

**PERFORMANSI SISTEM *MOBILE* WiMAX BERBASIS
*LOW DENSITY PARITY CHECK CODE***

SKRIPSI

Oleh

ISNEN KURNIA HARIMAN

04 03 03 058 6



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

**PERFORMANSI SISTEM *MOBILE* WiMAX BERBASIS
*LOW DENSITY PARITY CHECK CODE***

SKRIPSI

Oleh

ISNEN KURNIA HARIMAN

04 03 03 058 6



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PERFORMANSI SISTEM *MOBILE WIMAX* BERBASIS *LOW DENSITY PARITY CHECK CODE*

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 08 Januari 2008

Isnen Kurnia Hariman

04 03 03 058 6

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PERFORMANSI SISTEM *MOBILE WIMAX* BERBASIS
*LOW DENSITY PARITY CHECK CODE***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 3 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 08 Januari 2008

Dosen Pembimbing

Ir. Hartono Haryadi, M.Phil

NIP. 130 517 307

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penulisan skripsi ini penulis bersyukur kepada ALLAH S.W.T. atas karunia-Nya dan penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Ir. Hartono Haryadi, M.Phil

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Isnen Kurnia Hariman
NPM 04 03 03 058 6
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Ir. Hartono Haryadi, M.Phil

**PERFORMANSI SISTEM MOBILE WiMAX BERBASIS
*LOW DENSITY PARITY CHECK CODE***

ABSTRAK

Performansi *mobile* WiMAX dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah kondisi propagasi radio, posisi dan mobilitas pengguna dan skema *error control coding* (ECC) yang digunakan. Analisis terhadap faktor-faktor tersebut tentunya akan sangat bermanfaat dalam proses perencanaan dan penerapan teknologi WiMAX *mobile*. Dalam skripsi ini akan dibahas beberapa faktor yang mempengaruhi performansi WiMAX *mobile* menggunakan teknik LDPC (*low-density parity check code*) sebagai *error control coding*-nya.

Indikator performansi yang digunakan dalam simulasi adalah *bit error rate* (BER) dan *frame error rate* (FER). Beberapa parameter yang diujicoba yaitu, teknik modulasi, kondisi kanal transmisi, *rate* informasi, jumlah bit kode, jumlah iterasi maksimum LDPC *code*, algoritma *demodulator* dan *decoder*, serta *interleaver*. Teknik modulasi yang digunakan adalah QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Kondisi kanal transmisinya adalah AWGN dan *Rayleigh fading*. *Coderate*-nya yaitu $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan $\frac{5}{6}$. Algoritma *demodulator* yaitu *maximum a posteriori probability* pada domain log (log-MAP). Algoritma *decoding* yang digunakan yaitu *sum-product decoding* dan *min-sum decoding*. Terakhir, penerapan *bit interleaver coded modulation* (BICM).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa beberapa faktor tersebut mempengaruhi performa BER dan FER sistem WiMAX *mobile*.

Kata Kunci : WiMAX mobile, BER, FER, LDPC code

Isnen Kurnia Hariman

NPM 04 03 03 058 6

Department of Electrical Engineering

Counsellor

Ir. Hartono Haryadi, M.Phil

**PERFORMANCE OF MOBILE WiMAX SYSTEM
BASED ON LOW DENSITY PARITY CHECK CODE**

ABSTRACT

Mobile WiMAX performance is affected by several factors, such as air interface condition, user mobility and position, and error control coding scheme. Analysis of these factor are very useful for implementation of these technology. This paper will study several factors that affect the performance of mobile WiMAX based on low density parity check code as the error control coding.

This simulation uses bit error rate (BER) and frame error rate (FER) as the indicator performance. Several paramaters that being tested are modulation technique, air interface condition, information rate, number of code bits, number of maximum iteration of LDPC code, decoding algorithm, and bit interleaver. The modulation technique are QPSK, 16-QAM, and 64-QAM. Air interface condition are AWGN and Rayleigh fading. The information rate are $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, and $\frac{5}{6}$. The decoding algorithm are log-MAP, sum-product decoding, and min-sum decoding. Last, the use of bit interleaver coded modulation.

Simulation results show that these factor affected the performance of mobile WiMAX system, especially the modulation technique, air interface condition, information rate, maximum number of iteration, and number of code bits.

Keywords : mobile WiMAX, BER, FER, LDPC code

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR SINGKATAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	3
1.3 BATASAN MASALAH	3
1.4 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II WIMAX	5
2.1 STANDAR WIMAX	5
2.1.1 Perbandingan 802.16d ke 80216e	7
2.1.2 Migrasi Menuju 802.16e	8
2.2 KONFIGURASI JARINGAN WIMAX	9
2.2.1 Base Station	9
2.2.2 Subscriber Station	10
2.2.3 Transport Site	10
2.3 FITUR-FITUR WIMAX	10
2.3.1 Kecepatan Tranfer	10
2.3.2 Quality of Service (QoS)	11
2.3.3 Skalabilitas	12
2.3.4 Keamanan	13
2.3.5 Mobilitas dan Handover	13
2.4 MODULASI PADA WIMAX	17
2.5 LOW DENSITY PARITY CHECK CODE	18

2.6	ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS	20
2.6.1	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	20
2.6.2	Cyclic Prefix	24
2.6.3	Struktur Simbol OFDMA dan Sub-channellization	25
2.6.4	Scalable OFDMA (S-OFDMA)	26
BAB III PERANCANGAN DAN MEKANISME SIMULASI		27
3.1	MODEL KANAL	27
3.2	ALGORITMA DECODING	28
3.2.1	Algoritma Sum-Product (SP)	29
3.2.2	Min-Sum Decoding	29
3.3	INTERLEAVER	30
3.3.1	BIT INTERLEAVED CODED MODULATION (BICM)	30
3.3.2	BIT INTERLEAVED CODED MODULATION DENGAN ITERATIVE DECODING (BICM-ID)	32
3.4	MEKANISME SIMULASI	33
3.4.1	Simulasi Teknik Modulasi vs Kanal Transmisi	35
3.4.2	Simulasi Jumlah Iterasi LDPC Code	35
3.4.3	Simulasi Code Rate vs Framesize	35
3.4.4	Simulasi Algoritma Decoding	35
3.4.5	Simulasi Bit Interleaver	36
BAB IV HASIL DAN ANALISA SIMULASI		37
4.1	Simulasi Teknik Modulasi vs Kanal Transmisi	37
4.2	Simulasi Jumlah Iterasi LDPC Code	39
4.3	Simulasi <i>Code Rate</i> dan <i>Framesize</i>	41
4.4	Simulasi Algoritma <i>Decoding</i>	46
4.5	Simulasi Bit <i>Interleaver</i>	50
BAB V PENUTUP		52
DAFTAR ACUAN		53
DAFTAR PUSTAKA		55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konfigurasi Generik WiMAX	9
Gambar 2.2 Arsitektur <i>handover</i> dengan dua subnet	14
Gambar 2.3 Arsitektur <i>handover</i> untuk BS yang terintegrasi dengan AR	14
Gambar 2.4 <i>fast base station switching</i>	15
Gambar 2.5 <i>macro diversity handover</i>	16
Gambar 2.6 <i>hard handover</i>	17
Gambar 2.7 Modulasi adaptif	17
Gambar 2.8 grafik tanner (10,5), $w_c = 2$, $w_r = 4$	20
Gambar 2.9 Spektrum <i>Frequency Division Multiplexing</i> (FDM)	21
Gambar 2.10 Spektrum <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (OFDM)	21
Gambar 2.11 Luas area sinyal sinusoidal selalu bernilai 0 setiap perodenya	22
Gambar 2.12 Luas area hasil perkalian sinyal sinusoid yang saling harmonik	23
Gambar 2.13 Diagram transmitter OFDM	24
Gambar 2.14 Diagram <i>receiver</i> OFDM	24
Gambar 2.15 penyisipan <i>cyclic prefix</i> (CP)	25
Gambar 2.16 struktur <i>sub-carrier</i> OFDMA	25
Gambar 3.1 Blok diagram kanal AWGN	28
Gambar 3.3 <i>Transmitter</i> BICM dengan konstelasi 8-PSK dan <i>Gray mapping</i>	30
Gambar 3.4 Blok diagram sistem BICM	31
Gambar 3.5 Blok diagram sistem BICM-ID dengan <i>hard decision feedback</i>	33
Gambar 3.6 Blok diagram sistem BICM-ID dengan <i>soft decision feedback</i>	33
Gambar 4.1. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada variasi teknik modulasi	37
Gambar 4.2. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada variasi teknik modulasi	38
Gambar 4.3. Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi jumlah iterasi LDPC <i>code</i>	40
Gambar 4.4. Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi jumlah iterasi LDPC <i>code</i>	40
Gambar 4.5. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada QPSK untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	42

Gambar 4.6. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada QPSK untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	43
Gambar 4.7. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 16-QAM untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	44
Gambar 4.8. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 16-QAM untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	44
Gambar 4.9. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	45
Gambar 4.10. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi <i>rate</i> dan <i>framesize</i>	46
Gambar 4.11 Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada <i>sum-product decoding</i>	47
Gambar 4.12 Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada <i>sum-product decoding</i>	48
Gambar 4.13 Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada <i>min-sum decoding</i>	48
Gambar 4.14 Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada <i>min-sum decoding</i>	49
Gambar 4.15. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi BICM dan kanal	50
Gambar 4.16. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi BICM dan kanal	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Standar WiMAX	7
Tabel 2.2 Perbandingan Tipe Akses WiMAX	7
Tabel 2.3 Aplikasi <i>mobile</i> WiMAX dan QoS	12
Tabel 2.4 Parameter skalabilitas OFDMA	26

DAFTAR SINGKATAN

ACS	Add Compare Select
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BES	Best Effort Service
BICM	Bit Interleaved Coded Modulation
BICM-ID	Bit Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding
BS	Base Station
BTS	Base Transceiver Station
BWA	Broadband Wireless Access
CP	Cyclic Prefix
CPE	Customer Premise Equipment
CQI	Channel Quality Indicator
CTC	Convolutional Turbo Code
DSL	Digital Subscriber Line
ErtPS	Extended Real Time Polling Service
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
FBSS	Fast Base Station Switching
FDD	Frequency Division Duplex
FED	Free Ecuclidian Distance
FER	Frame Error Rate
FFT	Fast Fourier Transform
HHO	Hard Handover
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IP	Internet Protocol
ISCML	Iterative Solution Coded Modulation Library
ISI	Inter Symbol Interference

ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
LDPC	Low Density Parity Check Code
LOS	Line of Sight
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MAP	Maximum A Posteriori
MDHO	Macro Diversity Handover
MS	Mobile Station
NLOS	Non Line of Sight
nrtPS	Non Real Time Polling Service
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
P2P	Poin to Point
PHY	Physical Layer
PMP	Point to Multi Point
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
rtPS	Real Time Polling Service
SISO	Soft Input Soft Output
S-OFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SS	Subscriber Station
TDD	Time Divison Duplex
UGS	Unsolicited Grant Service
VoIP	Voice over IP
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Beberapa tahun ke belakang, telekomunikasi identik dengan layanan telepon (*voice*). Teknologi ini mulai berkembang ditandai dengan lahirnya generasi pertama 1G yang melayani komunikasi suara namun masih menggunakan sistem analog. Perkembangan selanjutnya diteruskan oleh 2G (GSM dan CDMA) yang sudah menggunakan sistem digital dan tidak hanya melayani komunikasi suara melainkan juga data melalui SMS (*short message service*), EDGE, dan GPRS. Kebutuhan akan layanan data yang meningkat ditambah adanya mobilitas pengguna membuat teknologi terus berkembang ke arah 3G yang mampu melayani komunikasi data dan multimedia. Kecepatan transfer data yang dirasa belum cukup, melahirkan HSDPA (*high speed downlink packet access*) yang sering disebut dengan 3,5G. Perkembangan selanjutnya mengarah ke layanan data *broadband* yang akan mendorong kelahiran 4G. Berdasarkan media yang digunakan, layanan akses *broadband* dapat dipenuhi oleh teknologi *wireline* (kabel) maupun *wireless* (tanpa kabel). Dari kategori teknologi *wireline* dapat digunakan teknologi DSL (*digital subscriber line*), kabel modem, HFC, maupun optik. Sedangkan dari kategori *wireless* dapat memanfaatkan teknologi *wireless LAN* (*local area network*), BWA (*broadband wireless access*) maupun WiMAX (*worldwide interoperability for microwave access*).

Teknologi WiMAX merupakan pengembangan dari BWA sebelumnya. WiMAX merupakan teknologi yang memiliki kemampuan cukup baik dalam hal kecepatan data, aplikasi untuk pengguna dan fleksibilitas jaringan. WiMAX mampu untuk menyalurkan data hingga kecepatan 75 Mbps dengan lebar spasi yang digunakan sebesar 20 MHz [1]. Fokus dari WiMAX adalah standarisasi sehingga diantara berbagai merk akan dapat saling ber-*interoperability*. Kelahiran WiMAX diawali munculnya standar 802.16 yang dikeluarkan salah satu oleh *working group* IEEE 802.xx. Sampai saat ini, standar WiMAX yang dikenal ada 2 tipe standar yaitu 802.16d (802.16-2004) untuk aplikasi *fixed* dan *nomadic* dan

standar 802.16e (802.16-2005) untuk aplikasi *portable* dan *mobile*. Jika dibandingkan dengan 3G, ternyata jumlah pemegang lisensi WiMAX lebih banyak dibandingkan 3G. Total akumulasi pemegang lisensi WiMAX sebanyak 721 sedangkan pemegang lisensi 3G sebanyak 106 [2]. Mayoritas pemegang lisensi WiMAX adalah lisensi wilayah sedangkan untuk 3G adalah lisensi nasional, sehingga pasar WiMAX lebih *fragmented* dibanding 3G. Harga sewa per Hz frekuensi WiMAX pun lebih murah dibandingkan 3G.

Di Indonesia, implementasi teknologi WiMAX masih terganjal alokasi frekuensi yang tepat untuk digunakan. Alokasi frekuensi WiMAX yang optimal terletak di 3,5 GHz karena perangkat yang bekerja di pita frekuensi ini lebih murah dibanding pada pita frekuensi lain. Namun, frekuensi ini telah lama diduduki oleh komunikasi satelit. Saat ini, masih dipertimbangkan penggunaan frekuensi alternatif lain di 2,3 GHz.

Dalam proses transmisi data, seringkali diterapkan *error correcting code* untuk menghasilkan transmisi informasi yang *reliable* dan efektif (cepat) antar pengguna jaringan. Teknik tersebut dapat dilakukan salah satunya dengan menerapkan LDPC (*low-density parity check*) code. LDPC code memiliki performansi *decoding* mendekati batas shannon. Performansi LDPC code dipengaruhi oleh jumlah iterasi LDPC code, besar *code rate*, ukuran *frame* dan algoritma *decoding* yang digunakan. *Code rate* yang didukung oleh LDPC code adalah $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3A}$, $\frac{2}{3B}$, $\frac{3}{4A}$, $\frac{3}{4B}$, dan $\frac{5}{6}$. Sedangkan ukuran framenya berkisar antara 576 dan 2304. Jumlah iterasi pada LDPC code, rata-rata adalah 30 dan maksimum 100. Salah satu kelebihan LDPC adalah memiliki kompleksitas tiap iterasi rendah, namun membutuhkan jumlah iterasi yang lebih banyak dibanding *error correcting code* yang lain. Semakin banyak jumlah iterasi, tentu akan menghasilkan performa yang baik, namun juga akan memberikan imbas yang kurang diinginkan. Algoritma *decoding* yang digunakan juga sangat mempengaruhi performansi LDPC code. Ada dua algoritma *decoding* pada LDPC code, yaitu algoritma *sum-product* dan algoritma *min-sum*.

Penerapan LDPC code pada sistem *mobile* WiMAX akan sangat mempengaruhi performansinya. Performansi *mobile* WiMAX juga dipengaruhi oleh teknik modulasi yang digunakan, kondisi kanal transmisi radio (*air interface*)

dan penggunaan *bit interleaver*. Analisis terhadap faktor-faktor tersebut tentunya akan sangat bermanfaat dalam proses perencanaan dan penerapan teknologi *mobile WiMAX*. Oleh karena itu, dalam skripsi ini akan dibahas bagaimana pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap performansi *mobile WiMAX* berbasis *LDPC code*.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

1. Menganalisis pengaruh teknik modulasi pada beberapa jenis kanal *wireless* untuk sistem *mobile WiMAX*,
2. Menganalisis pengaruh parameter *LDPC code* –*code rate*, ukuran frame, jumlah iterasi, dan algoritma *decoding*– terhadap performansi *mobile WiMAX*.
3. Menganalisis penerapan bit *interleaver* pada sistem *mobile WiMAX*.

1.3 BATASAN MASALAH

1. *Error correction code* yang digunakan pada simulasi ialah *low-density parity check code* (LDPC),
2. Indikator performansi simulasi yang diteliti adalah *bit error rate* (BER) dan *frame error rate* (FER),
3. Faktor-faktor performansi yang diuji adalah teknik modulasi, jenis kanal transmisi, jumlah iterasi *LDPC code*, *code rate*, ukuran *frame*, algoritma *decoding*, dan penggunaan bit *interleaver*.

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

1. Studi literatur

Studi ini dilakukan dengan mengambil berbagai sumber dari jurnal, artikel, buku, media cetak, internet, dan lain-lain.

2. Simulasi

Studi simulasi dilakukan menggunakan program *Iterative Solution Code Modulation Library* (ISCML) versi 1.8.0 yang dikembangkan

oleh Matthew C. Valenti yang dapat di-download dari situs www.iterativesolution.com. Data diambil dengan mengubah beberapa parameter yang ada dalam program sesuai dengan rancangan simulasi yang diinginkan. Program CML ini dijalankan menggunakan software Matlab versi 7.1.0.246 release 14 service pack 3.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan pada skripsi ini disusun sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang dan identifikasi permasalahan mengenai topik yang dibahas dalam skripsi ini. Kemudian dilanjutkan dengan penyampaian tujuan.

BAB II WiMAX

Memberikan gambaran dasar mengenai WiMAX dan *mobile* WiMAX sebagai pengantar untuk memahami pembahasan dalam bab III dan bab IV.

BAB III PERANCANGAN DAN MEKANISME SIMULASI

Membahas mekanisme yang dilakukan dalam simulasi serta parameter yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA SIMULASI

Berisi hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisa hasil tersebut.

BAB IV KESIMPULAN

Menyajikan poin-poin penting yang didapat dari simulasi yang dilakukan.

BAB II

WIMAX

2.1 STANDAR WIMAX

Salah satu faktor terpenting yang menentukan kesuksesan sebuah teknologi adalah standar sistem dari teknologi tersebut. Standar WiMAX yang ada saat ini terbagi menjadi 2 kategori besar yaitu IEEE.802.16d (sering disebut 802.16-2004) dan IEEE 802.16e (sering disebut 802.16-2005). Keduanya sangat berbeda, dimana 802.16d diperuntukkan bagi segmen *fixed* dan *nomadic* sedangkan 802.16e bagi segmen *portable* dan *mobile*.

WiMAX merupakan standar *Broadband Wireless Access* (BWA) dengan kemampuan untuk menyalurkan data kecepatan tinggi (layaknya teknologi xDSL pada jaringan *wireline*). Banyak kemampuan lebih yang ditawarkan oleh teknologi WiMAX dibanding teknologi sebelumnya seperti kemampuan diterapkan dalam kondisi NLOS (*Non Line of Sight*), aplikasinya baik untuk *fixed*, *nomadic*, *portable* maupun *mobile*.

IEEE sebenarnya telah ada *working group* yang khusus menangani dan mengembangkan WIMAX (802.16). Standar 802.16 ini difokuskan untuk mengatur spesifikasi sistem WiMAX di layer MAC (layer 2) dan PHY (layer 1). ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) juga mengatur spesifikasi BWA yang setara dengan WiMAX yaitu ETSI BRAN HIPERACCESS. Standar ini mengatur spesifikasi *fixed PMP* (*Point to Multipoint*) BWA yang beroperasi pada band frekuensi 10 sampai dengan 66 GHz.

Pada tahun 2003, IEEE juga mengembangkan spesifikasi WiMAX dengan nama IEEE 802.16-2003 atau sering disebut 802.16a. Standar ini di ETSI dianalogikan dengan standar ETSI BRAN HiperMAN. Secara sederhana perkembangan standar 802.16 dapat diuraikan sebagai berikut :

- 802.16

Standar ini mengatur pemanfaatan di band frekuensi 10 – 66 GHz. Aplikasi yang mampu didukung baru sebatas dalam kondisi *Line of Sight* (LOS).

- 802.16a

Menggunakan frekuensi 2 – 11 GHz, dapat digunakan untuk lingkungan *Non Line of Sight*. Standar ini difinalisasi pada Januari 2003. Terdapat 3 spesifikasi pada *physical layer* di dalam 802.16a, yaitu :

- Wireless MAN-SC: menggunakan format modulasi *single carrier*.
- Wireless MAN-OFDM : menggunakan *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) dengan *256 point Fast Fourier Transform* (FFT). Modulasi ini bersifat mandatori untuk *non licensed band*.
- Wireless MAN-OFDMA : menggunakan *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA) dengan *2048 point FFT*.

- 802.16d

Merupakan standar yang berbasis 802.16 dan 802.16a dengan beberapa perbaikan. 802.16d juga dikenal sebagai 802.16-2004. Frekuensi yang digunakan sampai 11 GHz. Standar ini telah difinalisasi pada 24 Juni 2004. Terdapat dua opsi dalam tranmisi pada 802.16d yaitu TDD (*Time Division Duplex*) maupun FDD (*Frequency Division Duplex*). Standar 802.16d diperuntukkan bagi layanan yang bersifat *fixed* maupun *nomadic*. Standar ini berbasis pada 802.16-2004 versi IEEE 802.16 dan standar ETSI HiperMAN. Sistem ini menggunakan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dan mendukung untuk kondisi lingkungan *Line of Sight* (LOS) and *Non Line of Sight* (NLOS). Beberapa vendor telah dan sedang mengembangkan CPE baik yang bersifat indoor maupun outdoor dan untuk laptop. Produk akan beroperasi pada band frekuensi 3,5 GHz dan 5,8 GHz. Sertifikasi produk pertama kali telah dilakukan di akhir tahun 2005.

- 802.16e

Standar ini memenuhi kapabilitas untuk aplikasi *portability* dan *mobility*. Standar ini telah difinalisasi di akhir tahun 2005. Berbeda dengan standar sebelumnya, maka antara standar 802.16d dan 802.16e tidak bisa dilakukan *interoperability* sehingga diperlukan *hardware* tambahan bila akan mengoperasikan 802.16e. Standar WiMAX 802.16e mendukung untuk aplikasi *portable* dan *mobile* sehingga dikondisikan mampu *hand-off* dan *roaming*. Sistem ini menggunakan teknik *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

Access (S-OFDMA), teknik modulasi *multi-carrier* yang menggunakan sub-kanalisisasi. Bagi *service provider*, standar 802.16e juga bisa dimanfaatkan untuk meng-cover pelanggan yang bersifat *fixed* (tetap). Kandidat terbesar pemanfaatan frekuensi 802.16e pada band frekuensi 2,3 GHz dan 2,5 GHz.

2.1.1 Perbandingan 802.16d ke 80216e

Berikut adalah tabel perbandingan standar WiMAX untuk 802.16d dan 802.16e :

Tabel 2.1 Perbandingan Standar WiMAX [3]

IEEE 802.16 Standard			Source: WiMAX Forum
	802.16	802.16a/REVd	802.16e
Completed	Dec. 2001	802.16a: Jan 2003 802.16 REVd: Q3 2004	Estimate: 2nd half of 2005
Spectrum	10 to 66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Channel Conditions	Line-of-sight only	Non line-of-sight	Non line-of-sight
Bit Rate	32 to 134 Mb/s at 28 MHz channelization	Up to 75 Mb/s at 20 MHz channelization	Up to 15 Mb/s at 5 MHz channelization
Modulation	QPSK, 16 QAM and 64 QAM	OFDM 256, OFDMA 64 QAM, 16 QAM, QPSK, BPSK	Same as REVd
Mobility	Fixed	Fixed and Portable	Mobility, Regional Roaming
Channel Bandwidths	20, 25 and 28 MHz	Selectable channel bandwidths between 1.25 and 20 MHz, with up to 16 logical sub-channels	Same as REVd
Typical Cell Radius	1 to 3 miles	3 to 5 miles; Maximum range 30 miles based on tower height, antenna gain and transmit power (among other parameters)	1 to 3 miles

Sedangkan bila dilihat dari tipe aksesnya, maka dapat dibandingkan seperti tabel berikut :

Tabel 2.2 Perbandingan Tipe Akses WiMAX [3]

Definition	Devices	Locations/ Speed	Handoffs	802.16-2004	802.16e
Fixed access	Outdoor and indoor CPEs	Single/ Stationary	No	Yes	Yes
Nomadic access	Indoor CPEs, PCMCIA cards	Multiple/ Stationary	No	Yes	Yes
Portability	Laptop PCMCIA or mini cards	Multiple/ Walking speed	Hard handoffs	No	Yes
Simple mobility	Laptop PCMCIA or mini cards, PDAs or smartphones	Multiple/ Low vehicular speed	Hard handoffs	No	Yes
Full mobility	Laptop PCMCIA or mini cards, PDAs or smartphones	Multiple/ High vehicular speed	Soft handoffs	No	Yes

2.1.2 Migrasi Menuju 802.16e

WiMAX forum sangat berkomitmen untuk mendukung migrasi ke jaringan untuk aplikasi *portable* maupun *mobile*. Operator yang berkeinginan untuk memberikan layanan secara *smooth* dan secara ekonomis (*effective cost*) maka migrasi dari 802.16-2004 ke 802.16e dapat dilakukan dengan beberapa opsi yaitu :

- Jaringan *Overlay*

Dalam situasi dimana operator menginginkan menyisir *fixed* sampai ke *mobile*, maka *overlay* antara jaringan 802.16e dan 802.16d dapat dilakukan dengan syarat operator dimaksud telah memiliki *license* untuk kedua teknologi tersebut. Dengan beroperasinya kedua teknologi secara *overlay*, maka operator dapat memberikan layanan yang beragam. Bagi pengguna dipersyaratkan untuk memiliki dua mode CPE yang *compatible* dengan 802.16d dan 802.16e.

- *CPE Dual-mode*

Operator yang menginginkan pindah ke layanan 802.16e dapat melakukan implementasi dengan dua mode CPE yang mendukung 802.16d dan 802.16e. Pada awalnya operator menggelar BTS 802.16d beserta CPE-nya, tetapi bila produk 802.16e telah muncul maka mulai mengenalkan CPE *double mode*. Ketika semua pelanggan telah mempunyai dua tipe CPE, maka operator siap mengganti jaringan 802.16-2004(d) dengan base station 802.16e dan secara otomatis CPE dapat berpindah ke 802.16e.

- *Upgrade Software/hardware base station*

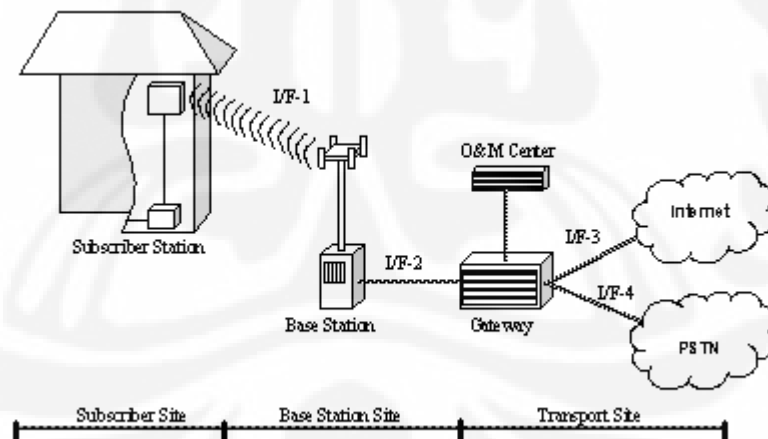
Solusi ini dapat dijadikan sebagai penghubung antara dua tipe CPE (802.16d dan 802.16e). BTS 802.16d dilakukan *upgrade software* agar mendukung 802.16e. Namun demikian, menurut informasi beberapa vendor, *upgrade* secara *software* tidak bisa dilakukan. Solusinya vendor menyediakan BTS dengan sistem modular. Tiap BTS terdiri dari 6 modul yang bisa dipakai untuk modul 802.16d atau 802.16e. Dengan demikian dalam satu lokasi BTS dapat mempunyai dua tipe *carrier* yaitu yang berbasis pada 802.16d dan 802.16e.

- *Dual-mode base stations*

Ketika CPE hanya mendukung untuk satu mode/tipe dan operator merencanakan migrasi secara gradual maka dilakukan dengan cara menginstal tipe *BTS WiMAX dual mode* yaitu 802.16d dan 802.16e. Dengan cara ini apapun tipe CPE yang ada di pelanggan akan langsung bisa terhubung ke BTS WiMAX. Solusi ini sama dengan pada teknologi GSM dimana operator menyediakan 2 tipe frekuensi baik di 900 MHz maupun 1800 MHz. Dengan demikian, model CPE apapun yang ada di pelanggan baik frekuensi 900 MHz ataupun hanya 1800 Mz dapat terhubung ke jaringan operator GSM.

2.2 KONFIGURASI JARINGAN WIMAX

Secara umum konfigurasi WiMAX dibagi menjadi 3 bagian yaitu *subscriber station*, *base station* dan *transport site*. Untuk *subscriber station* terletak di lingkungan pelanggan (bisa *fixed* atau *mobile/portable*). Sedangkan *base station* biasanya satu lokasi dengan jaringan operator (jaringan IP/internet atau jaringan TDM/PSTN). Untuk memperjelas dari konfigurasi dimaksud, maka gambar berikut merupakan konfigurasi generik dari WiMAX.



Gambar 2.1 Konfigurasi Generik WiMAX [4]

2.2.1 Base Station

BS pada WiMAX adalah titik yang menghubungkan pengguna dengan jaringan WiMAX. BS berada pada operator jaringan WiMAX. Di BS inilah pembagian IP pada setiap pelanggan dilakukan.

Terdapat 2 topologi jaringan WiMAX, *P2P (Point to Point)* dan *PMP (Point to Multipoint)*. Pada jaringan dengan topologi P2P, seluruh kapasitas dari BS ditransfer secara penuh menuju SS sehingga memiliki *bandwidth* yang besar. Biasanya topologi seperti ini digunakan untuk aplikasi *backhaul* dengan menggunakan WiMAX. Kemudian pada jaringan dengan topologi PMP, kapasitas BS terbagi-bagi sesuai dengan banyaknya pengguna aktif pada BS tersebut, makin banyak pengguna yang aktif maka *bandwidth* yang tersedia akan semakin kecil.

2.2.2 Subscriber Station

SS adalah bagian yang tersambung langsung dengan pengguna WiMAX. Untuk aplikasi *backhaul*, SS tidak terhubung secara langsung dengan pengguna, namun bagian SS hanya berfungsi untuk menangkap dan mengirim sinyal dari/ke BS untuk kemudian sinyal ini akan dikirim lagi dengan menggunakan protokol yang berbeda, misalnya *Wi-Fi*. SS yang terhubung langsung dengan pengguna (*end-user*) dapat berupa laptop, PDA, ataupun telepon seluler yang telah mendukung WiMAX *mobile*.

2.2.3 Transport Site

Transport Site pada WiMAX berfungsi sebagai *gateway* menuju ISP yang dikehendaki. Bagian ini yang menghubungkan perangkat WiMAX pada SS ke jaringan *world wide* untuk akses internet.

2.3 FITUR-FITUR WIMAX

Mobile WiMAX menawarkan skalabilitas dalam teknologi akses radio dan arsitektur jaringan, sehingga memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam pilihan membangun jaringan dan penawaran layanan. Beberapa fitur yang menonjol yang dimiliki *mobile* WiMAX diantaranya adalah :

2.3.1 Kecepatan Transfer

Penggunaan teknik antena MIMO, bersama dengan skema sub-kanalisasi yang fleksibel dan *adaptive coding and modulation (AMC)*, memungkinkan *mobile* WiMAX memiliki kecepatan transfer data pada sisi *downlink* hingga 63 Mbps per sektor dan pada sisi *uplink* hingga 28 Mbps per sektor dengan lebar kanal 10 MHz. [5]

2.3.2 Quality of Service (QoS)

WiMAX merupakan teknologi yang kaya akan fitur-fitur QoS. Tipe-tipe QoS diberikan sesuai dengan permintaan pengguna pada saat awal perangkat di *set-up*, namun BS juga dapat melakukan perubahan tipe layanan sesuai dengan *request* dari pengguna. WiMAX juga mampu memantau keadaan kanal transmisi (*air interface*) secara real-time sehingga dengan kemampuan ini *bandwidth* yang diberikan ke pengguna dapat terjaga. Beberapa tipe dari QoS pada WiMAX diantaranya adalah UGS, rtps, nrtps, dan BE. [6]

- **UGS (Unsolicited Grant Service)**

Untuk aplikasi-aplikasi yang membutuhkan *delay* yang rendah, dan mementingkan ketersambungan, maka UGS adalah layanan yang tepat. Layanan ini merupakan layanan yang premium dengan *delay* yang dibuat serendah mungkin agar tercipta hubungan yang kontinu dan *real time*. Aplikasi-aplikasi yang menggunakan tipe layanan ini contohnya adalah untuk ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), sebagai *backhaul*. UGS tidak dapat melakukan *request bandwidth* karena pada tipe ini *bandwidth* yang dialokasikan sudah tetap (konstan).

- **rtPS (Real Time Polling Service)**

Layanan ini memiliki *delay* yang kecil namun tidak signifikan seperti pada layanan UGS. Layanan tipe ini biasanya digunakan pada *video conferencing* yang membutuhkan *delay* yang kecil dan ketersambungan. Pada tipe layanan ini ketika minimum *bandwidth* diperlukan, mekanisme *request* dilakukan dengan menggunakan teknik polling, sedangkan metode *contention* dan *piggybacking* tidak diperbolehkan.

- **nrtPS (non-RTPS)**

Layanan ini tidak membutuhkan kontinuitas data. *Delay* dan *bandwidth* memberikan pengaruh yang tidak signifikan. Untuk layanan nrtPS, data dikirimkan dengan *delay* yang beragam namun penerima akan mendapat data yang utuh secara bersamaan. Hal ini dimungkinkan karena adanya *buffer* yang terdapat pada saluran. Aplikasi yang menggunakan tipe layanan ini contohnya adalah FTP dengan *bandwidth* yang besar, *video/audio streaming*. Teknik request

yang diijinkan pada metode ini yakni teknik polling, *contention*, dan *piggybacking*.

○ **BES (Best Effort Services)**

Pada tipe layanan ini, *delay* tidak diperhitungkan, namun ketersediaan informasi ke tujuan terjamin. Contoh aplikasi yang menggunakan layanan ini adalah HTTP, e-mail. Layanan ini hanya mengijinkan *request* dengan menggunakan teknik *contention* dan tidak menjamin *resource* minimal yang tersedia.

Berikut adalah tabel ringkasan aplikasi *mobile* WiMAX dan tipe layanan QoS yang digunakan :

Tabel 2.3 Aplikasi *mobile* WiMAX dan QoS [5]

QoS Category	Applications	QoS Specifications
UGS Unsolicited Grant Service	VoIP	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Jitter Tolerance
rtPS Real-Time Polling Service	Streaming Audio or Video	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Traffic Priority
ErtPS Extended Real-Time Polling Service	Voice with Activity Detection (VoIP)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Maximum Latency Tolerance • Jitter Tolerance • Traffic Priority
nrtPS Non-Real-Time Polling Service	File Transfer Protocol (FTP)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimum Reserved Rate • Maximum Sustained Rate • Traffic Priority
BE Best-Effort Service	Data Transfer, Web Browsing, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum Sustained Rate • Traffic Priority

2.3.3 Skalabilitas

Mobile WiMAX didesain untuk dapat bekerja pada lebar kanal yang berbeda dari 1,25 MHz sampai 20 MHz untuk memenuhi permintaan global sebagai usaha untuk mencapai harmonisasi spektrum dalam jangka panjang. Hal ini juga memungkinkan berbagai tingkat ekonomi menyadari kelebihan WiMAX *mobile*

dari berbagai sisi untuk kebutuhan masing-masing bentuk geografi seperti menyediakan akses internet di daerah pedesaan atau meningkatkan kapasitas akses broadband *mobile* di area metropolitan dan suburban.

2.3.4 Keamanan

Fitur yang disediakan untuk aspek keamanan *mobile* WiMAX merupakan yang terbaik di kelasnya, menggunakan autentikasi berbasis EAP (*extensible authentication protocol*), AES (*advanced encryption standard*)-CCM (*counter with cipher-block chaining message authentication code*) berbasis enkripsi yang terautentikasi, dan skema proteksi kontrol pesan berbasis CMAC (*block cipher-based message authentication code*) dan HMAC (*keyed hash message authentication code*).

2.3.5 Mobilitas dan Handover

Mobile WiMAX mendukung skema *handover* yang optimal dengan latensi kurang dari 50 milidetik untuk menjamin agar aplikasi *real time* seperti VoIP dapat dilakukan tanpa terjadi penurunan kualitas layanan. Skema manajemen yang fleksibel membuat keamanan terjamin selama proses *handover*.

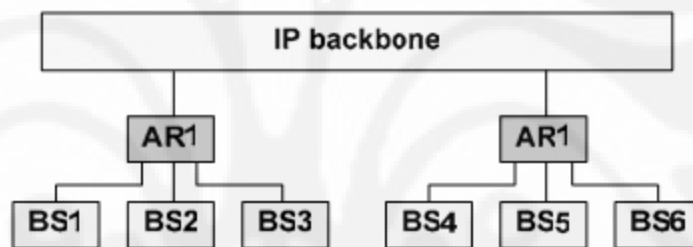
Dua hal yang sangat penting bagi aplikasi *mobile* adalah kemampuan baterai dan *handoff*. *Mobile* WiMAX dilengkapi *sleep mode* dan *idle mode* sehingga memungkinkan efisiensi daya *mobile station* (MS). *Mobile* WiMAX juga dilengkapi *seamless handoff* yang memungkinkan MS berpindah antar BS dengan kecepatan kendaraan tanpa ada gangguan koneksi.

Sleep mode adalah keadaan di mana MS tidak terdeteksi pada kanal transmisi *base station* yang sedang melayani selama beberapa periode waktu. Periode ini ditandai dengan tidak adanya trafik MS dari BS yang melayani sampai ke sisi *uplink* atau *downlink*. *Sleep mode* berguna untuk meminimalisasi penggunaan daya MS dan sumber daya kanal transmisi BS.

Idle mode merupakan mekanisme di mana BS hanya muncul secara periodik pada trafik *downlink* tanpa harus registrasi pada BS tertentu selama MS berada pada kanal transmisi yang dilingkupi oleh beberapa BS. *Idle mode* menguntungkan MS dengan menghilangkan persyaratan untuk *handoff* dan operasi normal lainnya serta menguntungkan jaringan dan BS dengan meniadakan

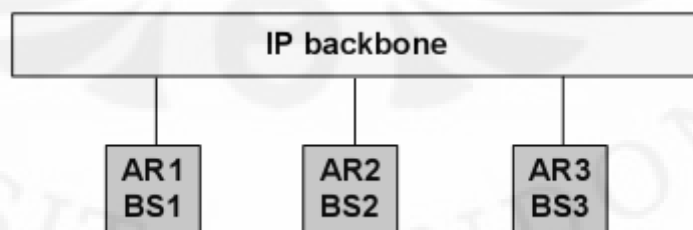
kanal transmisi dan trafik *handoff* jaringan dari MS yang tidak aktif, namun tetap menyediakan peringatan yang mudah dan cepat mengenai trafik *downlink* yang tertunda kepada MS.

Handover pada WiMAX adalah proses di mana MS berpindah dari kanal transmisi BS yang satu ke kanal transmisi pada BS yang lain. Karena WiMAX berbasis IP, maka proses *handover* juga harus mendukung *handover* IP di antara IP subnet yang berbeda. Standar *mobile IPv6* belum dapat menangani trafik *real time* seperti VoIP karena adanya latensi. Untuk mengatasi latensi ini, telah diusulkan protokol *mobile IPv6 fast handover (FMIPv6)*. Caranya dengan memperkirakan dan mempersiapkan *handover* yang akan datang. Ada dua kemungkinan arsitektur jaringan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Arsitektur *handover* dengan dua subnet [7]

Arsitektur pada Gambar 2.2 memiliki dua subnet IP yang berbeda. Tiap *access router* (AR) menangani tiga BS. AR1 menangani BS1, BS2, dan BS3. AR2 menangani BS4, BS5, dan BS6. *Handover* pada IP layer tidak diperlukan jika MS berpindah dari BS1 ke BS2 atau BS3 karena masih dalam satu subnet. Namun, jika MS berpindah dari BS3 ke BS4, maka dilakukan *handover*.

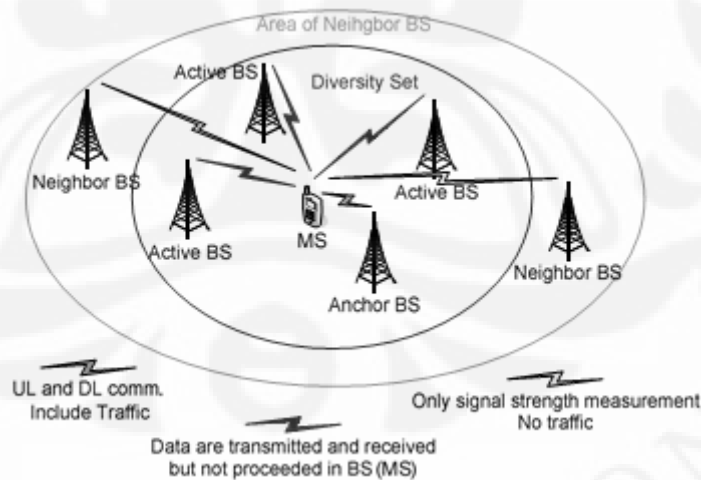


Gambar 2.3 Arsitektur *handover* untuk BS yang terintegrasi dengan AR [7]

Pada arsitektur yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3, tiap BS terintegrasi dengan AR. Pada kasus ini, *handover* berarti berganti subnet IP yang mengharuskan adanya *handover* IP.

Standar 802.16e memiliki tiga metode *handover*, yaitu *hard handover* (HHO), *fast base station switching* (FBSS) dan *macro diversity handover* (MDHO). HHO mandatori dari forum WiMAX sedangkan FBSS dan MDHO bersifat opsional. [8]

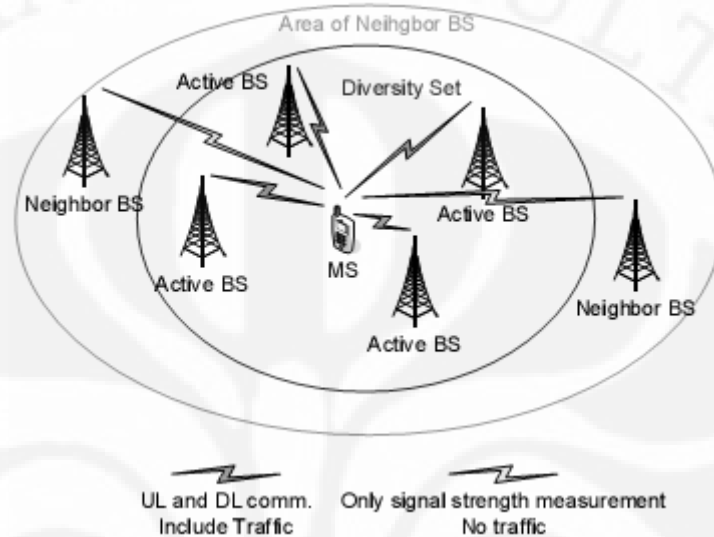
Pada FBSS, MS dan BS mendata sejumlah BS yang terlibat dalam FBSS dengan MS. Sekumpulan BS ini disebut *active set*. Di antara BS yang menjadi *active set*, ditentukan *anchor* BS-nya. MS hanya berkomunikasi dengan *anchor* BS untuk pesan pada sisi *uplink* dan *downlink* termasuk manajemen dan trafik koneksi. *Anchor* BS dapat berganti dari frame ke frame. Artinya, setiap frame dapat dikirim melalui BS yang berbeda dalam *active set*. Prosedur *update anchor* dilakukan dengan melihat kekuatan sinyal melalui kanal CQI. Persyaratan penting pada FBSS adalah data dikirim secara simultan kepada semua BS yang menjadi *active set* yang dapat melayani MS. FBSS digunakan untuk MS yang bergerak dengan kecepatan tinggi (*full mobility*) dan termasuk dalam kelompok *soft handover*. Berikut adalah gambar skema FBSS



Gambar 2.4 *fast base station switching* [8]

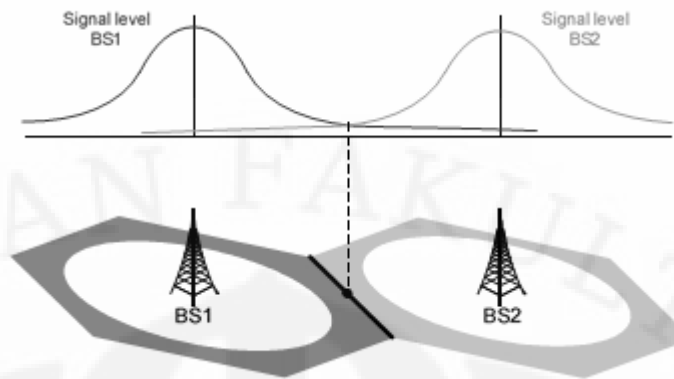
Pada MDHO, MS berkomunikasi dengan semua BS yang menjadi *active set* pada trafik dan pesan di sisi *uplink* dan *downlink*. Pada sisi *downlink*, terjadi *diversity combining* dari dua atau lebih BS yang mengirimkan data kepada MS.

Pada sisi *uplink*, terjadi *selection diversity* terhadap informasi yang diterima MS dari beberapa BS. MDHO juga digunakan untuk MS yang bergerak dengan kecepatan tinggi (*full mobility*) dan termasuk dalam kelompok *soft handover*. Berikut adalah gambar skema untuk MDHO.



Gambar 2.5 *macro diversity handover* [8]

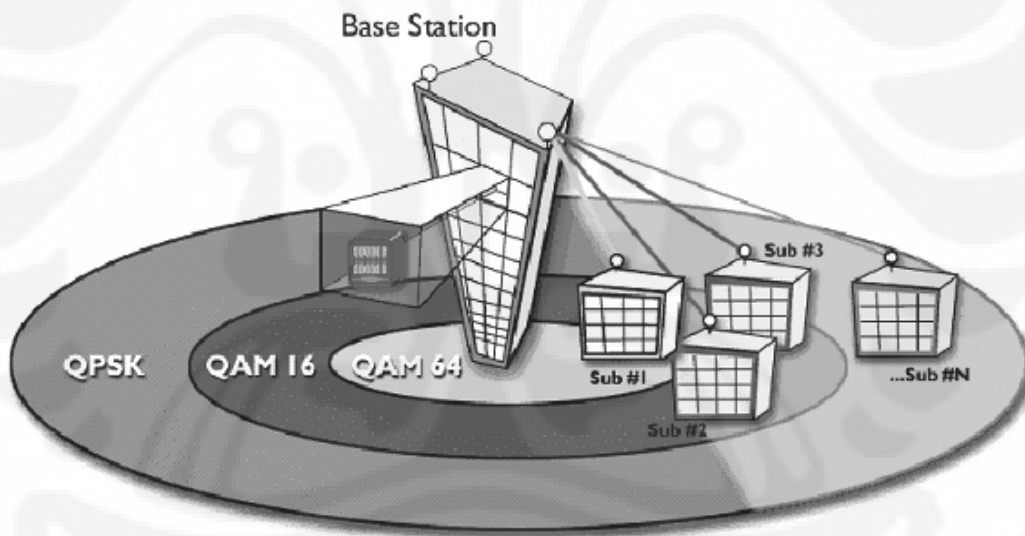
Pada HHO, MS mendengarkan pesan dari L2 (*link layer*). Sebuah BS biasanya memancarkan *neighbor advertisement message* secara berkala untuk identifikasi jaringan dan menentukan karakteristik BS terdekat. Dengan demikian, MS dapat membaca BS terdekat dan mengukur parameter sinyalnya. Proses *handover* dibagi dalam dua tahap yaitu tahap persiapan dan tahap pelaksanaan. Selama proses *handover*, MS hanya berkomunikasi dengan satu BS. Koneksi dengan BS yang lama terputus sebelum koneksi yang baru terbangun. *Handover* dilakukan setelah kekuatan sinyal sel BS tetangga lebih besar dari kekuatan sinyal sel BS saat ini. HHO digunakan pada MS yang bergerak dengan kecepatan rendah (*simple mobility*). Proses seperti ini dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Garis tebal pada gambar menunjukkan tempat di mana proses *handover* terjadi.



Gambar 2.6 *hard handover* [8]

2.4 MODULASI PADA WIMAX

WiMAX menerapkan AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) yang memungkinkan teknik modulasi yang digunakan disesuaikan dengan jarak dari BS dan *subscriber station*.



Gambar 2.7 Modulasi adaptif [9]

Teknik modulasi yang digunakan WiMAX adalah *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), 16 *Quadrature Amplitude Modulation* (16-QAM) dan 64 *Quadrature Amplitude Modulation* (64-QAM) [7]. Sedangkan pada teknik *encoding*, menggunakan *convolutional encoding* dengan *coding rate* $1/2$, $2/3$, $3/4$, dan $5/6$. Serta LDPC dengan *coding rate* $1/2$, $2/3$, dan $3/4$. [10]

Setiap simbol hasil modulasi QPSK mengandung 2 bit informasi, setiap simbol hasil modulasi 16 QAM mengandung 4 bit informasi dan setiap simbol hasil modulasi 64 QAM mengandung 6 bit informasi.

Dengan menggunakan teknologi antena cerdas (*smart antenna technology*), WiMAX dapat menentukan modulasi apa dan *coding rate* berapa yang akan digunakan kepada pengguna yang berada dalam cakupan *base station* tersebut. Penentuan tersebut diputuskan berdasarkan keadaan dan kondisi kanal transmisi antara pengguna dengan pemancar. Faktor-faktor yang menentukan seberapa keras kondisi kanal transmisi antara lain jarak antara pengguna dengan pemancar, keadaan geografis seperti bukit yang dapat meredam kuat sinyal atau *slow fading*, wilayah perkotaan (*urban*) atau pedesaan (*rural*) dimana gedung-gedung dapat menyebabkan *fast fading* dan cuaca seperti hujan yang memperburuk kanal transmisi.

Untuk menghadapi kanal transmisi yang buruk, akan diterapkan teknik modulasi yang lebih tahan gangguan (informasi yang terkandung dalam sinyal hasil modulasi lebih sedikit) dan *coding rate* yang lebih tinggi sehingga *transfer rate* lebih rendah sehingga informasinya lebih aman. Sebaliknya untuk kondisi kanal transmisi yang baik, akan digunakan teknik modulasi yang mengandung informasi lebih banyak dan *coding rate* yang lebih rendah sehingga *transfer rate* lebih cepat. Teknik modulasi yang disebutkan diatas memiliki *trade-off*, dimana teknik modulasi QPSK mempunyai karakteristik lebih tahan gangguan tetapi kecepatan penyampaian informasi lebih lambat. Karena sinyal yang dibentuk mengandung lebih sedikit informasi. Begitu sebaliknya dengan teknik modulasi QAM.

2.5 LOW DENSITY PARITY CHECK CODE

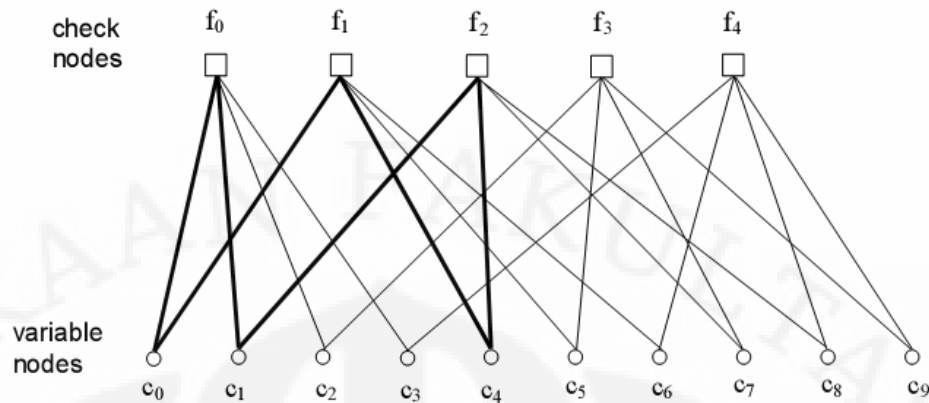
LDPC *code* termasuk salah satu kelas *linear block code* yang memiliki performa mendekati batas shannon. LDPC *code* pertama kali diperkenalkan oleh Gallager pada tahun 1960, namun belum mendapat tanggapan hingga 35 tahun setelahnya. Penelitian mengenai LDPC *code* dimulai kembali pada pertengahan tahun 1990 oleh MacKay, Luby, dan lainnya.

LDPC *code* dapat direpresentasikan dalam dua bentuk, yaitu bentuk matriks dan grafik. Jika \mathbf{Vn} adalah vektor dimensi $n \in \{0, 1\}$. Misalkan ada sebuah *linear block code* (n, k) dengan panjang *dataword* k dan panjang *codeword* n yang merupakan vektor *subspace* berdimensi k dari \mathbf{Vn} . *Codeword* \mathbf{c} dibangkitkan oleh perkalian matriks $\mathbf{u} = \mathbf{cG}$, di mana \mathbf{u} adalah pesan yang panjangnya k -bit, dan \mathbf{G} adalah matriks generator berukuran $k \times n$. Matriks *parity check* \mathbf{H} adalah matriks yang terdiri dari 1 dan 0 dengan ukuran $(n - k) \times n$ sedemikian sehingga $\mathbf{cH}^T = \mathbf{0}$. setiap baris pada matriks \mathbf{H} merupakan persamaan *parity check*. *Code rate* $R = k/n$. LDPC *code* ada dua jenis, yaitu *regular* dan *irregular*. Pada *regular* LDPC *code*, banyaknya angka 1 pada tiap kolom adalah sama. Banyaknya angka 1 dalam satu kolom matriks disebut *column weight* (w_c), sedangkan pada satu baris matriks disebut *row weight* (w_r). Nilai w_c biasanya 3 atau 4. Sedangkan *irregular* LDPC *code* memiliki w_c yang bervariasi untuk tiap kolom.

Matriks *parity check* \mathbf{H} juga dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik Tanner. Grafik ini merupakan grafik *bipartite*. Pada grafik Tanner terdapat dua jenis node, yaitu *variable nodes* (v-nodes) dan *check nodes* (c-nodes). *Variable node* berkaitan dengan bit *codeword*, atau jumlah kolom pada matriks \mathbf{H} . *Check node* berkaitan dengan persamaan *parity check*, atau jumlah baris pada matriks \mathbf{H} . Dengan demikian, ada n v-nodes dan ada $(n - k)$ c-nodes. *Bipartite* berarti node dengan tipe yang sama tidak dapat dihubungkan. c-node ke- i hanya dapat dihubungkan dengan v-node ke j jika elemen (i, j) matriks \mathbf{H} bernilai 1. sebagai contoh, misal ada sebuah *linear block code* $(10, 5)$ dengan $w_c = 2$, $w_r = 4$ dan matriks \mathbf{H} -nya adalah :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Komponen $h_{00} = h_{01} = h_{02} = h_{03}$ bernilai 1 sehingga v-nodes c_0, c_1, c_2, c_3 , dihubungkan ke c-node f_0 . Demikian seterusnya untuk baris ke-2 hingga ke-5. Maka, grafik Tanner dari matriks \mathbf{H} tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



Gambar 2.8 grafik tanner (10,5), $w_c = 2$, $w_r = 4$ [11]

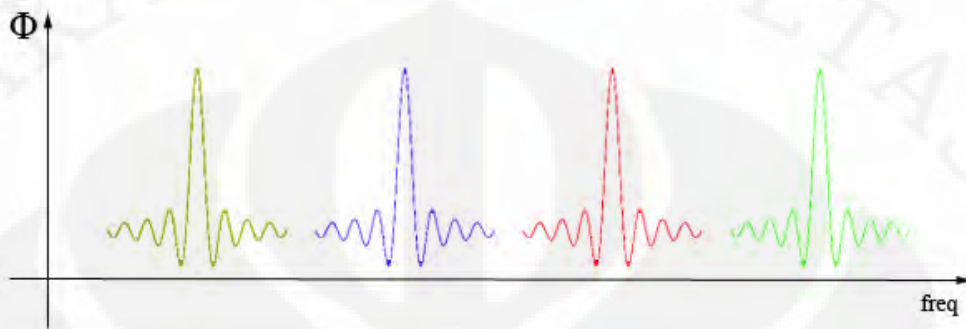
Cycle (loop) dari panjang v pada grafik Tanner adalah jalur yang terdiri dari v sambungan yang berakhir di node tersebut. Grafik Tanner pada Gambar 2.8 memiliki *cycle* dengan panjang 6 seperti ditunjukkan oleh garis tebal. *Girth* γ adalah panjang minimum *cycle* pada grafik Tanner. *Cycle* terpendek yang mungkin pada grafik *bipartite* Gambar 2.8 adalah 4. Hal ini ditunjukkan oleh banyaknya angka 1 yang terdapat di pojok submatriks H . *Cycle* yang pendek akan menurunkan performa algoritma *iterative decoding* yang digunakan pada LDPC codes.

2.6 ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS

2.6.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing

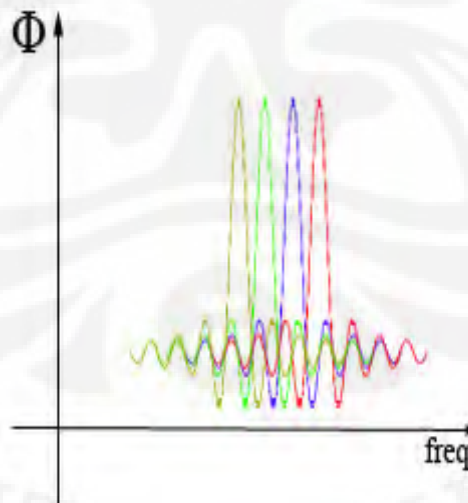
WiMAX menggunakan modulasi OFDM yang merupakan teknik modulasi yang sering diterapkan pada komunikasi nirkabel karena modulasi ini memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan teknik yang lain. OFDM adalah sebuah kombinasi antara *multiplex* dan modulasi [12]. *Multiplexing* adalah metode untuk menggunakan *bandwidth* secara bersamaan untuk beberapa kanal data yang berbeda. Pada kasus *multiplex* biasa sebuah kanal akan dibagi-bagi menjadi beberapa slot dan masing-masing slot dipisahkan oleh suatu parameter sesuai dengan keinginan dan kebutuhan seperti waktu, frekuensi, code, dan lain sebagainya. Setiap slot kemudian diisi sinyal informasi yang saling independen, artinya setiap slot terisi informasi yang berbeda sehingga didapatkan sebuah kanal yang berisi banyak informasi yang berbeda. Teknik seperti ini merupakan teknik

untuk menghemat kanal yang merupakan sumber daya terbatas. Agar tidak saling menginterferensi satu sama lain maka diberi jarak antar kanal (*guardband*) dimana hal ini sangat boros *bandwidth*. Gambar 2.9 dibawah ini memperlihatkan 4 buah sinyal informasi yang dikirimkan dalam satu kanal yang masing-masing terpisahkan oleh frekuensi yang berbeda.



Gambar 2.9 Spektrum *Frequency Division Multiplexing* (FDM) [12]

Sedangkan untuk OFDM, keempat kanal yang ada dalam satu *bandwidth* seakan-akan ditumpang tindihkan menjadi satu. Tidak ada jarak yang diberikan antar kanal (*guardband*). Dengan demikian, OFDM sangat efisien dalam penggunaan *bandwidth*. Gambar 2.10 menunjukkan model spektrum frekuensi dari OFDM yang terdiri dari empat kanal dalam satu *bandwidth*.



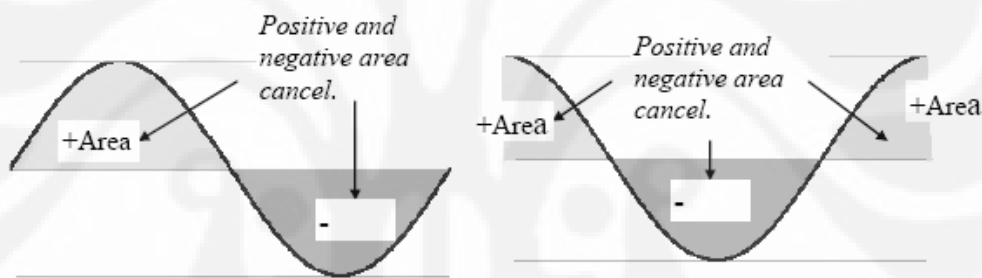
Gambar 2.10 Spektrum *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [12]

Spektrum frekuensi kanal pada OFDM dapat ditumpangtindihkan dan tidak terjadi saling interferensi antar kanal. Sebab masing-masing sinyal transmisi

dalam setiap kanal bersifat saling *orthogonal* dan *harmonic* satu sama lain. Kanal-kanal tersebut tidak akan saling menginterferensi karena *null* dari setiap kanal yang berdekatan jatuh tepat pada titik tengah spektrum yang membawa informasi (spektrum yang memiliki *power* tertinggi). Untuk mengatur supaya setiap *null* dari kanal spektrum tetangga jatuh tepat pada titik tengah spektrum yang membawa informasi, setiap sinyal transmisi pada setiap kanal harus bersifat saling *orthogonal* dan saling *harmonic*.

Carrier pada setiap sinyal berbentuk sinyal sinusoidal atau cosinusoidal, dan pada sinyal ini hasil integral setiap periodenya adalah 0 karena luas area positif dan negative sama besar seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.11 dibawah ini.

$$f(t) = \int_0^T \sin t dt = 0$$



Gambar 2.11 Luas area sinyal sinusoidal selalu bernilai 0 setiap periodenya [12]

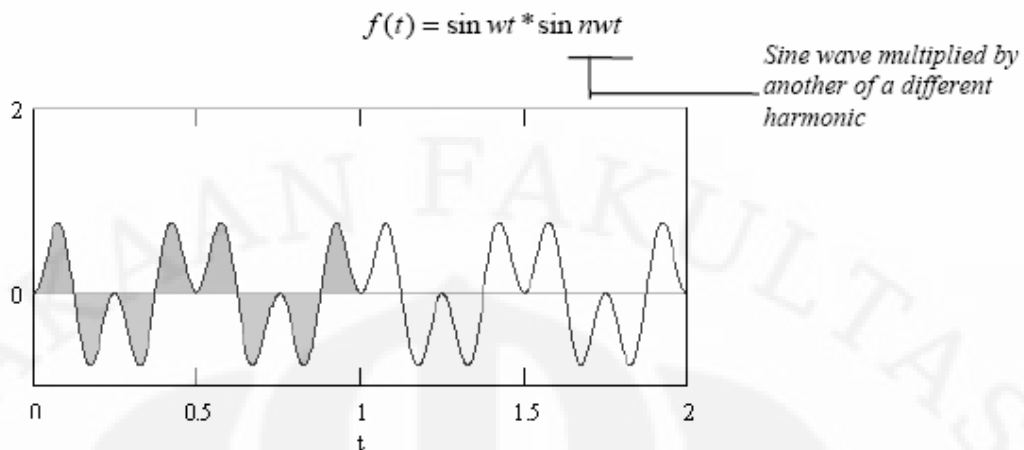
Anggaplah terdapat dua buah sinyal sinusoidal yang berbeda frekuensi yakni $\sin(m\omega t)$ dan $\sin(n\omega t)$ dimana n dan m merupakan bilangan bulat positif, maka akan didapatkan :

$$f(t) = \sin n\omega t \times \sin m\omega t$$

Maka dengan menggunakan hubungan persamaan trigonometri didapatkan :

$$= \frac{1}{2} \cos(m-n) - \frac{1}{2} \cos(m+n)$$

Dan jika dihitung luas dari sinyal hasil perkalian ini adalah 0 seperti tampak pada Gambar 2.12 dibawah ini :



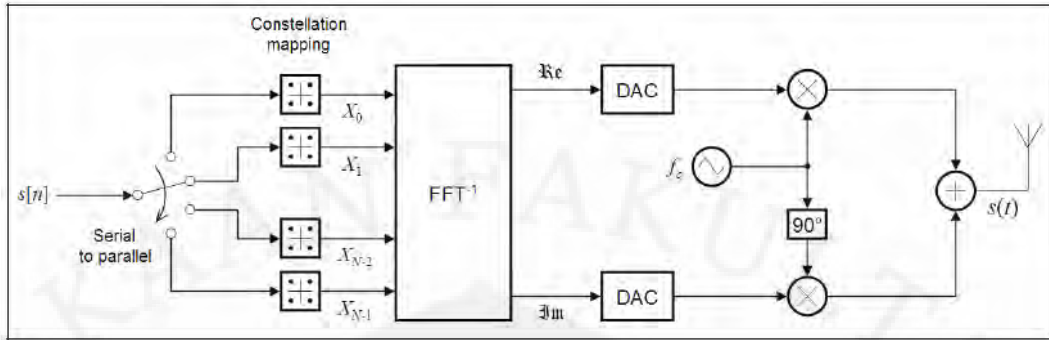
Gambar 2.12 Luas area hasil perkalian sinyal sinusoid yang saling harmonik [12]

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m-n)\omega t - \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cos(m+n)\omega t$$

$$= 0$$

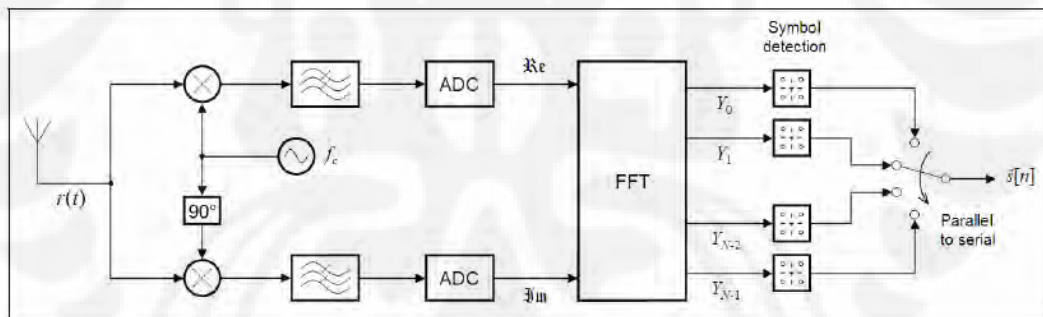
Dua buah sinyal ini disebut saling harmonik karena hasil perkalian kedua sinyal tersebut memiliki luas area 0 dan jika sinyal-sinyal yang harmonik ini dikirimkan dengan jarak frekuensi yang berdekatan tidak akan saling berinterferensi.

Untuk mendapatkan sinyal yang saling *orthogonal*, maka teknik yang dilakukan adalah sebagai berikut : sinyal yang akan dikirimkan $s[n]$ dibagi menjadi beberapa bagian kecil yang merupakan subcarrier yang berisikan data yang telah termodulasi dan saling harmonik. Kemudian sinyal ini akan masuk ke IFFT yang akan menghasilkan sinyal kompleks diskrit (imajiner dan real) dan kemudian akan dibentuk sinyal analognya pada DAC (*digital to analog converter*). Setelah menjadi sinyal analog, kemudian sinyal ini ditumpangkan ke carrier utama. Sinyal real dan imajiner dipisahkan dengan memberikan beda sudut fasa sebesar 90° . Kemudian kedua sinyal ini dijumlahkan yang kemudian akan dikirimkan melalui antenna. Gambar diagram dari pembentukan sinyal ini terlihat pada Gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Diagram transmitter OFDM. [13]

Kemudian pada bagian penerima, diagramnya dapat dilihat pada Gambar 2.14 dibawah ini. Sinyal yang telah diterima $r(t)$ kemudian difilter dan dipisahkan antara sinyal imajiner dan realnya. Keluaran dari sinyal ini kemudian masuk ke DAC yang akan merpresentasikan sinyal analog tersebut kedalam sinyal digital. Kemudian sinyal ini akan masuk ke FFT yang akan menghasilkan sinyal dalam domain frekuensi dan akan dideteksi setiap subcarriernya yang kemudian akan digabungkan kembali menjadi sinyal $s[n]$ yang utuh.



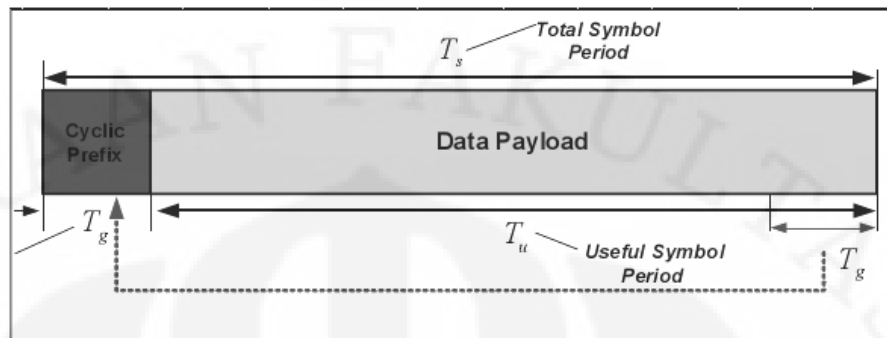
Gambar 2.14 Diagram receiver OFDM [13]

Keunggulan utama dari sinyal hasil OFDM adalah efisiensi spektrum frekuensi yang tinggi dan sifatnya yang tahan terhadap gangguan [13], dan kekurangannya adalah keakuratan dalam pembentukan ortogonalitas sinyal sangat tinggi sehingga implementasi dari OFDM akan sulit.

2.6.2 Cyclic Prefix

Pada OFDM digunakan cyclic prefix yang berfungsi untuk menghilangkan ISI (inter symbol interference). Hal ini dapat dilakukan selama durasi CP lebih lama dari delay spread kanal. CP merupakan pengulangan sample terakhir dari

sejumlah blok data yang disisipkan di awal data utama seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



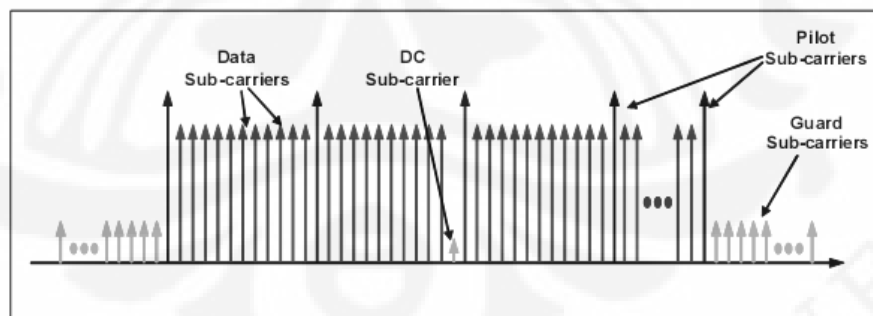
Gambar 2.15 penyisipan *cyclic prefix* (CP) [5]

CP dapat mencegah terjadinya interferensi antar blok dan membuat kanal seperti sebuah siklus serta menghasilkan kompleksitas yang rendah pada domain frekuensi.

2.6.3 Struktur Simbol OFDMA dan Sub-channellization

Struktur simbol OFDMA terdiri dari tiga tipe sub-carrier seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.16, yaitu :

- Data sub-carrier yang berfungsi untuk transmisi data
- Pilot sub-carrier yang berfungsi untuk estimasi dan sinkronisasi
- Null sub-carrier yang digunakan untuk guard band dan carrier DC



Gambar 2.16 struktur *sub-carrier* OFDMA [5]

Sub-carrier (data dan pilot) aktif dikelompokkan dalam sebuah subset dari *sub-carrier* yang disebut sub-channel.

2.6.4 Scalable OFDMA (S-OFDMA)

IEEE 802.16e-2005 menggunakan konsep S-OFDMA. S-OFDMA mendukung bandwidth yang lebar untuk memenuhi alokasi frekuensi yang bervariasi. Skalabilitas ini dicapai dengan mengatur ukuran FFT. Berikut adalah parameter S-OFDMA yang digunakan dalam standar 802.16e-2005 :

Tabel 2.4 Parameter skalabilitas OFDMA [5]

Parameters	Values			
System Channel Bandwidth (MHz)	1.25	5	10	20
Sampling Frequency (F_p in MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
FFT Size (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Number of Sub-Channels	2	8	16	32
Sub-Carrier Frequency Spacing	10.94 kHz			
Useful Symbol Time ($T_b = 1/f$)	91.4 microseconds			
Guard Time ($T_g = T_b/8$)	11.4 microseconds			
OFDMA Symbol Duration ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 microseconds			
Number of OFDMA Symbols (5 ms Frame)	48			

BAB III

PERANCANGAN DAN MEKANISME SIMULASI

3.1 MODEL KANAL

Sebelum dikirim, sinyal dimodulasi terlebih dahulu. Pada modulasi sinyal M -ary, bit $\mu = \log_2 M$ dipetakan ke simbol \mathbf{x}_k , yang dipilih dari himpunan $S = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M\}$. Simbol dapat merupakan multi-dimensi. Contoh 2-dimensi adalah QPSK, dan QAM, sedangkan contoh M -dimensi adalah FSK.

Sinyal yang diperoleh penerima adalah $Y_k = a_k \mathbf{x}_k + n_k$, dimana a_k adalah koefisien kanal *fading* ($a_k = 1$ untuk AWGN dan $a_k = \text{Rayleigh random variable}$ untuk *Rayleigh fading*), \mathbf{x}_k adalah sinyal yang dikirim, n_k adalah *Gaussian noise* dengan variansi $\sigma^2 = 1/(2E_s/N_o)$, E_s adalah energi tiap kode bit, dan N_o adalah *spectral density noise* satu sisi

Sinyal yang diterima kemudian di-demodulasi. Jika $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{y})$ merupakan probabilitas bersyarat (*conditional*), yaitu probabilitas diterimanya sinyal \mathbf{x}_k bila sinyal \mathbf{y} telah dikirimkan, dimana $\mathbf{x}_k \in S$ merupakan sinyal dikirim dan \mathbf{y} merupakan sinyal yang diterima. Jika fungsi $f(\mathbf{x}_k|\mathbf{y}) = K p(\mathbf{x}_k|\mathbf{y})$, dengan K merupakan konstanta perkalian yang tetap untuk setiap \mathbf{x}_k . Ketika semua simbol banyak yang mirip $\{f(\mathbf{x}_k|\mathbf{y}) \propto f(\mathbf{y}|\mathbf{x}_k)\}$, untuk tiap sinyal S , maka penerima menghitung $f(\mathbf{y}|\mathbf{x}_k)$. Fungsi ini bergantung pada modulasi, kanal dan penerima. Jika diasumsikan kemungkinan besar semua simbol banyak yang mirip, simbol \mathbf{x}_k yang mirip ditentukan oleh *hard decision* antara $f(\mathbf{y}|\mathbf{x}_k)$ atau $\log f(\mathbf{y}|\mathbf{x}_k)$. [14]

Contoh sinyal QAM melalui AWGN [15]

Jika $y = x + n$, dimana n adalah *gaussian noise* dengan variansi $N_o/2$, dan x adalah sinyal dengan rata-rata energi tiap simbol $E[|x|^2] = E_s$

$$p(y|x_k) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{|y-x_k|^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$f(y|x_k) = \exp\left\{-\frac{|y-x_k|^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\log f(y|x_k) = \frac{-|y-x_k|^2}{2\sigma^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\log f(y|x_k) = \frac{-E_s|y-x_k|^2}{N_o} \dots\dots\dots(3.4)$$

Log-Likelihood dari simbol $x_k (\Lambda_k)$ adalah sebagai berikut :

$$\Lambda_k = \log p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}) \dots\dots\dots(3.5)$$

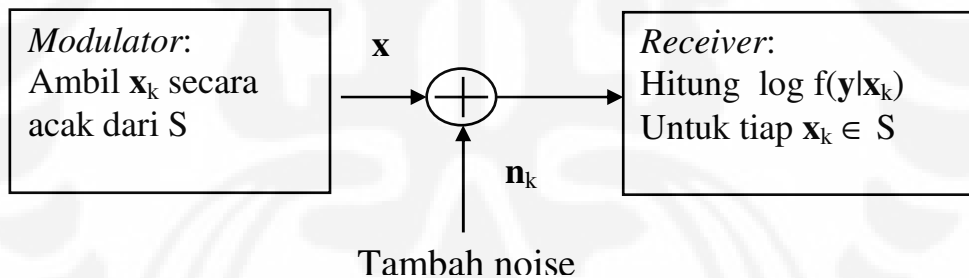
$$= \log \frac{p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y})}{\sum_{\mathbf{x}_m \in S} p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y})} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$= \log \frac{f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_k)}{\sum_{\mathbf{x}_m \in S} f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_m)} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$= \log f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_k) - \log \sum_{\mathbf{x}_m \in S} f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_m) \dots\dots\dots(3.8)$$

$$= \log f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_k) - \log \sum_{\mathbf{x}_m \in S} \exp\{\log f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_m)\} \dots\dots\dots(3.9)$$

$$= \log f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_k) - \max_{\mathbf{x}_m \in S}^* [\log f(\mathbf{y} | \mathbf{x}_m)] \dots\dots\dots(3.10)$$



Gambar 3.1 Blok diagram kanal AWGN [14]

Masukan ke *decoder* diasumsikan dalam *log-likelihood ratio* (LLR).

3.2 ALGORITMA DECODING

LDPC *code* memiliki dua algoritma *decoding*, yaitu algoritma *sum-product* dan algoritma *min-sum*. Aplikasi algoritma *sum-product* yang secara langsung adalah *a posteriori probability* (APP). Ketika diaplikasikan ke kode trellis, *sum-product* menjadi algoritma *decoding* BCJR. Dalam kesimpulan statistik sering dikenal sebagai algoritma “*belief propagation*”. Sedangkan untuk persamaan

keadaan model *Gaussian*, dikenal sebagai Kalman *smoother*. Algoritma *min-sum* juga dikenal sebagai *maksimum-likelihood sequence detection* (MLSD). Jika diaplikasikan pada trellis, hasil yang ditunjukkan sama dengan algoritma Viterbi.

3.2.1 Algoritma Sum-Product (SP)

Jika Q_i adalah LLR (*log-likelihood ratio*) dari kode bit ke- i . q_{ij} adalah info ekstrinsik yang dilewatkan dari v-node ke- i menuju c-node ke- j . R_{ij} adalah info ekstrinsik yang dilewatkan dari c-node ke- j menuju v-node ke- i . $C_i = \{j : h_{ji} = 1\}$ adalah sekumpulan baris dengan angka 1 pada kolom ke- i . $R_j = \{i : h_{ji} = 1\}$ adalah sekumpulan kolom dengan angka 1 pada kolom ke- j . $R_{j\setminus i} = \{i' : h_{ji'} = 1\} \setminus \{i\}$ yaitu sekumpulan lokasi kolom dengan angka 1 di kolom ke- j dan tidak termasuk lokasi i . Lalu, $\alpha_{ij} = \text{sign}(q_{ij})$, $\beta_{ij} = |q_{ij}|$, $\phi(x) = -\log \tanh(x/2) = \log((e^x + 1)/(e^x - 1)) = \phi^{-1}(x)$. Berikut adalah algoritmanya :

- Inisialisasi : nilai LLR kanal = $q_{ij} = \lambda_i = 2 \text{Re}\{a_i * r_i\} / \sigma^2$ (3.11)
- Ulangi terus untuk i, j di mana $h_{ij} = 1$
 - Pada setiap c-node, *update r message* :

$$r_{ji} = \left(\prod_{i' \in R_{j\setminus i}} \alpha_{i'j} \right) \phi \left(\sum_{i' \in R_{j\setminus i}} \phi(\beta_{i'j}) \right) \dots\dots\dots(3.12)$$

- Pada setiap v-node *update q message* dan LLR Q :

$$Q_i = \lambda_i + \sum_{j \in C_i} r_{ji} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$q_{ij} = Q_j - r_{ji} \dots\dots\dots(3.14)$$

- Lakukan *hard decision* :

$$\hat{c}_i = \begin{cases} 1 & \text{jika } Q_i < 0 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

- Setelah tiap iterasi, berhenti jika :
 $\hat{c}H^T = 0$, hal ini efektif karena probabilitas *decoding error* yang tidak terdeteksi dapat diabaikan.
- Jika tidak, berhenti saat iterasi maksimum dicapai.

3.2.2 Min-Sum Decoding

Pada algoritma *min-sum*, perlu dicatat bahwa :

$$\phi\left(\sum_{i'} \phi(\beta_{i',j})\right) \approx \phi\left(\max_{i'} \phi(\beta_{i',j})\right) = \phi\left(\phi\left(\min_{i'} \beta_{i',j}\right)\right)$$

$$\phi\left(\sum_{i'} \phi(\beta_{i',j})\right) = \min_{i'} \beta_{i',j} \dots \dots \dots (3.15)$$

Dengan demikian, formula untuk *update r message* adalah :

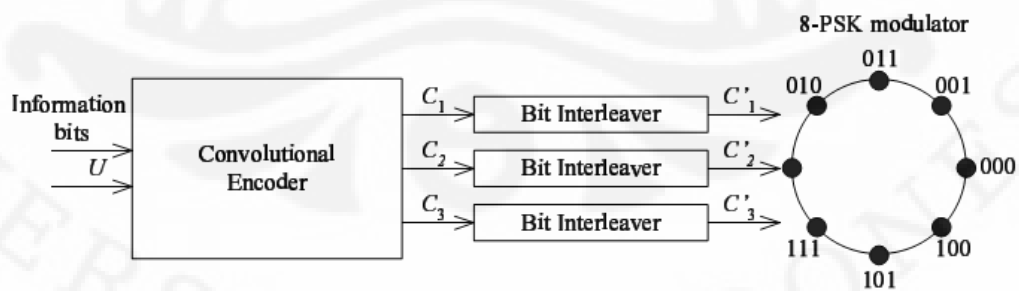
$$r_{ji} = \left(\prod_{i' \in R_{ji}} \alpha_{i',j} \right) \min_{i' \in R_{ji}} \beta_{i',j} \dots \dots \dots (3.16)$$

Hal ini mengurangi kompleksitas karena tidak perlu menghitung fungsi nonlinear ϕ .

3.3 INTERLEAVER

3.3.1 BIT INTERLEAVED CODED MODULATION (BICM)

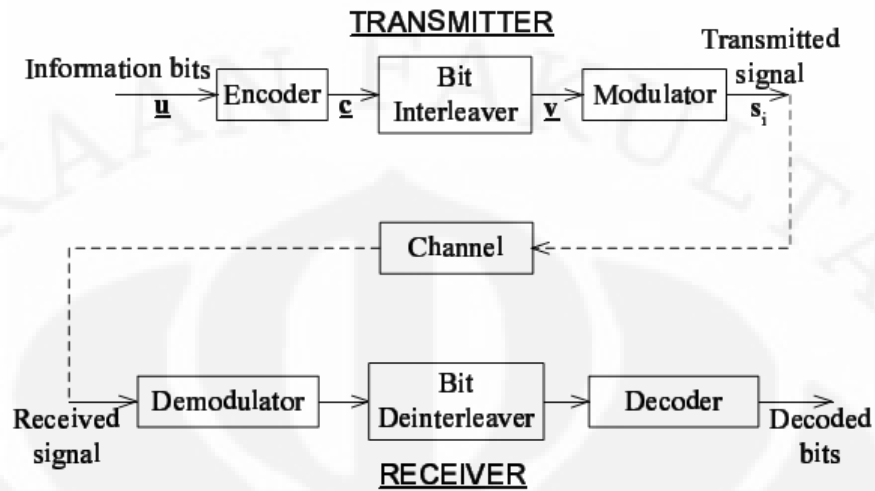
Potensi sistem BICM melalui kanal *fading* pertama kali diselidiki oleh Zehavi di mana ia merekomendasikan sebuah sistem pengkodean yang dibentuk dari *encoder* konvolusi yang diikuti *interleaver* bit acak. Gambar 3.2 menunjukkan sebuah sistem BICM dengan 8-PSK modulator dan 3 *interleaver* bit acak. Tiga bit output dari *interleaver* dipetakan ke simbol konstelasi 8-PSK dengan metode *Gray mapping*. Kelebihan dari sistem BICM adalah bahwa BICM memperlakukan *coding* dan modulasi sebagai komponen yang saling terpisah sehingga pengkodean dan modulator dapat dipilih secara fleksibel.



Gambar 3.2 Transmitter BICM dengan konstelasi 8-PSK dan *Gray mapping* [16]

Sistem BICM konvensional disusun oleh sebuah rangkaian seri dari *encoder* kanal, sebuah *interleaver* bit, dan sebuah modulator M-ary (di mana $M = 2^m$)

seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Pertama, urutan bit informasi \mathbf{u} di-*encoding* dengan *encoder* konvolusi untuk menghasilkan urutan bit output \mathbf{c} .



Gambar 3.3 Blok diagram sistem BICM [16]

Kemudian, bit yang sudah di-*encoding* tersebut dipermutasi oleh *interleaver* semi-acak. Tujuannya, untuk menghilangkan korelasi *fading* dan meningkatkan orde *diversity* hingga mencapai Hamming *distance* minimum d_H . Perhatikan bahwa pada Gambar 3.3 hanya terdapat sebuah *interleaver* bit. Hal ini sangat berbeda dengan pendekatan Zehavi yang menggunakan m *interleaver* bit. Penggunaan m *interleaver* bit ini akan membatasi fleksibilitas sistem BICM dan mempersulit analisa. Keluaran *interleaver* bit ini dikelompokkan dalam sebuah simbol kanal $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_m)$. Keluaran \mathbf{v} akan masuk ke dalam modulator menghasilkan sinyal $s_i = \xi(\mathbf{v})$, dengan $1 \leq i \leq M$. Notasi ξ menunjukkan skema pemetaan dari pola bit ke titik konstelasi. Untuk kanal *Rayleigh fading* yang non-selektif dan deteksi koheren, sinyal diterima sepanjang interval simbol dapat dituliskan dengan persamaan :

$$r = g s_i + w \dots \dots \dots (3.17)$$

Pada persamaan 3.17, \mathbf{w} adalah *white Gaussian noise* dengan *inphase* yang independen dan komponen *quadrature* yang memiliki *power spectral density* $\sigma^2 = N_0/2$. Skalar \mathbf{g} adalah variabel acak *Rayleigh* yang menggambarkan amplitudo *fading* dari sinyal yang ditransmisikan (s_i).

Receiver sistem BICM memiliki tiga elemen, yaitu *demodulator*, *de-interleaver*, dan *decoder* konvolusi. Performa sistem BICM melalui kanal AWGN

ditentukan oleh *free squared euclidian distance* (FED), yaitu $FED = d_H d_{\min}^2$, dengan d_{\min} adalah *Euclidian distance* minimum dari konstelasi sinyal. Sedangkan untuk kanal *Rayleigh fading* dengan *channel state information* (CSI) yang sempurna, faktor yang mempengaruhi performansinya adalah kuadrat rata-rata harmonik *Euclidian distance*, yang ditunjukkan dengan persamaan :

$$d_h^2 = \left(\frac{1}{m 2^m} \sum_{k=1}^m \sum_{s_i \in \Psi_b^k} \frac{1}{|s_i - s_i|^2} \right)^{-1} \dots\dots\dots(3.18)$$

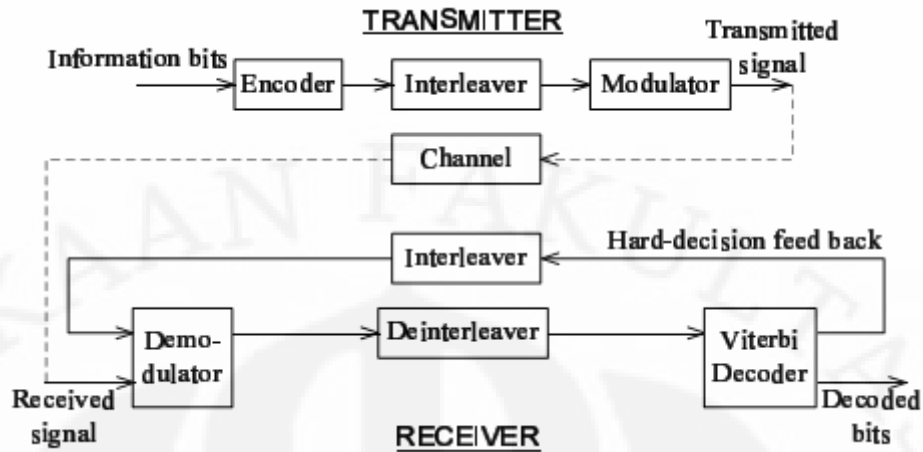
Performa sistem BICM yang melalui kanal *Rayleigh fading* dapat didekati dengan persamaan :

$$\log_{10} P_b = \frac{-d_H}{10} \left[(R d_h^2)_{dB} + \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dB} \right] + const \dots\dots\dots(3.19)$$

di mana P_b adalah probabilitas bit *error* dan R adalah *rate* informasi.

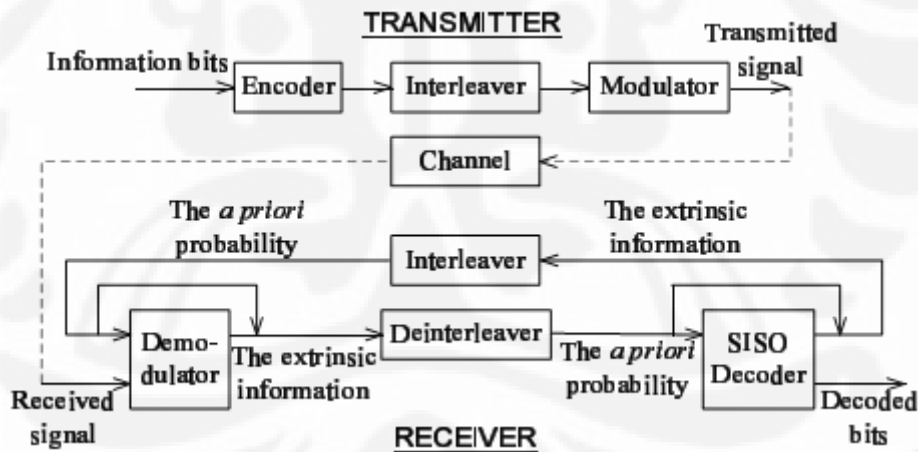
3.3.2 BIT INTERLEAVED CODED MODULATION DENGAN ITERATIVE DECODING (BICM-ID)

Baru-baru ini, kesuksesan *turbo code* telah menunjukkan keunggulan proses *iterative* dalam skema *decoding*. Dengan *turbo code*, performa BICM konvensional dapat ditingkatkan. BICM yang sudah ditingkatkan ini disebut dengan BICM-ID. BICM-ID yang pertama kali diperkenalkan menggunakan *hard-decision feedback* pada *receiver*-nya dan *decoder* viterbi. Performa BICM-ID dengan *hard decision feedback* ini dapat ditingkatkan lebih jauh dengan menggunakan *soft decision feedback*. Berikut adalah model sistem BICM-ID dengan *hard decision feedback* dan *soft decision feedback*,



Gambar 3.4 Blok diagram sistem BICM-ID dengan *hard decision feedback* [16]

Pada Gambar 3.4, terlihat bahwa *transmitter* sistem BICM-ID *hard decision feedback* tidak berbeda dengan sistem BICM konvensional. Perbedaan terdapat pada sisi *receiver*-nya, di mana BICM-ID *hard decision feedback* menggunakan *decoder* viterbi yang keluarannya di-*feedback* ke demodulator. Sedangkan pada Gambar 3.5, BICM-ID *soft decision feedback* menggunakan *decoder* yang lebih khusus lagi, yaitu *soft-input soft-output (SISO) decoder*.



Gambar 3.5 Blok diagram sistem BICM-ID dengan *soft decision feedback* [16]

3.4 MEKANISME SIMULASI

Simulasi dilakukan untuk mengetahui performansi LDPC *code* pada sistem *mobile* WiMAX atau standar IEEE 802.16e. Program simulasi dibuat dengan menggunakan *software* MATLAB. Program yang digunakan didapat dari *iterative solution code modulation library (ISCML)* versi 1.8.0 yang dikembangkan oleh

Matthew C. Valenti. Parameter yang digunakan dalam simulasi *mobile* WiMAX adalah sebagai berikut :

- Teknik modulasi, yaitu QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM,
- Kanal transmisi, yaitu AWGN dan *rayleigh fading*,
- *Rate* : efisiensi spektral yang didefinisikan sebagai jumlah data bit dibagi jumlah simbol per *frame*, atau dengan kata lain jumlah bit pesan dibagi jumlah bit yang dikirimkan (yaitu $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan $\frac{5}{6}$),
- *Framesize* : jumlah kode bit,
- Jumlah iterasi maksimum LDPC *code*, yaitu antara 10 – 100 iterasi,
- Bit *interleaver*, yaitu BICM dan BICM-ID,
- Algoritma *decoder* yaitu *sum-product decoding* dan *min-sum decoding*.

Indikator performansi yang digunakan adalah *bit error rate* (BER) dan *frame error rate* (FER). Nilai BER didapat dengan membandingkan data yang dikirim dengan data yang diterima, kemudian dihitung kesalahannya lalu dibagi dengan panjang data dan jumlah blok data yang dikirim. Sedangkan nilai FER dihitung dengan membagi jumlah *frame* yang *error* dengan jumlah blok yang dikirim. Sedangkan nilai E_b/N_0 (dalam watt) diperoleh dengan membagi nilai E_s/N_0 (dalam watt) dengan *rate*. Parameter *Rate* pada simulasi sudah didefinisikan di awal tiap skenario.

Target BER minimum adalah 10^{-5} . Jadi, apabila nilai BER sudah mencapai 10^{-5} , maka simulasi selesai. Untuk LDPC *code*, jumlah iterasi yang digunakan rata-rata 30 iterasi dan maksimum 100 iterasi. Artinya, apabila simulasi menggunakan iterasi maksimum sebanyak 30 iterasi, maka jika hasil perhitungan belum mencapai nilai BER yang diinginkan maka program akan terus melakukan iterasi sampai 30 kali. Jika iterasi maksimum telah dicapai, maka program akan terus melakukan perhitungan sampai jumlah maksimum *trial*. Setelah itu, program akan melakukan perhitungan untuk nilai E_b/N_0 berikutnya sesuai dengan kenaikan yang telah didefinisikan pada tiap skenario.

3.4.1 Simulasi Teknik Modulasi vs Kanal Transmisi

Simulasi pertama akan melihat performansi *mobile* WiMAX pada 3 teknik modulasi terhadap dua jenis kanal propagasi radio, yaitu AWGN dan *Rayleigh fading*. Teknik modulasi tersebut adalah QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Simulasi dilakukan dengan *framesize* sebesar 576 dan *rate* $\frac{1}{2}$. Jumlah iterasi LDPC *code* yang digunakan sebanyak 30 iterasi. Nilai E_b/N_0 divariasikan antara 0 dB sampai 10 dB dengan kenaikan 0,5 dB.

3.4.2 Simulasi Jumlah Iterasi LDPC Code

Simulasi pada bagian kedua ini akan mencari hubungan jumlah iterasi LDPC *code* terhadap performansi *mobile* WiMAX. Performansi *mobile* WiMAX yang akan diukur pada percobaan ini adalah nilai BER untuk 10 iterasi sampai 100 iterasi dengan kelipatan 10. Dalam pengujian, digunakan teknik modulasi QPSK dengan kanal AWGN. Nilai E_b/N_0 divariasikan antara 0 dB sampai 3 dB dengan kenaikan 0,1 dB untuk tiap iterasi LDPC *code*.

Program akan menampilkan grafik hasil simulasi yang menunjukkan hubungan BER untuk tiap iterasi LDPC *code* dengan variasi nilai E_b/N_0 . Selain itu, simulasi program juga dapat menampilkan hubungan *frame error rate* (FER) dengan E_b/N_0 untuk tiap iterasi LDPC *code*.

3.4.3 Simulasi Code Rate vs Framesize

Pada bagian ketiga, simulasi akan melihat pengaruh *code rate* dan *framesize* untuk ketiga teknik modulasi. *Code rate* yang digunakan ialah $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan $\frac{5}{6}$. Besar *framesize*-nya adalah 576 dan 1152. Iterasi LDPC *code* yang dipakai sebanyak 50 iterasi. Nilai E_b/N_0 divariasikan antara 0 dB sampai 15 dB dengan kenaikan 0,25 dB. Simulasi dilakukan untuk teknik modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM pada kanal AWGN.

3.4.4 Simulasi Algoritma Decoding

Melalui simulasi keempat, performansi *mobile* WiMAX akan dilihat dari sisi algoritma turbo *decoding* yang digunakan, yaitu algoritma log-MAP, Max

log-MAP, constant log-MAP, dan linear kog-MAP. Simulasi dilakukan pada teknik modulasi QPSK melalui kanal AWGN. *Rate*-nya $\frac{1}{2}$ dan *framesize*-nya 576. jumlah iterasi maksimum yang digunakan ialah 50 iterasi. Percobaan dilakukan untuk kedua algoritma *decoding* pada LDPC *code*, yaitu algoritma *sum-product* dan algoritma *min-sum*. Grafik BER dan FER dibuat terpisah antara algoritma *sum-product* dengan algoritma *min-sum*.

3.4.5 Simulasi Bit Interleaver

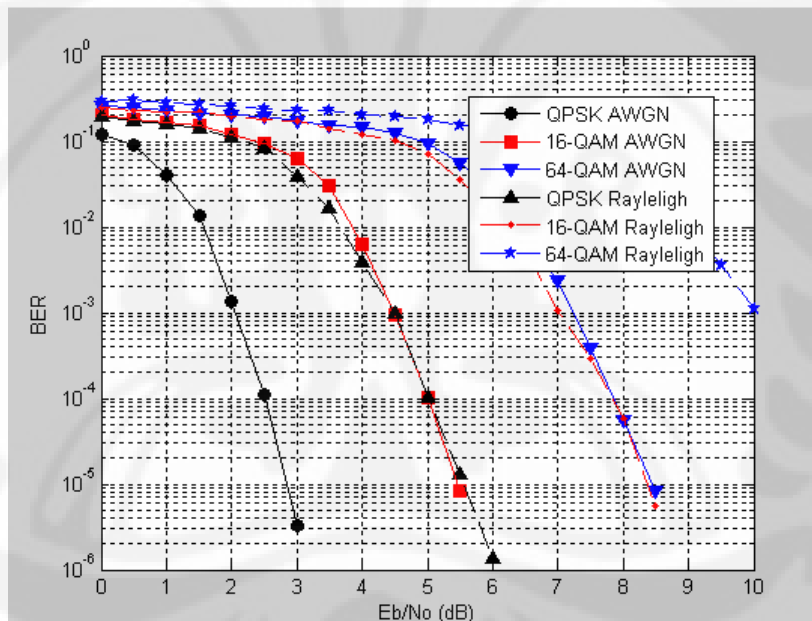
Simulasi terakhir ini akan memperlihatkan pengaruh bit *interleaver* terhadap performa sistem *mobile* WiMAX. Simulasi dilakukan dengan tanpa BICM, menggunakan BICM, dan BICM dengan *iterative decoding* (BICM-ID). simulasi dilakukan pada teknik modulasi 64-QAM melalui kanal AWGN dan *Rayleigh*. *Rate*-nya $\frac{1}{2}$ dan *framesize*-nya 576. Jumlah iterasi maksimum yang digunakan ialah 50 iterasi.

BAB IV

HASIL DAN ANALISA SIMULASI

4.1 Simulasi Teknik Modulasi vs Kanal Transmisi

Pada simulasi pertama, akan dilihat performansi *mobile* WiMAX pada tiga teknik modulasi terhadap kanal AWGN dan *Rayleigh fading*. Ketiga teknik modulasi tersebut adalah QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM. Nilai E_b/N_0 divariasikan dari 0 dB sampai 10 dB. Dari hasil simulasi didapat gambar grafik BER dan FER seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Gambar 4.1 menunjukkan hubungan BER terhadap E_b/N_0 sedangkan hubungan antara FER dengan E_b/N_0 ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Dari hasil tersebut dapat diketahui beberapa faktor yang mempengaruhi performansi *mobile* WiMAX.

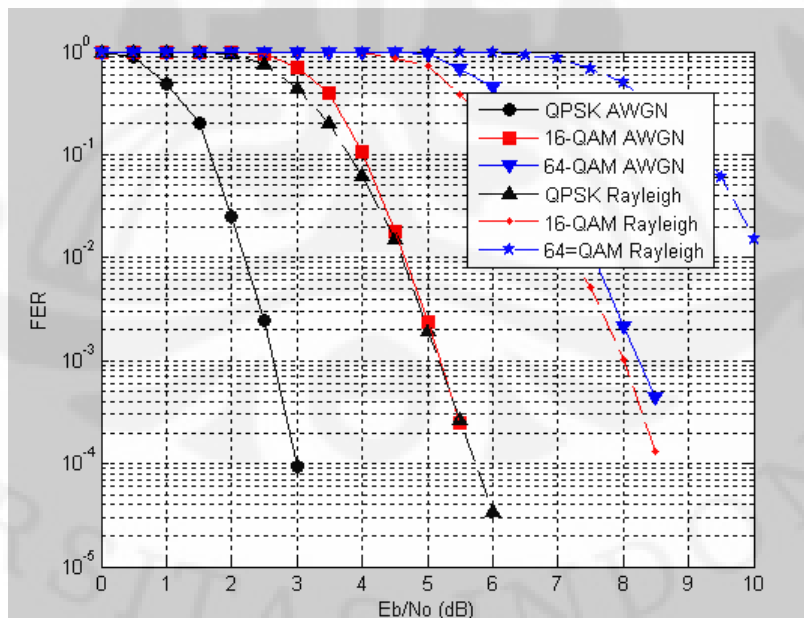


Gambar 4.1. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada variasi teknik modulasi

Faktor pertama yang mempengaruhi performansi *mobile* WiMAX adalah teknik modulasi. Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terlihat secara umum, modulasi QPSK memberikan performa terbaik, diikuti oleh 16-QAM dan 64-QAM. BER 10^{-5} telah dicapai oleh QPSK pada kanal AWGN saat E_b/N_0 bernilai sekitar 2,75 dB. Untuk 16-QAM pada kanal AWGN, nilai BER 10^{-5} dicapai ketika E_b/N_0 bernilai 5,5 dB. Sedangkan, untuk 64-QAM pada kanal AWGN, nilai

tersebut dicapai ketika E_b/N_0 bernilai 8,5 dB. WiMAX *Mobile*, menggunakan AMC dengan ketiga teknik modulasi tersebut. Sistem akan menentukan modulasi apa yang cocok untuk MS tertentu. Dari hasil simulasi, karena 64-QAM membutuhkan nilai E_b/N_0 yang besar untuk nilai BER tertentu, maka 64-QAM digunakan pada MS yang dekat dari BS dan radiusnya kecil. Sedangkan 16-QAM memiliki radius yang lebih besar dibanding 64-QAM dan QPSK memiliki radius paling besar. Hal ini disebabkan karena masing-masing modulasi menghasilkan jumlah bit informasi yang berbeda untuk tiap simbolnya. QPSK membawa 2 bit informasi, 16-QAM membawa 4 bit informasi, sedangkan 64-QAM membawa 6 bit informasi untuk tiap simbolnya. Dengan demikian, throughput 64-QAM akan lebih besar dibandingkan yang lain. Akan tetapi, QAM memiliki kelemahan, yaitu peka terhadap *noise*. Sehingga, untuk mempertahankan transmisi pada nilai BER tertentu, QAM membutuhkan nilai E_b/N_0 yang lebih besar.

Dapat disimpulkan bahwa modulasi dengan orde lebih tinggi membutuhkan kondisi kanal transmisi yang baik. Artinya, jika kondisi kanal transmisi baik, maka digunakan QAM dengan rate tinggi. Namun, jika kondisi kanal transmisi buruk maka digunakan QPSK dengan rate rendah. Hal ini dilakukan agar error yang terjadi selama proses transmisi dapat diperbaiki sebanyak mungkin.

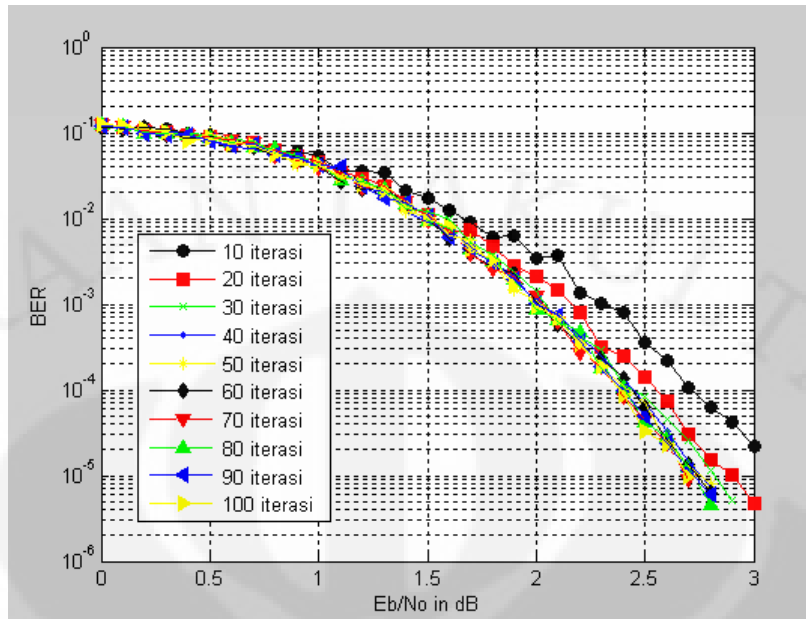


Gambar 4.2. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada variasi teknik modulasi

Faktor kedua yang mempengaruhi performa *mobile* WiMAX adalah kondisi propagasi kanal radio. Dalam simulasi digunakan kanal AWGN dan *Rayleigh fading*. Dari grafik Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, secara umum AWGN memiliki performa lebih baik dibanding *Rayleigh fading* untuk teknik modulasi yang sama. Alasan hal ini adalah karena sinyal yang diterima oleh MS pada kanal *rayleigh* merupakan penjumlahan dari beberapa sinyal yang telah melewati berbagai lintasan yang berbeda (*multipath*). Selain itu, pada kondisi *Rayleigh fading*, tidak ada komponen sinyal yang langsung menuju *receiver* dari *transmitter* (*line of sight*). Setiap sinyal yang melalui lintasan yang berbeda tersebut, memiliki fasa dan *gain* yang berbeda sesuai dengan medium dan jarak yang dilalui sinyal tersebut. Penjumlahan fasa dan *gain* yang berbeda-beda ini akan menyebabkan pelemahan dan penguatan sinyal yang diterima MS.

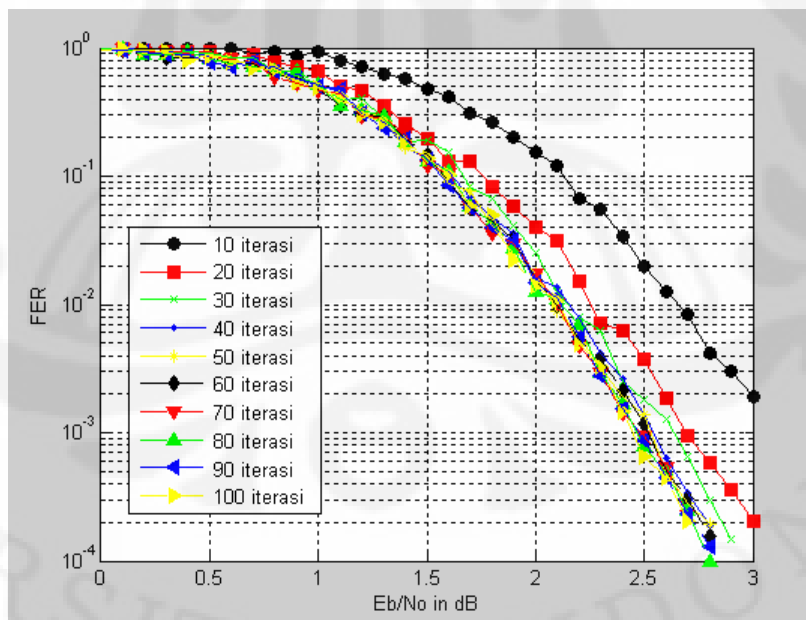
4.2 Simulasi Jumlah Iterasi LDPC Code

Pada simulasi kedua ini, akan dilihat performansi *mobile* WiMAX terhadap jumlah iterasi LDPC *code*. Simulasi dilakukan untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN. Jumlah kode bit (*framesize*) yang digunakan adalah 576 dengan perbandingan antara jumlah bit pesan dan bit yang dikirim (*rate*) adalah $\frac{1}{2}$. Nilai target BER minimum adalah 10^{-5} . Simulasi pada tiap iterasi akan berhenti setelah mencapai nilai BER minimum atau iterasi maksimum telah dicapai. Dari hasil simulasi didapat grafik seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Hasil simulasi pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa jumlah iterasi di atas 30 memiliki performa yang baik dibandingkan 10 dan 20 iterasi. Semakin banyak iterasi, tentunya performanya akan semakin baik. Terlihat bahwa, performa terbaik ditunjukkan oleh jumlah iterasi 100.



Gambar 4.3. Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi jumlah iterasi LDPC code

Dari grafik Gambar 4.3, untuk jumlah iterasi maksimum 10, nilai BER 0,00009 dicapai saat nilai E_b/N_0 3 dB. Sedangkan untuk jumlah iterasi 20, pada nilai E_b/N_0 yang sama, 3 dB, BER yang dihasilkan ialah 0,000007 atau sekitar sepersepuluhnya.



Gambar 4.4. Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi jumlah iterasi LDPC code

Gambar 4.4 menunjukkan FER hasil simulasi untuk berbagai jumlah iterasi yang berbeda. Hasil yang ditunjukkan tidak jauh berbeda dengan grafik BER pada

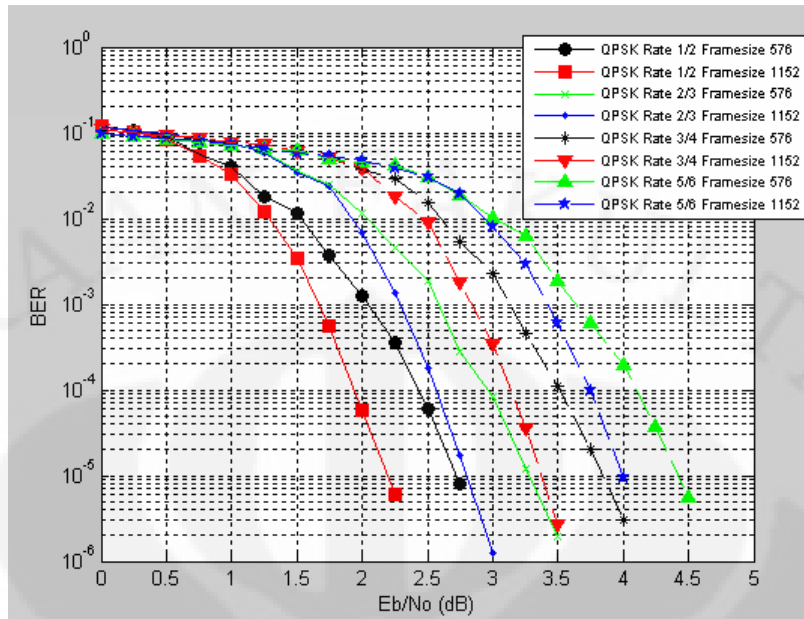
Gambar 4.3. Tampak bahwa untuk jumlah iterasi di atas 30, performa BER yang dihasilkan lebih baik dari 10 dan 20 iterasi. Untuk 10 iterasi, FER 0,009 dicapai ketika E_b/N_0 sebesar 3 dB. Sedangkan, pada 20 iterasi, untuk nilai E_b/N_0 yang sama ,3 dB, FER yang dihasilkan bernilai 0,0009. Dengan kata lain performanya 10 kali lebih baik. Pada jumlah iterasi 30 hingga 100, performa yang ditunjukkan tidak berbeda secara signifikan.

Pada simulasi ini, semakin banyak jumlah iterasi maka semakin baik performa yang dihasilkan. Hal ini disebabkan, sistem akan terus melakukan iterasi sampai mencapai nilai BER atau FER yang diharapkan. Simulasi baru akan berhenti jika telah mencapai BER atau FER yang diinginkan atau jumlah iterasi maksimum telah dicapai. Namun, imbasnya adalah semakin banyak jumlah iterasi maka waktu tunda (*delay*) akan semakin besar.

Dari hasil simulasi didapat bahwa, perbedaan performa antara tiap jumlah iterasi tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan ukuran frame (*framesize*) yang cukup kecil. *Framesize* merupakan panjang kode bit yang digunakan pada LDPC. Jika ukurannya kecil, maka iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai BER tertentu tidak terlalu besar. Misal, untuk ukuran *framesize* 576, sistem hanya membutuhkan 30 iterasi, maka walaupun jumlah iterasi maksimum diperbanyak, iterasi akan berhenti setelah 30 iterasi. Akibatnya, antara 30 iterasi dengan iterasi yang lebih banyak, performa yang ditunjukkan tidak berbeda jauh.

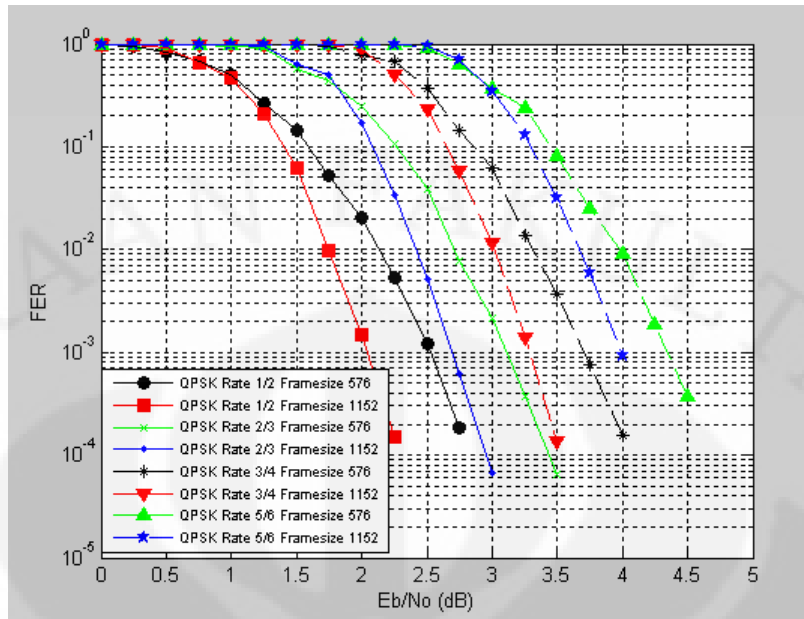
4.3 Simulasi Code Rate dan Framesize

Pada simulasi ketiga, disimulasikan sistem *mobile* WiMAX untuk empat *coderate* yaitu $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$ dan $\frac{5}{6}$, dan 2 *framesize*, yaitu 576 dan 1152. jumlah iterasi maksimum yang digunakan ialah 50 iterasi. Simulasi dilakukan untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN. Dari hasil simulasi dihasilkan grafik BER dan FER terhadap E_b/N_0 yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada QPSK untuk variasi *rate* dan *framesize*

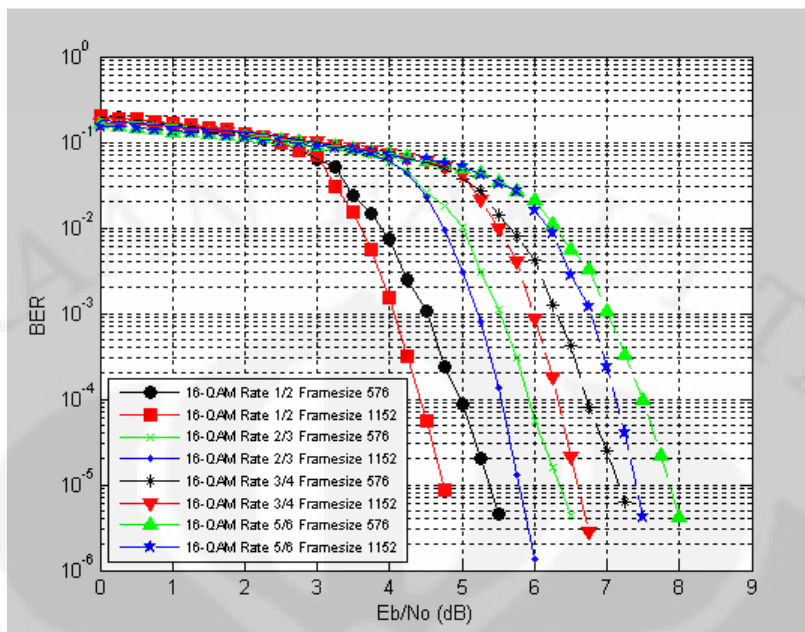
Grafik pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa *coderate* $\frac{1}{2}$ menghasilkan performa yang terbaik diikuti oleh $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan terakhir $\frac{5}{6}$. Lalu, untuk *coderate* yang sama, *framesize* dengan ukuran 1152 menghasilkan performa yang lebih baik dari 576. Begitupula pada grafik FER yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6, performa yang lebih baik tetap ditunjukkan oleh *rate* $\frac{1}{2}$ dengan *framesize* 1152. Pada Gambar 4.5, untuk *rate* $\frac{1}{2}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 1,25 dB. Untuk *rate* $\frac{2}{3}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 1,75 dB. Untuk *rate* $\frac{3}{4}$, performanya sama hingga 2 dB. Sedangkan untuk *rate* $\frac{5}{6}$, performanya sama hingga nilai E_b/N_0 3 dB.



Gambar 4.6. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada QPSK untuk variasi *rate* dan *framesize*

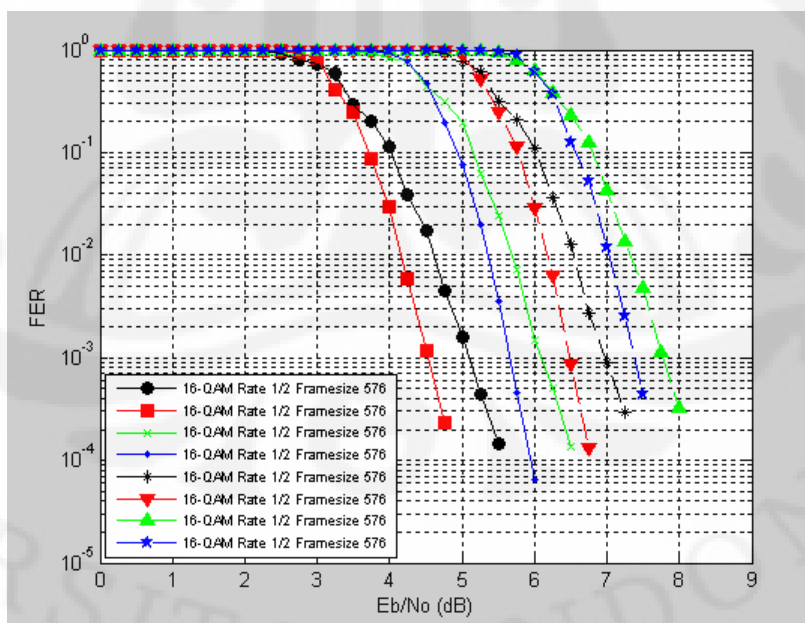
Grafik pada Gambar 4.6 juga menunjukkan pola performa yang sama seperti grafik pada Gambar 4.5. Simulasi selanjutnya, variasi *coderate* dan *framesize* dilakukan pada modulasi 16-QAM melalui kanal AWGN. Hasil simulasinya ditunjukkan oleh grafik BER dan FER pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.

Grafik pada Gambar 4.7 menunjukkan pola performa yang sama seperti pada modulasi QPSK, yaitu *coderate* $\frac{1}{2}$ menghasilkan performa yang terbaik diikuti oleh $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan terakhir $\frac{5}{6}$. Lalu, untuk *coderate* yang sama, *framesize* dengan ukuran 1152 menghasilkan performa yang lebih baik dari 576. Performa yang lebih baik tetap ditunjukkan oleh *rate* $\frac{1}{2}$ dengan *framesize* 1152. Pada Gambar 4.7, untuk *rate* $\frac{1}{2}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 3 dB. Untuk *rate* $\frac{2}{3}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 4 dB. Untuk *rate* $\frac{3}{4}$, performanya sama hingga 5 dB. Sedangkan untuk *rate* $\frac{5}{6}$, performanya sama hingga nilai E_b/N_0 6 dB.



Gambar 4.7. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 16-QAM untuk variasi *rate* dan *framesize*

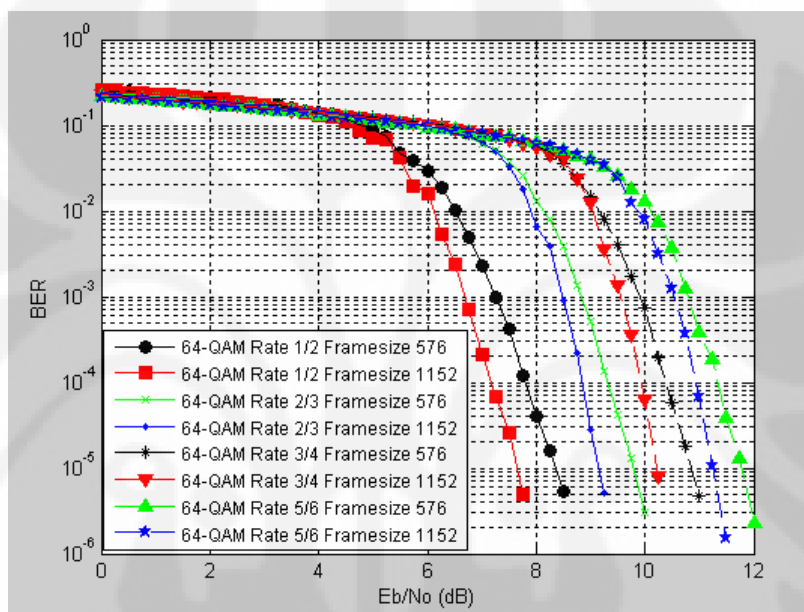
Grafik pada Gambar 4.8 juga menunjukkan pola performa yang sama seperti grafik pada Gambar 4.7. Simulasi selanjutnya, variasi *coderate* dan *framesize* dilakukan pada modulasi 64-QAM melalui kanal AWGN. Hasil simulasinya ditunjukkan oleh grafik BER dan FER pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



Gambar 4.8. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 16-QAM untuk variasi *rate* dan *framesize*

Grafik pada Gambar 4.9 menunjukkan pola performa yang sama seperti pada modulasi QPSK, yaitu *coderate* $\frac{1}{2}$ menghasilkan performa yang terbaik

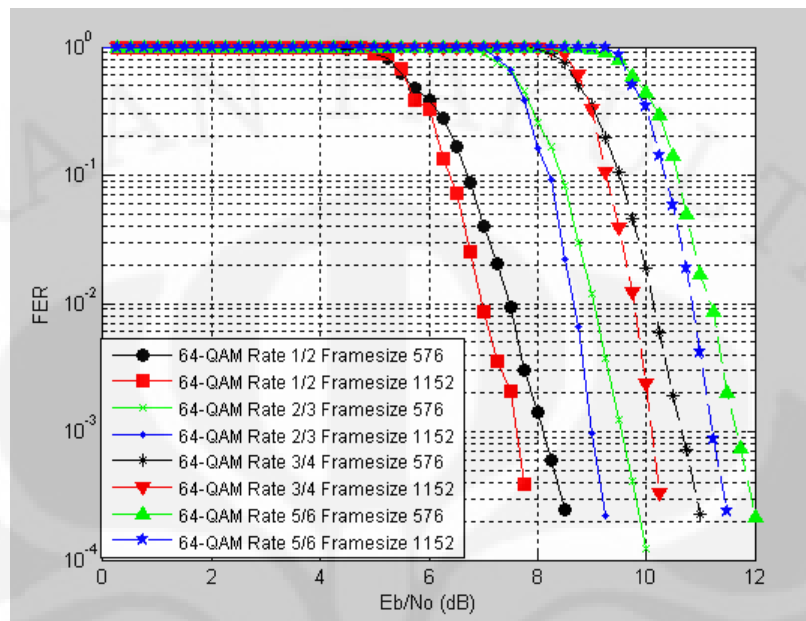
diikuti oleh $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan terakhir $\frac{5}{6}$. Lalu, untuk *coderate* yang sama, *framesize* dengan ukuran 1152 menghasilkan performa yang lebih baik dari 576. Pada grafik Gambar 4.10 juga ditunjukkan pola yang sama seperti Gambar 4.9. Performa yang lebih baik tetap ditunjukkan oleh *rate* $\frac{1}{2}$ dengan *framesize* 1152. Pada Gambar 4.9, untuk *rate* $\frac{1}{2}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 5 dB. Untuk *rate* $\frac{2}{3}$, performa *framesize* 576 dan 1152 sama dari nilai E_b/N_0 sebesar 0 dB hingga 7 dB. Untuk *rate* $\frac{3}{4}$, performanya sama hingga 9 dB. Sedangkan untuk *rate* $\frac{5}{6}$, performanya sama hingga nilai E_b/N_0 9,5 dB.



Gambar 4.9. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi *rate* dan *framesize*

Dari hasil simulasi ketiga ini, ada 2 faktor lagi yang mempengaruhi performansi *mobile* WiMAX. Faktor pertama adalah *coderate*, yaitu perbandingan antar jumlah bit pesan dengan jumlah bit yang dikirim. Jika *rate*-nya $\frac{1}{2}$, maka jumlah bit informasi yang dikirimkan 2 kali lebih banyak dibanding jumlah bit pesan. Dengan demikian, jumlah bit yang dikirim akan jauh lebih banyak dibanding dengan *rate* yang lebih besar seperti $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, dan $\frac{5}{6}$. Artinya, jika bit pesan berjumlah 120 bit, maka untuk *rate* $\frac{1}{2}$ bit yang dikirim 240 bit, *rate* $\frac{2}{3}$ 180 bit, *rate* $\frac{3}{4}$ 160 bit, sedangkan untuk *rate* $\frac{5}{6}$ hanya 144 bit. Jika, masing-masing dikirimkan melalui kanal yang sama, dengan kemungkinan kesalahan yang sama, maka untuk *rate* yang besar, bit pesan akan lebih banyak terkena *error* dibanding jika *rate*-nya kecil. Oleh karena itu, untuk mencapai BER pada nilai tertentu –

dalam simulasi ini 10^{-5} , simulasi dengan *rate* lebih besar membutuhkan energi per bit terhadap *noise* (E_b/N_0) yang besar.



Gambar 4.10. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi *rate* dan *framesize*

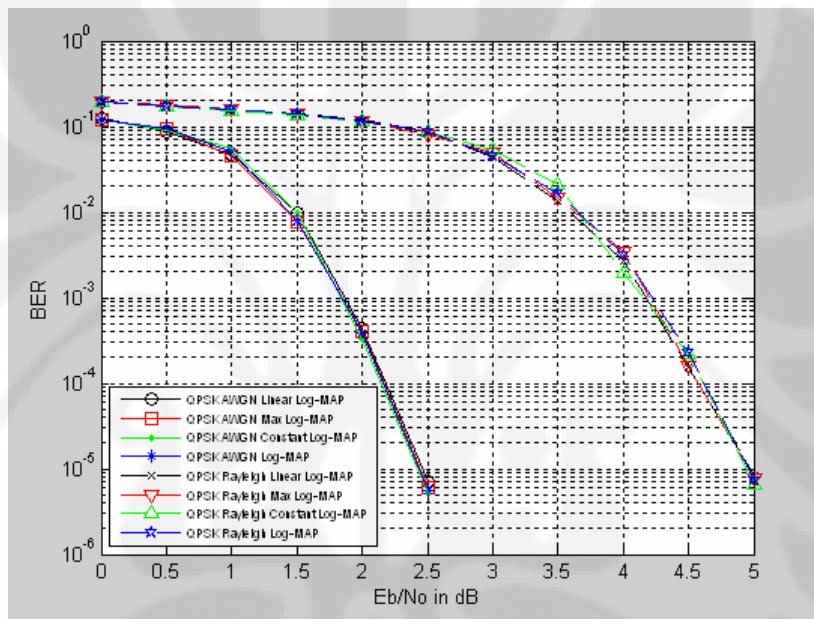
Faktor kedua yang mempengaruhi performa *mobile* WiMAX adalah ukuran frame (*framesize*), yaitu panjang kode bit. Dari grafik hasil simulasi tampak bahwa *framesize* 1152 menunjukkan performa yang lebih baik dibanding *framesize* 576. Artinya, jika *framesize* semakin banyak maka performanya semakin baik. Panjang kode (*framesize*) yang besar akan membuat bit-bit informasi dipetakan ke simbol-simbol yang jaraknya cukup berjauhan. Dengan demikian, *minimum distance* (MD) akan semakin besar. MD menggambarkan kemampuan sebuah kode untuk memperbaiki *error*. Jika jarak antar kode simbol semakin besar, maka semakin banyak *error* yang dapat diperbaiki. Dengan kata lain, semakin besar panjang kode (*framesize*), untuk menghasilkan nilai BER yang tertentu, maka nilai E_b/N_0 yang diperlukan semakin kecil.

4.4 Simulasi Algoritma *Decoding*

Simulasi keempat, memperlihatkan pengaruh algoritma *decoding* terhadap BER dan FER. Keempat algoritma tersebut adalah log-MAP, max log-MAP, constant log-MAP, dan linear log-MAP. Simulasi dilakukan untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN dan *Rayleigh fading* serta dua jenis tipe *decoder* pada

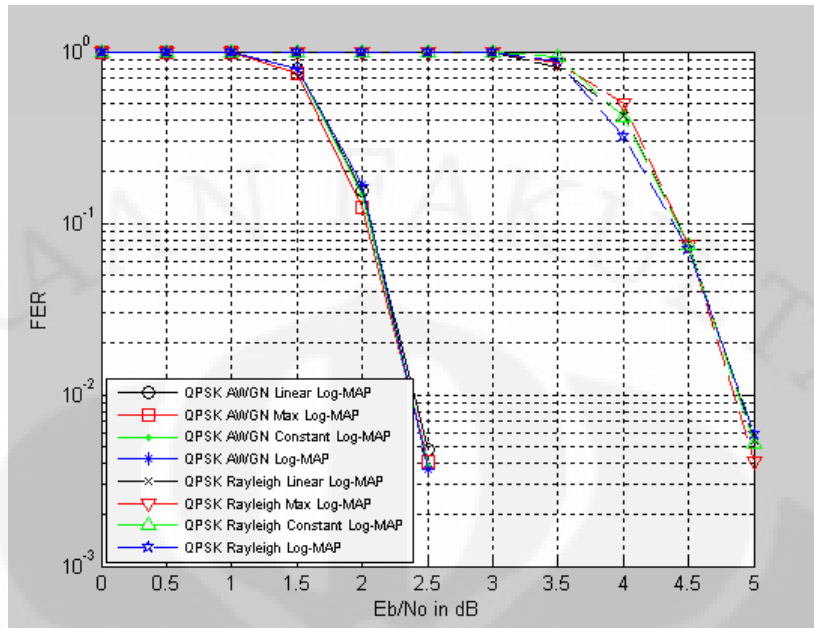
LDPC code, yaitu *sum-product decoding* dan *min-sum decoding*. Simulasi dilakukan pada *rate* $\frac{1}{2}$, *framesize* 576, dan jumlah iterasi maksimum 30 iterasi. Hasil simulasi ditunjukkan oleh grafik BER dan FER pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 untuk *sum-product decoding* dan grafik Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 untuk *min-sum decoding*.

Dari keempat gambar hasil simulasi keempat, terlihat bahwa keempat algoritma log-MAP tidak banyak mempengaruhi performa BER dan FER *mobile* WiMAX. Faktor yang sangat mempengaruhi dalam simulasi ini adalah algoritma *decoding* pada LDPC code.



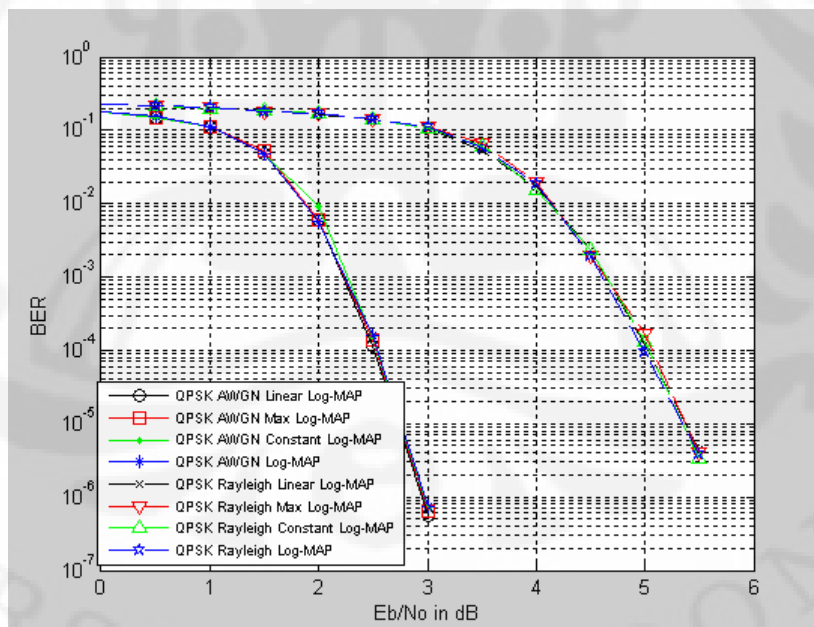
Gambar 4.11 Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada *sum-product decoding*

Pada Gambar 4.11, nilai BER 10^{-5} telah dicapai sebelum nilai E_b/N_0 mencapai 2,5 dB untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN. Sedangkan pada kanal *Rayleigh* nilai BER 10^{-5} baru dicapai pada E_b/N_0 5 dB.



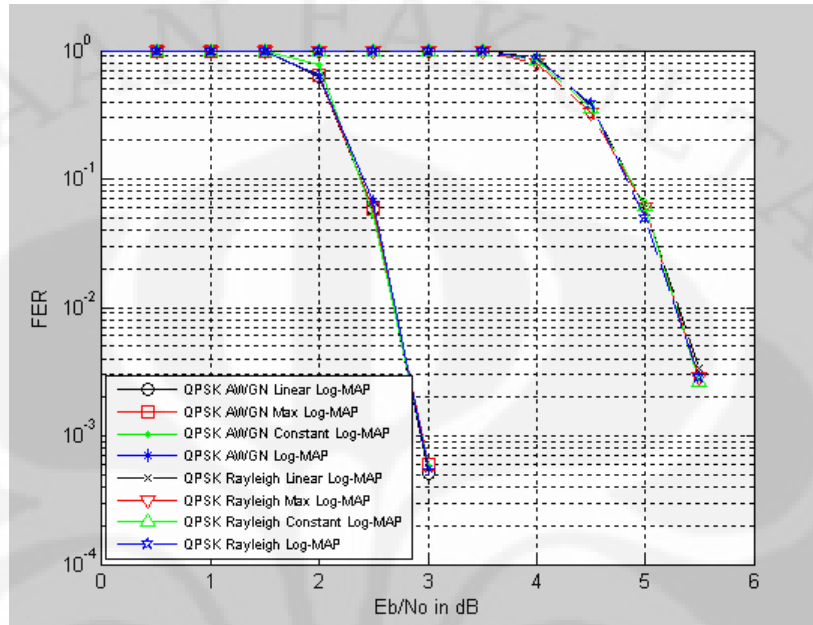
Gambar 4.12 Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada sum-product decoding

Untuk Gambar 4.12, pada nilai E_b/N_0 2,5 dB nilai FER modulasi QPSK pada kanal AWGN sekitar 0,07. Pada kanal *Rayleigh* nilai tersebut dicapai pada E_b/N_0 sebesar 5 dB.



Gambar 4.13 Grafik BER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada min-sum decoding

Pada Gambar 4.13, nilai BER 10^{-5} dicapai pada E_b/N_0 sekitar 2,75 dB untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN. Sedangkan pada kanal *Rayleigh* baru dicapai ketika nilai E_b/N_0 sekitar 5,25 dB.



Gambar 4.14 Grafik FER terhadap E_b/N_0 untuk variasi log-MAP pada *min-sum decoding*

Pada Gambar 4.14, untuk E_b/N_0 2,75 dB nilai FER sekitar 0,07 untuk modulasi QPSK pada kanal AWGN. Sedangkan pada kanal *Rayleigh*, untuk E_b/N_0 5,25 dB, nilai FER-nya adalah 0,01.

Dari hasil pemaparan tersebut, dapat disimpulkan *sum-product decoding* memiliki performa yang lebih baik dari *min-sum decoding*. Pada *sum-product decoding*, persamaan untuk r message-nya adalah :

$$r_{ji} = \left(\prod_{i' \in R_{ji}} \alpha_{i'j} \right) \phi \left(\sum_{i' \in R_{ji}} \phi(\beta_{i'j}) \right) \dots\dots\dots(4.1)$$

Sedangkan pada *min-sum decoding* :

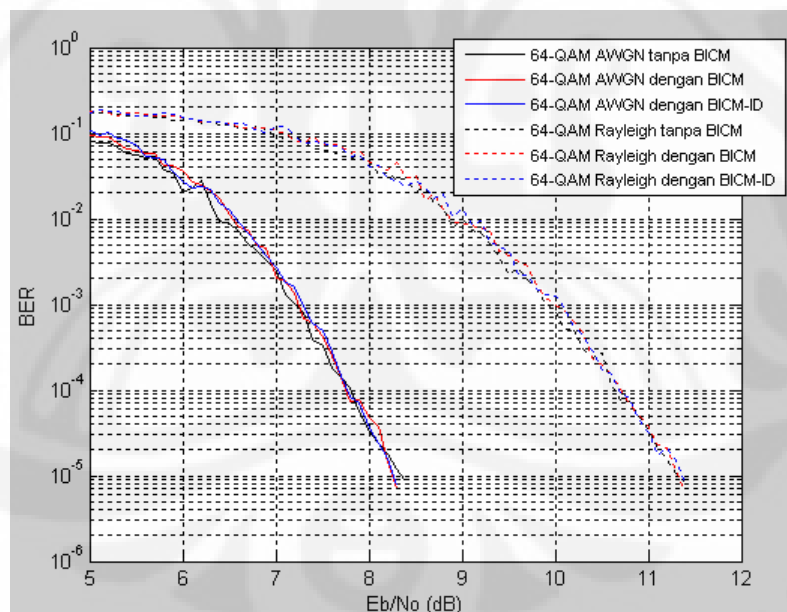
$$r_{ji} = \left(\prod_{i' \in R_{ji}} \alpha_{i'j} \right) \min_{i' \in R_{ji}} \beta_{i'j} \dots\dots\dots(4.2)$$

Terlihat, bahwa pada *sum-product decoding* pesan di-*decode* dengan melakukan penjumlahan seluruh matriks β , sedangkan pada *min-sum* hanya mengambil nilai minimum matriks β . Dari [17], *sum-product decoding* sangat

efektif karena probabilitas *error decoding* yang tidak terdeteksi dapat diabaikan. Dengan demikian, *sum-product decoding* memiliki performa yang lebih baik. Namun demikian, kelemahannya adalah, yaitu secara numerik tidak stabil dan terlalu banyak multipleks [19]. *Min-sum decoding*, walaupun memiliki performa yang kurang dari *sum-product*, akan tetapi, memiliki kompleksitas yang lebih rendah.

4.5 Simulasi Bit Interleaver

Simulasi terakhir, akan memperlihatkan performa *mobile WiMAX* akibat pengaruh penggunaan *interleaver*. *Interleaver* yang digunakan berupa *bit interleaved coded modulation* (BICM). Data pertama, dilakukan simulasi tanpa menggunakan BICM. Yang kedua, menggunakan BICM, sedangkan data ketiga disimulasikan menggunakan BICM-ID. Simulasi dilakukan pada modulasi 64-QAM melalui kanal AWGN dan *Rayleigh*. Hasil simulasi ditunjukkan oleh grafik BER dan FER terhadap E_b/N_0 pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



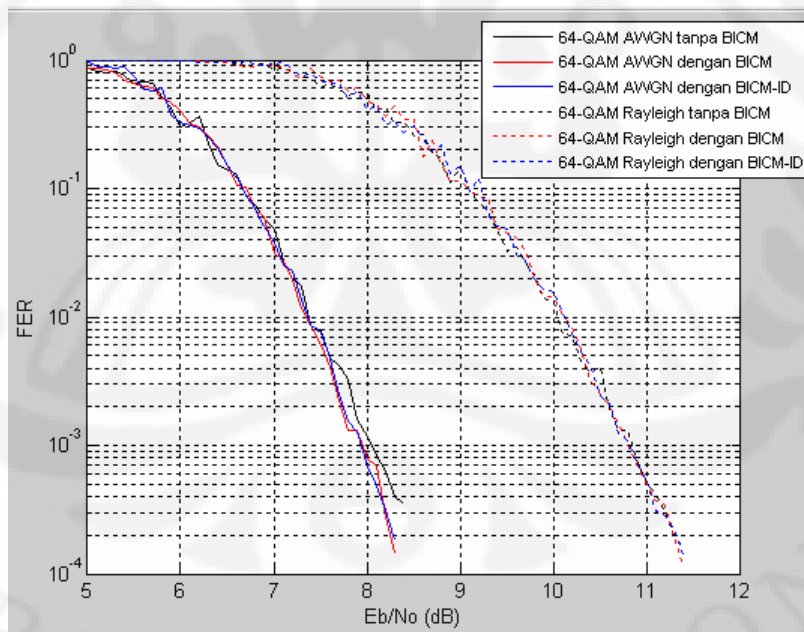
Gambar 4.15. Grafik BER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi BICM dan kanal

Hasil simulasi pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 menunjukkan bahwa, digunakan atau tidaknya BICM tidak mempengaruhi performa BER dan FER pada sistem *mobile WiMAX*. Secara umum, ketiga data yang disimulasikan memberikan performa yang sama. Tujuan digunakan bit *interleaver* adalah

melakukan penyebaran kesalahan *burst* dan meningkatkan orde diversitas sistem [17]. Teknik *interleaving* dilakukan dengan menyusun ulang urutan orde simbol yang dikirimkan. [18]

Kesalahan *burst* adalah kesalahan yang terjadi pada urutan simbol yang berurutan. Proses *interleaving* akan memecah *error burst* ke dalam bagian-bagian kecil sehingga dapat dengan mudah diperbaiki oleh kode koreksi kesalahan. Dengan demikian, BICM tidak banyak mempengaruhi BER maupun FER. Biasanya menggunakan BICM itu dalam rangka meningkatkan kapasitas kanal. BICM-ID dilakukan untuk meningkatkan performa BICM pada kanal *Gaussian* dengan meningkatkan *free euclidian distance* (FED) dari kode bit-nya. [17]

BICM mentransformasi kanal menjadi μ kanal biner paralel, sehingga kapasitas kanal yang menggunakan BICM adalah penjumlahan kapasitas sejumlah μ kanal biner. Kapasitas BICM bergantung pada bagaimana bit-bit dipetakan ke dalam simbol. Dari [19] diketahui bahwa *gray mapping* merupakan metode pemetaan bit ke simbol yang menghasilkan kapasitas lebih baik dibandingkan metode pemetaan simbol lain, seperti *antigray* dan *quasigray*.



Gambar 4.16. Grafik FER terhadap E_b/N_0 pada 64-QAM untuk variasi BICM dan kanal

BAB V

PENUTUP

Dari hasil simulasi dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Teknik modulasi QPSK menghasilkan performa yang terbaik di banding modulasi QAM. Hal ini disebabkan karena QAM lebih rentan terkena *noise* sehingga membutuhkan nilai energi per bit yang lebih besar agar bisa mempertahankan BER pada nilai tertentu.
2. Jika kondisi kanal transmisi baik maka dapat digunakan modulasi QAM dengan rate besar. Namun, jika kondisi kanal transmisi buruk maka dapat digunakan modulasi QPSK dengan rate rendah.
3. Kondisi distribusi *Rayleigh* pada kanal transmisi menyebabkan performa yang kurang baik dibanding AWGN. Hal ini karena sinyal yang diterima dari kondisi *Rayleigh* merupakan penjumlahan beberapa sinyal yang melalui medium, lintasan, dan jarak yang berbeda sehingga masing-masing sinyal memiliki fasa dan gain berbeda. Akibatnya, hasil penjumlahannya dapat saling melemahkan atau menguatkan dan pada kondisi yang sangat buruk bisa saling meniadakan.
4. Semakin banyak jumlah iterasi LDPC *code*, maka performa yang ditunjukkan akan semakin baik.
5. *Rate* informasi dan jumlah kode bit sangat mempengaruhi performa *mobile* WiMAX.
6. Algoritma *decoding* pada LDPC *code*, yaitu *sum-product decoding* memberikan performa yang lebih baik dibanding *min-sum decoding*. Namun demikian, *min-sum decoding* memiliki kompleksitas yang kecil dalam penerapannya.
7. Penggunaan BICM maupun BICM-ID tidak banyak mempengaruhi performa BER dan FER karena *interleaver* ini digunakan untuk meningkatkan kapasitas kanal.

DAFTAR ACUAN

- [1] Gunadi Dwi Hantoro, “WiMAX dan DSL : Musuh atau Teman ?” 22 Februari 2006. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari <http://www.ristinet.com/index.php?ch=8&lang=ind&s=81dde7203106feaf8933781ecc3cac5a&n=330>
- [2] Hazim Ahmadi, “Benarkah WiMAX Mengalahkan 3G?”, 30 Maret 2007. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari <http://www.ristinet.com/index.php?ch=8&lang=ind&s=f10743862e4e2ff86d9bd53399bd6727&n=363>
- [3] Gunadi Dwi Hantoro, “Kupas Tuntas Standar WiMAX”, 4 Mei 2006. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari <http://www.ristinet.com/index.php?ch=8&lang=ind&s=f10743862e4e2ff86d9bd53399bd6727&n=339>
- [4] Gunadi Dwi Hantoro, “WiMAX dan DSL : Musuh atau Teman ?”, 22 Februari 2006. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari <http://www.ristinet.com/index.php?ch=8&lang=ind&s=81dde7203106feaf8933781ecc3cac5a&n=330>
- [5] WiMAX Forum, “Mobile WiMAX – part I : A Technical Overview and Performance Evaluation”, Agustus 2006. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf
- [6] Prof. Rahim Tafazolli, “Wimax and 3GPP LTE : How Are They Related?”, Centre for Communication Systems Research (CCSR), University of Surrey (UK). April 2007.
- [7] Z. Becvar, J. Zelenka, R. Bestak, “*Comparison Of Handovers In Umts And Wimax*,” Czech Technical University in Prague, Department of Telecommunication Engineering.
- [8] Zdenek Becvar, Jan Zelenka, “*Handovers in the Mobile WiMAX*”, Czech Technical University Department of Telecommunication Engineering. Diakses pada tanggal 12 Nopember 2007 dari http://fireworks.intranet.gr/fireworks_docspublic/Fireworks_6CTUPB008a.pdf
- [9] Sam W. Ho, “Adaptive Modulation (QPSK, QAM),” Intel Corp., 2004.
- [10] “Understanding WiMAX and 3G for Portable/Mobile Broadband Wireless”, Intel broadband wireless access technical white paper. Desember 2004.

[11] William E. Ryan, "An Introduction to LDPC Codes", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, Agustus 2003.

[12] Langtan, Charon., "Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Tutorial", www.complextoreal.com, Intuitive Guide for Principles of Communication, 2004.

[13] Axell, Christian dan Mikael Brogsten, "Efficient WiMAX Receiver Implementation on A Programmable Baseband Processor", Thesis for Department of Electrical Engineering Linkopings Universitet, Swedia 2006.

[14] Matthew Valenti dan Rohit Iyer Seshadri, *Turbo and LDPC Codes: Implementation, Simulation, and Standardization*, West Virginia University, Juni 2006.

www.ieeevtc.org/vtc2007fall/final_programme.pdf

[15] M. C. Valenti dan J. Sun, "The UMTS Turbo Code and an Efficient Decoder Implementation Suitable for Software-Defined Radios," *International Journal of Wireless Information Networks*,(8)4 2001.

www.csee.wvu.edu/~mvalenti/documents/DOWLA-CH12.pdf

[16] Nghi H. Tran, "Signal Mapping Design for Bit Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding (BICM-ID)," Tesis Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan, Canada, Desember 2004.

[17] "Trellis Coded Modulation",

[18] "Basic Technique for Error Control Coding"

[19] Matthew Valenti, "Iterative Solutions Coded Modulation Library Theory of Operation", West Virginia University, 3 Oktober 2005

DAFTAR PUSTAKA

G. Kabatiansky, E. Krouk, S. Semenov, *Error Correcting Coding and Security for Data Networks*, (England :John Wiley and Sons Ltd., 2005)

Jorge Castineira Moreira, Patrick Guy Farrel, *Essentials of Error Control Coding*, (England :John Wiley and Sons Ltd., 2006)

Morelos Zaragoza, Robert H., *The Art of Error Correcting Code*, (England :John Wiley and Sons Ltd., 2006)