



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI DAN ANALISA KINERJA
SISTEM MIMO OFDM-FDMA
BERDASARKAN ALOKASI SUBCARRIER**

SKRIPSI

KIKI SYAHGUSTINA

0706199514

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI DAN ANALISA KINERJA
SISTEM MIMO OFDM-FDMA
BERDASARKAN ALOKASI SUBCARRIER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

KIKI SYAHGUSTINA

0706199514

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri
Dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Kiki Syahgustina

NPM : 0706199514

Tanda Tangan :

Tanggal : 29 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Kiki Syahgustina
NPM : 0706199514
Program Studi : Teknik Elektro – Ekstensi
Judul Skripsi : Simulasi dan Analisa Kinerja Sistem MIMO OFDM-FDMA berdasarkan Alokasi Subcarrier

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro – Ekstensi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo DEA (.....)

Penguji : Filbert Hilman Juwono S.T.,M.T. (.....)

Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir Harry Sudiby DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
3. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 29 Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kiki Syahgustina
NPM : 0706199514
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**SIMULASI DAN ANALISA KINERJA SISTEM MIMO OFDM-FDMA
BERDASARKAN ALOKASI SUBCARRIER**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 29 Desember 2009

Yang menyatakan

(Kiki Syahgustina)

ABSTRAK

Nama : Kiki Syahgustina
Program Studi : Teknik Elektro - Ekstensi
Judul : Simulasi dan Analisa Kinerja Sistem MIMO OFDM-FDMA Berdasarkan Alokasi Subcarrier.

Teknologi MIMO OFDM-FDMA dapat digunakan untuk menyediakan layanan data berkecepatan tinggi secara *realtime* dengan kinerja yang baik pada kanal *multipath fading*. Skripsi ini merancang dan menganalisa kinerja sistem MIMO OFDM-FDMA, yang melayani beberapa *user* dengan alokasi *subcarrier* yang berbeda-beda. Ada beberapa teknik dari OFDM-FDMA berdasarkan alokasi *subcarrier*-nya, yaitu: *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA*. Pada *Block FDMA* setiap *user* dialokasikan ke sebuah grup *subcarrier* yang berdekatan dalam time slot tertentu, sedangkan pada *Interleaved FDMA* setiap *user* dialokasikan secara berselang-seling (*interlaced*) dengan *user* lain pada *subcarrier*. Teknik *Space Time Block Coding (STBC) Alamouti 2x2* digunakan untuk sistem MIMO. *Bit Error Rate (BER)* yang dihasilkan oleh kedua teknik alokasi akan dianalisa untuk membandingkan kinerja sistem pada kanal AWGN dan kanal *Rayleigh Fading*.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa sistem MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Interleaved FDMA* memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *Block FDMA*. Pada kanal AWGN, terdapat perbedaan sebesar $\pm 0,8$ dB untuk 2 *user* dan ± 1 dB untuk 4 *user* pada $BER = 10^{-3}$. Pada kanal *Rayleigh Fading*, terdapat perbedaan sebesar $\pm 0,9$ dB untuk 2 *user* dan $\pm 1,1$ dB untuk 4 *user* pada $BER = 10^{-3}$.

Penambahan jumlah *user* pada masing-masing teknik alokasi meningkatkan BER yang dihasilkan, yang berarti menurunkan kinerja sistem. Frekuensi *Doppler* yang semakin tinggi pada masing-masing teknik alokasi juga meningkatkan BER yang dihasilkan, yang berarti menurunkan kinerja sistem.

Kata kunci:

MIMO, OFDM-FDMA, *Block FDMA*, *Interleaved FDMA*, STBC, BER.

ABSTRACT

Nama : Kiki Syahgustina
Program Studi : Teknik Elektro - Ekstensi
Judul : Simulation and Analysis Performance of MIMO OFDM-FDMA System Based on Allocations of Subcarrier

MIMO OFDM-FDMA technique can be used in order to serve high data rate in realtime which give a good performance on a multipath fading channel. This final project was design and analyzes the performance of MIMO OFDM-FDMA system, that service multiuser with difference allocate it to subcarrier. There are several technique of OFDM-FDMA based on the allocation of subcarriers to users: Block FDMA and Interleaved FDMA. In Block FDMA technique, each user is allocated a bunch of adjacent subcarriers. In Interleaved FDMA technique, each user allocated interlaced with other user's subcarrier in frequency domain. *Space Time Block Coding* (STBC) Alamouti 2x2 technique is used for MIMO. *Bit Error Rate* (BER) which generated by both allocation technique will be analyze to compare the performance of system in AWGN channel and Rayleigh Fading channel.

Based on simulation result, could be get that MIMO OFDM-FDMA system with Interleaved FDMA technique allocation of subcarriers give better performance than Block FDMA. Using AWGN channel, there are difference equal to $\pm 0,8$ dB for 2 *user* and ± 1 dB for 4 *user* at $BER = 10^{-3}$. Using Rayleigh Fading channel, there are difference equal to $\pm 0,9$ dB for 2 *user* and $\pm 1,1$ dB for 4 *user* at $BER = 10^{-3}$.

Addition the user of each method improve the BER result which finally affect the system performance degradation. Higher Doppler frequency of each method improve the BER result which finally affect the system performance degradation.

Keyword:

MIMO, OFDM-FDMA, Block FDMA, Interleaved FDMA, STBC, BER.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN.....	xv
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 MIMO OFDM-FDMA.....	4
2.1 <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (OFDM).....	4
2.1.1 Konsep <i>Orthogonal</i>	5
2.1.2 IDFT dan DFT.....	6
2.1.3 <i>Cyclic Prefix</i>	7
2.1.4 Keunggulan OFDM.....	8
2.1.5 <i>Multiple Access</i> pada OFDM.....	8
2.2 OFDM-FDMA.....	8
2.2.1 <i>Block FDMA</i>	9
2.2.2 <i>Random Allocation</i>	10
2.2.3 <i>Interleaved FDMA</i>	10
2.3 <i>Multiple Input Multiple Output</i> (MIMO).....	11
2.3.1 Konsep Dasar MIMO.....	11
2.3.2 Kanal MIMO.....	12
2.3.3 <i>Space Time Block Coding</i> (STBC).....	13
2.4 Modulasi QPSK.....	15
2.5 <i>Forward Error Correction</i> (FEC).....	16
2.6 Kanal Transmisi <i>Wireless</i>	18

2.6.1	<i>Additive White Gaussian Noise(AWGN)</i>	18
2.6.2	<i>Kanal Multipath Fading</i>	18
2.6.2.1	<i>Rayleigh Fading</i>	19
2.6.2.2	<i>Rician Fading</i>	20
2.7	<i>Efek Doppler</i>	20
BAB 3 PERANCANGAN MODEL SISTEM		22
3.1	Parameter Simulasi.....	22
3.2	Diagram Blok Sistem MIMO OFDM-FDMA.....	23
3.3	Sistem <i>Transmitter</i>	24
3.3.1	<i>Random Data Generator</i>	24
3.3.2	<i>Convolutional Encoder</i>	24
3.3.3	<i>Interleaver</i>	24
3.3.4	Modulasi QPSK.....	25
3.3.5	<i>Serial to Parallel</i>	26
3.3.6	Alokasi <i>Subcarrier</i>	26
3.3.6.1	<i>Block FDMA</i>	26
3.3.6.2	<i>Interleaved FDMA</i>	27
3.3.7	<i>Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)</i>	27
3.3.8	Penambahan <i>Cyclic Prefix</i>	28
3.3.9	<i>Parallel to Serial</i>	28
3.3.10	<i>STBC Encoder</i>	28
3.4	Kanal Transmisi.....	29
3.5	Sistem <i>Receiver</i>	29
3.5.1	<i>STBC Decoder</i>	29
3.5.2	<i>Serial to Parallel</i>	29
3.5.3	Penghilangan <i>Cyclic Prefix</i>	30
3.5.4	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i>	30
3.5.5	Realokasi <i>Subcarrier</i>	30
3.5.6	<i>Parallel to Serial</i>	30
3.5.7	Demodulasi QPSK.....	30
3.5.8	<i>Deinterleaver</i>	31
3.5.9	<i>Convolutional Decoder</i>	31
3.6	Parameter Frekuensi <i>Doppler</i>	31
3.7	Perencanaan Parameter Simulasi.....	32
3.8	Parameter Kinerja Sistem.....	33
BAB 4 ANALISA HASIL SIMULASI		34
4.1	Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Block FDMA</i>	34
4.1.1	Simulasi Berdasarkan Jumlah <i>User</i>	34
4.1.1.1	Kanal AWGN.....	34

4.1.1.2	Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	36
4.1.2	Simulasi Berdasarkan Frekuensi <i>Doppler</i>	37
4.2	Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved FDMA</i>	38
4.2.1	Simulasi Berdasarkan Jumlah <i>User</i>	38
4.2.1.1	Kanal AWGN.....	38
4.2.1.2	Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	39
4.2.2	Simulasi Berdasarkan Frekuensi <i>Doppler</i>	41
4.3	Perbandingan Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Block FDMA</i> dengan MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved FDMA</i>	42
4.3.1	Simulasi Berdasarkan Jumlah <i>User</i>	42
4.3.1.1	Kanal AWGN.....	42
4.3.1.2	Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	43
4.3.2	Simulasi Berdasarkan Frekuensi <i>Doppler</i>	44
BAB 5 KESIMPULAN.....		46
DAFTAR REFERENSI.....		47
LAMPIRAN.....		48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip (a) FDM dan (b) OFDM.....	4
Gambar 2.2 Spektrum Simbol OFDM.....	5
Gambar 2.3 <i>Cyclic Prefix</i> OFDM.....	7
Gambar 2.4 OFDM-FDMA.....	9
Gambar 2.5 <i>Block</i> FDMA.....	9
Gambar 2.6 <i>Random Allocation</i>	10
Gambar 2.7 <i>Interleaved</i> FDMA.....	11
Gambar 2.8 Kanal MIMO.....	12
Gambar 2.9 STBC Alamouti 2x2.....	14
Gambar 2.10 Konstelasi Sinyal QPSK.....	16
Gambar 2.11 <i>Convolutional Encoder</i>	17
Gambar 2.12 Prinsip Kanal <i>Multipath Fading</i>	19
Gambar 3.1 Diagram Blok MIMO OFDM-FDMA.....	23
Gambar 3.2 <i>Convolutional Encoder</i> $\frac{1}{2}$	24
Gambar 3.3 Aliran Bit pada <i>Interleaver</i>	25
Gambar 3.4 Modulator QPSK.....	26
Gambar 3.5 Alokasi <i>Block</i> FDMA.....	27
Gambar 3.6 Alokasi <i>Interleaved</i> FDMA.....	27
Gambar 3.7 Pola Transmisi STBC.....	29
Gambar 3.8 Demodulator QPSK.....	31
Gambar 4.1 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Block</i> FDMA pada Kanal AWGN.....	35
Gambar 4.2 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Block</i> FDMA pada Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	36
Gambar 4.3 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Block</i> FDMA Dengan Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	37

Gambar 4.4 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved</i> FDMA pada Kanal AWGN.....	39
Gambar 4.5 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved</i> FDMA pada Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	40
Gambar 4.6 Kinerja MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved</i> FDMA Dengan Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	41
Gambar 4.7 Perbandingan Kinerja <i>Block</i> FDMA dan <i>Interleaved</i> FDMA pada Kanal AWGN.....	43
Gambar 4.8 Perbandingan Kinerja <i>Block</i> FDMA dan <i>Interleaved</i> FDMA pada Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	44
Gambar 4.9 Perbandingan Kinerja <i>Block</i> FDMA dan <i>Interleaved</i> FDMA Dengan Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	45

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter-parameter OFDM.....	22
Tabel 4.1 Pembagian <i>Subcarrier</i> untuk Setiap <i>User</i>	34
Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi <i>Block</i> FDMA Kanal AWGN.....	35
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi <i>Block</i> FDMA Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	37
Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi <i>Block</i> FDMA Berdasarkan Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	38
Tabel 4.5 Data Hasil Simulasi <i>Interleaved</i> FDMA Kanal AWGN.....	39
Tabel 4.6 Data Hasil Simulasi <i>Interleaved</i> FDMA Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	41
Tabel 4.7 Data Hasil Simulasi <i>Interleaved</i> FDMA Berdasarkan Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	42
Tabel 4.8 Data Hasil Simulasi Perbandingan <i>Block</i> dan <i>Interleaved</i> FDMA Kanal AWGN.....	43
Tabel 4.9 Data Hasil Simulasi Perbandingan <i>Block</i> dan <i>Interleaved</i> FDMA Kanal <i>Rayleigh Fading</i>	44
Tabel 4.10 Data Hasil Simulasi Perbandingan <i>Block</i> dan <i>Interleaved</i> FDMA Variasi Frekuensi <i>Doppler</i>	45

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A: Source Code MIMO OFDM-FDMA <i>Block</i> FDMA.....	48
Lampiran B: Source Code MIMO OFDM-FDMA <i>Interleaved</i> FDMA.....	54
Lampiran C: Fungsi-fungsi yang Digunakan.....	60

DAFTAR SINGKATAN

AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GI	<i>Guard interval</i>
ICI	<i>Inter-carrier Interference</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MRC	<i>Maximum Ratio Combining</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
STC	<i>Space-time Coding</i>
STBC	<i>Space Time Block Coding</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>

DAFTAR ISTILAH

<i>Bandwidth</i>	Lebar spektrum atau lebar pita frekuensi yang digunakan dalam mengirimkan sinyal dalam sistem komunikasi nirkabel.
<i>Block FDMA</i>	Teknik alokasi <i>subcarrier</i> dari <i>user</i> pada OFDM, dimana, setiap <i>user</i> mengalokasikan deretan bit-bit pada sebuah grup <i>subcarrier</i> yang berdekatan dalam <i>time slot</i> tertentu.
<i>Burst error</i>	Terjadinya <i>error</i> pada bit-bit data yang berdekatan.
<i>Channel coding</i>	Pengkodean kanal.
<i>Cyclic prefix</i>	<i>Guard interval</i> yang diambil dari beberapa data simbol terakhir dari satu simbol OFDM dan di-copy-kan di awal simbol tersebut.
<i>Data rate</i>	Kecepatan data.
<i>Delay spread</i>	Interval ukuran <i>delay</i> masing-masing lintasan yang dilewati sinyal dengan nilai penguatan atau redaman tertentu.
<i>Diversity gain</i>	Gain yang didapat karena penggunaan teknik diversitas pada sistem MIMO.
<i>Fading</i>	Fenomena terjadinya variasi amplitudo dan/atau fasa relatif pada satu atau lebih komponen frekuensi sinyal yang diterima.
<i>Frequency flat fading</i>	<i>Fading</i> yang terjadi saat <i>bandwidth</i> dari sinyal yang dikirim lebih sempit daripada <i>bandwidth</i> koheren kanal transmisi.
<i>Frequency selective fading</i>	<i>Fading</i> yang terjadi saat <i>bandwidth</i> dari sinyal yang dikirim lebih lebar daripada <i>bandwidth</i> koheren kanal transmisi.

<i>Guard interval</i>	Interval waktu (pada TDM) atau frekuensi (pada FDM) untuk memastikan tidak ada interferensi antar sinyal pada sistem transmisi.
<i>Intercarrier interference</i>	Interferensi antar sinyal <i>carrier</i> yang terjadi karena penggunaan <i>multicarrier</i> .
<i>Interleaved FDMA</i>	Teknik alokasi <i>subcarrier</i> dari <i>user</i> pada OFDM, dimana, setiap <i>user</i> mengalokasikan deretan bit-bit pada <i>subcarrier</i> tertentu yang dibuat berselang-seling (<i>interlaced</i>) dengan <i>subcarrier user</i> lain dalam domain frekuensi.
<i>Intersymbol Interference</i>	Interferensi yang terjadi antara dua simbol yang berdekatan.
<i>Multicarrier</i>	Penggunaan banyak <i>carrier</i> untuk membawa sinyal informasi.
<i>Multipath fading</i>	<i>Fading</i> yang terjadi akibat fenomena propagasi yang menyebabkan sinyal radio sampai pada antena penerima dengan dua atau lebih pola.
<i>Multiple access</i>	Teknik akses jamak yang memungkinkan beberapa <i>user</i> berbagi spektrum frekuensi dan berbagi akses secara simultan tanpa saling mengganggu.
<i>Multiplexing gain</i>	Gain yang didapat karena penggunaan teknik <i>spatial multiplexing</i> pada sistem MIMO.
<i>Random Allocation</i>	Teknik alokasi <i>subcarrier</i> dari <i>user</i> pada OFDM, dimana, setiap <i>user</i> mengalokasikan deretan bit-bit ke sejumlah <i>subcarrier</i> secara acak.
<i>Space Time Block Coding</i>	Teknik yang digunakan dalam komunikasi <i>wireless</i> untuk mengirimkan aliran data yang sama melalui sejumlah antena dan mengolah data yang telah diterima untuk meningkatkan reliabilitas data transfer.

Spatial diversity

Teknik transmisi pada sistem MIMO untuk mengirimkan sinyal informasi yang sama secara paralel dengan menggunakan coding yang berbeda.

Spatial multiplexing

Teknik transmisi pada sistem MIMO untuk mengirimkan data yang berbeda secara paralel dan dikodekan secara paralel untuk setiap antena pengirim.

Subcarrier

Kanal frekuensi pembawa sebagai hasil pembagian pita frekuensi pada teknik OFDM untuk membawa sinyal dari sisi pengirim ke sisi penerima.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi komunikasi, khususnya komunikasi *wireless* saat ini menuntut akses berkecepatan tinggi dengan kualitas sinyal yang baik serta tahan terhadap gangguan dan interferensi. Gangguan yang biasa terjadi pada komunikasi *wireless* adalah *multipath fading*. *Multipath fading* menyebabkan sinyal yang diterima oleh penerima tidak sama dengan sinyal yang dikirim, karena adanya sinyal-sinyal pantul dari lapisan ionosfer dan objek terestrial.

Salah satu teknik yang digunakan untuk mengatasi *multipath fading* adalah *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). OFDM merupakan teknik modulasi *multicarrier*, dimana antara *subcarrier* yang satu dengan yang lain saling tegak lurus (*orthogonal*)[1]. Dengan adanya sifat ortogonalitas ini, antara *subcarrier* yang berdekatan dapat dibuat tumpang tindih (*overlapping*) tanpa menimbulkan efek *intercarrier interference* (ICI). Penggunaan *bandwidth* akan menjadi lebih efisien. Penggunaan OFDM juga akan mengubah kondisi kanal yang semula bersifat *frequency selective fading* akan dirasakan seperti kanal *flat fading* oleh masing-masing *subcarrier*, sehingga *distorsi* sinyal akibat perlakuan kanal *multipath fading* menjadi berkurang[2].

Teknik OFDM terus dikembangkan untuk meningkatkan kinerja sistem. Pengembangan teknologi tersebut, dilakukan dengan menggunakan teknik multiple akses. Teknik multiple akses yang digunakan pada transmisi dengan OFDM adalah OFDM-TDMA, OFDM-FDMA dan OFDM-CDMA.

Teknik lain yang dapat digunakan untuk mengatasi *multipath fading* adalah penggunaan multi-antena. Multi-antena dapat ditempatkan pada sisi *transmitter*, sisi *receiver* atau pada sisi *transmitter* dan *receiver*. Penempatan multi-antena pada sisi *transmitter* dan *receiver* disebut *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Sistem MIMO meningkatkan efisiensi dalam penggunaan *bandwidth* dan meningkatkan performansi sistem komunikasi *wireless*[3].

Skripsi ini akan merancang sistem yang menggabungkan teknik MIMO dengan teknik OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier* metoda *Block FDMA*

dan *Interleaved* FDMA. Sistem tersebut akan disimulasikan dan dianalisa kinerjanya pada kanal *frequency selective fading* yang terdistribusi *Rayleigh*.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Teknik *multiple access* FDMA dapat dikombinasikan dengan OFDM, yang disebut dengan OFDM-FDMA. Kombinasi ini telah disetujui oleh IEEE 802.16 sebagai standar untuk transmisi pada frekuensi 2 - 11 GHz. Berdasarkan pada alokasi *subcarrier* terdapat beberapa variasi pada teknik OFDM-FDMA, diantaranya *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA*. Permasalahan yang muncul adalah dengan menggabungkan teknik MIMO dengan teknik OFDM-FDMA, teknik alokasi *subcarrier* mana yang memiliki kinerja terbaik. Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui teknik mana yang memiliki kinerja yang optimum.

Kinerja dari sistem OFDM dianalisa dengan menggunakan teknik modulasi QPSK. Kanal yang akan digunakan harus diperhitungkan agar sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

1.3 TUJUAN

Skripsi ini bertujuan untuk membuat pemodelan dan simulasi serta menganalisa kinerja teknik MIMO OFDM-FDMA dengan menggunakan alokasi *subcarrier Block FDMA* dan *Interleaved FDMA*.

1.4 BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini, masalah yang akan dibahas dibatasi pada pemodelan simulasi dan analisa kinerja teknik MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Block FDMA* dan *Interleaved FDMA* pada kanal AWGN dan kanal *Rayleigh fading* berdasarkan kinerja BER dari sistem. Simulasi menggunakan software Matlab 7.6.0 (R2008a).

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab 2 : MIMO OFDM-FDMA

Bab ini memberikan teori dasar tentang teknik modulasi *multicarrier* OFDM, alokasi subcarrier pada OFDM-FDMA, teknik antena MIMO dan jenis kanal *wireless* yang digunakan.

Bab 3 : Perancangan Model Sistem

Bab ini menjelaskan tentang perancangan model sistem dari teknik MIMO OFDM-FDMA yang akan digunakan pada simulasi beserta parameter-parameter yang akan dianalisis.

Bab 4 : Analisa Hasil Simulasi

Bab ini menganalisa kinerja dari teknik MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Block* FDMA dan *Interleaved* FDMA hasil simulasi.

Bab 4 : Kesimpulan

Bab ini berisikan kesimpulan yang merupakan pernyataan singkat dan tepat yang dijabarkan dari hasil simulasi dan analisa kinerja sistem.

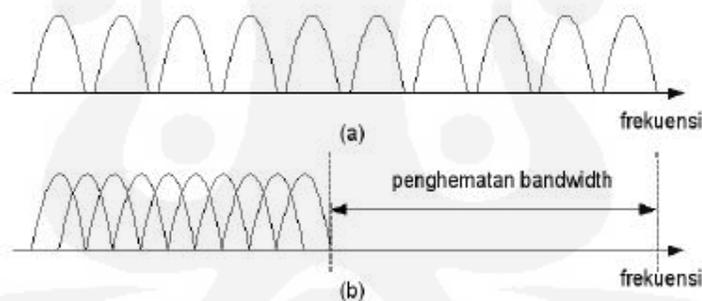
BAB 2

MIMO OFDM-FDMA

2.1 *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*

OFDM merupakan teknik modulasi yang menggunakan beberapa buah frekuensi *carrier (multicarrier)*[1]. Masing-masing *subcarrier* dibuat saling *orthogonal* dan *harmonic* satu sama lain, sehingga antara *subcarrier* yang berdekatan dapat dibuat *overlapping* tanpa menimbulkan efek *intercarrier interference (ICI)*. Dengan kata lain, null dari setiap kanal yang berdekatan jatuh tepat pada titik tengah spektrum. Hal ini, menyebabkan efisiensi spektrum OFDM lebih tinggi jika dibandingkan teknik modulasi konvensional.

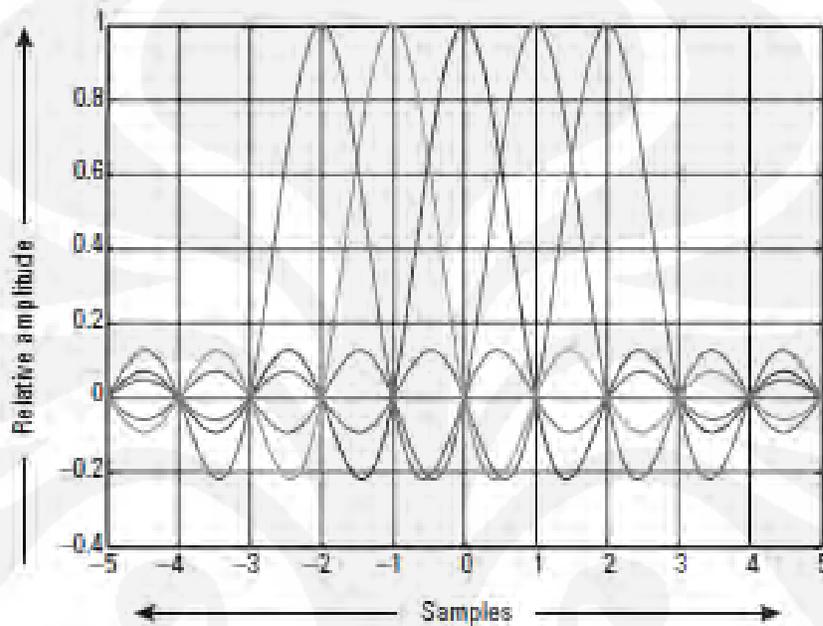
Pada teknik modulasi konvensional FDM (*Frequency Division Multiplexing*), suatu *bandwidth* tertentu dibagi menjadi beberapa kanal tersendiri berdasarkan frekuensi dengan diberi jarak antar kanal (*guardband*). *Guardband* berfungsi untuk mencegah interferensi antara kanal satu dengan yang lain.



Gambar 2.1 Prinsip (a) FDM dan (b) OFDM

Konsep dasar dari OFDM adalah membagi data serial berkecepatan tinggi menjadi beberapa data paralel berkecepatan rendah yang ditransmisikan oleh beberapa *subcarrier*. Penransmisian dengan *data rate* yang lebih rendah menyebabkan *bandwidth subcarrier* menjadi lebih rendah dari *bandwidth* koheren kanal. Hal ini dapat mereduksi *distorsi* sinyal akibat perlakuan kanal *multipath fading*, karena kondisi kanal yang semula bersifat *frequency selective fading* (dimana *bandwidth* dari kanal lebih sempit daripada *bandwidth* dari transmisi

sehingga mengakibatkan pelemahan daya terima secara tidak seragam pada beberapa frekuensi tertentu) akan dirasakan seperti kanal *flat fading* oleh masing-masing *subcarrier*[2].



Gambar 2.2 Spektrum Simbol OFDM[2]

2.1.1 Konsep *Orthogonal*

Pada sistem komunikasi, sinyal-sinyal dikatakan *orthogonal* jika sinyal-sinyal tersebut berdiri sendiri tanpa saling mengganggu satu sama lain. Sifat *orthogonal* dari vektor sinyal ini memungkinkan beberapa sinyal informasi dikirimkan pada kanal yang sama tanpa mengalami interferensi. Secara matematis, dua set sinyal dikatakan *orthogonal* jika integral perkalian keduanya dalam satu interval sama dengan nol[4].

$$f(t) = \sin mwt \times \sin nwt \quad (2.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2} \cos (m - n)wt - \frac{1}{2} \cos (m + n)wt \quad (2.2)$$

$$f(t) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos (m - n)wt - \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos (m + n)wt = 0 \quad (2.3)$$

Hasil integral perkalian kedua sinyal dengan frekuensi m dan n di atas sama dengan nol, maka sinyal-sinyal $\sin mx$, $\cos mx$, $\sin nx$ dan $\cos nx$ saling *orthogonal* satu dengan yang lain untuk nilai m dan n adalah integer. Frekuensi ini disebut harmonik.

2.1.2 IDFT dan DFT

Pada OFDM, masing-masing *subcarrier* memiliki persamaan gelombang sebagai berikut:

$$S_c(t) = A_c(t) e^{j[\omega_c t + \phi(t)]} \quad (2.4)$$

Karena OFDM terdiri dari banyak *subcarrier*, maka persamaan gelombangnya menjadi:

$$S_S(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n(t) e^{j[\omega_n t + \phi_n(t)]} \quad (2.5)$$

Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) dan *Discrete Fourier Transform* (DFT) digunakan untuk mentransformasikan sinyal ke dalam fungsi domain waktu. Penggunaan IDFT dan DFT pada teknik OFDM akan mengurangi tingkat kompleksitas sistem pengirim dan penerima. Dengan menggunakan IDFT dan DFT, tidak diperlukan *osilator*, *mixer* dan *filter* untuk masing-masing *subcarrier*. Algoritma *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) dapat diimplementasikan untuk mempersingkat waktu komputasi.

IFFT dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad (2.6)$$

Persamaan FFT adalah sebagai berikut:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad (2.7)$$

dengan:

N = Jumlah point IFFT (subcarrier total)

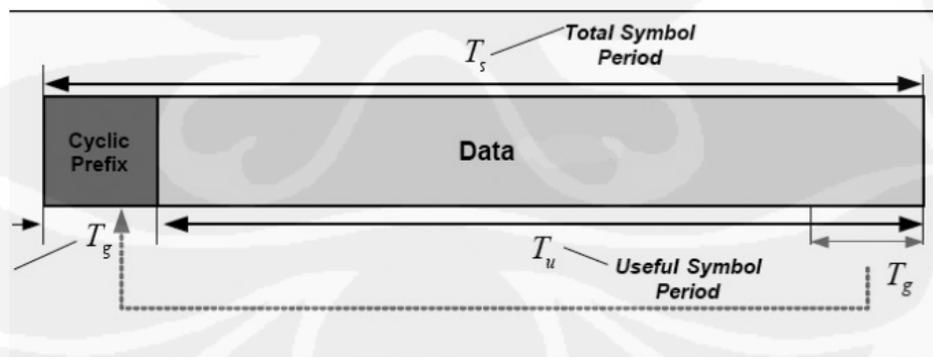
$x(k)$ = nilai dari spektrum ke- k (domain frekuensi)

$x(n)$ = nilai sinyal pada domain waktu

Dari persamaan di atas, sebelum melakukan IFFT maka hal yang harus dilakukan adalah menentukan panjang IFFT. Jumlah titik IFFT pada implementasi bernilai 2^n , dengan n merupakan bilangan bulat positif. Jika jumlah frekuensi *subcarrier* yang digunakan kurang dari 2^n , maka perlu ditambahkan *zeropadding*.

2.1.3 Cyclic Prefix

Guard interval (GI) ditambahkan pada awal tiap simbol OFDM hasil keluaran dari IFFT dengan cara meng-copy bagian belakang dari simbol. Di penerima *guard interval* akan dibuang kembali sebelum dilakukan operasi FFT. Metoda ini disebut juga *cyclic prefix*. Panjang *cyclic prefix* yang diperlukan tergantung dari kondisi *delay spread* kanal. Penambahan *cyclic prefix* dapat mengeliminasi efek *Intersymbol Interference* (ISI) selama panjang *cyclic prefix* lebih besar dari *delay spread*[5]. ISI hanya akan berpengaruh pada bagian simbol yang merupakan *cyclic prefix*, sehingga data *payload* OFDM tidak mengalami distorsi akibat ISI.



Gambar 2.3 Cyclic Prefix OFDM

Penambahan *cyclic prefix* menyebabkan periode simbol OFDM menjadi lebih panjang, seperti dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$T_s = T_u + T_g \quad (2.8)$$

dengan:

T_s = total periode simbol

T_u = periode simbol yang digunakan

T_g = periode *cyclic prefix*

2.1.4 Keunggulan OFDM

Beberapa keunggulan OFDM adalah sebagai berikut[1]:

- a. Efisiensi dalam penggunaan frekuensi, karena masing-masing *subcarrier* saling *orthogonal* maka *overlapping* diperbolehkan.
- b. Penggunaan *subcarrier narrowband* pada transmisi OFDM akan mengubah kondisi kanal yang *frequency selective fading* menjadi *flat fading*. Pelemahan yang disebabkan oleh *flat fading* lebih mudah dikendalikan, sehingga performansi dari sistem mudah untuk ditingkatkan.
- c. Tidak sensitif terhadap sinyal tunda, dengan rendahnya kecepatan transmisi di tiap *subcarrier* berarti periode simbolnya menjadi lebih panjang sehingga kesensitifan sistem terhadap *delay spread* menjadi relatif berkurang.
- d. Penggunaan IFFT dan FFT pada OFDM mengurangi tingkat kompleksitas komputasi sistem pengirim dan penerima.
- e. Mengeliminasi efek *Intersymbol Interference* (ISI) dengan menambahkan *cyclic prefix*.

2.1.5 Multiple Access pada OFDM

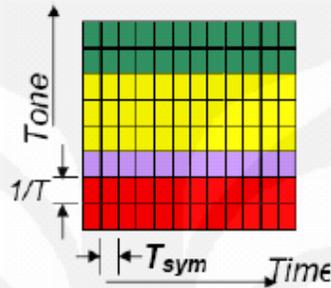
Pada lingkungan *multi user*, OFDM perlu dikombinasikan dengan teknik akses jamak (*multiple access*). *Multiple access* memungkinkan beberapa *user* berbagi spektrum frekuensi dan berbagi akses secara simultan tanpa saling mengganggu.

Ada 3 modulasi *multicarrier* berbasis teknik *multiple access* untuk sistem OFDM[6], yaitu:

- a. OFDM-TDMA
- b. OFDM-FDMA
- c. OFDM-CDMA.

2.2 OFDM-FDMA

Pada OFDM-FDMA, setiap *user* akan mengalokasikan deretan bit-bit pada beberapa *subcarrier* yang telah ditentukan sebelumnya dalam *time slot* tertentu. Data dari setiap *user* hanya ditransmisikan menggunakan *subcarrier* yang dialokasikan untuk setiap user. Pada setiap kelompok *subcarrier* dapat dilakukan *fixed modulation* atau *adaptive modulation*.



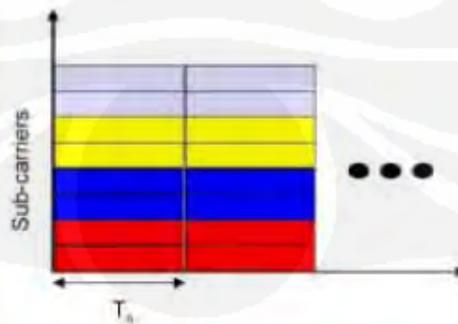
Gambar 2.4 OFDM-FDMA

Berdasarkan pada alokasi *subcarrier* dari *user*, terdapat tiga variasi pada sistem OFDM-FDMA, yaitu [6]:

- *Block FDMA*
- *Random Allocation*
- *Interleaved FDMA*

2.2.1 Block FDMA

Pada *Block FDMA*, setiap *user* mengalokasikan deretan bit-bit pada sebuah grup *subcarrier* yang berdekatan dalam *time slot* tertentu. Bit-loading dari grup *subcarrier* dapat dilakukan secara bersamaan.



Gambar 2.5 Block FDMA

Beberapa keunggulan menggunakan sistem *Block FDMA*, adalah:

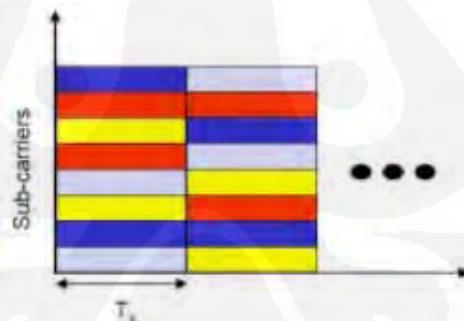
- a. Mudah dalam alokasi *subcarrier* dengan kompleksitas komputasi yang rendah.
- b. Meminimalkan *inter-user interference* akibat distorsi, variasi *power level*, dan *frequency error*.

Kekurangan dari *Block FDMA*, antara lain:

- a. Sistem transmisi yang lebih peka terhadap *frequency selective fading*.
- b. *Probabilitas* dari seluruh *subcarrier* yang dialokasikan untuk user tertentu hilang karena terjadi gangguan (*deep fade*) selama penransmisian cukup besar.

2.2.2 *Random Allocation*

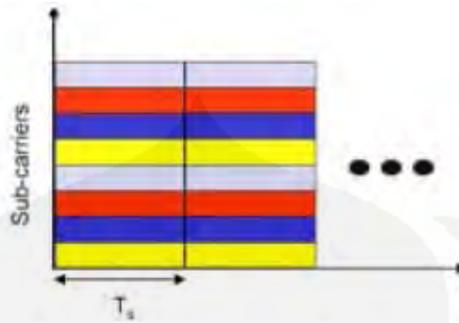
Pada *Random Allocation*, setiap *user* mengalokasikan deretan bit-bit ke sejumlah *subcarrier* secara acak. Metoda alokasi *subcarrier* secara acak memungkinkan *probabilitas* dari seluruh *subcarrier* hilang karena terjadi gangguan (*deep fade*) selama penransmisian sangat kecil.



Gambar 2.6 *Random Allocation*

2.2.3 *Interleaved FDMA*

Pada *Interleaved FDMA*, setiap *user* mengalokasikan deretan bit-bit pada *subcarrier* tertentu. *Subcarrier* tersebut dibuat berselang-seling (*interlaced*) dengan *subcarrier user* lain dalam domain frekuensi.



Gambar 2.7 Interleaved FDMA

Keunggulan *Interleaved FDMA* dibandingkan *Block FDMA* adalah jika terjadi gangguan (*deep fade*) yang menyebabkan hilangnya sinyal pada kelompok *subcarrier* tertentu selama proses penransmisian, hanya sebahagian sinyal dari *user* saja yang terpengaruh. Data yang rusak tersebut dapat diperbaiki menggunakan teknik pengkodean.

2.3 *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*

2.3.1 Konsep Dasar MIMO

MIMO merupakan suatu teknik pada sistem komunikasi *wireless* yang menggunakan lebih dari satu antena di sisi pengirim M dan lebih dari satu antena di sisi penerima N , dengan $M \geq N$. Setiap antena akan mengirimkan informasi yang berbeda secara independen dan simultan dalam *band* frekuensi yang sama. Sistem MIMO diharapkan dapat mengurangi *fading* dan interferensi dari user lain, meningkatkan *reliability*, meningkatkan *throughput* tanpa perlu meningkatkan *bandwidth*, mengurangi daya transmit[7].

MIMO dapat memberikan *diversity gain* dan *multiplexing gain*. *Diversity gain* didapat dengan menerapkan teknik *spatial diversity* dan *multiplexing gain* didapat dengan menerapkan teknik *spatial multiplexing* pada sistem komunikasi *wireless*.

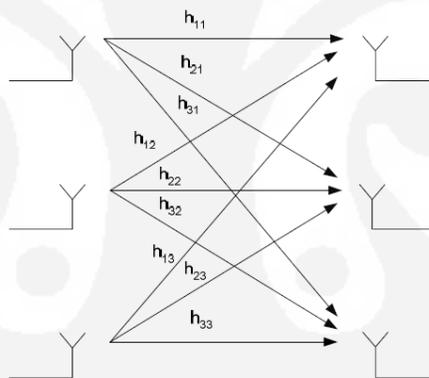
Prinsip dari *spatial diversity* adalah setiap antena pengirim mengirimkan sinyal informasi yang sama secara paralel dengan menggunakan coding yang berbeda pada kanal *independent fading*, sehingga di penerima minimal ada satu sinyal yang tidak mengalami *deep fade*. Teknik *spatial diversity* dapat

menanggulangi *fading* dan secara signifikan dapat menambah *link quality* dan meningkatkan *signal-to-noise ratio* (SNR)[8].

Teknik *spatial multiplexing* mengirimkan data yang berbeda secara paralel dan dikodekan secara paralel untuk setiap antenna pengirim. Tujuan utama teknik ini adalah untuk meningkatkan kapasitas kanal, dengan memecah aliran data berlaju tinggi menjadi sejumlah aliran data paralel sesuai dengan jumlah antenna pengirim. Dengan kanal *independent fading* antara pasangan pengirim dan penerima pada kondisi *multipath*, MIMO memberikan peningkatan kapasitas yang linier dengan jumlah antenna yang digunakan tanpa perlu meningkatkan *bandwidth* dan daya transmit.

2.3.2 Kanal MIMO

Sistem kanal MIMO dapat direpresentasikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.8 Kanal MIMO

Jika sinyal yang dikirimkan antenna adalah $x_1, x_2, x_3, \dots, x_M$, maka sinyal yang diterima oleh antenna penerima adalah

$$\begin{aligned}
 y_1 &= h_{11} x_1 + h_{12} x_2 + \dots + h_{1M} x_M \\
 y_2 &= h_{21} x_1 + h_{22} x_2 + \dots + h_{2M} x_M \\
 &\vdots \\
 y_N &= h_{N1} x_1 + h_{N2} x_2 + \dots + h_{NM} x_M
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

dengan M adalah jumlah antenna di sisi pengirim dan N adalah jumlah antenna di sisi penerima[3].

Persamaan (2.9) di atas, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$\underline{y} = H \underline{x} + \underline{n} \quad (2.10)$$

dengan

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}, \underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix}, \underline{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

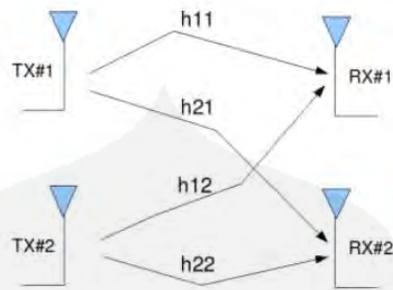
h_{NM} menyatakan respon antenna pengirim M ke antenna penerima N , x menyatakan sinyal yang ditransmisikan, y menyatakan sinyal yang diterima, dan n adalah AWGN yang dialami antenna penerima N .

2.3.3 Space Time Block Coding (STBC)

Tujuan dari *space-time coding* (STC) adalah mendapatkan kualitas sinyal setinggi mungkin dengan memanfaatkan teknik *diversity* pada pemancar dan penerima. Secara umum STC pada MIMO memanfaatkan teknik diversitas pada pengirim dan penerima, sehingga memberikan keuntungan lebih jika dibandingkan sistem wireless konvensional yang hanya menggunakan diversitas pada penerima.

Besarnya peningkatan kualitas sinyal yang diterima antenna penerima diukur dengan parameter *diversity gain*. Pada diversitas konvensional, nilai *diversity gain* akan semakin meningkat dengan semakin besarnya jumlah antenna yang digunakan pada penerima. Penggunaan STC pada sistem MIMO dengan M antenna pengirim dan N antenna penerima meningkatkan *diversity gain* menjadi $M \times N$. Contohnya, dengan dua antenna pada masing-masing pengirim dan penerima, sistem MIMO dengan STC diharapkan mampu menyediakan *diversity gain* yang ekuivalen dengan diversitas konvensional yang menggunakan 4 antenna pada penerima.

Space-time coding (STC) yang akan digunakan adalah *Space Time Block Coding* (STBC) yang diciptakan oleh hasil temuan Siavash Alamouti, yang menggunakan dua antenna pengirim. Pada sistem STBC Alamouti, aliran data yang sama dikirimkan melalui kedua antenna pengirim[9].



Gambar 2.9 STBC Alamouti 2x2

STBC Alamouti dapat dinyatakan dalam bentuk matrik:

$$\begin{matrix} & T_{x1} & T_{x2} \\ t & \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \end{bmatrix} \\ t + T & \begin{bmatrix} -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.12)$$

Tanda * menyatakan konjugate dari persamaan sinyal yang dimaksud. Persamaan sinyal yang diterima antenna R_{x1} adalah:

$$\text{saat } t: \quad y_{11} = h_{11}s_1 + h_{12}s_2 + n_{11} \quad (2.13)$$

$$\text{saat } t + T: \quad y_{12} = -h_{11}s_2^* + h_{12}s_1^* + n_{12} \quad (2.14)$$

Persamaan sinyal yang diterima antenna R_{x2} adalah:

$$\text{saat } t: \quad y_{21} = h_{21}s_1 + h_{22}s_2 + n_{21} \quad (2.15)$$

$$\text{saat } t + T: \quad y_{22} = -h_{21}s_2^* + h_{22}s_1^* + n_{22} \quad (2.16)$$

Pada antenna R_{x1} , sinyal terima dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{12} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Pada antenna R_{x2} , sinyal terima dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} y_{21} \\ y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{21} \\ h_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{21} \\ n_{22} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dengan menggunakan skema decoding yang tepat, BER dari STBC Alamouti 2x2 di atas ekuivalen dengan *Maximum Ratio Combining* (MRC) yang

menggunakan empat antena pada penerima[1]. STBC Alamouti adalah satu-satunya STBC yang mendapatkan *diversity gain* secara utuh tanpa mengorbankan *data rate*.

Pada sisi penerima, decoder STBC akan menerima dua sinyal dari dua antena. Dengan nilai h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} hasil estimasi kanal diketahui, maka dapat ditentukan nilai \hat{s}_1 dan \hat{s}_2 dengan menggunakan skema Alamouti sebagai berikut:

$$\hat{s}_1 = h_{11}^* \cdot y_{11} + h_{12} \cdot y_{12}^* + h_{21}^* \cdot y_{21} + h_{22} \cdot y_{22}^* \quad (2.19)$$

$$\hat{s}_2 = h_{12}^* \cdot y_{11} - h_{11} \cdot y_{12}^* + h_{22}^* \cdot y_{21} - h_{21} \cdot y_{22}^* \quad (2.20)$$

2.4 Modulasi QPSK

Setiap bit yang telah dialokasikan pada *subcarrier*, akan di-*mapping* sesuai dengan metode modulasi yang digunakan. *Mapping* bertujuan untuk merubah bit-bit informasi menjadi simbol-simbol sebelum ditumpangkan ke frekuensi *carrier*. Salah satu *mapper* yang sering digunakan adalah *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).

Pada QPSK, data informasi akan dibentuk menjadi simbol-simbol sesuai dengan konstelasi QPSK pada gambar 2.10. QPSK merupakan modulasi fasa dengan 2 bit per simbol, sehingga simbol satu dengan yang lain berbeda fasa dengan kelipatan $\pi/2$. Output dari QPSK adalah bilangan kompleks dengan *data rate*-nya adalah $R_b/2$. Persamaan sinyal QPSK adalah sebagai berikut[10]:

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + (2i - 1) \frac{\pi}{4} \right] \quad (2.21)$$

dengan:

$0 \leq t \leq T_s$, T_s adalah durasi simbol

E_s = energi per simbol modulasi

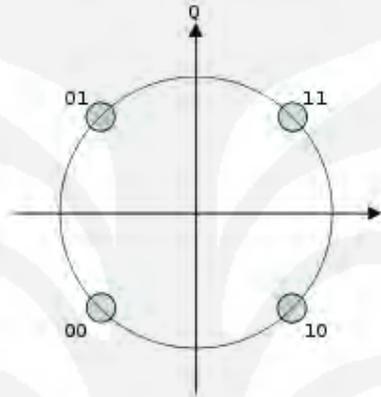
$i = 1, 2, 3, 4$

$$\text{bit } 00 : S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{\pi}{4} \right] \quad (2.22)$$

$$\text{bit 01 : } S_2(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4} \right] \quad (2.23)$$

$$\text{bit 11 : } S_3(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{5\pi}{4} \right] \quad (2.24)$$

$$\text{bit 10 : } S_4(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{7\pi}{4} \right] \quad (2.25)$$



Gambar 2.10 Konstelasi sinyal QPSK

2.5 Forward Error Correction (FEC)

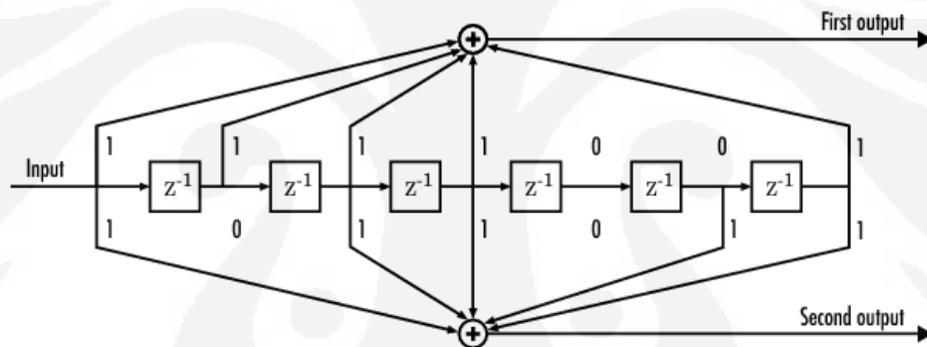
Forward Error Correction (FEC) berfungsi untuk mendeteksi dan mengoreksi *error* tanpa harus meminta pengirim untuk mengirimkan data ulang. Konsep dasar dari FEC adalah dengan menambahkan *bit-bit* redundan pada *bit* informasinya. Penggunaan FEC dapat lebih menghemat *bandwidth* dan efisiensi daya, karena penransmisian data ulang bisa dihindari.

Terdapat dua tipe dasar dari FEC, yaitu *block code* dan *convolutional code*[11]. *Block code* terdiri dari *Hamming code*, *BCH code*, *Red Solomon code*, *Hadamard code*, *Golay code* dan *Cyclic code*. Bab ini hanya membahas tentang *convolutional code*.

Convolutional code di-generate dengan melewati *bit-bit* informasi melalui sebuah *shift register*. Umumnya, *shift register* terdiri dari K tingkatan dan m generator fungsi aljabar linier berdasarkan *generator polynomial*-nya, seperti pada gambar 2.11. Parameter K disebut juga *constraint length*.

Jika *convolutional encoder* memiliki a input dan b output, maka *generator polynomial* merupakan matriks $a \times b$. Pada gambar 2.11, *generator polynomial* adalah matriks 1×2 . Untuk menentukan besaran dari matriks dapat dilakukan dengan cara:

- Memberikan bilangan biner 1 untuk setiap titik yang terhubung dari *shift register* ke *adder*, dan yang tidak terhubung dengan biner 0. (Contohnya, pada gambar 2.11 biner dari *output* pertama adalah 1111001 dan biner dari *output* kedua adalah 1011011).
- Mengkonversikan bilangan biner menjadi bilangan oktal. (Contohnya, pada gambar 2.11 biner 1111001 menjadi 171_8 dan biner 1011011 menjadi 133_8 , sehingga matriks dari *generator polynomial* adalah $[171 \ 133]$).



Gambar 2.11 *Convolutional Encoder*

Coderate pada *convolutional encoder* merupakan nilai perbandingan antara jumlah masukan dengan jumlah keluaran pada satu waktu yang bersamaan. Semakin besar *coderate*, maka kemampuan dalam mendeteksi dan memperbaiki *error* akan semakin baik. Konsekuensinya *encoder* semakin tidak efisien, karena jumlah *bit* yang dikirim akan semakin banyak.

2.6 Kanal Transmisi *Wireless*

Model kanal yang sering digunakan pada sistem komunikasi *wireless* antara lain kanal AWGN dan kanal *multipath fading* terdistribusi *Rayleigh* atau terdistribusi *Rician*.

2.6.1 *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*

Noise yang terjadi pada sistem transmisi karena adanya pengaruh dari kondisi komponen-komponen elektronik, seperti penguat pada sistem komunikasi, serta kanal transmisi yang tidak bekerja pada suhu 0° K. Pada suhu tidak sama dengan 0° K, elektron-elektron pada komponen elektronik dan kanal akan bergerak secara acak sehingga respon komponen elektronik dan kanal tidak sempurna.

Model matematis dari *noise* yang terjadi pada kanal komunikasi, seperti kondisi di atas, dapat diwakili oleh *noise* kanal *additive*, yang memiliki distribusi probabilitas *gaussian*, serta merata pada semua band frekuensi dengan nilai yang relatif rendah. *Probability density function* (pdf) dari AWGN dinyatakan sebagai berikut:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.26)$$

dengan:

μ = rata-rata

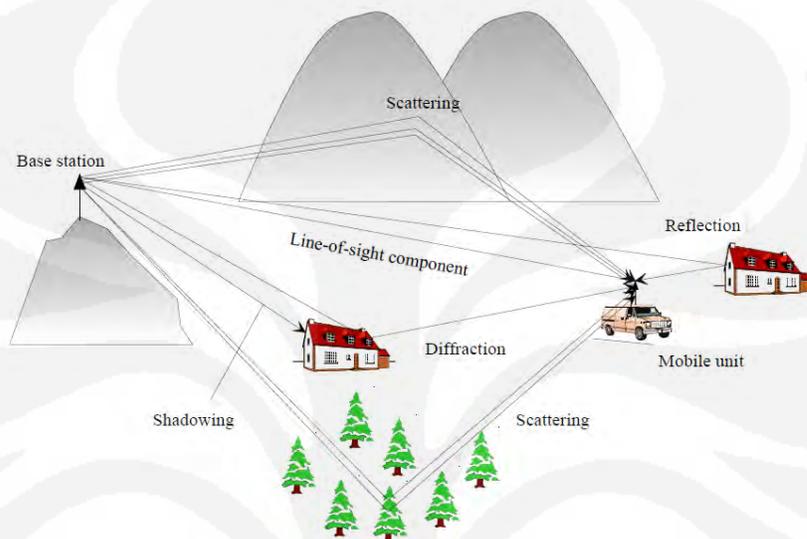
σ^2 = variansi dari variabel acak

AWGN adalah model yang baik untuk mewakili kondisi sebenarnya selama hanya *noise thermal receiver* yang menjadi sumber gangguan. Efek *fading* dapat diabaikan, sehingga dapat dikatakan sistem transmisi dengan kanal AWGN adalah kanal dengan kondisi sistem paling sempurna, karena gangguan dari luar diabaikan.

2.6.2 *Kanal Multipath Fading*

Gangguan-gangguan pada komunikasi *wireless*, seperti pantulan (*reflection*), difraksi (*diffraction*), dan hamburan (*scattering*), sangat mempengaruhi sinyal yang diterima. Akibat gangguan-gangguan tersebut,

penerima menerima sinyal hasil superposisi dari beberapa sinyal yang berbeda fasa, waktu kedatangan serta daya sinyal yang diterima. Fenomena inilah yang disebut dengan *multipath fading*, seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Prinsip Kanal *Multipath Fading*[12]

Multipath adalah fenomena propagasi yang mengakibatkan sinyal radio sampai pada antena penerima dengan dua atau lebih pola. Hal ini disebabkan karena adanya pantulan dan difraksi dari lapisan *ionosfer*, juga pantulan dari objek terestrial, seperti gunung, pohon dan bangunan. Sedangkan *fading* adalah fenomena terjadinya variasi amplitudo dan/atau fasa relatif pada satu atau lebih komponen frekuensi sinyal yang diterima. *Fading* disebabkan perubahan karakteristik jalur propagasi terhadap waktu.

Pada komunikasi *wireless* dengan kanal *multipath*, model statistik yang sering digunakan adalah *fading* Rayleigh atau *fading* Rician.

2.6.2.1 *Rayleigh Fading*

Kanal *Rayleigh Fading* adalah kanal yang menggunakan distribusi *Rayleigh* sebagai variasi amplitudo dari sinyal. Distribusi *Rayleigh* terjadi jika tidak ada komponen *scatter* yang dominan, sehingga rata-rata distribusi *Gaussian*

menjadi nol dan fasa terdistribusi merata antara 0 dan 2π radian. Distribusi *Rayleigh* sering digunakan untuk menggambarkan statistik *time varying* selubung sinyal pada kanal *flat fading* atau pada masing-masing komponen *multipath*. Selubung sinyal merupakan penjumlahan dua *quadrature* sinyal *noise gaussian* sehingga menghasilkan distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* memiliki pdf sebagai berikut:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & \text{untuk } r \geq 0 \\ 0 & \text{untuk } r < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

dengan

σ^2 = waktu daya rata-rata sinyal terima

2.6.2.1 Rician Fading

Ketika ada satu komponen dominan, distribusi sinyal dapat berubah menjadi distribusi *Rician*. Amplitudo sinyal yang diterima mempunyai distribusi *Rician* yang diperoleh dari persamaan:

$$p(r) = \frac{2(K+1)r}{\Omega} \exp\left[-K - \frac{(K+1)r^2}{\Omega}\right] I_0\left[2\sqrt{\frac{K(K+1)r}{\Omega}}\right] \quad (2.28)$$

dengan:

$r \geq 0, K \geq 0, \Omega \geq 0$

I_0 = fungsi *Bessel* termodifikasi orde 1

$\Omega = E[r^2]$

K = rasio daya yang diterima

2.7 Efek Doppler

Pada komunikasi wireless bergerak (*mobile*) selain propagasi *multipath*, efek *Doppler* juga memberikan pengaruh yang negatif. Pergerakan pengguna atau objek di sekitarnya menyebabkan terjadinya pergeseran frekuensi (*Doppler shift*), yang dapat dihitung dengan persamaan[13]:

$$f_d = \frac{f_c \cdot v}{c} \cos \theta \quad (2.29)$$

dengan:

f_c = frekuensi carrier

v = kecepatan pengguna

θ = sudut kedatangan sinyal relatif terhadap arah kecepatan pengguna

Pergeseran frekuensi maksimum terjadi pada saat sudut kedatangan sinyal sama dengan 0° dan nilai tersebut dapat bernilai positif atau negatif, yaitu sebesar:

$$f_m = \frac{f_c \cdot v}{c} \quad (2.30)$$

BAB 3 PERANCANGAN MODEL SISTEM

Bab ini membahas tentang perancangan model sistem MIMO OFDM-FDMA. Pembahasan dimulai dari parameter-parameter OFDM yang digunakan pada simulasi. Dilanjutkan dengan pembahasan blok-blok diagram yang digunakan untuk simulasi MIMO OFDM-FDMA serta cara kerja masing-masing blok.

3.1 Parameter Simulasi

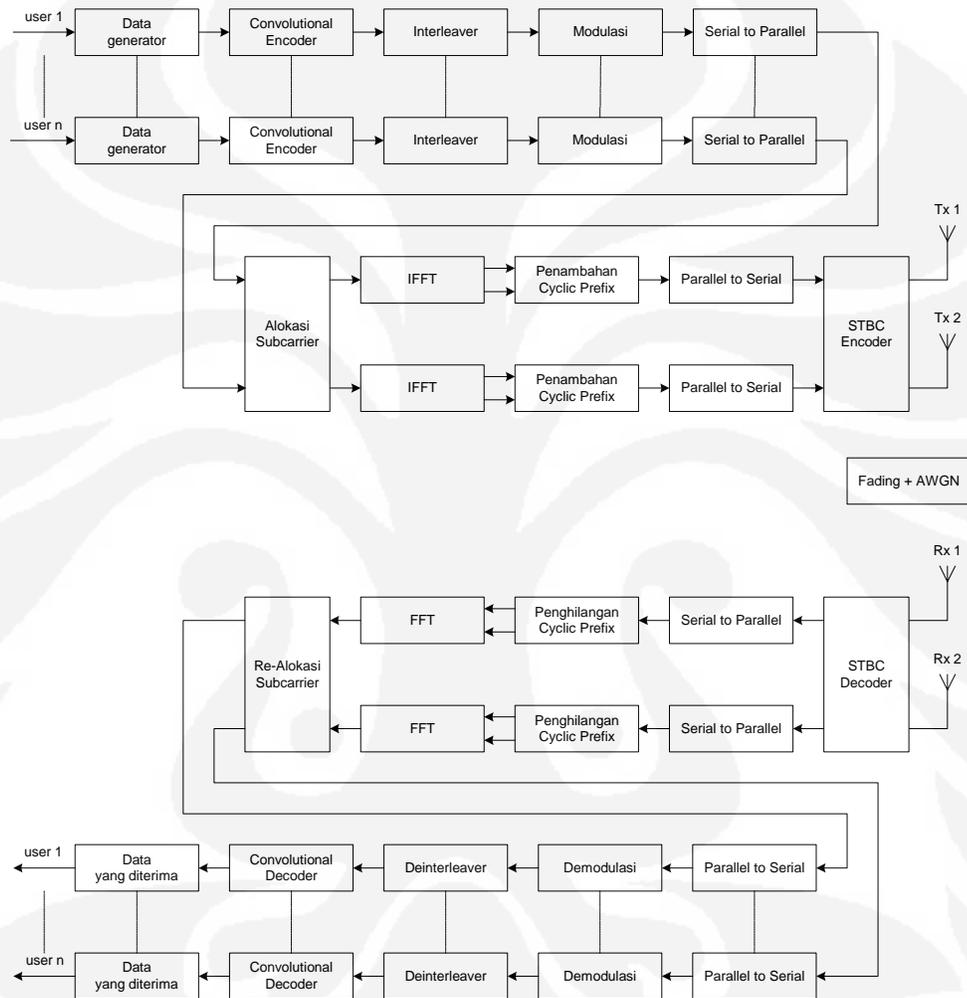
Sistem pada simulasi memiliki parameter-parameter OFDM seperti diperlihatkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter-parameter OFDM

Parameter	Nilai Parameter
Frekuensi <i>carrier</i> (F_C)	3.5 GHz
Jumlah point IFFT (N_{FFT})	128
Jumlah <i>subcarrier</i> (N_C)	128
Jumlah data <i>subcarrier</i> (N_D)	112
Jumlah simbol <i>subcarrier</i> (N_S)	16
Rasio <i>Cyclic Prefix</i> (G)	1/8
Periode simbol OFDM (T_S)	102.9 μ s
Periode <i>Cyclic Prefix</i> (T_G)	11.4 μ s
Teknik modulasi	QPSK
Channel coding	Convolutional Coding
Coderate	1/2
Jumlah user	2, 4, 8

3.2 Diagram Blok Sistem MIMO OFDM-FDMA

Model sistem MIMO OFDM-FDMA yang akan disimulasikan terdiri dari tiga bagian besar blok sistem, yaitu: blok sistem *transmitter*, blok kanal transmisi, dan blok sistem *receiver*.



Gambar 3.1 Diagram Blok MIMO OFDM-FDMA

3.3 Sistem Transmitter

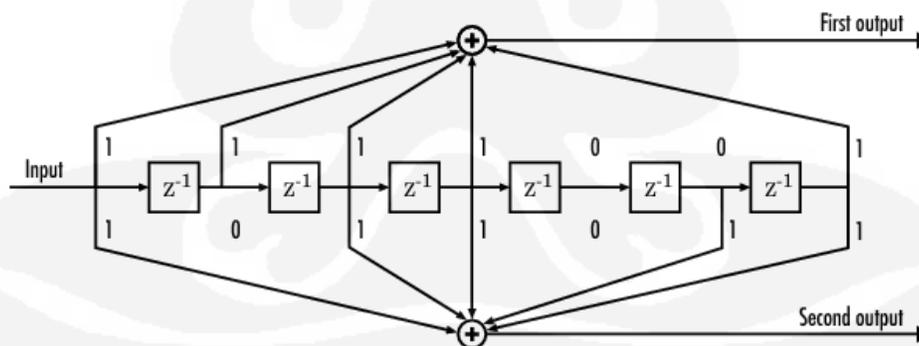
3.3.1 Random Data Generator

Random data generator merupakan blok yang membangkitkan data informasi untuk setiap user yang akan dikirim secara random, yang terdiri dari bit 1 dan 0 dengan menggunakan fungsi *built-in* “*randint*” pada MATLAB.

3.3.2 Convolutional Encoder

Channel coding yang digunakan pada simulasi ini adalah *convolutional encoding*. *Convolutional encoder* berfungsi untuk menurunkan *error rate* selama pentransmisian data, dengan cara mendeteksi dan sekaligus memperbaiki *error* selama pentransmisian data tanpa harus meminta pengirim untuk mengirimkan kembali data yang sama.

Convolutional encoder yang akan digunakan memiliki nilai *coderate* $\frac{1}{2}$. *Coderate* merupakan nilai perbandingan antara jumlah masukan dengan jumlah keluaran pada satu waktu yang bersamaan pada *convolutional encoding*. *Coderate* $\frac{1}{2}$ berarti 1 bit masukan dipetakan menjadi 2 bit keluaran. Untuk *coderate* $\frac{1}{2}$, *generator polynomial* yang digunakan adalah [171 133] dengan constraint length $K = 7$ seperti pada gambar 3.2.

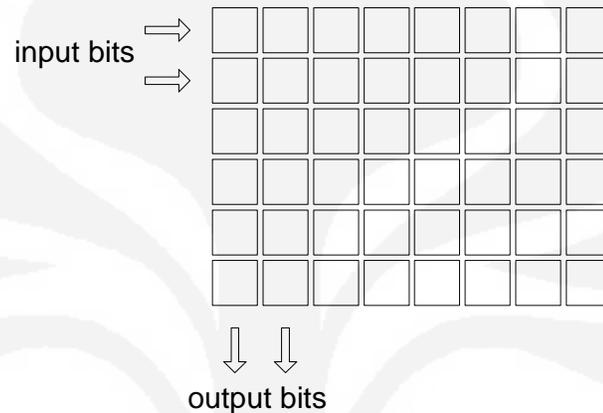


Gambar 3.2 Convolutional Encoder $\frac{1}{2}$

3.3.3 Interleaver

Kondisi kanal *multipath* memungkinkan terjadinya *error* yang berurutan (*burst error*). Cara untuk meminimalisasi *burst error* selama pentransmisian data adalah dengan menggunakan teknik *interleaver*. *Interleaver* dirancang untuk

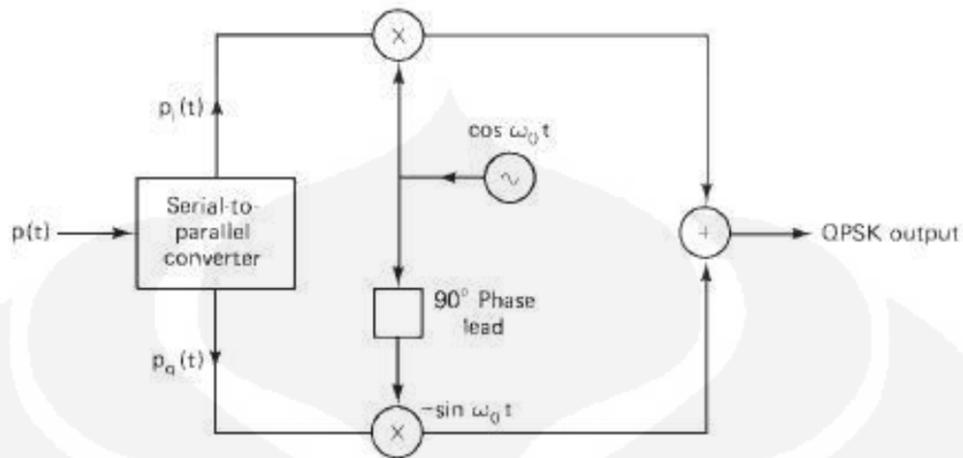
menyebarkan pola urutan bit-bit yang sebenarnya, agar sebelum masuk decoder tidak terjadi *burst error*. *Interleaver* berbentuk sebuah matriks, aliran bit input akan mengisi matriks tersebut baris demi baris. Keluaran dari *interleaver* merupakan aliran bit yang tersusun secara kolom.



Gambar 3.3 Aliran Bit pada *Interleaver*

3.3.4 Modulasi QPSK

Proses modulasi berfungsi untuk memetakan bit-bit informasi yang akan dikirimkan menjadi simbol-simbol sebelum ditumpangkan ke frekuensi *carrier*. Modulasi yang digunakan pada simulasi ini adalah QPSK. Berdasarkan gambar 3.4, QPSK dapat diperoleh dengan penggabungan 2 modulasi BPSK. *Bit stream* yang masuk pada modulator $p(t)$, dibagi menjadi 2 stream yaitu $p_i(t)$ dan $p_q(t)$. *Bit stream* $p_i(t)$ akan dimodulasi dengan $\cos w_o t$ dan $p_q(t)$ akan dikombinasikan dengan $\sin w_o t$. Kemudian kedua *bit stream* ini akan digabungkan kembali menjadi *stream* QPSK.



Gambar 3.4 Modulator QPSK

3.3.5 Serial to Parallel

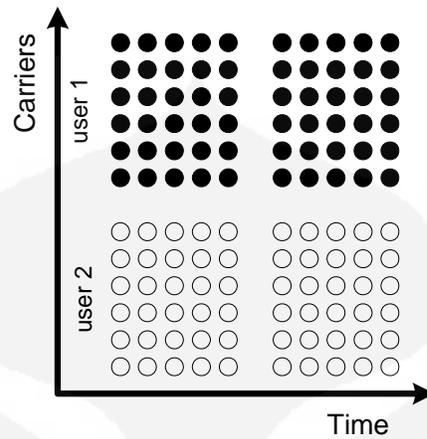
Blok ini berfungsi untuk mengkonversikan data serial menjadi data paralel, yang disesuaikan dengan jumlah *subcarrier* yang digunakan. Parameter yang dibutuhkan pada blok ini adalah jumlah *subcarrier* dan jumlah data yang dibawa oleh tiap satu *subcarrier*. Matlab menyediakan fungsi *built-in* “*reshape*” untuk melakukan konversi ini.

3.3.6 Alokasi Subcarrier

Pada blok ini setiap user akan dialokasikan ke *subcarrier* sesuai dengan teknik alokasi yang digunakan. Pada simulasi ini, ada dua metode alokasi yang akan digunakan yaitu *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA* dengan jumlah *user* 2, 4, dan 8.

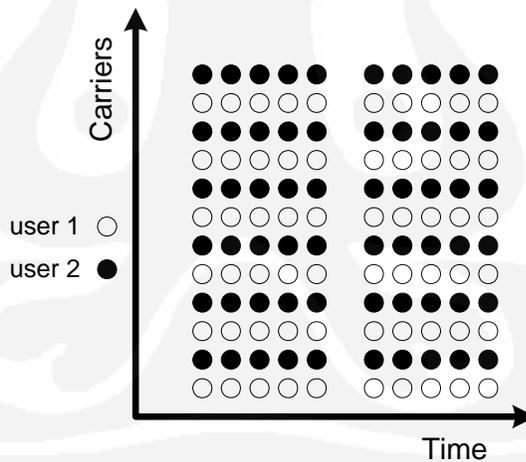
3.3.6.1 Block FDMA

Alokasi ini menempatkan data dari seorang *user* pada sebuah blok *subcarrier*, kemudian menempatkan data dari *user* berikutnya pada blok berikutnya juga. Pada gambar 3.5 dapat dilihat, *user* 1 menempati satu blok *subcarrier* kemudian *user* 2 menempati blok *subcarrier* berikutnya.

Gambar 3.5 Alokasi *Block* FDMA

3.3.6.2 *Interleaved* FDMA

Interleaved FDMA menempatkan *user* secara berselang-seling pada *subcarrier*. Jika terdapat dua *user* aktif maka alokasi *subcarrier* dibagi untuk dua *user* secara bergantian atau berselang-seling, seperti dapat dilihat pada gambar 3.6.

Gambar 3.6 Alokasi *Interleaved* FDMA

3.3.7 *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT)

Blok IFFT merupakan inti dari modulasi *multicarrier* OFDM, karena IFFT berfungsi sebagai *baseband* modulator yang akan membangkitkan *subcarrier-subcarrier* yang saling *orthogonal* satu dengan yang lain. Keluaran dari satu kali

proses N-point IFFT akan membentuk satu simbol OFDM. Fungsi *built-in* “*ifft*” pada Matlab digunakan untuk membangkitkan fungsi IFFT. Jumlah point IFFT yang digunakan pada simulasi adalah $N_{FFT} = 128$.

3.3.8 Penambahan *Cyclic Prefix*

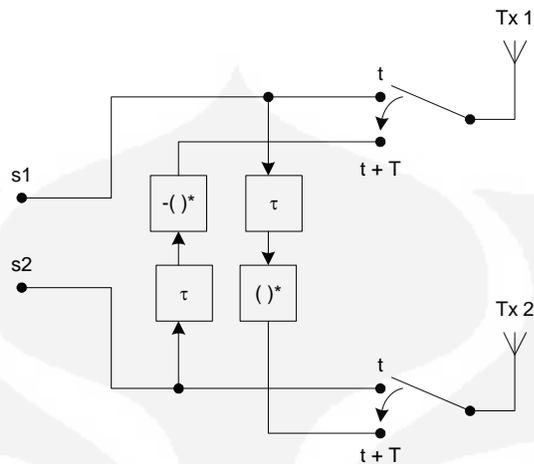
Penambahan *cyclic prefix* dilakukan dengan cara meng-*copy* deretan akhir simbol OFDM dengan periode tertentu, kemudian menambahkannya pada bagian awal dari simbol. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menjaga ortogonalitas masing-masing *subcarrier* dan untuk mencegah ICI dan ISI. Pada simulasi ini, jumlah data *cyclic prefix* yang digunakan adalah 1/8 dari jumlah point IFFT.

3.3.9 *Parallel to Serial*

Data informasi yang berbentuk paralel sebelum dikirimkan melalui kanal transmisi, terlebih dulu diubah kembali menjadi aliran data serial.

3.3.10 STBC *Encoder*

Sistem STBC *encoder* yang digunakan pada simulasi ini, menggunakan metode Alamouti 2x2. Simbol akan ditransmisikan melalui dua buah antena pengirim yang berbeda dan diterima oleh dua antena penerima secara bersamaan. Pada saat t , antena T_{x1} mentransmisikan simbol s_1 sedangkan antena T_{x2} mentransmisikan simbol s_2 . Pada saat $t+T$, switch masing-masing antena akan bergeser untuk mentransmisikan simbol berikutnya. Saat $t+T$, antena T_{x1} mentransmisikan simbol $-s_2^*$ sedangkan antena T_{x2} mentransmisikan simbol s_1^* . Proses pentransmisian sinyal pada STBC *encoder* metode Alamouti 2x2 ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pola transmisi STBC

3.4 Kanal Transmisi

Kanal transmisi yang digunakan pada simulasi ini adalah kanal AWGN dan kanal *Rayleigh fading*. Kanal AWGN dan kanal *Rayleigh fading* digunakan untuk merepresentasikan kanal transmisi yang sesuai dengan kanal transmisi sebenarnya. Gangguan AWGN divariasikan dengan parameter SNR dan gangguan *Rayleigh fading* divariasikan dengan parameter kecepatan gerak relatif *user*.

3.5 Sistem Receiver

3.5.1 STBC Decoder

STBC decoder akan menerima dua sinyal dari dua antenna penerima. Pada saat t , antenna R_{x1} menerima sinyal y_{11} sedangkan antenna R_{x2} menerima sinyal y_{21} . Pada saat $t+T$, antenna R_{x1} menerima sinyal y_{12} sedangkan antenna R_{x2} menerima sinyal y_{22} . Dengan menghitung nilai respon kanal maka nilai s_1 dan s_2 dapat ditentukan.

3.5.2 Serial to Parallel

Mengkonversikan deretan data informasi serial menjadi deretan paralel.

3.5.3 Penghilangan *Cyclic Prefix*

Proses penghilangan *cyclic prefix* yang sebelumnya ditambahkan pada sisi *transmitter*, sehingga yang tersisa adalah simbol yang hanya mengandung informasi yang sesungguhnya saja.

3.5.4 *Fast Fourier Transform (FFT)*

Blok FFT merupakan proses kebalikan dari IFFT. FFT berfungsi untuk mengkonversi deretan data paralel domain waktu menjadi domain frekuensi.

3.5.5 Realokasi *Subcarrier*

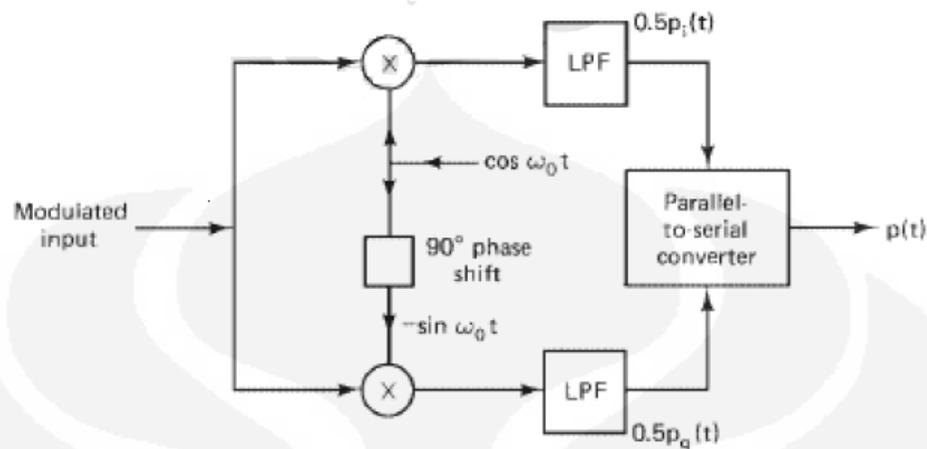
Data yang telah diterima direalokasikan kembali untuk masing-masing *user*, sesuai dengan metode yang digunakan pada sisi *transmitter*. Jika pada sisi *transmitter* digunakan alokasi *Block FDMA*, maka pada sisi *receiver* digunakan realokasi *Block FDMA*. Sedangkan jika pada sisi *transmitter* digunakan alokasi *Interleaved FDMA*, maka pada sisi *receiver* juga digunakan realokasi *Interleaved FDMA*.

3.5.6 *Parallel to Serial*

Blok ini berfungsi mengubah deretan data paralel menjadi deretan data serial.

3.5.7 Demodulasi QPSK

Proses demodulasi merupakan kebalikan dari proses modulasi pada sisi *transmitter*. Demodulasi berfungsi untuk memetakan kembali deretan simbol menjadi bit-bit informasi berdasarkan daerah konstelasi dari simbol tersebut, seperti terlihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Demodulator QPSK

3.5.8 Deinterleaver

Deinterleaver merupakan proses kebalikan dari fungsi *interleaver* pada sisi *transmitter*. Bit-bit akan mengisi matriks kolom per kolom dan output dari *deinterleaver* merupakan matriks baris.

3.5.9 Convolutional Decoder

Convolutional decoder akan membentuk algoritma *viterbi decoding* untuk menghasilkan bit data informasi dari bit yang dikodekan. Prinsip kerja dari *viterbi decoder* adalah berdasarkan prinsip diagram *trellis encoder* pada sisi *transmitter*.

3.6 Parameter Frekuensi Doppler

Frekuensi *doppler* dipengaruhi oleh frekuensi kerja dan kecepatan *user* bergerak. Pada simulasi ini frekuensi kerja (F_c) yang digunakan adalah 3.5 GHz dengan kecepatan *user* bergerak bervariasi. Besarnya frekuensi *doppler* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) dengan $\theta = 0^\circ$.

$$f_d = \frac{f_c \cdot v}{c}$$

1. Saat kecepatan *user* bergerak 3 km/jam (0.833 m/s, *slow move*), maka diperoleh frekuensi *doppler* :

$$f_d = \frac{3,5 \cdot 10^9 \cdot 3}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,6} = 9,722 \text{ Hz} \approx 10 \text{ Hz}$$

2. Saat kecepatan user bergerak 10 km/jam (2.78 m/s, normal), maka diperoleh frekuensi *doppler* :

$$f_d = \frac{3,5 \cdot 10^9 \cdot 10}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,6} = 32,407 \text{ Hz} \approx 32 \text{ Hz}$$

3. Saat kecepatan user bergerak 30 km/jam (8.33 m/s, *fast move*), maka diperoleh frekuensi *doppler* :

$$f_d = \frac{3,5 \cdot 10^9 \cdot 30}{3 \cdot 10^8 \cdot 3,6} = 97,22 \text{ Hz} \approx 97 \text{ Hz}$$

3.7 Perencanaan Parameter Simulasi

Simulasi akan dilakukan bertujuan untuk mengetahui performansi sistem MIMO OFDM-FDMA dengan skema percobaan sebagai berikut:

1. Simulasi dilakukan pada sisi *transmitter* dan *receiver*.
2. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi subcarrier *Block* FDMA pada kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* untuk jumlah *user* yang berbeda.
3. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi subcarrier *Block* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading* untuk frekuensi *doppler* yang berbeda.
4. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi subcarrier *Interleaved* FDMA pada kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* untuk jumlah *user* yang berbeda.
5. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi subcarrier *Interleaved* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading* untuk frekuensi *doppler* yang berbeda.
6. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA (*Block* FDMA) dan MIMO OFDM-FDMA (*Interleaved* FDMA) pada kanal AWGN dan *Rayleigh Fading* untuk jumlah *user* yang berbeda.
7. Perbandingan kinerja MIMO OFDM-FDMA (*Block* FDMA) dan MIMO OFDM-FDMA (*Interleaved* FDMA) pada kanal *Rayleigh Fading* untuk frekuensi *doppler* yang berbeda.

Asumsi-asumsi yang digunakan pada simulasi yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sinkronisasi dan estimasi kanal yang sempurna antara sisi *transmitter* dan *receiver*.
2. *Power Average Peak Ratio* (PPAR) tidak diperhitungkan dalam simulasi.
3. *Cyclic prefix* yang digunakan sebagai *guard interval* pada simulasi OFDM lebih panjang dari *delay spread*, sehingga tidak terjadi ISI.
4. Konversi *analog to digital* (A/D) dan *digital to analog* (D/A) tidak dimasukkan dalam simulasi.

3.8 Parameter Kinerja Sistem

Pada skripsi ini untuk menganalisa kinerja dari sistem MIMO OFDM-FDMA, maka akan diukur laju *Bit Error Rate* (BER) sistem. BER merupakan parameter yang paling utama dalam menentukan kualitas suatu sistem. Semakin tinggi nilai BER menandakan kinerja sistem yang semakin buruk, karena informasi yang diterima pada sisi penerima mengalami banyak perubahan selama transmisi. Dalam proses simulasi ini, BER diperoleh dengan membandingkan *bit* yang diterima pada sisi penerima dengan *bit* yang dikirim pada sisi pengirim.

$$BER = \frac{\text{jumlah bit error}}{\text{total bit}} \quad (3.1)$$

BAB 4

ANALISA HASIL SIMULASI

Pada bab ini akan ditampilkan hasil simulasi dari sistem MIMO OFDM-FDMA berdasarkan alokasi *subcarrier* yang telah dimodelkan pada bab sebelumnya. Hasil dari simulasi akan dianalisa untuk mengetahui kinerja dari MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Block FDMA* dan *Interleaved FDMA*. Seluruh simulasi dilakukan dengan menggunakan Matlab 7.6.0 (R2008a).

4.1 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA*

Pada sistem MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Block FDMA*, *user* dialokasikan pada sebuah grup *subcarrier* yang berdekatan.

4.1.1 Simulasi Berdasarkan Jumlah *User*

Simulasi ini dilakukan untuk melihat pengaruh jumlah *user* terhadap kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block*. Variasi jumlah *user* yang disimulasikan adalah 2, 4, dan 8 *user*. Seluruh *subcarrier* dipakai dan dibagi ke masing-masing *user* secara merata, seperti yang diperlihatkan pada tabel 4.1.

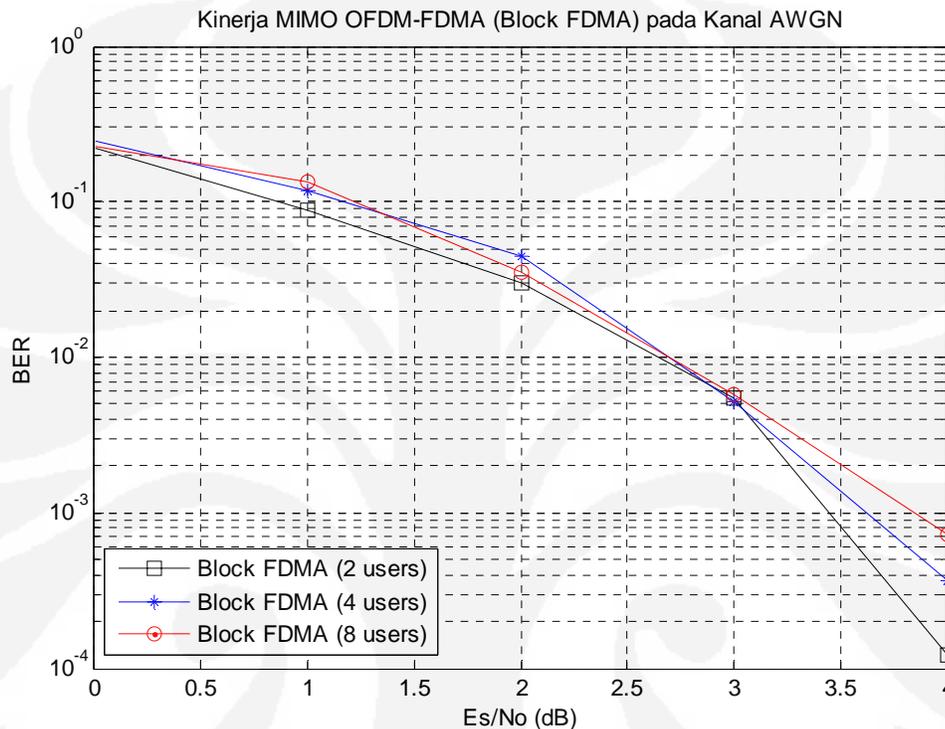
Tabel 4.1 Pembagian *Subcarrier* untuk Setiap *User*

Jumlah <i>User</i>	Jumlah <i>Subcarrier</i> per <i>User</i>
2	64
4	32
8	16

4.1.1.1 Kanal AWGN

Hasil simulasi dari sistem MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA* pada kanal AWGN dapat dilihat pada gambar 4.1. Kinerja sistem untuk jumlah *user* yang berbeda cenderung sama sampai $E_s/N_o = 3$ dB dengan $BER \pm 6.10^{-3}$. Semakin baik kondisi kanal yang ditandai dengan semakin besar E_s/N_o . Nilai BER setelah $E_s/N_o > 3$ dB untuk masing-masing *user* menunjukkan perbedaan. Dimana dengan semakin besar jumlah *user* maka nilai BER-nya akan semakin

besar untuk E_s/N_0 yang sama. Ini menunjukkan bahwa semakin sedikit jumlah *user*, maka kinerja dari sistem semakin baik. Pada tabel 4.2 dapat dilihat penambahan jumlah *user* akan membesar nilai BER yang dihasilkan.



Gambar 4.1 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA* pada Kanal AWGN

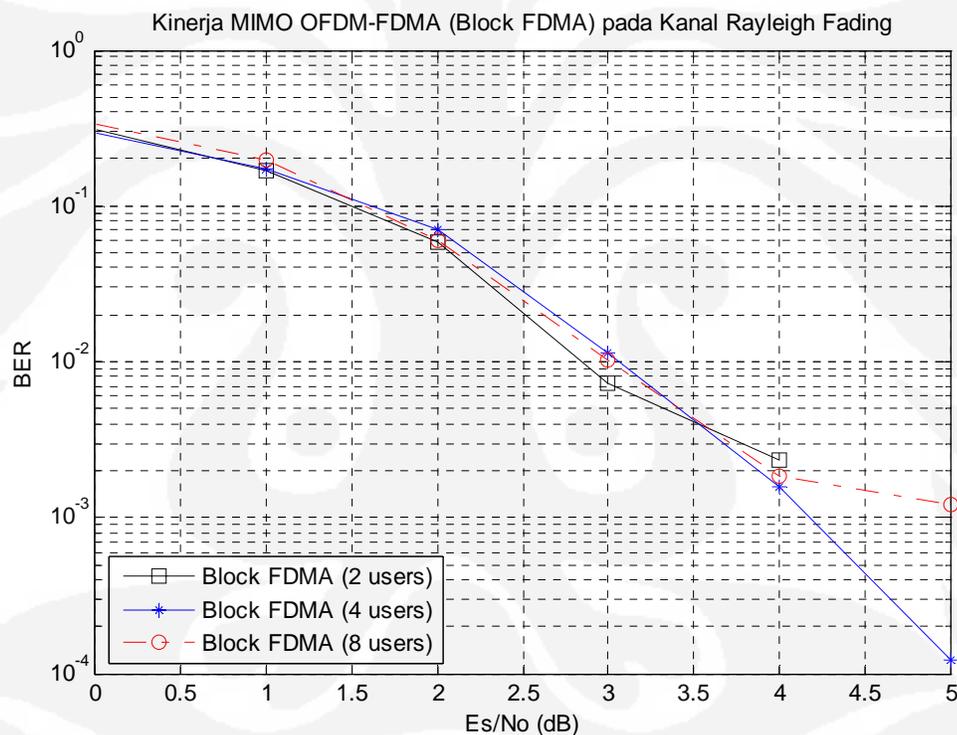
Tabel 4.2 Data Hasil Simulasi *Block FDMA* Kanal AWGN

Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_0 = 4$ dB)
2	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4	$3,7 \cdot 10^{-4}$
8	$7,3 \cdot 10^{-4}$

Penambahan jumlah *user* menyebabkan peluang untuk terjadinya *bit error* pada sisi *receiver* semakin besar. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas sistem pada sisi *transmitter* dan *receiver* yang akan semakin tinggi untuk jumlah *user* yang semakin banyak. Banyak *subcarrier* (panjang IFFT) juga berpengaruh pada kinerja dari sistem yang dihasilkan. Semakin banyak *subcarrier* (panjang IFFT) yang digunakan oleh *user*, maka kinerja sistem akan semakin baik.

4.1.1.2 Kanal Rayleigh Fading

Pada simulasi ini akan diamati kinerja sistem MIMO OFDM-FDMA Block FDMA pada kanal Rayleigh Fading. Simulasi dilakukan pada kanal Rayleigh Fading dengan frekuensi Doppler (F_d) = 10 Hz, v = 3 km/jam, dan F_c = 3,5 Ghz. Dari hasil simulasi pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa kinerja sistem untuk jumlah *user* yang berbeda tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Semakin banyak jumlah *user* nilai BER sistem pada E_s/N_0 yang sama akan semakin besar, dengan perbedaan yang cukup besar terjadi setelah $E_s/N_0 > 4$ dB. Pada saat $E_s/N_0 = 4$ dB kurva untuk jumlah *user* 2 terputus, ini menunjukkan bahwa untuk nilai E_s/N_0 berikutnya nilai BER = 0.



Gambar 4.2 Kinerja MIMO OFDM-FDMA Block FDMA pada Kanal Rayleigh Fading

Tabel 4.3 memperlihatkan nilai BER untuk jumlah *user* yang berbeda pada saat $E_s/N_0 = 5$ dB. Untuk jumlah *user* yang berbeda perbedaan nilai BER-nya cukup besar, sehingga dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah *user* nilai BER akan semakin besar. Hal ini membuktikan bahwa jumlah *user* berpengaruh pada

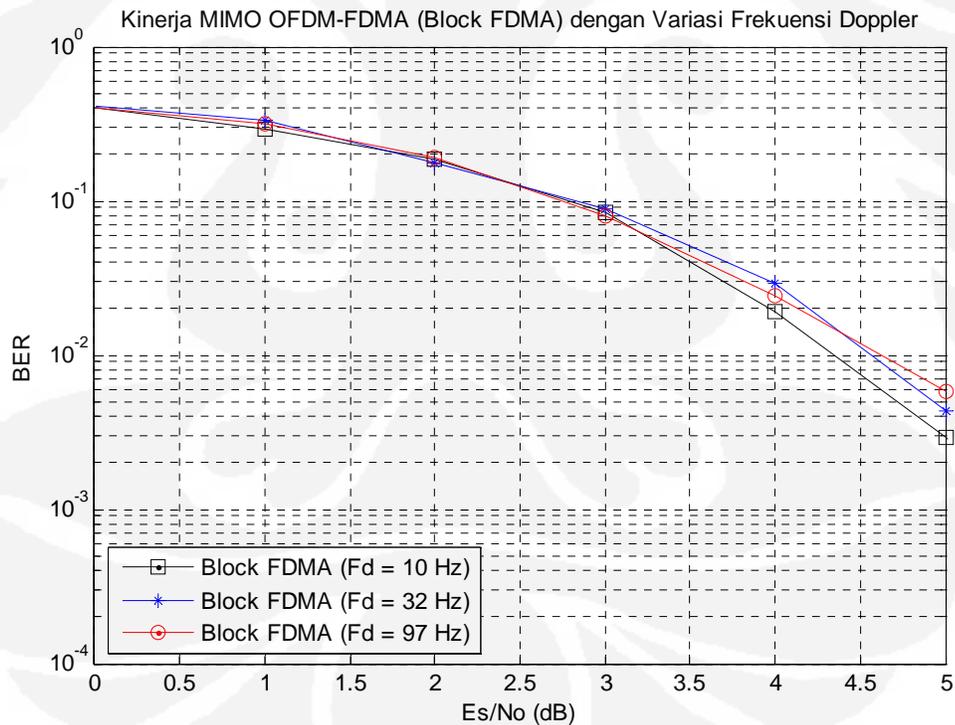
kinerja sistem. Semakin banyak jumlah *user* akan menurunkan kinerja dari sistem, yang ditandai dengan nilai BER yang semakin besar.

Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi *Block FDMA* Kanal *Rayleigh Fading*

Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_0 = 5$ dB)
2	0
4	$1,2 \cdot 10^{-4}$
8	$1,2 \cdot 10^{-3}$

4.1.2 Simulasi Berdasarkan Frekuensi *Doppler*

Simulasi ini bertujuan untuk melihat pengaruh frekuensi *Doppler* terhadap kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA*. Simulasi dilakukan dengan variasi frekuensi *Doppler* 10 Hz, 32 Hz, dan 97 Hz sedangkan jumlah *user* yang digunakan tetap (jumlah *user* = 2).



Gambar 4.3 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA* dengan Variasi Frekuensi *Doppler*

Gambar 4.3 memperlihatkan pengaruh frekuensi *Doppler* terhadap kinerja sistem. Semakin besar frekuensi *Doppler* maka nilai BER sistem akan semakin besar. Besarnya nilai frekuensi *Doppler* dipengaruhi oleh kecepatan gerak dari pengirim dan penerima. Semakin besar kecepatan gerak antara pengirim dan penerima, maka pergeseran frekuensi *Doppler* (*Doppler shift*) akan semakin besar. Perbedaan frekuensi ini menyebabkan perbedaan frekuensi untuk mensampling data pada sisi penerima. Sehingga data hasil demodulasi pada sisi penerima akan berbeda dengan data yang dikirimkan, yang akan menyebabkan nilai BER semakin besar.

Tabel 4.4 Data Hasil Simulasi *Block* FDMA Berdasarkan Variasi Frekuensi *Doppler*

Frekuensi <i>Doppler</i> (F_d)	BER ($E_s/N_o = 5$ dB)
10 Hz	$2,9 \cdot 10^{-3}$
32 Hz	$4,4 \cdot 10^{-3}$
97 Hz	$5,9 \cdot 10^{-3}$

4.2 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA

Pada sistem MIMO OFDM-FDMA dengan alokasi *subcarrier Block* FDMA, *user* dialokasikan pada *subcarrier* secara berselang-seling (*interlaced*).

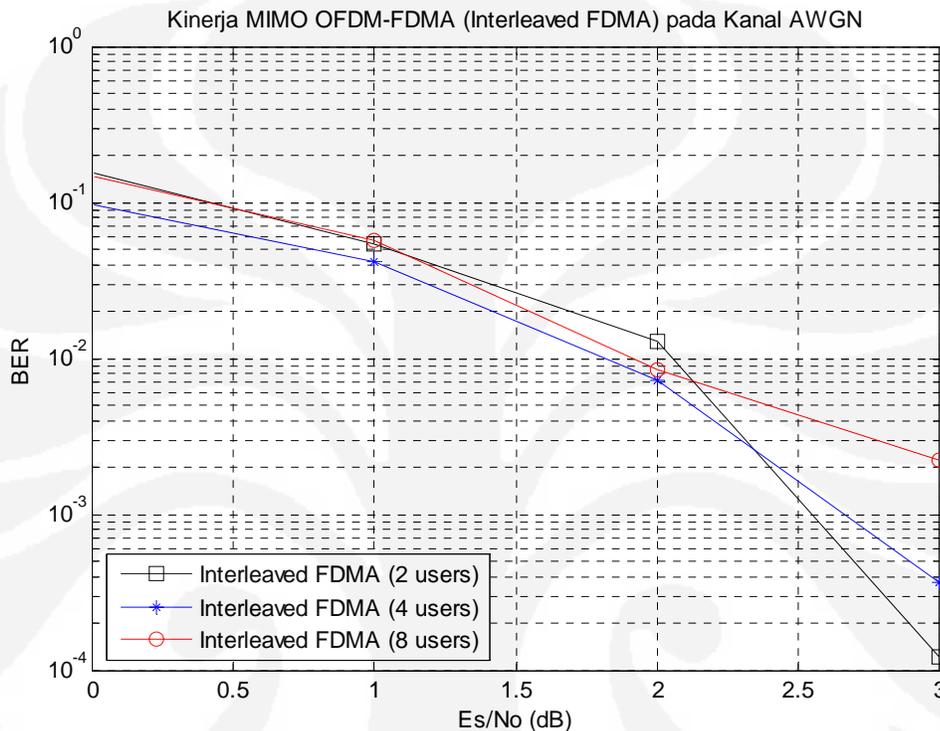
4.2.1 Simulasi Berdasarkan Jumlah *User*

Simulasi ini dilakukan untuk menunjukkan kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA berdasarkan jumlah *user* yang berbeda-beda. Variasi jumlah *user* yang disimulasikan adalah 2, 4, dan 8 pada kanal AWGN dan kanal *Rayleigh Fading*.

4.2.1.1 Kanal AWGN

Hasil simulasi kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA berdasarkan variasi jumlah *user* pada kanal AWGN dapat dilihat pada gambar 4.4 dan tabel 4.5. Gambar 4.4 memperlihatkan kinerja sistem yang relatif sama untuk jumlah *user* yang berbeda-beda. Perbedaan kinerja sistem yang dipengaruhi oleh jumlah *user* baru terlihat setelah $E_s/N_o = 2$ dB. Pada $E_s/N_o = 3$ dB perbedaan

antara nilai BER 2 *user* dengan 4 *user* tidak terlalu besar, yaitu $1,2 \cdot 10^{-4}$ dan $3,7 \cdot 10^{-4}$. Perbedaan nilai BER yang cukup besar terjadi antara 4 *user* dengan 8 *user*, dimana BER 8 *user* meningkat menjadi $2,2 \cdot 10^{-3}$.



Gambar 4.4 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA pada Kanal AWGN

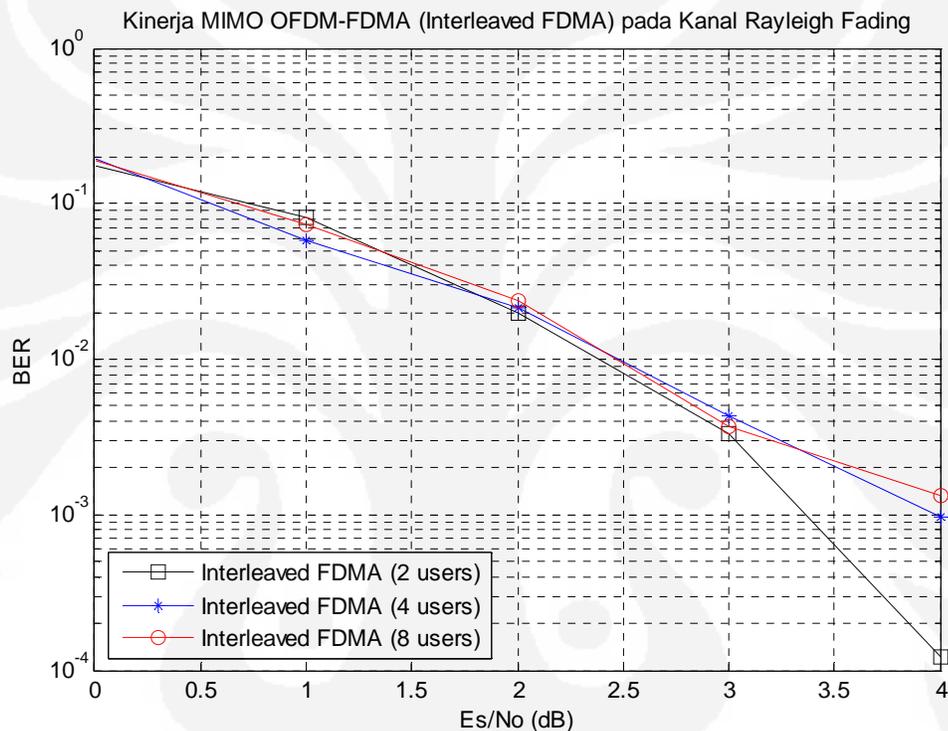
Tabel 4.5 Data Hasil Simulasi *Interleaved* FDMA Kanal AWGN

Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_o = 3$ dB)
2	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4	$3,7 \cdot 10^{-4}$
8	$2,2 \cdot 10^{-3}$

4.2.1.2 Kanal *Rayleigh Fading*

Simulasi dilakukan untuk melihat pengaruh jumlah *user* terhadap kinerja sistem MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading*. Sistem disimulasikan dengan jumlah *user* yang bervariasi yaitu: 2, 4, dan 8 menggunakan kanal *Rayleigh Fading* pada frekuensi *Doppler* (F_d) = 10 Hz, F_c = 3,5 GHz dan *user* bergerak dengan kecepatan $v = 3$ km/jam.

Pada gambar 4.5 dapat dilihat hasil dari simulasi kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved FDMA* berdasarkan variasi jumlah *user* pada kanal *Rayleigh Fading*. Hasil simulasi memperlihatkan perbedaan kinerja yang cukup besar antara *Interleaved FDMA* (2 *user*) dan *Interleaved FDMA* (4 *user*) baru terjadi setelah $E_s/N_0 > 3$ dB. Perbedaan kinerja yang terjadi antara *Interleaved FDMA* (4 *user*) dan *Interleaved FDMA* (8 *user*) tidak terlalu besar.



Gambar 4.5 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved FDMA* pada Kanal *Rayleigh Fading*

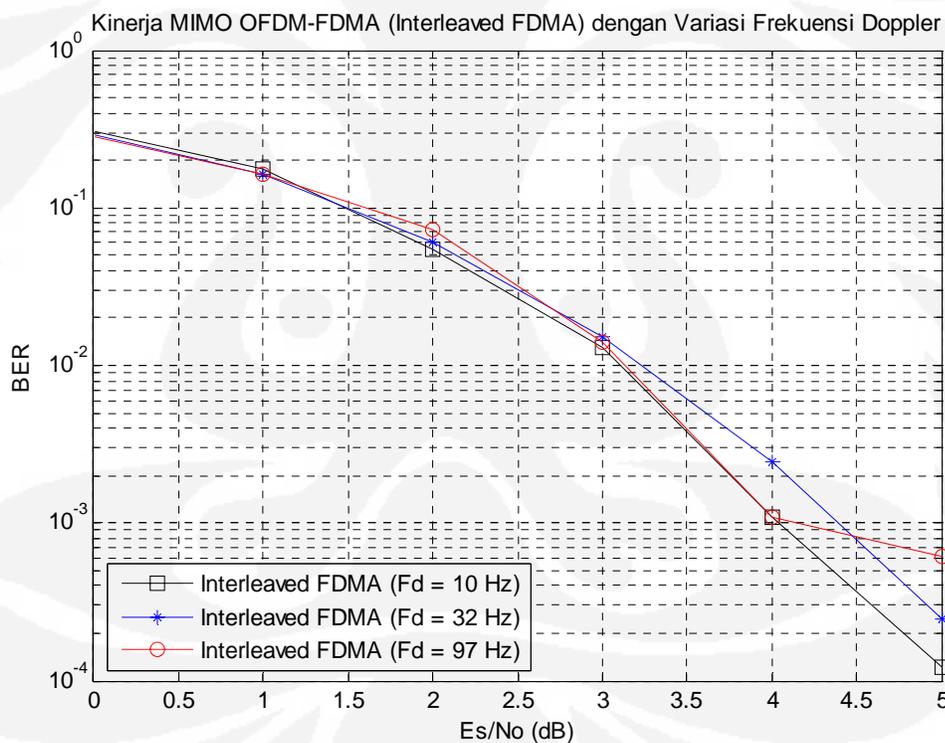
Dari tabel 4.6 diperoleh bahwa pada saat $E_s/N_0 = 4$ dB, jumlah *user* yang semakin banyak menyebabkan nilai BER sistem akan semakin besar. Hasil ini membuktikan bahwa jumlah *user* berpengaruh pada kinerja dari sistem, peningkatan jumlah *user* diikuti dengan peningkatan nilai BER sistem. Hal ini berarti peningkatan jumlah user berakibat penurunan kinerja sistem yang ditandai dengan nilai BER yang semakin besar.

Tabel 4.6 Data Hasil Simulasi *Interleaved* FDMA Kanal *Rayleigh Fading*

Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_o = 4$ dB)
2	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4	$9,8 \cdot 10^{-4}$
8	$1,3 \cdot 10^{-3}$

4.2.2 Simulasi Berdasarkan Frekuensi *Doppler*

Pada sistem MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA dilakukan simulasi untuk menunjukkan pengaruh frekuensi *Doppler* terhadap kinerja dari sistem. Jumlah *user* yang sama digunakan untuk frekuensi *Doppler* yang berbeda, yaitu: 2 *user*. Variasi frekuensi *Doppler* yang digunakan pada simulasi adalah 10 Hz, 32 Hz dan 97 Hz.

Gambar 4.6 Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA dengan Variasi Frekuensi *Doppler*

Pada gambar 4.6 dan tabel 4.7 dapat dilihat hasil simulasi dari sistem. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan bergerak dari *user* yang

mengakibatkan semakin besar pergeseran dari frekuensi *Doppler*. Pergeseran frekuensi *Doppler* yang semakin besar menyebabkan kinerja dari sistem MIMO OFDM-FDMA *Interleaved FDMA* semakin menurun.

Tabel 4.7 Data Hasil Simulasi *Interleaved FDMA* Berdasarkan Variasi Frekuensi *Doppler*

Frekuensi <i>Doppler</i> (F_d)	BER ($E_s/N_o = 5$ dB)
10 Hz	$1,2 \cdot 10^{-4}$
32 Hz	$2,4 \cdot 10^{-4}$
97 Hz	$6,1 \cdot 10^{-4}$

4.3 Perbandingan Kinerja MIMO OFDM-FDMA *Block FDMA* dengan MIMO OFDM-FDMA *Interleaved FDMA*

Simulasi dilakukan untuk membandingkan kinerja MIMO OFDM-FDMA yang menggunakan teknik alokasi yang berbeda. Dari hasil simulasi dapat diketahui teknik alokasi *subcarrier* yang mempunyai kinerja yang lebih baik. Simulasi dilakukan dengan jumlah *user* dan frekuensi *Doppler* yang bervariasi.

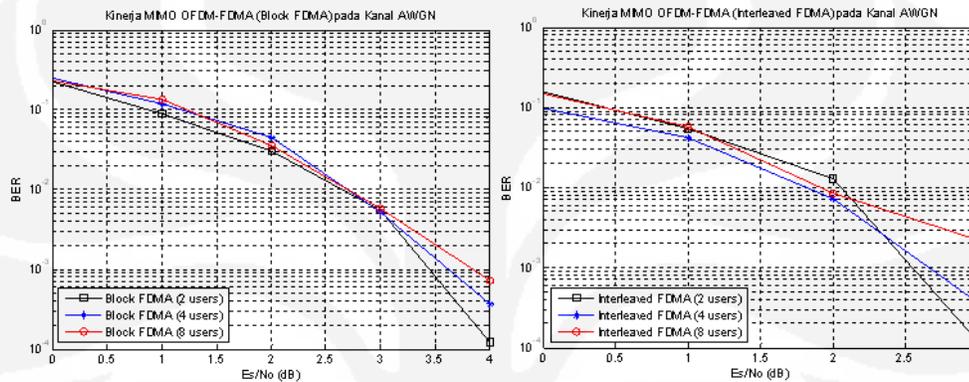
4.3.1 Simulasi Berdasarkan Jumlah *User*

Pada bagian ini simulasi dilakukan untuk mengetahui kinerja teknik alokasi *subcarrier Block FDMA* dan *Interleaved FDMA*, dengan jumlah *user* yang bervariasi. Jumlah *user* yang digunakan pada simulasi adalah 2, 4, dan 8 *user*.

4.3.1.1 Kanal AWGN

Gambar 4.7 memperlihatkan hasil simulasi dari *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA* pada kanal AWGN. Hasil simulasi pada tabel 4.8 menunjukkan nilai BER sistem dengan teknik *Interleaved FDMA* lebih kecil dari teknik *Block FDMA*, yang berarti kinerja sistem dengan teknik *Interleaved FDMA* lebih baik dari teknik *Block FDMA*. Hal ini disebabkan, karena teknik *Interleaved FDMA* mengalokasikan data *user* secara berselang-seling (*interlaced*) pada *subcarrier*. Akibatnya jika terjadi gangguan (*deep fade*) yang menyebabkan hilangnya sinyal pada kelompok *subcarrier* tertentu, hanya sebahagian kecil data

dari *user* yang terpengaruh. Data yang rusak dapat diperbaiki dengan teknik pengkodean. Sedangkan jika gangguan (*deep fade*) terjadi pada kelompok *subcarrier* yang menggunakan teknik *Block FDMA*, maka sebagian besar data dari *user* pada kelompok/grup itu terpengaruh. Data yang rusak sulit diperbaiki dengan teknik pengkodean.



Gambar 4.7 Perbandingan Kinerja *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA* pada kanal AWGN

Tabel 4.8 Data Hasil Simulasi Perbandingan *Block* dan *Interleaved FDMA* Kanal AWGN

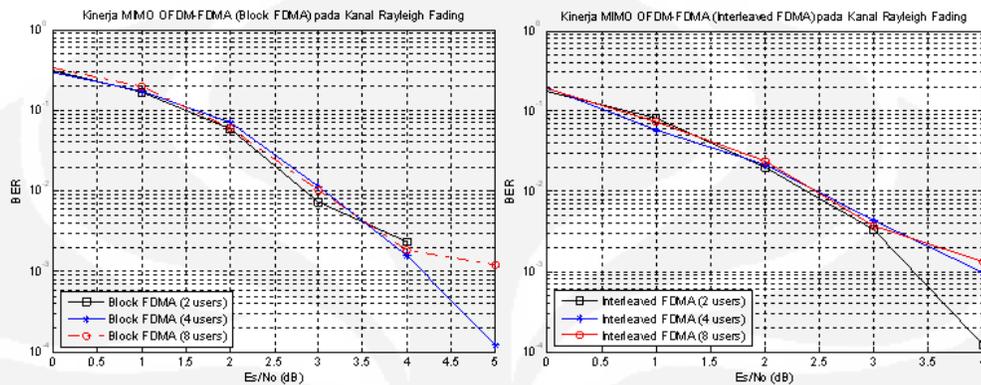
Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_0 = 3$ dB)	
	<i>Block FDMA</i>	<i>Interleaved FDMA</i>
2	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
8	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa pada sistem dengan teknik *Block FDMA* terjadi penurunan kinerja sebesar $\pm 0,8$ dB untuk 2 *user* dan ± 1 dB untuk 4 *user* jika dibandingkan dengan teknik *Interleaved FDMA* pada $BER = 10^{-3}$. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja sistem dengan teknik *Interleaved FDMA* lebih baik dari teknik *Block FDMA* pada kanal AWGN.

4.3.1.2 Kanal *Rayleigh Fading*

Hasil simulasi untuk membandingkan kinerja sistem yang menggunakan teknik *Block FDMA* dengan teknik *Interleaved FDMA* dapat dilihat pada gambar 4.8. Terdapat perbedaan pada kinerja sistem kedua teknik, pada teknik *Interleaved FDMA* terjadi peningkatan kinerja $\pm 0,9$ dB untuk 2 *user* dan

peningkatan kinerja $\pm 1,1$ dB untuk 4 *user* pada $BER = 10^{-3}$. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kinerja sistem dengan teknik *Interleaved* FDMA lebih baik dari teknik *Block* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading*.



Gambar 4.8 Perbandingan Kinerja *Block* FDMA dan *Interleaved* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading*

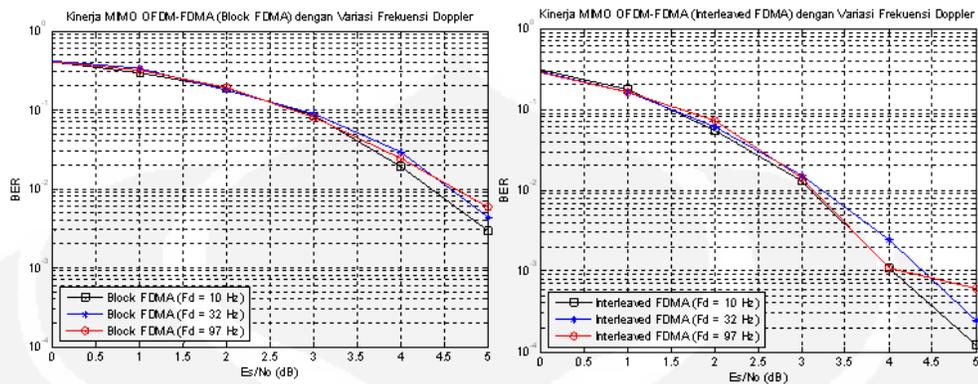
Dari data pada tabel 4.9 dapat dilihat bahwa nilai BER teknik *Interleaved* FDMA lebih kecil dibandingkan teknik *Block* FDMA untuk nilai $E_s/N_0 = 4$ dB. Semakin kecil nilai BER dari suatu sistem, maka semakin baik kinerja dari sistem tersebut.

Tabel 4.9 Data Hasil Simulasi Perbandingan *Block* dan *Interleaved* FDMA Kanal *Rayleigh Fading*

Jumlah <i>User</i>	BER ($E_s/N_0 = 4$ dB)	
	<i>Block</i> FDMA	<i>Interleaved</i> FDMA
2	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$
8	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

4.3.2 Simulasi Berdasarkan Frekuensi *Doppler*

Pada bagian ini disimulasi dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem yang menggunakan teknik *Block* FDMA dengan teknik *Interleaved* FDMA berdasarkan variasi pada frekuensi *Doppler*. Variasi frekuensi *Doppler* yang disimulasikan yaitu: 10 Hz, 32 Hz dan 97 Hz dengan jumlah *user* 2 untuk masing-masing teknik alokasi *subcarrier*.



Gambar 4.9 Perbandingan Kinerja *Block FDMA* dan *Interleaved FDMA* dengan Variasi Frekuensi *Doppler*

Hasil simulasi pada gambar 4.9 dan tabel 4.10 dapat dilihat bahwa frekuensi *Doppler* mempengaruhi kinerja dari sistem. Semakin tinggi frekuensi *Doppler* mengakibatkan semakin buruk kinerja yang dihasilkan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan nilai BER semakin besar untuk frekuensi *Doppler* yang semakin tinggi pada kedua teknik alokasi *subcarrier*. Nilai BER semakin besar terjadi akibat pergeseran frekuensi *Doppler* pada kanal yang semakin besar, sehingga *bit error* yang terjadi pada sisi penerima semakin banyak.

Tabel 4.10 Data Hasil Simulasi Perbandingan *Block* dan *Interleaved FDMA* dengan Variasi Frekuensi *Doppler*

Frekuensi <i>Doppler</i> (<i>F_d</i>)	BER (<i>E_s/N_o</i> = 5 dB)	
	<i>Block FDMA</i>	<i>Interleaved FDMA</i>
10 Hz	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
32 Hz	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
97 Hz	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$

Tabel 4.10 memperlihatkan kinerja yang lebih baik pada sistem yang menggunakan teknik *Interleaved FDMA* dibandingkan teknik *Block FDMA*. Kinerja yang lebih baik ditunjukkan dengan nilai BER teknik *Interleaved FDMA* lebih kecil dari nilai BER teknik *Block FDMA*. Pada teknik *Interleaved FDMA* terjadi peningkatan kinerja $\pm 1,3$ dB dibandingkan teknik *Block FDMA* pada BER = 10^{-2} .

BAB 5

KESIMPULAN

Dari hasil penyusunan skripsi yang telah dilakukan, maka didapat beberapa kesimpulan yang berhubungan dengan simulasi dan analisa kinerja sistem MIMO OFDM-FDMA berdasarkan alokasi *subcarrier Block* FDMA dan *Interleaved* FDMA, sebagai berikut:

1. Jumlah *user* mempengaruhi kinerja MIMO OFDM-FDMA dengan teknik alokasi *subcarrier Block* FDMA maupun *Interleaved* FDMA, semakin banyak jumlah *user* kinerja sistem semakin memburuk yang ditandai dengan nilai BER pada penerima yang semakin besar.
2. Pergerakan *user* yang semakin cepat menyebabkan frekuensi *Doppler* yang semakin tinggi. Semakin tinggi frekuensi *Doppler* pada kanal, maka kinerja sistem dengan teknik alokasi *subcarrier Block* FDMA maupun *Interleaved* FDMA akan semakin menurun.
3. Pada kanal AWGN kinerja sistem dengan teknik alokasi *subcarrier Interleaved* FDMA menunjukkan kinerja yang lebih baik dari *Block* FDMA dengan peningkatan kinerja sebesar $\pm 0,8$ dB untuk 2 *user* dan ± 1 dB untuk 4 *user* pada BER = 10^{-3} .
4. Peningkatan kinerja sistem dengan teknik alokasi *subcarrier Interleaved* FDMA dibandingkan *Block* FDMA pada kanal *Rayleigh Fading* adalah sebesar $\pm 0,9$ dB untuk 2 *user* dan $\pm 1,1$ dB untuk 4 *user* pada BER = 10^{-3} .
5. Pada teknik *Interleaved* FDMA terjadi peningkatan kinerja $\pm 1,3$ dB dibandingkan teknik *Block* FDMA pada BER = 10^{-2} untuk sistem pada kanal *Rayleigh Fading* dengan variasi frekuensi *Doppler*.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Andrews, J.G., Ghosh, A., Muhamed, R., **“Fundamentals of WiMAX”**, Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.
- [2] Uma Shanker Jha and Ramjee Prasad, **“OFDM Towards Fixed and Mobile Broadband Wireless Access”**, Artech House, Inc., London, 2007.
- [3] **“The Non-Engineer’s Introduction to MIMO and MIMO-OFDM”**, <http://www.mimo.ucla.edu>.
- [4] Charan Langton, **“Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Tutorial”**, Intuitive Guide to Principles of Communications, 2004.
- [5] Pejman Roshan, Jonathan Leary, **“802.11 Wireless LAN Fundamentals”**, Cisco Press, Indianapolis, 2003.
- [6] Alexis Dowhuszko, **“Multiple Access Schemes for OFDM”**, Helsinki University of Technology, 2006.
- [7] Ilan Hen, **“MIMO Architecture for Wireless Communication”**, in *Intel Technology Journal*, vol.10, issue02, May 2006.
- [8] Rohde and Schwarz, **“Introduction to MIMO Systems”**, Munchen, 2006.
- [9] S.M. Alamouti, **“A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication”**, in *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, vol.16, No.8, October 1998.
- [10] K Sam Shanmugam, **“Digital and Analog Communications System”**, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 1979.
- [11] Stavroulakis, Peter, **“Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems”**, Artech House, Inc., London, 2003.
- [12] Matthias Patzold, **“Mobile Fading Channels”**, John Wiley & Sons, Ltd., 2002.

LAMPIRAN

Lampiran A: Source Code MIMO OFDM-FDMA *Block* FDMA

```
%=====
%   SIMULASI DAN ANALISA KINERJA SISTEM MIMO OFDM-FDMA
%   BERDASARKAN ALOKASI SUBCARRIER
%   Oleh: Kiki Syahgustina
%   NPM: 0706199514
%   Pembimbing: Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo DEA
%=====

% inisialisasi
clear all;
close all;
clc;
ber1 = 0;           % ber untuk user 1
ber2 = 0;           % ber untuk user 2

% parameter OFDM
Nc = 128;           % jumlah total subcarrier/jumlah point FFT
Ns = Nc/8;          % jumlah total simbol per subcarrier
Nd = Nc-Ns;         % jumlah total data subcarrier
GI = 1/8;           % rasio cyclic prefix
CP = 1/8*Nc;        % panjang cyclic prefix
coderate = 1/2;
k = 2;              % level modulasi QPSK
jumlah_user = [3]; % jumlah user

% parameter MIMO
mimo = '2x2';       % mimo 2x2
Ntx = 2;
Nrx = 2;

EbNoi = 0 : 0.5 : 2.5;
EsNoi = 2 * EbNoi;
Fc = 3.5e9;         % frekuensi carrier (Hz)
c = 3e8;            % m/s
v = 3;              % kecepatan penerima (km/jam)
Fd = round(v*Fc/(3.6*c)); % frekuensi doppler (Hz)
fs = 28e3;
fc = 3e4;
tsamp = 1/(fs);
tsym = 8*tsamp;
nsamp = tsym/tsamp;
bbb = 10*log10(nsamp);
ch = rayleighchan(tsamp,Fd,1e-7*[0 0.2 0.4],[-3.98 -3.01 0]);
ch.ResetBeforeFiltering = 0;
```

```

for aaa = 1 : length(EsNoi)
    EsNo = EsNoi(aaa)

%=====
% TRANSMITTER
%=====

    jumlah_user = 2;           % jumlah user

%===== User 1 =====
% Generate Input
    data_user1 = randint(1,Nc*Ns*k./jumlah_user);

% Convolution Encoder
    tb = 20;
    trellis = poly2trellis(7,[171 133]);      %define trellis
    code1 = convenc(data_user1,trellis);

% Interleaver
    data1 = interleaver(code1);

% Mapping Simbol (Modulasi)
    [qpsk_I,qpsk_Q] = qpsk_map(data1);
    chan_I1 = qpsk_I;
    chan_Q1 = qpsk_Q;

% Serial to Parallel
    a1 = length(chan_I1)/(Nc/jumlah_user);
    chan_I11 = reshape(chan_I1,Nc/jumlah_user,a1);
    chan_Q11 = reshape(chan_Q1,Nc/jumlah_user,a1);

%===== User 2 =====
% Generate Input
    data_user2 = randint(1,Nc*Ns*k./jumlah_user);

% Convolution Encoder
    tb = 20;
    trellis = poly2trellis(7,[171 133]);      %define trellis
    code2 = convenc(data_user2,trellis);

% Interleaver
    data2 = interleaver(code2);

% Mapping Simbol (Modulasi)
    [qpsk_I,qpsk_Q] = qpsk_map(data2);
    chan_I2 = qpsk_I;
    chan_Q2 = qpsk_Q;

% Serial to Parallel
    a2 = length(chan_I2)/(Nc/jumlah_user);
    chan_I12 = reshape(chan_I2,Nc/jumlah_user,a2);
    chan_Q12 = reshape(chan_Q2,Nc/jumlah_user,a2);

```

```

%=====Alokasi Subcarrier Block FDMA=====
chan_I = [chan_I11;chan_I12];
chan_Q = [chan_Q11;chan_Q12];

%=====

% IFFT
data_mess = chan_I+chan_Q.*j;
data_ifft = ifft(data_mess,Nc);

% Menambahkan Cyclic Prefix

data_prefix = [data_ifft(Nc-CP+1:Nc,:);data_ifft];

% Parallel to Serial
data_out = reshape(data_prefix,1,(Nc+CP)*a1);

% Alamouti encoder
for ii = 1:2:length(data_out)
    mes1(ii) = data_out(ii);
    mes1(ii+1) = -1*(conj(data_out(ii+1)));
    mes2(ii) = data_out(ii+1);
    mes2(ii+1) = conj(data_out(ii));
end

% Antena Tx1
tx1 = mes1;

% Antena Tx2
tx2 = mes2;

%=====
% KANAL RAYLEIGH FADING
%=====

snr = EsNo+10*log10(k*2)-bbb;
tx = [tx1,tx2];
txx = tx(:);
rx = awgn(txx,snr,'measured');

ch = rayleighchan(1/(28e3),Fd,1e-7*[0 0.2 0.4],[-3.98 -3.01 0]);
ch.ResetBeforeFiltering = 0;
fad = abs(filter(ch,ones(size(rx))));
fadedSig = fad.*rx;
fadedSig = reshape(fadedSig,4608,[]);

rx1 = fadedSig(:,1);
rx1 = reshape(rx1,1,[]);

rx2 = fadedSig(:,2);
rx2 = reshape(rx2,1,[]);

```

```

%=====
% RECEIVER
%=====

% Alamouti decoder
L = length(rx1);
for iii = 1:2:L;
    s1(iii) = rx1(iii);
    s1(iii+1) = conj(-1*rx1(iii+1));
    s2(iii) = conj(rx2(iii+1));
    s2(iii+1)=rx2(iii);
end
out1 = s1;
out2 = s2;
out = 0.5*(out1+out2);

% Serial to Parallel
b = length(out)/(Nc+CP);
hasil = reshape(out,(Nc+CP),b);

% Menghilangkan Cyclic Prefix
out_prefix = hasil(CP+1:(Nc+CP),:);

% FFT
out_fft = fft(out_prefix,Nc);
buff_I = real(out_fft);
buff_Q = imag(out_fft);

%=====Realokasi Subcarrier Block FDMA=====
%===== User 1 =====

buff_I11 = buff_I(1:Nc./jumlah_user,:);
buff_Q11 = buff_Q(1:Nc./jumlah_user,:);

% Parallel to Serial
buff_I1 = reshape(buff_I11,1,Nc/jumlah_user*a1);
buff_Q1 = reshape(buff_Q11,1,Nc/jumlah_user*a1);

% Demapping Simbol (Demodulasi)
output_mapping1 = detector_qpsk(buff_I1,buff_Q1);
output_mapping1 = output_mapping1';

% Deinterleaver
output1 = deinterleaver(output_mapping1);

% Convolutional Decoding
decoded1 = vitdec(output1,trellis,tb,'cont','hard');
decoded11 = decoded1(tb+1:end);
decoded11 = decoded11(:);
output11 = data_user1((length(data_user1)-tb+1):end);
output_decoded1 = [decoded11;output11(:)];

% Data Output
data_output1 = output_decoded1;

```

```

        data_output1 = data_output1';
%===== User 2 =====%

    buff_I12 = buff_I(Nc/2+1:Nc,:);
    buff_Q12 = buff_Q(Nc/2+1:Nc,:);

    % Parallel to Serial
        buff_I2 = reshape(buff_I12,1,Nc/jumlah_user*a2);
        buff_Q2 = reshape(buff_Q12,1,Nc/jumlah_user*a2);

    % Demapping Simbol (Demodulasi)
        output_mapping2 = detector_qpsk(buff_I2,buff_Q2);
        output_mapping2 = output_mapping2';

    % Deinterleaver
        output2 = deinterleaver(output_mapping2);

    % Convolutional Decoding
        decoded2 = vitdec(output2,trellis,tb,'cont','hard');
        decoded12 = decoded2(tb+1:end);
        decoded12 = decoded12(:);
        output12 = data_user2((length(data_user2)-tb+1):end);
        output_decoded2 = [decoded12;output12(:)];

    % Data Output
        data_output2 = output_decoded2;
        data_output2 = data_output2';

%=====Menghitung BER=====%

    noe_1 = sum(abs(data_output1-data_user1));
    nod_1 = length(data_user1);
    ber_temp1 = noe_1/nod_1;
    ber1 = [ber1 ber_temp1];

    noe_2 = sum(abs(data_output2-data_user2));
    nod_2 = length(data_user2);
    ber_temp2 = noe_2/nod_2;
    ber2 = [ber2 ber_temp2];

    ber_averagel = (ber1 + ber2)./(jumlah_user);

    jumlah_user = [];

%=====

end

figure(2)

% Grafik BER vs EsNo rata-rata untuk seluruh user%
    ber_output1 = ber_averagel(2:length(ber_averagel));
    semilogy(EsNoi,ber_output1,'-g+','-.ro');
    hold on

```

```
grid on
title ('Kinerja MIMO OFDM-FDMA (Block FDMA) pada Kanal Rayleigh
Fading');
xlabel('Es/No (dB)');
ylabel('BER');
h = legend('Block FDMA (2 users)',3);
set(h,'Interpreter','none');
```



Lampiran B: Source Code MIMO OFDM-FDMA *Interleaved* FDMA

```

%=====
%   SIMULASI DAN ANALISA KINERJA SISTEM MIMO OFDM-FDMA
%   BERDASARKAN ALOKASI SUBCARRIER
%   Oleh: Kiki Syahgustina
%   NPM: 0706199514
%   Pembimbing: Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo DEA
%=====

% inisialisasi
clear all;
close all;
clc;
ber1 = 0;           % ber untuk user 1
ber2 = 0;           % ber untuk user 2

% parameter OFDM
Nc = 128;           % jumlah total subcarrier/jumlah point FFT
Ns = Nc/8;          % jumlah total simbol per subcarrier
Nd = Nc-Ns;         % jumlah total data subcarrier
GI = 1/8;           % rasio cyclic prefix
CP = 1/8*Nc;        % panjang cyclic prefix
coderate = 1/2;
k = 2;              % level modulasi QPSK
jumlah_user = [3]; % jumlah user

% parameter MIMO
mimo = '2x2';       % mimo 2x2
Ntx = 2;
Nrx = 2;

EbNoi = 0 : 0.5 : 2.5;
EsNoi = 2 * EbNoi;
Fc = 3.5e9;         % frekuensi carrier (Hz)
c = 3e8;            % m/s
v = 3;             % kecepatan penerima (km/jam)
Fd = round(v*Fc/(3.6*c)); % frekuensi doppler (Hz)
fs = 28e3;
fc = 3e4;
tsamp = 1/(fs);
tsym = 8*tsamp;
nsamp = tsym/tsamp;
bbb = 10*log10(nsamp);
ch = rayleighchan(tsamp,Fd,1e-7*[0 0.2 0.4],[-3.98 -3.01 0]);
ch.ResetBeforeFiltering = 0;

for aaa = 1 : length(EsNoi)
    EsNo = EsNoi(aaa)

```

```

%=====
% TRANSMITTER
%=====

jumlah_user = 2;           % jumlah user

%===== User 1 =====

% Generate Input
data_user1 = randint(1,Nc*Ns*k./jumlah_user);

% Convolution Encoder
tb = 20;
trellis = poly2trellis(7,[171 133]);           %define trellis
code1 = convenc(data_user1,trellis);

% Interleaver
data1 = interleaver(code1);

% Mapping Simbol (Modulasi)
[qpsk_I,qpsk_Q] = qpsk_map(data1);
chan_I1 = qpsk_I;
chan_Q1 = qpsk_Q;

% Serial to Parallel
a1 = length(chan_I1)/(Nc/jumlah_user);
chan_I11 = reshape(chan_I1,Nc/jumlah_user,a1);
chan_Q11 = reshape(chan_Q1,Nc/jumlah_user,a1);

%===== User 2 =====

% Generate Input
data_user2 = randint(1,Nc*Ns*k./jumlah_user);

% Convolution Encoder
tb = 20;
trellis = poly2trellis(7,[171 133]);           %define trellis
code2 = convenc(data_user2,trellis);

% Interleaver
data2 = interleaver(code2);

% Mapping Simbol (Modulasi)
[qpsk_I,qpsk_Q] = qpsk_map(data2);
chan_I2 = qpsk_I;
chan_Q2 = qpsk_Q;

% Serial to Parallel
a2 = length(chan_I2)/(Nc/jumlah_user);
chan_I12 = reshape(chan_I2,Nc/jumlah_user,a2);
chan_Q12 = reshape(chan_Q2,Nc/jumlah_user,a2);

chanI = [chan_I11;chan_I12];
chanQ = [chan_Q11;chan_Q12];

```

```

%=====Alokasi Subcarrier Interleaved FDMA=====

N = 2*Ns;
[chan_I,chan_Q] = interleaved(chanI,chanQ,Nc,N,jumlah_user);

%=====

% IFFT
data_mess = chan_I+chan_Q.*j;
data_ifft = ifft(data_mess,Nc);

% Menambahkan Cyclic Prefix

data_prefix = [data_ifft(Nc-CP+1:Nc,:);data_ifft];

% Parallel to Serial
data_out = reshape(data_prefix,1,(Nc+CP)*a1);

% Alamouti encoder
for ii = 1:2:length(data_out)
    mes1(ii) = data_out(ii);
    mes1(ii+1) = -1*(conj(data_out(ii+1)));
    mes2(ii) = data_out(ii+1);
    mes2(ii+1) = conj(data_out(ii));
end

% Antena Tx1
tx1 = mes1;

% Antena Tx2
tx2 = mes2;

%=====
% KANAL RAYLEIGH FADING
%=====

snr = EsNo+10*log10(k*2)-bbb;
tx = [tx1,tx2];
txx = tx(:);
rx = awgn(txx,snr,'measured');

ch =rayleighchan(1/(28e3),Fd,1e-7*[0 0.2 0.4],[-3.98 -3.01 0]);
ch.ResetBeforeFiltering = 0;
fad = abs(filter(ch, ones(size(rx))));
fadedSig = fad.*rx;
fadedSig = reshape(fadedSig,4608,[]);

rx1 = fadedSig(:,1);
rx1 = reshape(rx1,1,[]);

rx2 = fadedSig(:,2);
rx2 = reshape(rx2,1,[]);

```

```

%=====
% RECEIVER
%=====

% Alamouti decoder
L = length(rx1);
for iii = 1:2:L;
    s1(iii) = rx1(iii);
    s1(iii+1) = conj(-1*rx1(iii+1));
    s2(iii) = conj(rx2(iii+1));
    s2(iii+1)=rx2(iii);
end
out1 = s1;
out2 = s2;
out = 0.5*(out1+out2);

% Serial to Parallel
b = length(out)/(Nc+CP);
hasil = reshape(out,(Nc+CP),b);

% Menghilangkan Cyclic Prefix
out_prefix = hasil(CP+1:(Nc+CP),:);

% FFT
out_fft = fft(out_prefix,Nc);
buff_I = real(out_fft);
buff_Q = imag(out_fft);

%=====Relokasi Subcarrier Interleaved FDMA =====
[buffI,buffQ] = deinterleaved(buff_I,buff_Q,Nc,N,jumlah_user);

%===== User 1 =====

buff_I11 = buffI(1:Nc./jumlah_user,:);
buff_Q11 = buffQ(1:Nc./jumlah_user,:);

% Parallel to Serial
buff_I1 = reshape(buff_I11,1,Nc/jumlah_user*a1);
buff_Q1 = reshape(buff_Q11,1,Nc/jumlah_user*a1);

% Demapping Simbol (Demodulasi)
output_mapping1 = detector_qpsk(buff_I1,buff_Q1);
output_mapping1 = output_mapping1';

% Deinterleaver
output1 = deinterleaver(output_mapping1);

% Convolutional Decoding
decoded1 = vitdec(output1,trellis,tb,'cont','hard');
decoded11 = decoded1(tb+1:end);
decoded11 = decoded11(:);
output11 = data_user1((length(data_user1)-tb+1):end);
output_decoded1 = [decoded11;output11(:)];

```

```

% Data Output
    data_output1 = output_decoded1;
    data_output1 = data_output1';

%===== User 2 =====%

    buff_I12 = buffI(Nc/2+1:Nc,:);
    buff_Q12 = buffQ(Nc/2+1:Nc,:);

% Parallel to Serial
    buff_I2 = reshape(buff_I12,1,Nc/jumlah_user*a2);
    buff_Q2 = reshape(buff_Q12,1,Nc/jumlah_user*a2);

% Demapping Simbol (Demodulasi)
    output_mapping2 = detector_qpsk(buff_I2,buff_Q2);
    output_mapping2 = output_mapping2';

% Deinterleaver
    output2 = deinterleaver(output_mapping2);

% Convolutional Decoding
    decoded2 = vitdec(output2,trellis,tb,'cont','hard');
    decoded12 = decoded2(tb+1:end);
    decoded12 = decoded12(:);
    output12 = data_user2((length(data_user2)-tb+1):end);
    output_decoded2 = [decoded12;output12(:)];

% Data Output
    data_output2 = output_decoded2;
    data_output2 = data_output2';

%=====Menghitung BER=====%

    noe_1 = sum(abs(data_output1-data_user1));
    nod_1 = length(data_user1);
    ber_temp1 = noe_1/nod_1;
    ber1 = [ber1 ber_temp1];

    noe_2 = sum(abs(data_output2-data_user2));
    nod_2 = length(data_user2);
    ber_temp2 = noe_2/nod_2;
    ber2 = [ber2 ber_temp2];

    ber_averagel = (ber1 + ber2)./(jumlah_user);

    jumlah_user = [];

%=====
end

```

```
figure(2)

% Grafik BER vs EsNo rata-rata untuk seluruh user%
ber_output1 = ber_averagel(2:length(ber_averagel));
semilogy(EsNoi,ber_output1,'-g+',);
hold on
grid on

title ('Kinerja MIMO OFDM-FDMA (Interleaved FDMA) pada Kanal
Rayleigh Fading');
xlabel('Es/No (dB)');
ylabel('BER');
h = legend('Interleaved FDMA (2 users)',3);
set(h,'Interpreter','none');
```

Lampiran C: Fungsi-fungsi yang Digunakan

1. Fungsi *Interleaver*

```
function [codenn] = interleaver(source)
% interleaver
coden = reshape(source,8,[]);
coden1 = coden(1,:);
coden1 = coden1(:);
coden2 = coden(2,:);
coden2 = coden2(:);
coden3 = coden(3,:);
coden3 = coden3(:);
coden4 = coden(4,:);
coden4 = coden4(:);
coden5 = coden(5,:);
coden5 = coden5(:);
coden6 = coden(6,:);
coden6 = coden6(:);
coden7 = coden(7,:);
coden7 = coden7(:);
coden8 = coden(8,:);
coden8 = coden8(:);
codenn =
[coden1;coden2;coden3;coden4;coden5;coden6;coden7;coden8];
end
```

2. Fungsi Modulasi QPSK

```
function [Ich,Qch]=qpsk_map(bit_source)
len=length(bit_source);
block=floor(len/2);
for i=1:block
    if (bit_source(2*i-1)==0 & bit_source(2*i)==0)
        qam_symbol(i)=1+j;
    elseif (bit_source(2*i-1)==0 & bit_source(2*i)==1)
        qam_symbol(i)=1-j;
    elseif (bit_source(2*i-1)==1 & bit_source(2*i)==0)
        qam_symbol(i)=-1+j;
    elseif (bit_source(2*i-1)==1 & bit_source(2*i)==1)
        qam_symbol(i)=-1-j;
    end
end
Ich=real(qam_symbol)/sqrt(2);
Qch=imag(qam_symbol)/sqrt(2);
```

3. Fungsi Alokasi *Interleaved* FDMA

```
function [chan_I,chan_Q] =
interleaved(chanI,chanQ,Nc,N,jumlah_user)
chan_I = zeros(Nc,N);
chan_Q = zeros(Nc,N);
for ii = 1:jumlah_user
    chan_I(ii:jumlah_user:Nc,1:N) = chanI((ii-1)*Nc./jumlah_user+1
```

```

:Nc./jumlah_user*ii,1:N);
    chan_Q(ii:jumlah_user:Nc,1:N) = chanQ((ii-1)*Nc./jumlah_user+1
:Nc./jumlah_user*ii,1:N);
end

```

4. Fungsi Realokasi *Interleaved* FDMA

```

function [buffI,buffQ] =
deinterleaved(buff_I,buff_Q,Nc,N,jumlah_user)
buffI = zeros(Nc,N);
buffQ = zeros(Nc,N);
for ii = 1:jumlah_user
    buffI((ii-1)*Nc./jumlah_user+1:Nc./jumlah_user*ii,1:N) =
buff_I(ii:jumlah_user:Nc,1:N);
    buffQ((ii-1)*Nc./jumlah_user+1:Nc./jumlah_user*ii,1:N) =
buff_Q(ii:jumlah_user:Nc,1:N);
end

```

5. Fungsi Demodulasi QPSK

```

function b_hat=detector_qpsk(I,Q);
len=length(I);
b_hat=zeros(1,2*len);
for k=1:len
    if (I(k)<=0)
        b_hat(2*k-1)=1;
    end
    if (Q(k)<=0)
        b_hat(2*k)=1
    end
end
end

```

6. Fungsi *Deinterlever*

```

function [codenn] = deinterleaver(source)
%deinterleaver
bbb = source;
b1 = reshape(bbb,[],8);
b2 = b1';
codenn = b2(:);
end

```