

Analisis Kinerja Sistem MIMO-OFDM pada Kanal Rayleigh dan AWGN dengan Modulasi QPSK

M Lukmanul Hakim¹, Sukiswo², Imam Santoso²

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang
2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a transmission technique uses multiple frequency which each carrier is orthogonal. Each sub-carriers are modulated with a conventional modulation technique at a low symbol rate. This modulation can be modulated Phase Shift Keying (PSK). Problem of interference or multipath fading can be handled with MIMO (Multiple Input Multiple Output). This system uses a number of antenna transmitter and receiver to make the signal reflection as the main signal amplifier so that will support each other. This final project simulates performance of MIMO-OFDM with Alamouti STBC (Space Time Block Code) and MRC (Maximal Ratio Combining) with QPSK modulation at Rayleigh Fading Distribution Channel and AWGN (Additive White Gaussian Noise). The simulation results shows it need s $E_b/N_0 = 5$ dB to achieve $BER = 10^{-5}$ in both MIMO techniques. $BER = 0$ when E_b/N_0 greater than 5 dB at STBC and $BER = 0$ when E_b/N_0 greater than 5 dB at MRC. Better BER of MIMO STBC than MIMO MRC found on almost all values of E_b/N_0 . Based on the simulation, performance of STBC-OFDM technique have advantages 1 dB from MRC-OFDM technique to achieve $BER = 0$.

Keyword : OFDM, STBC, MIMO, BER

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem perkuliahan dalam suatu Perguruan Tinggi OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) adalah sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa buah frekuensi (*multicarrier*) yang saling tegak lurus (*orthogonal*). Masing-masing *sub-carriers* tersebut dimodulasikan dengan teknik modulasi konvensional pada rasio simbol yang rendah. Satu prinsip kunci dari OFDM adalah skema modulasinya menggunakan rasio simbol yang rendah sehingga hanya mendapat sedikit pengaruh *intersymbol interference* dari *multipath fading* maupun gangguan akibat *noise*. Oleh karena itu, maka dapat ditransmisikan sejumlah aliran *low-rate* dalam paralel, bukan aliran *high-rate* tunggal.

Masalah gangguan pada kanal atau *multipath fading* dapat diatasi dengan sistem MIMO (Multiple Input Multiple Output). Sistem ini menggunakan sejumlah antena pengirim dan sejumlah antena penerima. Hal tersebut bertujuan untuk menjadikan sinyal pantulan sebagai penguat sinyal utama sehingga saling mendukung atau tidak saling menggagalkan. Selain itu sistem ini juga secara signifikan mampu meningkatkan *throughput* data dan *range* (jangkauan) komunikasi tanpa lebar pita (*bandwidth*) frekuensi dan daya pancar tambahan

Penelitian tentang MIMO-OFDM sebelumnya telah dilakukan oleh di Teknik Elektro UI (Irhamsyah, 2008) dalam bentuk Tesis yang membahas unjuk kerja MIMO-OFDM dengan pengkodean STBC. Penelitian tentang MIMO-OFDM juga telah dilakukan di Teknik Elektro UNDIP dalam bentuk Penelitian yang membahas tentang kinerja SVD-OFDM 2x2 pada kanal Rayleigh (Effendi, 2009). Selain itu juga tentang CDMA-OFDM yang dikombinasikan dengan MIMO (Awirya, 2011) dan MIMO-OFDMA (Susilo, 2011).

Pada Penelitian ini akan dilakukan simulasi dan analisis untuk sistem MIMO-OFDM dengan Q-PSK dimana pada Penelitian ini sistem OFDM akan ditambah dengan MIMO (Multiple Input-Multiple Output) STBC Alamouti dan MRC untuk kemudian diambil data yang dapat dipakai untuk mengetahui kinerja dari sistem tersebut.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kinerja sistem MIMO-OFDM dengan modulasi QPSK terhadap pengaruh jumlah *subcarrier*, teknik MIMO STBC dan MRC serta tingkat E_b/N_0 pada kanal *Rayleigh fading distribution* dan *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) terhadap *Bit Error Rate* (BER).

1.3 Batasan Masalah

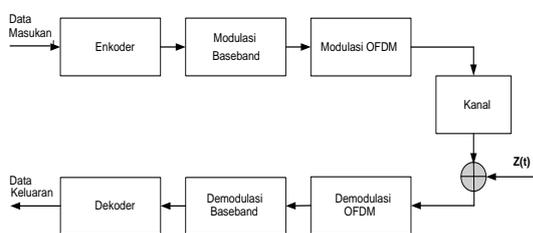
Agar pembahasan atau analisis tidak melebar dan terarah, maka permasalahan dibatasi pada :

- 1) Kanal yang digunakan adalah kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dan *Rayleigh*.
- 2) Modulasi digital yang digunakan adalah QPSK.
- 3) Sinyal masukan adalah data biner acak.
- 4) Simulasi ini diasumsikan *single user*.
- 5) MIMO yang digunakan adalah MIMO STBC Alamouti skema 2x4 dan MRC 1x4.
- 6) Parameter yang diubah adalah jumlah *subcarrier*, nilai E_b/N_0 , dan teknik MIMO.
- 7) Jumlah *carrier* yang digunakan adalah 32, 64, 128 dan 256.
- 8) Jumlah simbol yang digunakan adalah 512.
- 9) Kecepatan *user* adalah acak dengan *range* antara 10 km/jam sampai 80 km/jam.
- 10) Penerima sistem diasumsikan memiliki informasi respon kanal dan derau dengan sempurna sehingga pengiriman sinyal pilot tidak perlu disimulasikan.

II. DASAR TEORI

2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) adalah sebuah teknik transmisi yang menggunakan beberapa buah frekuensi yang saling tegak lurus (*orthogonal*). OFDM diterapkan kepada sinyal yang telah termodulasi, sebagai modulasi tingkat kedua. Caranya yaitu dengan membagi data secara paralel pada sejumlah subkanal pita sempit, lalu masing-masing data pada subkanal tersebut dimodulasikan dengan subfrekuensi pembawa yang saling orthogonal, selanjutnya ditransmisikan secara simultan. OFDM memungkinkan pengiriman aliran data kecepatan tinggi dengan membaginya ke dalam aliran-aliran berkecepatan rendah. Proses yang dilakukan sama dengan teknik modulasi multicarrier, yang membedakan adalah penggunaan subpembawa yang saling orthogonal pada masing-masing subkanal.



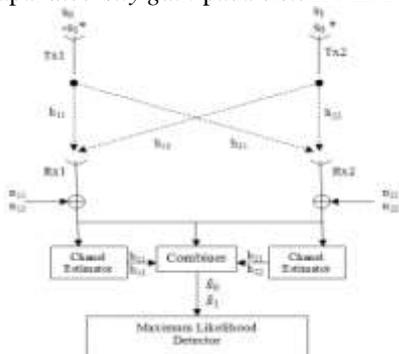
Gambar 1 Sistem OFDM sederhana

2.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Tuntutan peningkatan *data rate* dan kualitas layanan suatu sistem komunikasi *wireless* memicu lahirnya teknik baru untuk meningkatkan efisiensi spektrum dan perbaikan kualitas saluran. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan multi antenna pada sisi pengirim dan penerima, teknik ini dikenal dengan *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*. Prinsip kerja MIMO adalah memperbanyak sinyal informasi yang di pancarkan untuk meningkatkan kemampuan komunikasi dan mengurangi *error* yang dapat terjadi akibat kanal transmisi

2.3 Space Time Block Code (STBC)

Skema transmisi *Space Time Block Code (STBC)* merupakan skema transmisi yang diperkenalkan oleh Alamouti pada tahun 1998. *Space Time Block Code (STBC)* adalah skema yang digunakan dalam teknik *transmit diversity* untuk mencapai *diversity gain* pada sistem MIMO.

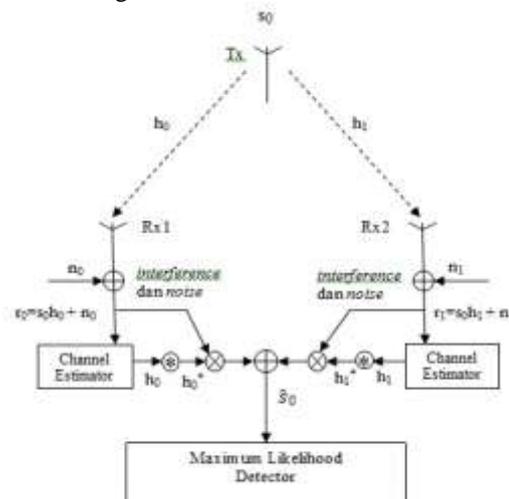


Gambar2 Skema matriks transmisi STBC

Pada saat t , Tx1 memancarkan sinyal S_0 dan Tx2 memancarkan sinyal S_1 , kemudian saat $t+1$, Tx1 memancarkan sinyal $-S_1^*$ dan Tx2 memancarkan sinyal S_0^* . Tanda * merupakan operasi konjugat.

2.4 Maximal Ratio Combining (MRC)

MRC adalah satu skema penerapan multi antenna. MRC menggunakan multi antenna pada bagian penerima. Pada skema ini diperoleh *diversity gain* yang maksimum, yaitu $N_T \times N_R$ dengan memanfaatkan diversitas spasial. Berikut adalah penjelasan tentang skema MRC.



Gambar 3 Skema Maximal Ratio Combining (MRC)

Gambar 3 menunjukkan model MRC. Bit stream yang ditransmisikan dinyatakan dengan $[S_0, S_1, \dots, S_n]$. Kanal antara antenna pemancar pertama dengan penerima dinyatakan dengan h_0 , kanal antara antenna pemancar kedua dengan penerima dinyatakan dengan h_1 . Diasumsikan $h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0}$ dan $h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1}$. Sinyal yang diterima oleh penerima adalah $r_0 = h_0 s_0 + n_0$ dan $r_1 = h_1 s_1 + n_1$ dengan n_0, n_1 adalah derau kompleks Gaussian. Penerima mengestimasi simbol menggunakan persamaan :

$$y = h_0 r_0 + h_1 r_1 = (|h_0|^2 + |h_1|^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1^* n_1 \dots \dots \dots (1)$$

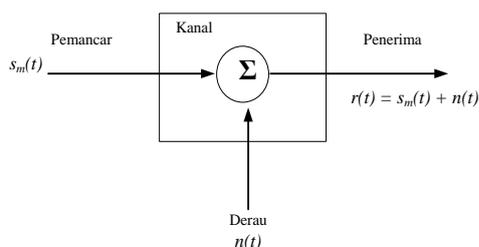
Jadi, jika h_0 atau h_1 (atau keduanya) tidak mengalami *fading*, dapat dibuat estimasi yang akurat dari pemancar dengan menggunakan detektor ML (*maximum likelihood*). Pada kondisi ini peluang sinyal pada kedua kanal akan mengalami *deep fade* sangat kecil sehingga BER (*Bit Error Rate*) rata-rata pada output penerima dapat ditingkatkan.

2.5 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

QPSK atau *quadrature-PSK* adalah bentuk lain dari modulasi digital selubung konstan termodulasi sudut. QPSK adalah teknik pengkodean *M-ary*. Dalam QPSK ada empat fase keluaran yang berbeda, maka harus ada empat kondisi masuk yang berbeda. Karena masuk ke digital ke modulator QPSK adalah sinyal biner (dasar 2), maka untuk menghasilkan empat kondisi masuk yang berbeda harus dipakai bit masuk lebih dari satu bit tunggal. Menggunakan 2 bit, ada empat kondisi yang mungkin: 00, 01, 10 dan 11.

2.6 Kanal AWGN

Dalam komunikasi, kanal *Additive White Gaussian Noise (AWGN)* adalah suatu kanal dimana informasi diberi gangguan berupa penambahan linear dari *white noise* dengan kerapatan spektrum yang konstan dan distribusi *Gaussian* dari *sample noise*.



Gambar 4 Pemodelan kanal AWGN

2.7 Kanal Rayleigh Fading

Dalam komunikasi seluler, tentunya jarang sekali terjadi hubungan langsung saja. Sinyal banyak mengalami pantulan dimana-mana, sehingga terdapat berbagai macam jalur yang dilalui sinyal untuk sampai ke penerima (*multipath*). Antara sinyal yang pancarannya melalui *multipath* tersebut dapat berinterferensi positif maupun negatif sehingga pada penerima terlihat bahwa sinyal tersebut berfluktuasi. Efek fluktuasi sinyal ini biasa disebut dengan *fading*. *Fading* juga dapat terjadi karena efek doppler, yang terjadi jika *user* bergerak dengan kecepatan relatif terhadap *base station*. Salah satu pemodelan kanal *multipath* adalah distribusi *Rayleigh*. Persamaan umum *probability density function* (pdf) distribusi *Rayleigh* adalah sebagai berikut :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad 0 \leq r \leq \infty \dots\dots\dots(2)$$

r adalah magnitudo dan σ adalah nilai rms dari level sinyal yang diterima sebelum detektor, dan σ² adalah daya waktu rata-rata dari sinyal yang diterima.

Pengaruh perpindahan pengguna dijabarkan oleh rumus:

$$fd = \left(\frac{vf}{c}\right) \cos \theta \dots\dots\dots(3)$$

dimana f adalah frekuensi carrier, v= kecepatan pengguna, c kecepatan cahaya, θ sudut gelombang dan fd adalah frekuensi *doppler*.

2.8 Parameter Eb/No

E_b/N₀ (*energy per bit to noise power spectral density ratio*) adalah parameter yang biasa digunakan dalam komunikasi digital. Hal ini sangat berguna saat membandingkan performa *bit error rate* (BER) untuk modulasi digital yang berbeda-beda tanpa menyertakan parameter pita frekuensi. Parameter lain yang sering digunakan adalah *E_s/N₀* (*energy per symbol to noise power spectral density ratio*).

2.9 Bit Error Rate (BER)

Dalam telekomunikasi, rasio *error* adalah rasio jumlah bit, elemen, karakter, atau blok yang diterima dengan salah dibanding jumlah total bit, elemen, karakter, ataupun blok yang dikirim sepanjang interval waktu tertentu. Rasio yang paling sering ditemui adalah *bit error ratio* (BER). Contoh BER adalah jumlah kesalahan bit yang diterima dibagi dengan jumlah total bit yang dikirimkan. Biasanya kurva BER digambarkan dalam hubungan BER (dB) dengan SNR (dB) atau BER (dB) dengan *E_b/N₀* (dB).

III. PROGAM SIMULASI

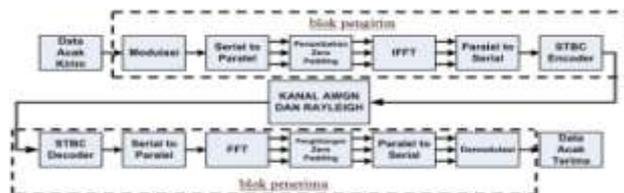
Pemodelan sistem MIMO-OFDM dengan menggunakan MATLAB bertujuan agar parameter dalam sistem dapat divariasikan dan dites. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengukur kinerja MIMO-OFDM apabila diberikan modulasi quadrature phase shift keying (Q-PSK) yang berbeda ke dalam sistem. Parameter yang diukur adalah Bit Error Rate

(BER) dalam hubungannya dengan energy per bit to noise power spectral density ratio (*E_b/N₀*).

Tampilan program MATLAB 7.6 ini dibuat dengan menggunakan fasilitas GUI (Graphical User Interface) dengan tampilan grafis agar memudahkan pemakaian. Blok pemodelan sistem MIMO-OFDM terdiri dari 3 bagian penting yaitu:

1. Blok pengirim MIMO-OFDM
2. Blok kanal Rayleigh dan AWGN
3. Blok penerima MIMO-OFDM

Blok perancangan simulasi sistem OFDM untuk kanal AWGN dan Rayleigh dapat dilihat pada gambar 5 berikut:



Gambar 5 Blok Pemodelan Simulasi MIMO-OFDM

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

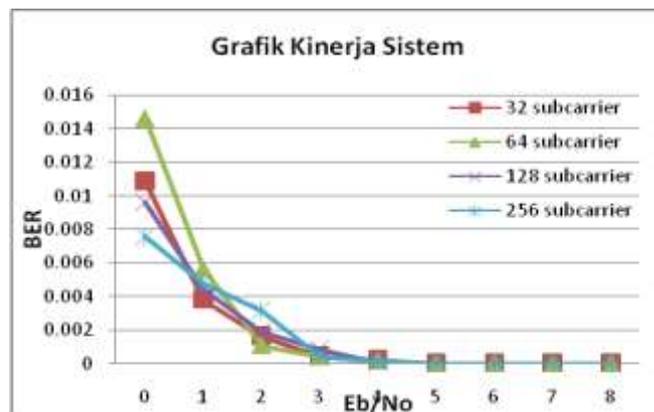
4.1 Pengaruh Jumlah Subcarrier Terhadap Sistem STBC-OFDM

Pada percobaan ini akan dianalisa pengaruh jumlah *subcarrier* terhadap sistem STBC-OFDM. Jumlah *subcarrier* divariasikan dengan nilai 32, 64, 128 dan 256 dengan modulasi QPSK. Sedangkan parameter lainnya dibuat tetap.

Tabel 1 Nilai perbandingan BER terhadap *E_b/N₀* variasi jumlah *subcarrier* pada STBC-OFDM.

<i>E_b/N₀</i> (dB)	BER			
	32 subcarrier	64 subcarrier	128 subcarrier	256 subcarrier
0	0.010892	0.014665	0.0096054	0.0075844
1	0.0038177	0.0056519	0.0044151	0.004784
2	0.0016388	0.0010834	0.0018715	0.0031525
3	0.0004364	0.00042267	0.00083313	0.00044518
4	0.00021057	0.00016632	6.1035e ⁻⁵	0.00014114
5	1.8311e ⁻⁵	1.8311e ⁻⁵	2.2125e ⁻⁵	1.6022e ⁻⁵
6	3.0518e ⁻⁶	0	1.9836e ⁻⁵	1.0681e ⁻⁵
7	0	0	0	1.9073e ⁻⁶
8	0	0	0	0

Grafik untuk Tabel 2 ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6 Grafik perbandingan nilai BER terhadap *E_b/N₀* dengan variasi jumlah *Subcarrier* pada STBC-OFDM

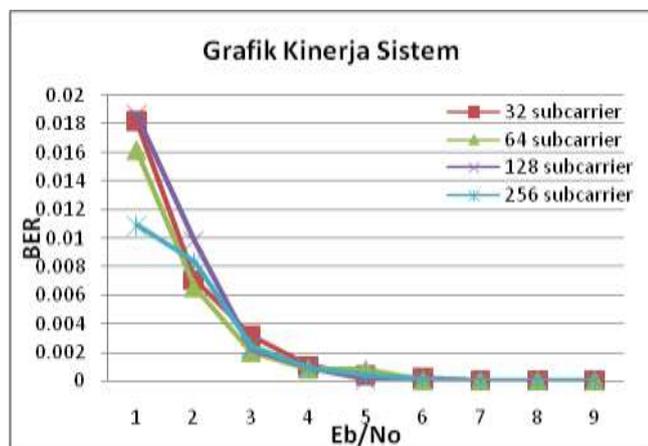
Gambar 6 memperlihatkan bahwa nilai BER menurun seiring dengan membesarnya nilai Eb/No. Karena semakin besar nilai Eb/No maka level derau yang mempengaruhi sinyal data semakin kecil sehingga kesalahan yang terjadi karena derau juga semakin kecil. Kinerja keempat sistem hampir sama yaitu target BER 10^{-5} tercapai saat nilai Eb/No sekitar 5 dB. Hal ini disebabkan karena parameter yang digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem adalah Eb/No bukan SNR sistem, sehingga berapapun jumlah *subcarrier* yang digunakan nilai BER pada Eb/No tertentu akan memiliki nilai yang hampir sama. Parameter Eb/No biasa digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem digital tanpa menyertakan parameter pita frekuensi, sehingga dengan parameter Eb/No panjang pita frekuensi yang berubah-ubah karena variasi jumlah *subcarrier* tidak berpengaruh pada sistem. BER menurun seiring dengan meningkatnya nilai Eb/No walaupun terjadi fluktuasi sehingga terdapat laju penurunan BER yang tidak linear dan signifikan. Hal ini terjadi karena kecepatan pengguna yang berubah secara random sehingga mengakibatkan kondisi kanal yang berbeda-beda pada setiap nilai Eb/No yang disimulasikan.

4.2 Pengaruh Jumlah Subcarrier Terhadap Sistem MRC-OFDM

Pada percobaan ini akan dianalisa pengaruh jumlah *subcarrier* terhadap sistem MRC-OFDM. Jumlah *subcarrier* divariasi dengan nilai 32, 64, 128 dan 256 dengan modulasi QPSK sedangkan parameter lainnya dibuat tetap.

Tabel 3 Nilai perbandingan BER terhadap Eb/No variasi jumlah *subcarrier* pada MRC-OFDM.

Eb/No (dB)	BER			
	32 subcarrier	64 subcarrier	128 subcarrier	256 subcarrier
0	0.01824	0.016154	0.018679	0.010908
1	0.007077	0.0065277	0.0097832	0.0083042
2	0.0031464	0.0020065	0.0022537	0.0024052
3	0.0010651	0.00084534	0.00089874	0.00088005
4	0.00039978	0.00076447	4.5013e ⁻⁵	0.00039825
5	0.000177	2.4414e ⁻⁵	9.2316e ⁻⁵	9.2316e ⁻⁵
6	9.1553e ⁻⁶	0	4.1199e ⁻⁵	2.3651e ⁻⁵
7	0	0	0	4.5776e ⁻⁶
8	0	0	0	0



Gambar 7 Grafik perbandingan nilai BER terhadap Eb/No dengan variasi jumlah *Subcarrier* pada MRC-OFDM

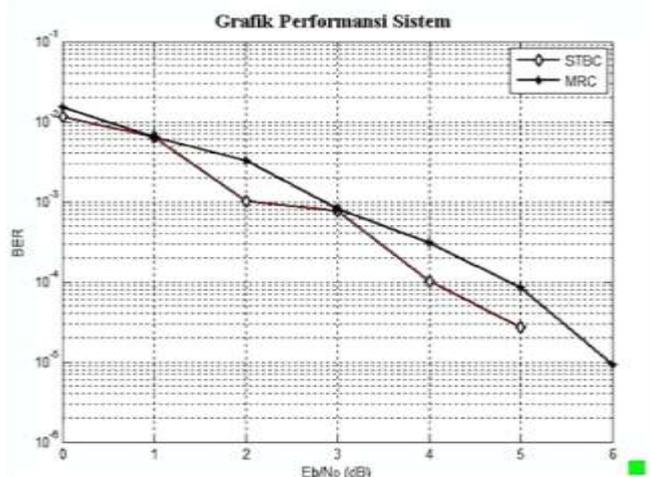
Gambar 7 memperlihatkan bahwa nilai BER menurun seiring dengan membesarnya nilai Eb/No. Karena semakin besar nilai Eb/No maka level derau yang mempengaruhi sinyal data semakin kecil sehingga kesalahan yang terjadi karena derau juga semakin kecil. Kinerja keempat sistem hampir sama yaitu target BER 10^{-5} tercapai saat nilai Eb/No sekitar 5 dB. Hal ini disebabkan karena parameter yang digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem adalah Eb/No bukan SNR sistem, sehingga berapapun jumlah *subcarrier* yang digunakan nilai BER pada Eb/No tertentu akan memiliki nilai yang hampir sama. Parameter Eb/No biasa digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem digital tanpa menyertakan parameter pita frekuensi, sehingga dengan parameter Eb/No panjang pita frekuensi yang berubah-ubah karena variasi jumlah *subcarrier* tidak berpengaruh pada sistem. BER menurun seiring dengan meningkatnya nilai Eb/No walaupun terjadi fluktuasi sehingga terdapat laju penurunan BER yang tidak linear dan signifikan. Hal ini terjadi karena kecepatan pengguna yang berubah secara random sehingga mengakibatkan kondisi kanal yang berbeda-beda pada setiap nilai Eb/No yang disimulasikan.

4.3 Analisis Kinerja Variasi Teknik MIMO Terhadap Sistem MIMO-OFDM

Pada percobaan ini akan dianalisa pengaruh modulasi terhadap sistem MIMO-OFDM. Teknik MIMO yang digunakan adalah STBC dan MRC sedangkan parameter lainnya dibuat tetap.

Tabel 4 Nilai perbandingan BER terhadap Eb/No dengan variasi teknik MIMO STBC dan MRC

Eb/No (dB)	MODULASI	
	STBC	MRC
0	0.011349	0.015231
1	0.0063721	0.0064026
2	0.0010132	0.0032684
3	0.00078125	0.00081787
4	0.00010071	0.00031128
5	2.7466e ⁻⁵	8.5449e ⁻⁵
6	0	9.1553e ⁻⁶
7	0	0



Gambar 8 Kinerja sistem OFDM variasi teknik MIMO STBC dan MRC

Gambar 8 menunjukkan perbedaan kinerja sistem OFDM dengan variasi teknik MIMO STBC dan MRC yang tidak terlalu jauh. Pada teknik MIMO STBC BER=10⁻⁵ membutuhkan nilai Eb/No sekitar 5 dB dan akan menuju nilai BER=0 saat Eb/No lebih besar dari 5 dB. Nilai BER lebih baik pada MIMO STBC terhadap MIMO MRC terdapat pada hampir semua nilai Eb/No. Pada nilai 0 dB terdapat selisih nilai BER 0.003882, dan seterusnya pada nilai 1-6 dB = 0.000305, 0.0022552, 0.00003662, 0.00021057, 5.7983e⁻⁵ dan 9.1553e⁻⁶. Pada teknik MRC menunjukkan kinerja lebih rendah sekitar 1 dB daripada teknik STBC untuk mendapatkan nilai BER=0.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pengujian dan analisis pada sistem MIMO CDMA-OFDM adalah sebagai berikut :

1. Pada sistem STBC-OFDM dengan 32 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.010892. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.001556/dB.
2. Pada sistem STBC-OFDM dengan 64 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau derau paling buruk didapat nilai BER=0.01004. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.002444166/dB.
3. Pada sistem STBC-OFDM dengan 128 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.0096054. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.0013722/dB.
4. Pada sistem STBC-OFDM dengan 256 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.0075844. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.00094805/dB.
5. Pada sistem MRC-OFDM dengan 32 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.01824. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.002605714/dB.
6. Pada sistem MRC-OFDM dengan 64 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.016154. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.002692333/dB.
7. Pada sistem MRC-OFDM dengan 128 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.0096054. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.002668428/dB.
8. Pada sistem MRC-OFDM dengan 256 subcarrier saat nilai Eb/No=0 dB atau rasio terendah didapat nilai BER=0.0075844. Rata-rata laju penurunan sebesar 0.0013635/dB.
9. Pada variasi jumlah subcarrier 32, 64, 128, dan 256 pada sistem MRC-OFDM dan STBC-OFDM untuk mencapai target BER=10⁻⁵ dibutuhkan nilai Eb/No sekitar 4-5 dB.
10. Kinerja sistem MRC-OFDM dan STBC-OFDM menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan pada variasi jumlah subcarrier.
11. Pada sistem MIMO-OFDM nilai BER teknik STBC lebih baik dari MRC yang terdapat pada hampir semua nilai Eb/No.
12. Pada teknik MRC menunjukkan kinerja lebih rendah sekitar 1 dB daripada teknik STBC untuk mendapatkan nilai BER=0.

5.2 Saran

Berikut beberapa saran yang bisa digunakan untuk penelitian lebih lanjut :

1. Menggunakan model kanal yang lain untuk merepresentasikan kondisi kanal dengan berbagai gangguannya.
2. Menggunakan teknik MIMO yang lain seperti STTC dan Quasi-orthogonal STBC.

Daftar Pustaka

- [1] Ananta, A, Simulasi Perbandingan Kinerja Modulasi M-PSK dan M-QAM Terhadap Laju Kesalahan Data Pada Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Penelitian S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2009.
- [2] Efendi, V.M., Analisis kerja Sistem Svd-Ofdm 2X2 pada kanal Rayleigh Fading, Penelitian S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2008.
- [3] Fadhila, W.S., Pengaruh Modulasi M-PSK pada Unjuk Kerja Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Laporan Penelitian Teknik Elektro Undip, 2009.
- [4] Hantoro, B.W., Analisis Diversitas Penerima dan Pemancar Pada Sistem MIMO, Penelitian S-1, Institut Teknologi Bandung, 2009.
- [5] Hara, S., R.Prasad, Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communication. Artech House, London, 2003.
- [6] Komariah, I., Analisis Pengaruh Jumlah Antena Dan Algoritma Deteksi Pada Sistem Mimo Penjamakan Spasial Terhadap Kualitas Pengiriman Informasi, Penelitian S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2008.
- [7] Rappaport, Theodore S, Wireless Communications, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [8] Sarif, Y.H., Analisis Pengaruh Derau Terhadap Laju Kesalahan Data pada Sistem OFDM, Laporan Penelitian Teknik Elektro Undip, 2004.
- [9] Schulzeand, H., C.Luders, Theory and Applications of OFDM and CDMA, John Wiley & Son, West Sussex, 2005.
- [10] S. Harada and R. Prasad, Simulation and Software Radio for Mobile Communication, Boston, Artech House, 2003, ch.4
- [11] S.M. Alamouti, Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication, IEEE Journal on Select Areas in Communications, Vol.16, pp. 1451-1458, Okt. 1998.
- [12] Tsoulos, G., MIMO System Technology for Wireless Communication, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [13] Vucetic, B., J.Yuan, Space-Time Coding, Wiley, West Sussex, 2003.
- [14] Wibisono, G., U.Kurniawan, G.Dwi, Konsep Teknologi Seluler, Informatika, Bandung, 2007.
- [15] Wu, N., L.Hanzo, O.R. Alamri, M.El-Hajjar, Near-Capacity Multi-Functional MIMO Systems, PDF File, Januari, 2011.
- [16] ---, Phase Shift Keying, http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_shift_keying, Mei 2011.