

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Layanan *broadband* dapat dipenuhi dengan berbagai teknologi, baik *wireline* maupun *wireless*. Teknologi *wireline* dapat memanfaatkan serat optik, sedangkan *wireless* yang menggunakan gelombang radio sebagai media transmisi, salah satunya dapat memanfaatkan WiMAX. WiMAX telah melalui beberapa tahapan pengembangan dan standarisasi ke arah mobilitas sampai terbentuknya standar IEEE 802.16e yang dikenal dengan *Mobile WiMAX*. *Mobile WiMAX* dapat melayani pengguna yang *fixed* maupun *mobile* yang merupakan optimalisasi kinerja dari standar sebelumnya sehingga dapat mengatasi dinamika kanal bergerak.

Pada bab ini akan dijelaskan teori penunjang mengenai teknologi *mobile WiMAX*, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) yang merupakan *air interface* pada sisi *uplink* maupun *downlink* sistem *mobile WiMAX*, model propagasi gelombang radio serta parameter-parameter yang digunakan untuk mengetahui performansi sistem jaringan *mobile WiMAX*.

2.1 *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX)

WiMAX adalah salah satu teknologi *Broadband Wireless Access* (BWA), yaitu suatu teknologi akses yang menjanjikan *bandwidth* yang lebar dengan kecepatan data yang tinggi. Teknologi ini dipersiapkan untuk layanan *multimedia* generasi keempat (4G). Standar *Broadband Wireless Access* (BWA) yang saat ini secara luas telah digunakan adalah standar yang dikeluarkan oleh *Institut of Electrical and Electronics Engineering* (IEEE). Beberapa standar BWA antara lain adalah standar 802.11 untuk jaringan *Wireless Fidelity* (WiFi), 802.15 untuk *Personal Area Network* (PAN), dan 802.16 untuk jaringan *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX). [Gunawan Wibisono, 2009]

Standar yang digunakan WiMAX adalah IEEE 802.16, standar ini pun berkembang dari waktu ke waktu. Awalnya IEEE 802.16 dikeluarkan untuk beroperasi pada frekuensi 10-66 GHz dengan transmisi *line of sight* (LOS). Selanjutnya dirilis IEEE 802.16a untuk beroperasi pada frekuensi yang lebih rendah yaitu 2-11 GHz yang dapat mendukung aplikasi *non line of sight* (NLOS). Karena mendukung aplikasi NLOS maka WiMAX standar IEEE 802.16a ini bisa dikatakan menjadi solusi awal dari transmisi jarak jauh yang besar kemungkinan kanal propagasi antara *transmitter* dan

receiver terdapat pepohonan, bangunan ataupun benda lain yang menghalangi. Kemudian IEEE mengeluarkan standar 802.16d, dikenal juga dengan *fixed* WiMAX, yang selanjutnya berkembang menjadi standar 802.16e dengan menambahkan kemampuan untuk aplikasi *user* yang bergerak atau *mobile*. Oleh karena itu, standar 802.16e dikenal juga sebagai *mobile* WiMAX.

2.1.1 *Mobile Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) 802.16e*

Mobile WiMAX adalah salah satu teknologi *Broadband Wireless Access (BWA)* dengan *data rate* tinggi. *Mobile* WiMAX adalah pengembangan dari standar WiMAX sebelumnya. *Mobile* WiMAX merupakan solusi *broadband wireless* yang memungkinkan penggabungan antara jaringan *mobile broadband* dan *fixed broadband* melalui satu teknologi akses radio dengan cakupan area yang luas dan arsitektur jaringan yang fleksibel. *Air interface mobile* WiMAX adalah *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*, baik pada sisi *uplink* maupun *downlink*. Untuk mendukung *bandwidth* kanal yang berkembang (*scalable*) dari 1.25 MHz ke 20 MHz, IEEE 802.16e mengenalkan *Scalable-OFDMA (SOFDMA)*.

Mobile WiMAX Release-1 memiliki standar *bandwidth* kanal sebesar 5 MHz hingga 10 MHz untuk alokasi spektrum yang terdaftar pada frekuensi 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz, dan 3.5 GHz. Sedangkan jumlah *subcarrier* yang dapat digunakan pada *mobile* WiMAX bersifat *scalable*. Pada standar WiMAX yang sebelumnya jumlah *sub-carrier* bersifat tetap atau *fixed*. [Amitabh Kumar, 2008]

2.1.2 *Arsitektur Mobile WiMAX*

Secara umum arsitektur jaringan WiMAX terdiri dari tiga bagian, yaitu :

1. *User Equipment*, terletak dilingkungan pelanggan dan digunakan oleh *end-user* untuk mengakses jaringan.
2. *Access Service Network (ASN)* yang terdiri dari :
 - *Base Station (BS)*
Base station merupakan perangkat *transceiver (transmitter dan receiver)*, yang memiliki fungsi utama membangun hubungan dengan *user equipment* dengan media *interface* gelombang radio yang mengikuti standar WiMAX. Selain itu *base station* juga berfungsi mengatur *micromobility management* seperti proses *handover* dan *radio resource management*.

- *Access Service Network-Gateway (ASN-GW)*

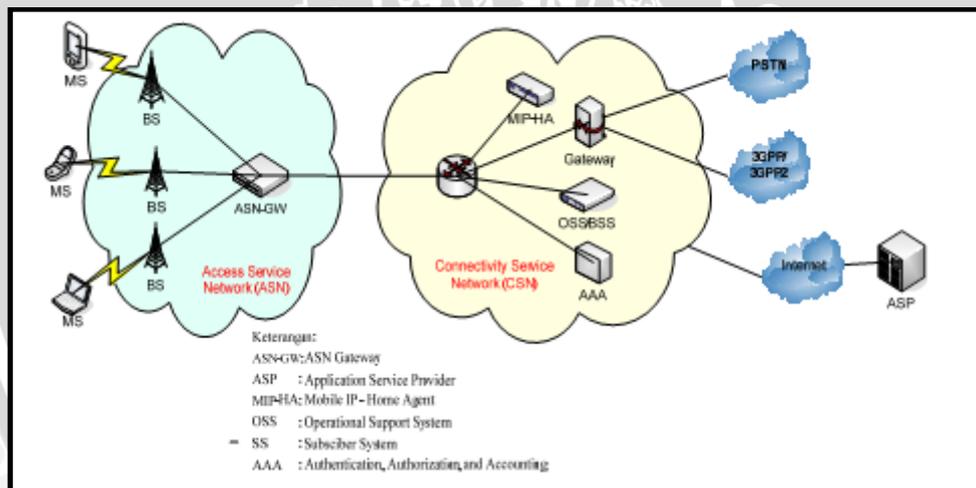
ASN-GW melakukan fungsi koneksi dan manajemen mobilitas serta batas-batas antar-layanan jaringan penyedia melalui pengolahan kontrol pelanggan dan pembawa lalu lintas data.

ASN terdiri dari satu atau lebih *base station* dan satu atau lebih *ASN gateway* yang membentuk jaringan akses radio.

3. *Connectivity Service Network (CSN)*

Berfungsi menyediakan konektivitas ke internet, ASP dan fungsi jaringan umum lainnya.

Arsitektur jaringan WiMAX ditunjukkan pada Gambar 2.1, dimana *mobile station* merupakan *user equipment* yang digunakan untuk mengakses jaringan WiMAX. *Base station* dan *Access Service Network-Gateway (ASN-GW)* adalah bagian dari ASN yang membentuk jaringan akses radio, dan *Connectivity Service Network (CSN)* yang merupakan jaringan inti pada WiMAX.



Gambar 2.1 Arsitektur *Mobile WiMAX*

(Sumber : WiMAX Forum, 2006)

2.1.3 Spektrum Frekuensi WiMAX

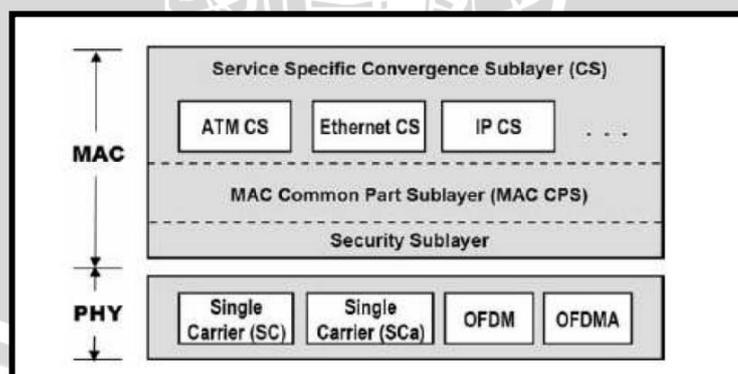
Pemilihan spektrum frekuensi operasi untuk WiMAX dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah penggunaan frekuensi untuk komunikasi seluler, *microwave link*, dan sistem komunikasi satelit. Dari beberapa pertimbangan tersebut maka WiMAX Forum menetapkan 2 *band* frekuensi utama pada *certification profile* untuk *fixed* WiMAX, yaitu *band* 3.5 GHz dan 5.8 GHz. Sementara untuk *mobile* WiMAX

ditetapkan 4 *band* frekuensi pada sistem profil *release-1*, yaitu *band* 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz, dan 3.5 GHz. [WiMAX Forum, 2006]

Frekuensi *fixed* WiMAX di *band* 3.3 GHz hanya digunakan di negara-negara Asia. Hal ini terkait dengan penggunaan *band* 3.5 GHz di Asia digunakan untuk komunikasi satelit, demikian juga dengan di Indonesia. *Band* 3.5 GHz di Indonesia digunakan oleh satelit Telkom untuk memberikan layanan *broadcast* TV. Apabila frekuensi 3.5 GHz digunakan secara bersama antara satelit dan BWA maka akan menimbulkan potensi interferensi. Sedangkan untuk *mobile* WiMAX digunakan frekuensi 2.3 GHz, sesuai dengan peraturan Dirjen Pos dan Telekomunikasi tahun 2007. [Gunawan Wibisono, 2009]

2.1.4 Protokol IEEE 802.16/16e

Fungsi-fungsi komunikasi dibagi menjadi suatu rangkaian *layer*. Masing-masing *layer* menampilkan subrangkaian fungsi-fungsi yang masih berkaitan yang diperlukan untuk berkomunikasi dengan sistem yang lain. Karakteristik standar 802.16/16e ditentukan oleh spesifikasi teknis dari *Physical Layer* (PHY) dan *Medium Access Control* (MAC). *Physical layer* berfungsi untuk mengalirkan data di *level* fisik. Sedangkan *Medium Access Control* (MAC) *layer* berfungsi sebagai penterjemah protokol-protokol yang ada di atasnya seperti ATM, *Ethernet*, dan IP. Gambar 2.2 menunjukkan protokol IEEE 802.16/16e. [Kwang-Cheng Chen, 2008]



Gambar 2.2 Protokol IEEE 802.16/16e

(Sumber : Kwang-Cheng Chen and J. Roberto B. de Marca, 2008)

2.1.4.1 Physical Layer (PHY)

Physical layer mobile WiMAX didasarkan pada penggunaan *scalable* OFDMA. Ukuran FFT dapat bervariasi dari 128 untuk *bandwidth* 1.25 MHz sampai 2048 untuk

bandwidth 20 MHz. Mobile WiMAX akan beroperasi pada band spektrum 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz dan 3.5 GHz dengan menggunakan *scalable* OFDMA. Dua profil *bandwidth* sistem yang sedang dikembangkan oleh WiMAX Forum Technical Working Group Release-1 untuk *scalable* OFDMA adalah 5 dan 10 MHz seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1. OFDMA mungkin adalah teknologi yang paling penting yang berhubungan dengan WiMAX. *Scalable* OFDMA didasarkan pada OFDMA yang pada gilirannya didasarkan pada OFDM.

Tabel 2.1 Parameter-Parameter *Scalable* OFDMA (SOFDMA)

Parameter	Value			
<i>System Channel Bandwidth</i> (MHz)	1.25	5	10	20
<i>Sampling Frequency</i> (F_p in MHz)	1.4	5.6	11.2	22.4
FFT Size (N_{FFT})	128	512	1024	2048
<i>Number of Sub-Channels</i>	2	8	16	32
<i>Sub-carrier Frequency Spacing</i>	10,94 kHz			
<i>Useful Symbol Time</i> ($T_u = 1/f$)	91,4 μ s			
<i>Guard Time</i> (T_g)	11,4 μ s			
<i>OFDMA Symbol Duration</i> ($T_s = T_u + T_g$)	102,9 μ s			
<i>Number of OFDMA Symbols (5 ms Frame)</i>	48			

(Sumber : WiMAX Forum, 2006)

Physical layer pada *mobile* WiMAX mendukung operasi *Time Division Duplexing* (TDD) dan *full* maupun *half duplex Frequency Division Duplexing* (FDD), akan tetapi rilis awal profil sertifikasi *mobile* WiMAX hanya mencakup TDD. Fitur ini memberikan kemudahan pengaturan spektrum frekuensi yang akan digunakan agar diperoleh efisiensi spektrum yang optimal. Hal ini juga sejalan dengan fleksibilitas penggunaan kanal yang diperkenankan.

Physical layer berfungsi untuk mengalirkan data di *level* fisik. Terdapat 4 pilihan standar *air interface* yang digunakan dalam *physical layer* IEEE 802.16/16 dengan masing-masing standar memiliki spesifikasi yang berbeda diantaranya adalah :

- *Wireless MAN-SC* : *air interface* yang menggunakan teknik modulasi *single carrier* yang bekerja pada frekuensi 10-66 GHz,
- *Wireless MAN-Sca* : *air interface* yang menggunakan teknik modulasi *single carrier* yang bekerja pada frekuensi di bawah 11 GHz,
- *Wireless MAN-OFDM* : *air interface* yang menggunakan skema *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dengan menggunakan *carrier* sebanyak 256. Tipe ini bekerja pada frekuensi dibawah 11 GHz,

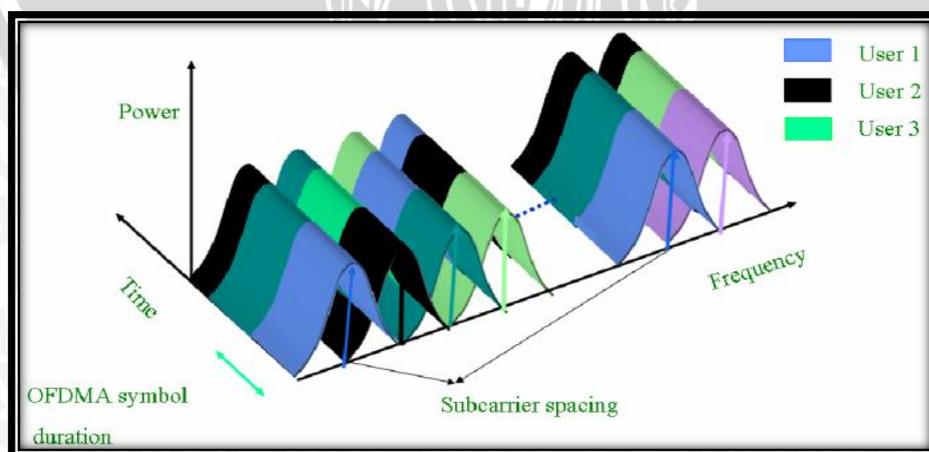
- *Wireless MAN-OFDMA* : *air interface* yang menggunakan skema *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dengan jumlah *carrier* hingga 2048 dan bekerja pada frekuensi di bawah 11 GHz. Metode ini juga mendukung penggunaan *scalable FFT* sebesar 128, 512, 1024, dan 2048.

2.1.4.2 Media Access Control (MAC)

MAC *layer* dibagi menjadi tiga *sublayer* yaitu *Service Specific Convergence Sublayer* (SS-CS) yaitu *sublayer* untuk mengakomodasi perkembangan teknologi masa depan, *MAC Common Part Sublayer* dan *Security Sublayer*. MAC *layer* juga berfungsi untuk mengakomodasi *throughput* data kecepatan tinggi melalui *physical layer*. MAC *layer* mempunyai karakteristik *connection identifier* (CID). CID digunakan untuk membedakan kanal *uplink* dan *downlink*. Setiap SS memiliki MAC *address* dengan lebar standar 48 bit. [Gunawan Wibisono,2009]

2.2 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

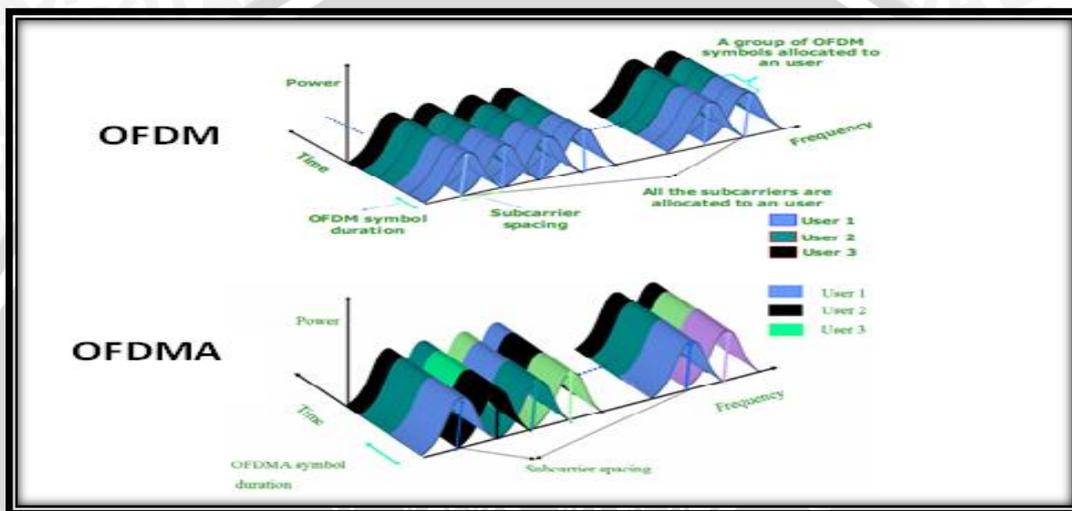
Pada dasarnya *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) merupakan gabungan antara *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) dan *Time Division Multiple Access* (TDMA). Hal ini berarti bahwa *multiple user* dialokasikan pada *subcarrier* yang berbeda secara dinamis (FDMA) dan pada *time slot* yang berbeda pula (TDMA). Sehingga pada periode waktu tertentu, kanal dapat melayani *multiple user* karena dalam satu *subcarrier* diperbolehkan diduduki oleh satu atau lebih *user* yang memiliki simbol OFDMA yang berbeda. Sinyal OFDMA pada domain frekuensi dan waktu ditunjukkan pada Gambar 2.3. [Srikanth, 2007]



Gambar 2.3 Sinyal OFDMA dilihat dari domain frekuensi dan waktu

(Sumber : Srikanth S., 2007)

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) merupakan pengembangan dari *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Akan tetapi kedua teknik *multiple access* ini memiliki perbedaan yang mendasar, yaitu pada OFDMA dalam satu *subcarrier* diperbolehkan diduduki oleh satu atau beberapa *user* yang memiliki simbol OFDMA yang berbeda. Sedangkan pada OFDM dalam satu *subcarrier* hanya diperbolehkan diduduki oleh *user* yang memiliki simbol OFDM yang sama. Perbedaan antara OFDMA dan OFDM ditunjukkan pada Gambar 2.4. [Srikanth, 2007]



Gambar 2.4 Perbandingan sinyal OFDM dan OFDMA dalam domain frekuensi dan waktu

(Sumber : Srikanth S., 2007)

Pada Gambar 2.4 dapat dilihat bahwa OFDM pada periode waktu tertentu hanya dapat melayani satu *user*. Data yang dikirim tetap dibagi ke dalam banyak *subcarrier*. Berbeda dengan OFDMA, pada periode waktu tertentu kanal dapat melayani *multiple user* karena *user* dialokasikan ke dalam banyak *subcarrier* secara terdistribusi atau acak.

Teknologi OFDMA menggunakan sinyal *orthogonal*. *Orthogonal* merupakan keadaan yang terjadi apabila *null sideband* dari salah satu *subcarrier* bertumpukan dengan *main lobe frequency* dari *subcarrier* yang selanjutnya. Sehingga *overlapping* dari frekuensi *carrier* tidak akan mempengaruhi sinyal. Dengan demikian akan menghilangkan adanya *guard band*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien.

Setiap *subcarrier* dalam suatu sinyal OFDMA dijaga sedekat mungkin secara teoritis agar diperoleh orthogonalitas pada setiap *subcarrier* dengan mengalokasikan setiap sinyal informasi yang terpisah ke dalam *subcarrier* yang berbeda. Jarak antar

subcarrier (Δf) pada spektrum sinyal dapat dinyatakan dengan persamaan berikut : [Hara, 2003]

$$\Delta f = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2-1)$$

Dengan :

Δf = selang antar frekuensi tiap *subcarrier* (Hz)

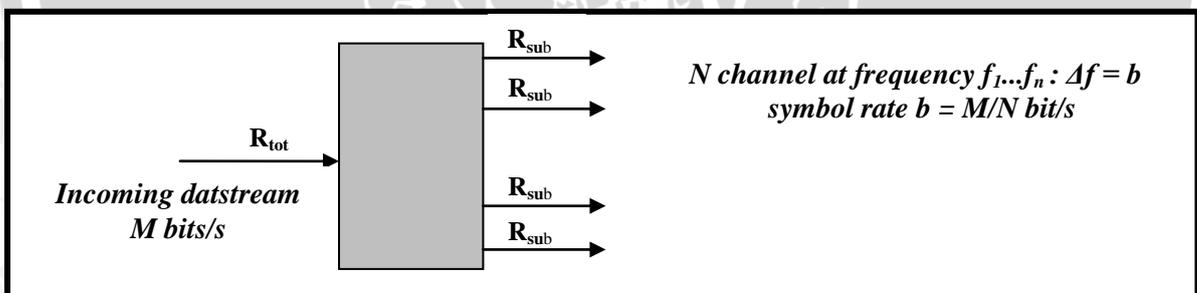
T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)

T_{cp} = durasi *cyclic prefix* (s)

OFDMA memiliki prinsip kerja yang sama dengan OFDM yaitu mengirimkan banyak pesan pada satu kanal pentransmisian. OFDMA juga dapat mengirimkan pesan tanpa terjadi *inter-carrier interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI). Hal ini dikarenakan adanya proses penambahan *cyclic prefix* (CP) pada simbol OFDMA.

2.2.1 Pembagian Aliran Data pada OFDMA

Prinsip dasar dari sistem OFDMA ini adalah membagi sebuah M laju data yang tinggi (*single high-rate bit stream*) menjadi N laju data rendah, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pembagian aliran data pada OFDMA

(Sumber : <http://www.cogitamus.it>)

Dalam sistem OFDMA laju transmisi total (R_{total}) yang tersedia dibagi kedalam beberapa *subcarrier* (R_{sub}) agar dapat mentransmisikan data dengan laju data rendah. Laju transmisi untuk masing-masing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan berikut : [Tufvesson, 1998]

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \quad (2-2)$$

Dengan :

R_{sub} = laju data masing-masing *subcarrier* (bps)

R_{tot} = laju data total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

Durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing *subcarrier* dinyatakan dengan persamaan : [Tufvesson, 1998]

$$T_{sub} = \frac{\log_2 \cdot M}{R_{sub}} = \frac{N \cdot \log_2 \cdot M}{R_{tot}} \quad (2-3)$$

Dengan :

T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)

R_{sub} = laju transmisi masing-masing *subcarrier* (bps)

R_{tot} = laju tranmisi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

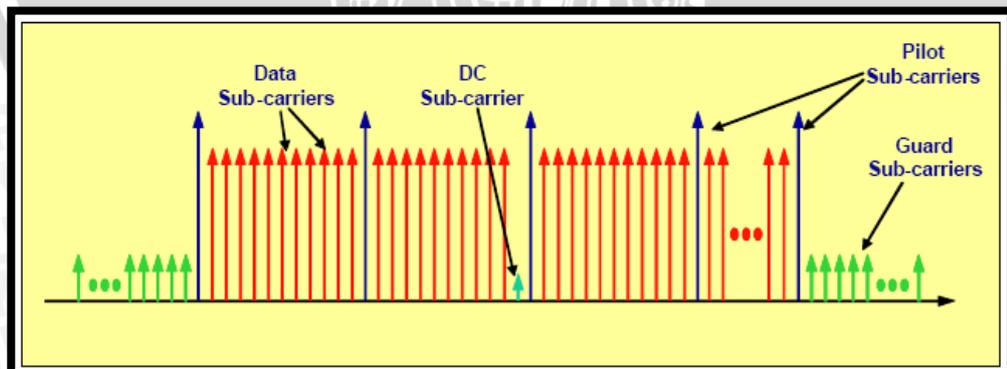
M = jumlah sinyal sesuai modulasi, untuk QPSK nilai $M = 2^2 = 4$, 16-QAM nilai $M = 2^4 = 16$, dan 64-QAM nilai $M = 2^6 = 24$

2.2.2 Struktur Simbol OFDMA dan Subkanalisasi

Struktur simbol OFDMA terdiri dari tiga tipe *subcarrier* seperti ditunjukkan

Gambar 2.6 :

- ✓ *Data sub-carrier*, yaitu untuk transmisi *data*
- ✓ *Pilot sub-carrier*, yaitu untuk estimasi dan sinkronisasi
- ✓ *Null sub-carrier* (tidak untuk transmisi) digunakan sebagai *guard band* dan *DC carrier*.



Gambar 2.6 Struktur *sub-carrier* OFDMA

(Sumber: WiMAX Forum, 2006)

Sub-carrier aktif (*data* dan *pilot*) dikelompokkan ke dalam *sub-set* dalam *subcarrier* yang disebut sub-kanal. *Mobile WiMAX* mendukung subkanalisasi untuk DL maupun UL. Unit minimum sumber daya frekuensi waktu dari subkanalisasi adalah satu *plot*, sama dengan 48 *sub-carrier*. [WiMAX Forum,2006]

Tabel 2.2 menunjukkan ketentuan jumlah *subcarrier* berdasarkan *bandwidth* kanal pada arah *downlink* sesuai dengan *bandwidth* sistem yang digunakan.

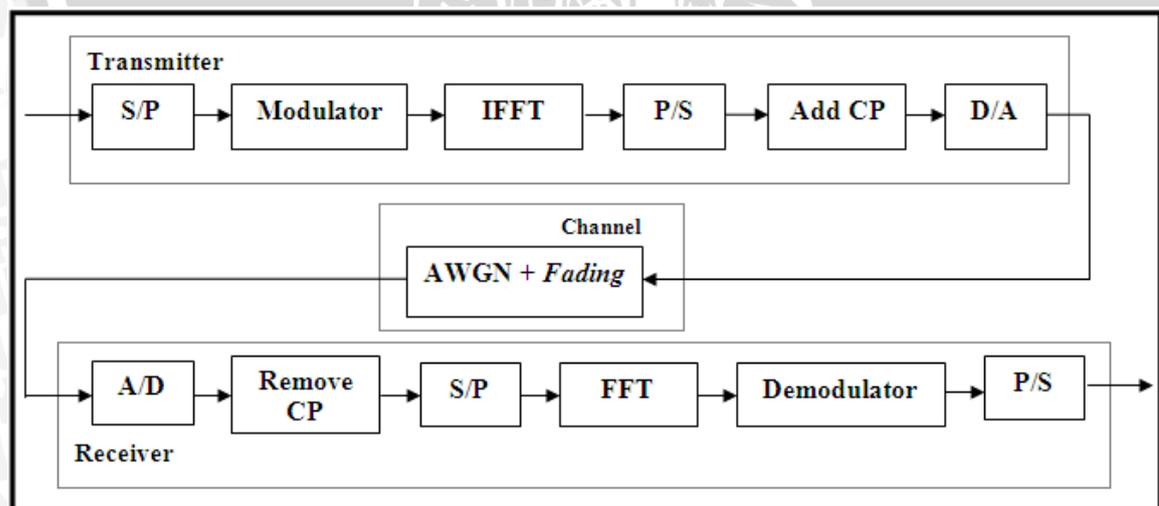
Tabel 2.2 Ketentuan jumlah *sub-carrier* pada arah *downlink*

Parameter	Value	
<i>System Channel Bandwidth (MHz)</i>	5	10
<i>FFT Size (N_{FFT})</i>	512	1024
<i>Null Sub-carriers</i>	92	184
<i>Pilot Sub-carriers</i>	60	120
<i>Data Sub-carriers</i>	320	720

(Sumber: WiMAX Forum, 2006)

2.2.3 Blok Diagram OFDMA

Blok diagram dasar dari pemancar dan penerima OFDMA ditunjukkan pada Gambar 2.7. Pada sisi *transmitter* terdapat konverter serial/paralel, modulator, IFFT, konverter paralel/serial, *add cyclic prefix*, dan konverter digital/analog. Sedangkan pada sisi *receiver* terdapat konverter analog/digital, *remove cyclic prefix*, konverter serial/paralel, FFT, demodulator dan konverter paralel/serial.



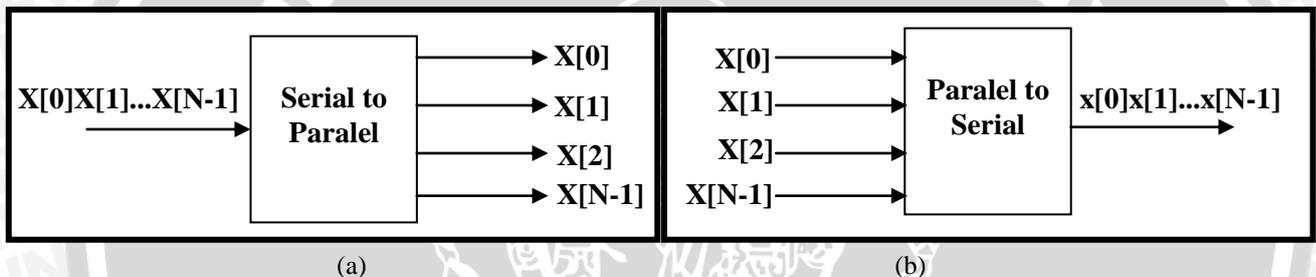
Gambar 2.7 Blok diagram pemancar dan penerima sistem OFDMA

(Sumber : Kwang-Cheng Chen, 2007)

2.2.3.1 Konversi Serial ke Paralel (S/P) dan Konversi Paralel ke Serial (P/S)

Data yang akan dipancarkan umumnya dalam bentuk aliran data serial. Oleh karena itu dibutuhkan konversi serial ke paralel pada sistem OFDMA untuk mengubah aliran *bit* data serial ke dalam data-data yang akan dipancarkan dalam setiap simbol OFDMA. Sehingga jika *bit rate* semula adalah R maka *bit rate* di tiap jalur paralel adalah R/N dimana N adalah jumlah jalur *subcarrier*. Hasil dari proses konversi serial ke paralel merupakan proses pengisian *payload* data untuk setiap *subcarrier*.

Pada penerima terjadi proses yang berkebalikan, dimana data dari *subcarrier* (data paralel) diubah kembali ke dalam aliran data serial aslinya. Proses yang terjadi pada penerima ini disebut juga dengan proses konversi paralel ke serial (P/S). Gambar 2.8(a) menunjukkan konversi serial ke paralel dan Gambar 2.8(b) menunjukkan konversi paralel ke serial.



Gambar 2.8 (a) Konversi Serial ke Paralel, (b) Konversi Paralel ke Serial

(Sumber : Johan, 2008)

2.2.3.2 Modulator dan Demodulator

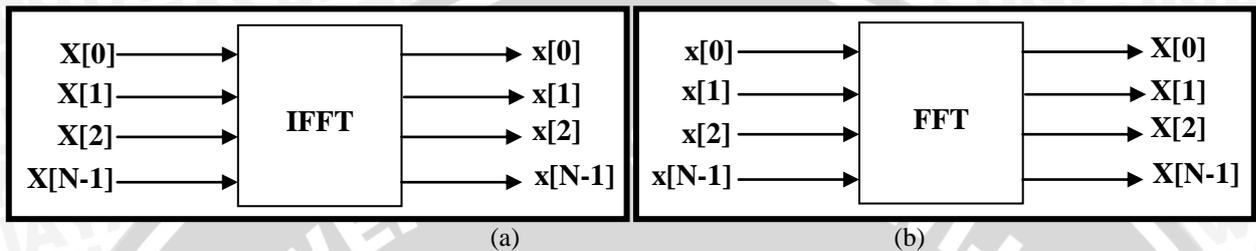
Modulator bertugas untuk mengkodekan masukan data-data informasi dari sebuah pesan menjadi keluaran berupa simbol yang cocok untuk pengiriman. Karena sumber informasinya berupa data digital, maka digunakan modulator *baseband* digital yang memodulasikan M -bit menjadi satu simbol yang disebut juga dengan modulasi M -ary. Contoh dari modulasi ini adalah *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Pada blok demodulator simbol-simbol diubah menjadi bit-bit informasi data kembali, sesuai dengan teknik modulasi yang digunakan yaitu QPSK atau QAM.

2.2.3.3 Invers Fast Fourier Transform (IFFT) dan Fast Fourier Transform (FFT)

Simbol OFDMA disusun dalam sebuah frame yang diubah dalam bentuk *domain* waktu dengan menggunakan *Invers Fast Fourier Transform* (IFFT). IFFT berfungsi sebagai *modulator*, dimana setiap simbol akan memodulasi frekuensi

subcarrier yang dibangkitkan oleh blok IFFT. Keluaran dari setiap proses transformasi IFFT akan membuat sebuah deretan simbol OFDMA.

Sedangkan *Fast Fourier Transform* (FFT) berfungsi sebagai *demodulator*, dengan cara mengubah sinyal wilayah waktu ke wilayah frekuensi. Titik FFT diset seperti titik IFFT. Kemudian simbol-simbol disusun kembali sesuai teknik pengalokasian *user* yang digunakan di pemancar. Gambar 2.9(a) merupakan proses IFFT dan Gambar 2.9(b) adalah proses FFT dengan N adalah jumlah *subcarrier*.



Gambar 2.9 (a) Proses IFFT, (b) Proses FFT

(Sumber : Johan, 2008)

2.2.3.4 *Cyclic Prefix*

Pada komunikasi *wireless* ada salah satu masalah yang terpenting yaitu *delay spread*. *Delay spread* merupakan suatu interval ukuran *delay* masing-masing lintasan yang dilewati sinyal dengan nilai penguatan atau peredaman tertentu. *Delay spread* ini dapat menimbulkan interferensi antar simbol, karena setiap simbol saling bertumpukan dengan simbol sebelum dan sesudahnya. *Delay spread* dapat menimbulkan *Intersymbol Interference* (ISI).

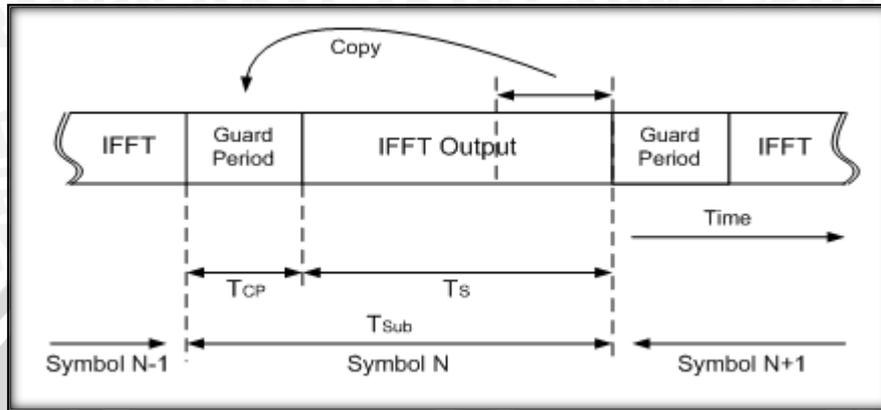
Pada OFDMA, *delay spread* dapat diatasi dengan menambah panjang simbol OFDMA sehingga melebihi panjang *delay spread*. Dengan bertambahnya panjang simbol OFDMA maka karakteristik kanal dapat berubah sehingga mengakibatkan orthogonalitas antar *subcarrier* dapat hilang dan ICI meningkat. Disisi lain, ISI juga menjadi masalah dengan meningkatnya *bandwidth carrier* dan laju simbol *subcarrier*. Untuk mencegah terjadinya ISI maka pada tiap simbol OFDMA disisipkan *guard interval* secara periodik. Bila panjang *guard interval* melebihi *multipath delay*, maka ISI dapat dihilangkan.

Akan tetapi penggunaan *guard interval* tidak dapat mencegah terjadinya *Interchannel Interference* (ICI) sehingga orthogonalitas antar *subcarrier* tidak mampu dijaga. Untuk mengatasi masalah ini, simbol OFDMA diperpanjang secara *cyclic* dalam *guard interval* atau disebut dengan *cyclic prefix*. Dengan penambahan *cyclic prefix*

maka masalah interferensi (ISI dan ICI) yang terjadi pada komunikasi *wireless* dapat diatasi.

Proses penambahan *cyclic prefix* dapat dilihat pada Gambar 2.10. ISI dan ICI dapat dicegah jika panjang *cyclic prefix* melebihi panjang *delay spread* maksimum.

[Amitabh Kumar, 2008]



Gambar 2.10 Penyisipan *Cyclic Prefix* pada Simbol OFDMA.

(Sumber : Eric Lawrey, 1997)

Proses penambahan *cyclic prefix* (T_{cp}) dilakukan pada pemancar terhadap simbol OFDMA. Pada penerima, *cyclic prefix* (T_{cp}) akan dipisahkan dari simbol OFDMA. Akibat penambahan *cyclic prefix* ini maka total dari durasi simbol OFDMA untuk masing-masing *subcarrier* adalah durasi simbol OFDMA tanpa *cyclic prefix* ditambah durasi *cyclic prefix*, sehingga total durasi simbol OFDMA adalah $T_s = T_{sub} + T_{cp}$.

Bandwidth antar *subcarrier* setelah penambahan *cyclic prefix* sama dengan *invers* dari durasi simbol tanpa *cyclic prefix*. Secara matematis *bandwidth* antar *subcarrier* diketahui sesuai pada persamaan : [Hara, 2003]

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2-4)$$

dan *bandwidth* sistem dari sejumlah *subcarrier* yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned} B &= \frac{2}{T_s} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp})T_s} \\ &= \frac{2(1-\alpha_{cp})+N-1}{(1-\alpha_{cp})T_s} \\ &= \frac{2(1-\alpha_{cp})+N-1}{(1-\alpha_{cp}) \frac{N \log_2 M}{R_{tot}}} \\ &= \frac{R_{tot} [2(1-\alpha_{cp})+N-1]}{(1-\alpha_{cp})N \log_2 M} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Dengan :

B = *bandwidth* sistem (Hz)

T_s = total durasi simbol OFDMA (s)

R_{tot} = laju data total (bps)

M = jumlah kemungkinan sinyal sesuai modulasi

N = jumlah *subcarrier*

α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

dimana $\alpha_{cp} = \frac{T_{cp}}{T_s}$

Pada sisi penerima proses yang dilakukan adalah *remove cyclic prefix*. Proses ini dilakukan untuk memisahkan sinyal sebenarnya dengan *cyclic prefix* yang kemungkinan telah terkena efek ISI dan ICI. Selain itu simbol yang harus diterima oleh stasiun penerima adalah simbol asli tanpa *cyclic prefix*.

2.2.3.5 Konversi Digital ke Analog (D/A) dan Konversi Analog ke Digital (A/D)

Pada pemancar, konverter *digital-to-analog* (D/A) mengkonversikan sinyal digital OFDMA ke dalam format analog. Sedangkan pada sisi penerima, konverter *analog-to-digital* (A/D) mengkonversikan sinyal analog OFDMA ke dalam format digital.

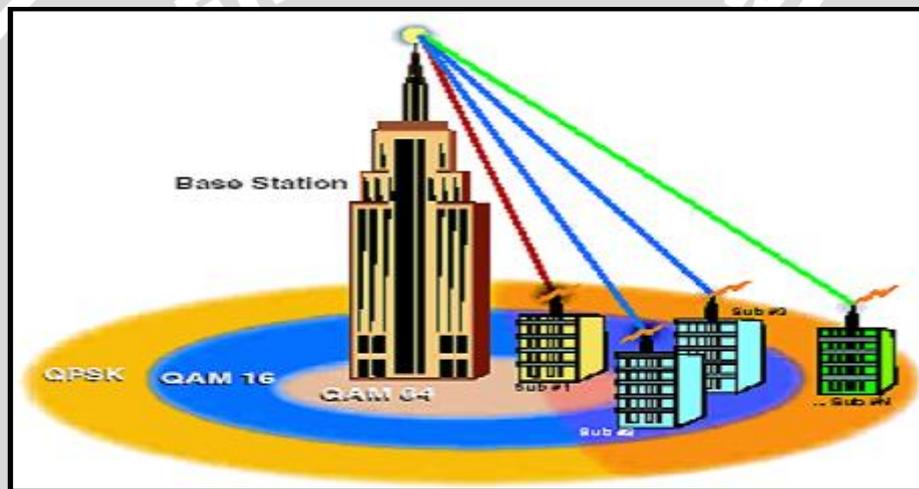
2.3 Modulasi

Modulasi adalah proses pengkodean informasi dari sumber pesan dengan cara yang sesuai dengan proses transmisi. Pada modulasi digunakan sinyal *carrier* yang memiliki nilai frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai frekuensi sinyal pesan. Pada umumnya modulasi dapat dilakukan dengan mengubah-ubah amplitudo, fasa, atau frekuensi dari sinyal *carrier* sesuai dengan amplitudo sinyal pesan. Akan tetapi pada perkembangannya teknik modulasi sudah dapat mengkombinasikan perubahan amplitudo, fasa, dan frekuensi dalam suatu teknik modulasi.

Dalam sistem komunikasi nirkabel, terdapat sebuah teknik modulasi yang disebut dengan modulasi adaptif. Sistem modulasi adaptif melakukan perubahan jenis modulasi sesuai dengan kondisi *link* radio saat tertentu. Modulasi adaptif secara efektif dapat mengatur keseimbangan akan kebutuhan *bandwidth* dan kualitas sambungan atau biasanya diukur dengan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Sistem modulasi adaptif

melakukan perubahan jenis modulasi sesuai dengan kondisi *link* radio saat itu. Jika jarak *user equipment* dengan *base station* dekat, akan menghasilkan redaman kecil sehingga kualitas sinyal yang diterima *user equipment* cukup baik maka digunakan modulasi yang lebih tinggi untuk memberikan kapasitas *bandwidth* yang lebih besar. Akan tetapi semakin jauh jarak *user equipment* dengan *base station* yang berarti redaman akan semakin besar, maka sistem modulasinya digeser menjadi lebih rendah untuk menjaga kestabilan dan kualitas sambungan.

Perpindahan modulasi dapat diatur secara otomatis dan dinamis dari 64-QAM, 16-QAM, dan QPSK. Seperti dilihat pada Gambar 2.11, jarak yang dekat antara *base station* dan *user equipment* menggunakan teknik modulasi 64-QAM, jarak sedang menggunakan 16-QAM dan jarak jauh menggunakan teknik modulasi QPSK.



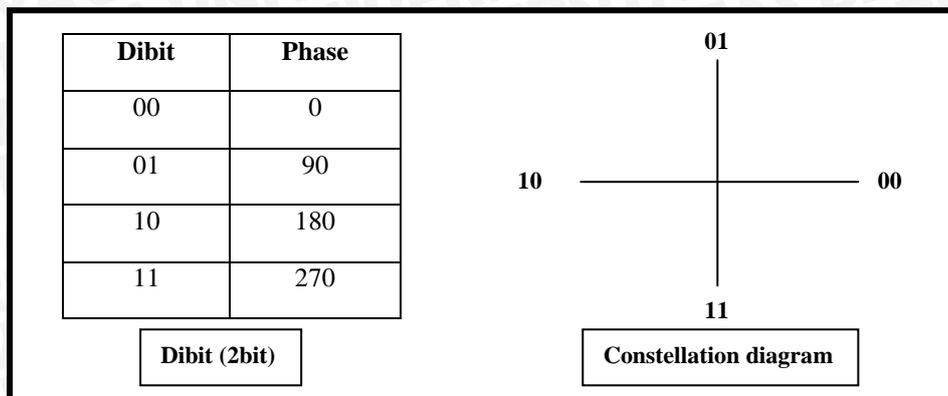
Gambar 2.11 Sistem Modulasi Adaptif
(Sumber : *Understanding WiMAX*, Intel 2004)

2.3.1 *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK)

QPSK merupakan bentuk lain dari modulasi *Phase Shift Keying* (PSK). QPSK merupakan teknik modulasi yang merubah atau memodulasikan fasa sinyal *carrier* yang memiliki jumlah fasa sebanyak 4 buah. QPSK mentransmisikan data dua kali lebih cepat karena terdapat dua bit dalam tiap simbolnya. Misalnya fasa 0° merepresentasikan bit 00, fasa 90° merepresentasikan bit 01, fasa 180° merepresentasikan bit 10, dan fasa 270° merepresentasikan bit 11. Pasangan bit-bit yang merepresentasikan masing-masing fasa disebut dengan dibit. Kelemahan dari QPSK yaitu kurang tahan terhadap *noise* dan rawan terjadi interferensi dari sinyal lain.

QPSK memodulasi fasa dengan 2 bit per simbol sehingga simbol satu dengan simbol yang lain berbeda fasa dengan kelipatan $\pi/2$. Gambar 2.12 di bawah

menjelaskan hubungan antara fasa dengan bit pada QPSK yang disebut dengan *constellation* atau *phase state diagram*. [Behrouz A. Forouzan, 2000]



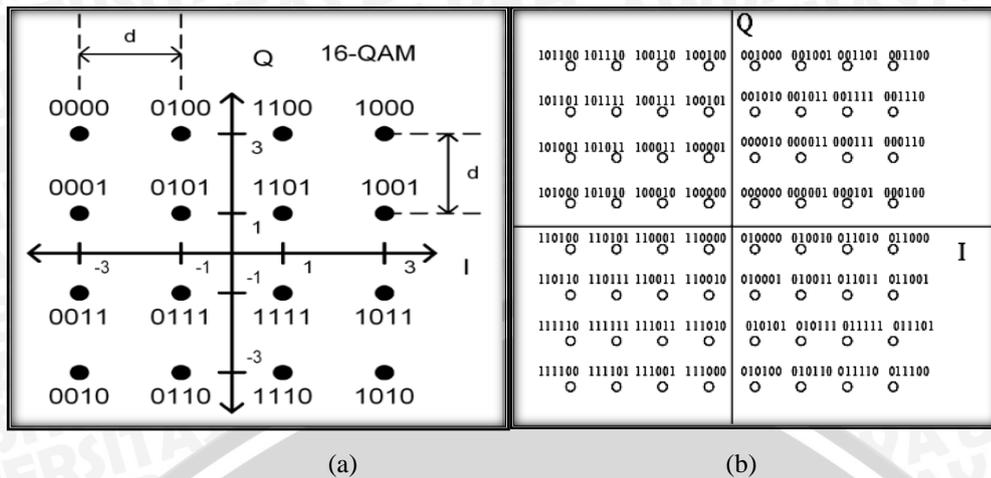
Gambar 2.12 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) constellation

(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

2.3.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

QAM merupakan teknik yang mengkombinasikan teknik *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan teknik *Phase Shift Keying* (PSK). Pada QAM, amplitudo dan *phase* sinyal *carrier* berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi. Sehingga sinyal direpresentasikan dalam besaran amplitudo dan pergeseran *phase*. Dikatakan *quadrature* karena jumlah minimum *bit* pada tiap simbolnya adalah 2 *bit*. Sehingga dikenal teknik 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, dan 256-QAM tergantung banyaknya jumlah *bit* dalam satu simbol. Tetapi sesuai standar yang telah diterapkan oleh IEEE 802.16e *mobile* WiMAX, teknik QAM yang digunakan pada teknologi *mobile* WiMAX adalah 16-QAM dan 64-QAM. [WiMAX Forum, 2006]

Untuk 16-QAM terdapat 4 *bit* setiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *quadbit*. Sedangkan untuk 64-QAM terdapat 6 *bit* pada tiap simbolnya, sehingga disebut juga dengan *hexabit*. Teknik 64-QAM merupakan teknik yang paling cepat mentransmisikan data, karena jumlah *bit* per simbolnya adalah yang tertinggi dibandingkan dengan teknik modulasi digital yang lain, yaitu 6 *bit*. Gambar 2.13 menjelaskan hubungan antara amplitudo dan fasa dengan *bit* pada 16-QAM dan 64-QAM. [Behrouz A. Forouzan, 2000]



Gambar 2.13 (a) Konstelasi 16-QAM (b) 64-QAM

(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

2.4 Propagasi Gelombang

Propagasi adalah proses perambatan gelombang elektromagnetik dari suatu tempat ke tempat yang lain. Model propagasi gelombang radio/elektromagnetik dilatarbelakangi oleh konsep dari dua buah antenna (pemancar dan penerima) pada udara bebas yang dipisahkan oleh jarak d (km). Model propagasi umumnya menjelaskan perkiraan rata-rata kuat sinyal yang diterima *receiver* pada jarak tertentu dari *transmitter*.

Propagasi gelombang elektromagnetik pada umumnya dipengaruhi oleh banyak faktor dalam bentuk yang sangat kompleks, diantaranya cuaca, keadaan geografis daerah dan fenomena luar angkasa yang tidak menentu. Propagasi gelombang elektromagnetik akan mengalami pantulan, difraksi, atau *scattering*, sehingga akan mengalami perubahan nilai amplitudo dan fasa, tergantung dari koefisien refleksi, lintasan, dan sudut datangnya gelombang.

Dalam propagasi gelombang elektromagnetik pada sistem komunikasi *wireless* terdapat empat buah mekanisme, yaitu :

a. Propagasi *Free Space*

Propagasi *free space* merupakan propagasi gelombang radio dimana sinyal dari *transmitter* dapat langsung diterima oleh *receiver*.

b. *Reflection* (pantulan)

Pantulan terjadi ketika perambatan gelombang elektromagnetik mengenai objek yang ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombang yang dipancarkan. Pantulan dapat terjadi pada permukaan tanah, gedung, serta tembok.

c. *Diffraction* (difraksi)

Difraksi terjadi pada saat gelombang yang dipancarkan dibelokkan oleh benda dengan permukaan yang memiliki sisi yang tajam. Gelombang-gelombang yang dihasilkan dari difraksi ini juga akan mempengaruhi gelombang yang diterima, meskipun tidak terlihat halangan langsung.

d. *Scattering* (hamburan)

Hamburan terjadi jika medium yang dilewati gelombang terdiri dari benda-benda yang ukurannya lebih kecil daripada panjang gelombang yang dipancarkan. Hamburan dihasilkan oleh permukaan kasar, benda kecil, atau ketidakteraturan dalam saluran frekuensi.

2.4.1 Kanal Propagasi

Kanal merupakan suatu media transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dari pemancar ke penerima. Dalam sistem *wireless*, yang tentunya menggunakan medium *wireless*, terdapat dua macam gangguan yang dinilai memiliki efek signifikan terhadap sistem. Gangguan tersebut adalah *noise* dan *fading*. [Gunawan Wibisono, 2008]

1. *Noise* atau derau

Noise merupakan gelombang elektromagnetik yang terdapat di alam, dapat bersumber dari matahari, bumi, atmosfer, galaksi, busi kendaraan bermotor, dan lain-lain. Dalam sistem nirkabel, sinyal asli dapat bercampur (ditambahkan) dengan sinyal *noise* ini sehingga *magnitude* sinyal total per satuan waktu merupakan penjumlahan kedua sinyal ini.

2. *Fading*

Fading secara definitif adalah penurunan dan fluktuasi daya di sisi *receiver*. *Fading* menyebabkan suatu kondisi dimana sinyal yang diterima terlalu jelek untuk dilakukan pemrosesan selanjutnya, yaitu demodulasi. Pada proses transmisi, sinyal yang sampai di penerima tidak hanya melewati satu jalur tetapi datang dari berbagai jalur (*multipath*). *Fading* pada sistem komunikasi *wireless* dapat menurunkan kualitas sinyal yang diterima. Beberapa efek *fading* terhadap sinyal diantaranya yaitu:

- Perubahan kuat sinyal secara cepat yang diterima pada jarak dan interval waktu yang singkat.

- Mengakibatkan modulasi frekuensi yang acak yang disebabkan oleh perbedaan sinyal *multipath* berdasar efek *Doppler*.
- *Time dispersion (echo)* yang disebabkan oleh waktu tunda (*delay*) propagasi dari gelombang *multipath*.

Fading juga dapat terjadi walaupun *receiver* dalam keadaan tetap/diam. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan adanya pergerakan dari objek di sekitar *receiver*. Dalam sistem komunikasi *wireless*, pengaruh *fading* harus diminimalkan. Proses terjadinya *fading* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Proses terjadinya *fading*
(Sumber : Gunawan Wibisono, 2007)

Pada sistem ini, karakteristik kanal diwakili oleh dua gejala yaitu *fading* yang adanya *noise* yang berdistribusi Gaussian, *Additive White Gaussian Noise (AWGN)* dan berdistribusi *Rayleigh*.

2.4.2 Kanal *Additive White Gaussian Noise (AWGN)*

Kanal AWGN adalah kanal ideal yang hanya memiliki noise AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Kanal ideal berarti kanal ini tidak menyebabkan *distorsi* (perubahan bentuk sinyal) pada sinyal yang dikirim, satu-satunya melemahnya sinyal disebabkan adalah *noise* AWGN. Kanal ideal memiliki *bandwidth* tidak terbatas dan respon frekuensinya tetap untuk segala frekuensi.

Noise AWGN adalah *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan *wireless* manapun, memiliki sifat-sifat *additive*, *white*, dan *gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal, sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, dan sifat *gaussian* artinya besarnya tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *gaussian*. Besarnya daya *noise* AWGN dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$N_o = k \times T \times B \quad (2-6)$$

Dengan :

N_o = daya *noise* saluran transmisi (J Hz atau watt)

k = konstanta Boltzman (1.38×10^{-23} J/K)

T = temperature operasi sistem ($^{\circ}$ K)

B = *bandwidth* (Hz)

2.4.3 Kanal Rayleigh Fading

Kanal *fading* merupakan kanal tidak ideal yang terdapat pada sistem komunikasi nirkabel, yang memiliki keterbatasan *bandwidth* dan menyebabkan distorsi pada sinyal yang dikirim. Kanal ini dibuat untuk memperkirakan akibat yang ditimbulkan oleh *multipath fading*. Distribusi yang sering digunakan untuk menjelaskan bentuk selubung sinyal pada kanal *multipath* yaitu distribusi *Rayleigh* sehingga fenomena ini lebih dikenal dengan *Rayleigh Fading Model*.

Pada kanal komunikasi bergerak, distribusi *Rayleigh* biasa digunakan untuk menjelaskan perubahan waktu dari selubung sinyal *fading* datar (*flat fading*) yang diterima atau selubung dari satu komponen *multipath*. Telah diketahui bahwa selubung dari jumlah antara dua sinyal derau *Gaussian* akan membentuk distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* digunakan untuk mewakili komunikasi yang sifatnya NLOS (*Non Line of Sight*). Distribusi *Rayleigh* mempunyai fungsi kerapatan probabilitas (*probability density function*) yang diturunkan sebagai berikut :

$$p(r) \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), & r \geq 0 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2-7)$$

Dengan :

$p(r)$ = fungsi sinyal berdistribusi *Rayleigh*

σ^2 = variasi dari sinyal

r = *magnitude* dari sinyal

Salah satu parameter penting dalam menganalisis karakteristik kanal *fading* yaitu *Doppler Shift*. *Doppler Shift* disebabkan oleh pergerakan relatif antara pemancar dan penerima dan akibat pergerakan objek-objek pada kanal. Hal ini mengakibatkan adanya pelebaran spektral sinyal yang diterima. Frekuensi *Doppler* maksimum terjadi apabila arah pergerakan relatif *user* searah dengan arah propagasi sinyal. Persamaan berikut menunjukkan persamaan *doppler shift* maksimum :

$$f_m = \frac{vf_c}{c} \quad (2-8)$$

Dengan :

- f_m = frekuensi *doppler* maksimum (Hz)
 f_c = frekuensi *carrier* (Hz)
 v = kecepatan pergerakan relatif (m/s)
 c = kecepatan gelombang di udara (3×10^8 m/s)

2.5 Model Propagasi

Dalam sistem komunikasi nirkabel, mentransfer informasi dari antenna pemancar dan antenna penerima dilakukan dengan menggunakan gelombang elektromagnetik. Interaksi antara gelombang elektromagnetik dan lingkungan mengurangi kekuatan sinyal kirim dari pemancar ke penerima, yang menyebabkan *pathloss*. *Pathloss* adalah penurunan kekuatan gelombang elektromagnetik karena menyebar melalui ruang bebas. *Pathloss* merupakan komponen utama dalam analisis dan desain *link budget* sistem telekomunikasi. Istilah *pathloss* umum digunakan dalam komunikasi nirkabel dan sinyal propagasi. *Pathloss* terjadi karena banyak faktor, seperti *free space loss*, pembiasan, difraksi, pantulan, hamburan, dan penyerapan. *Pathloss* juga dipengaruhi oleh kontur medan, lingkungan (perkotaan atau pedesaan, *vegetasi* dan dedaunan), propagasi menengah (udara kering atau lembab), jarak antara pemancar dan penerima, dan tinggi serta lokasi antenna.

Model propagasi yang berbeda dapat digunakan untuk menghitung *pathloss*. Model propagasi adalah model estimasi karakteristik kanal. Model propagasi sangat berperan penting dalam perencanaan jaringan *wireless*. Secara umum, model propagasi dikelompokkan menjadi tiga besar, yaitu :

- ✓ Model *Empirik*, model yang diturunkan dari hasil pengukuran lapangan dilokasi-lokasi yang dianggap mewakili *sample* lingkungan nirkabel.
- ✓ Model *Deterministik*, model yang dikembangkan dari teori propagasi gelombang elektromagnetik dan digunakan untuk perhitungan daya pancar yang ditinjau.
- ✓ Model *Stokastik*, model yang menyertakan perubahan acak sebagai representasi kondisi lingkungan yang berubah dari waktu ke waktu dan dari lokasi ke lokasi lain.

Dari ketiga model propagasi di atas, model propagasi *empirik* merupakan model yang sangat diminati karena kemudahan dalam penggunaan serta toleransi terhadap ketidaktersediaan informasi *terrain*. Yang termasuk dalam model kanal propagasi empirik adalah model ECC-33, COST-231 Hata dan *Stanford University Interim* (SUI).

2.5.1 Propagasi Indoor dan Outdoor

1. Propagasi Indoor

Propagasi *indoor* memiliki mekanisme yaitu pantulan, difraksi, dan hamburan dengan kondisi yang bervariasi. Model propagasi *indoor* merupakan model propagasi komunikasi bergerak biasa yaitu cakupan daerahnya dan variasi lingkungan yang lebih besar seiring dengan makin kecilnya jarak antara *transmitter* dan *receiver*. Propagasi *indoor* sangat dipengaruhi hal-hal spesifik pada bangunan, seperti konstruksi material dan tipe bangunan.

2. Propagasi Outdoor

Cakupan area untuk propagasi *outdoor* sangat luas dan memiliki tingkat *interferensi* yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan karena propagasi gelombang pada ruang terbuka akan melewati penghalang yang lebih banyak, seperti gedung, rumah, pepohonan, gunung, serta terpengaruh oleh cahaya.

2.5.2 Model Propagasi ECC 33

Model propagasi ECC 33 adalah hasil pengembangan dari model propagasi Okumura-Hata. Model propagasi ECC 33 merupakan model propagasi empiris, yaitu pengukuran propagasi pada wilayah geografis yang berbeda dengan menggunakan faktor koreksi empiris. Dimulai dengan pengukuran prediksi redaman propagasi pada kawasan urban. Redaman dinyatakan sebagai fungsi dari tinggi efektif antena BS (h_b) dan tinggi antena pengguna (h_{ue}) diukur dari atas tanah. Model propagasi ini dirancang untuk frekuensi hingga 3000 MHz, tinggi antena *base station* (BS) 30-200 meter, tinggi antena *user equipment* (UE) 1-10 meter, dan jarak antara BS dengan UE mencapai 20 km. [Mohammad Shahajahan dan A.Q.M. Abdulla Hes Shafi, 2009]

Klasifikasi lingkungan suatu lintasan gelombang radio berdasarkan halangan dan tingkat kepadatan halangan dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

a. Daerah urban

Ciri-ciri daerah urban diantaranya yaitu:

- Gedung-gedung yang terdapat di daerah tersebut berkerangka logam dan memiliki beton yang tebal, sehingga membatasi propagasi radio melalui gedung.
- Memiliki gedung-gedung tinggi, sehingga kemungkinan terjadinya difraksi pada propagasi sinyal sangat kecil.
- Sinyal radio dalam perambatannya mengalami pantulan dengan redaman tertentu.
- Memiliki sangat sedikit pepohonan, sehingga redaman akibat pepohonan (*foliage loss*) dapat diabaikan.
- Banyak terdapat kendaraan yang bergerak, sehingga menyebabkan perubahan karakteristik kanal secara kontinyu.

b. Daerah sub – urban

Ciri-ciri daerah sub – urban antara lain yaitu:

- Memiliki tingkat halangan yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah urban, sehingga propagasi sinyal radio relatif lebih baik dan rata-rata kuat sinyal tinggi.
- Kecepatan pergerakan kendaraan lebih tinggi dibanding daerah urban.
- Memiliki gedung-gedung yang relatif rendah, sehingga sinyal radio mengalami difraksi oleh puncak gedung.

c. Daerah rural

Ciri-ciri daerah rural antara lain yaitu:

- Jarang terdapat halangan, sehingga kuat sinyal yang diterima akan lebih besar dibanding daerah urban atau sub – urban.
- Memiliki ruas jalan yang lebar.
- Kecepatan pergerakan kendaraan sangat tinggi.

Perhitungan nilai *pathloss* (PL) berdasarkan kondisi NLOS dan model propagasi ECC 33 untuk kawasan urban dapat ditentukan dengan persamaan : [Mohammad Shahajahan dan A.Q.M. Abdulla Hes Shafi, 2009]

$$P_L (dB) = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad (2-9)$$

Dengan :

P_L = redaman propagasi NLOS (dB)

A_{fs} = *Free space attenuation* (dB)

A_{bm} = *Basic medium path loss*

G_b = Faktor gain tinggi antenna pengirim

G_r = Faktor gain tinggi antenna penerima

Dengan eksponen *free space attenuation* (A_{fs}) diperoleh dari persamaan :

$$A_{fs} = 92.4 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) \quad (2-10)$$

Dengan :

d = jarak antara pengirim (BS) dengan penerima (UE) (km)

f = frekuensi operasi (GHz)

Basic medium pathloss dinyatakan dengan persamaan :

$$A_{bm} = 20.41 + 9.83\log_{10}(d) + 7.894\log_{10}(f) + 9.56[\log_{10}(f)]^2 \quad (2-11)$$

Dengan :

d = jarak antara pengirim (BS) dengan penerima (UE) (km)

f = frekuensi operasi (GHz)

Untuk faktor gain tinggi antenna *transmitter* dinyatakan dengan persamaan :

$$G_b = \log_{10}\left(\frac{h_b}{200}\right) \{13.958 + 5.8[\log_{10}(d)]^2\} \quad (2-12)$$

Dengan :

d = jarak antara pengirim (BS) dengan penerima (UE) (km)

h_b = tinggi antenna pengirim (m)

Sedangkan faktor gain tinggi antenna *receiver* dinyatakan pada persamaan :

$$G_r = 0.759h_r - 1.862 \quad (2-13)$$

Dengan :

h_r = tinggi antenna penerima (m)

2.6 Parameter Performansi Sistem

Beberapa parameter performansi sistem yang di bahas dalam skripsi ini antara lain sebagai berikut :

2.6.1 Bandwidth Sistem

Bandwidth merupakan luas atau lebar cakupan frekuensi yang digunakan oleh sinyal OFDMA dalam medium transmisi. Untuk menghitung nilai *bandwidth* sistem dari sejumlah *subcarrier* dapat digunakan Persamaan (2-5), yaitu :

$$B_{sistem} = \frac{R_{tot} [2(1 - \alpha_{cp}) + N - 1]}{(1 - \alpha_{cp})N \log_2 M}$$

Dengan :

B_{sistem} = bandwidth sistem (Hz)

R_{tot} = laju data total (bps)

M = jumlah kemungkinan sinyal sesuai teknik modulasi

N = jumlah *subcarrier*

α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

2.6.2 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah perbandingan antara sinyal yang dikirim terhadap *noise*. SNR digunakan untuk mengetahui besarnya pengaruh redaman sinyal terhadap sinyal yang ditransmisikan. SNR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan : [E. Glatz, 1999]

$$SNR_{(dB)} = P_r (dBm) - N_o (dBm) \quad (2-14)$$

Dengan :

SNR = *Signal to Noise Ratio* (dB)

P_r = daya yang diterima (dBm)

N_o = daya noise saluran transmisi (dBm)

Daya yang diterima *receiver* (P_r) dipengaruhi oleh propagasi sinyal dari pemancar ke penerima. Daya terima dapat dinyatakan dalam persamaan : [Wang, 2004]

$$P_r = P_t + G_t + G_r - P_L - 10 \log_{10}(N) \quad (2-15)$$

Dengan :

P_r = daya terima (dBm)

P_t = daya pancar (dBm)

G_t = gain antena pemancar (dBi)

G_r = gain antena penerima (dBi)

P_L = rugi-rugi propagasi (dB)

N = jumlah *subcarrier*

Sedangkan untuk perhitungan daya *noise* dinyatakan dengan persamaan : [E. Glatz, 1999]

$$N_o = 10 \log_{10}(kT) + 10 \log_{10}(B_{sistem}) + NF \quad (2-16)$$

Dengan :

- N_o = daya *noise* saluran transmisi (dBm)
 k = konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$)
 T = suhu *absolute* (300° K)
 NF = *noise figure* (dB)
 B = *bandwidth* sistem (Hz)

Dan untuk nilai SNR_{sistem} yang menggunakan *air interface* OFDMA diperoleh dari persamaan : [Hara, 2003]

$$SNR_{sistem} = (1 - \alpha_{CP})SNR \quad (2-17)$$

Dengan :

- SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)
 SNR = *signal to noise ratio* (dB)
 α_{CP} = faktor *cyclic prefix*

2.6.3 Energy Bit to Noise Ratio (Eb/No)

E_b/N_o adalah suatu parameter penting dalam komunikasi digital. Parameter ini berhubungan dengan SNR yang biasanya digunakan untuk memenuhi laju data digital dan sebagai ukuran mutu standar untuk kinerja sistem komunikasi digital. Dilihat dari namanya, E_b/N_o dapat didefinisikan sebagai perbandingan energi sinyal per *bit* terhadap *noise* (disebut juga SNR per bit).

Perhitungan E_b/N_o , terutama digunakan ketika akan menentukan performansi *Bit Error Rate* (BER) pada skema modulasi digital yang berbeda. Energi per bit dalam sebuah sinyal dijelaskan dalam persamaan : [Barry, 2003]

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR_{sistem} + 10 \log_{10} \frac{B}{R} \quad (2-18)$$

Dengan :

- E_b/N_o = rasio energi *bit* terhadap *noise* (dB)
 SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)
 B = *bandwidth* sistem (Hz)
 R = laju data total (bps)

2.6.4 Bit Error Rate (BER)

BER atau dengan sebutan lain probabilitas *error bit* merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah *error bit* terhadap total bit yang diterima.

Pada *mobile* WIMAX terdapat tiga macam teknik modulasi yang digunakan baik disisi *ulink* maupun *downlink*, yaitu QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM, besarnya nilai BER (P_b) untuk masing-masing teknik modulasi dituliskan dalam persamaan : [Hara, 2003]

a) QPSK

$$P_{b(QPSK)} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{E_b/N_o}}} \right] \quad (2-19)$$

Dengan :

$P_{b(QPSK)}$ = probabilitas *bit error* pada saat transmisi menggunakan modulasi QPSK

$\frac{E_b}{N_o}$ = rasio *energy bit* terhadap *noise* (dB)

b) 16-QAM

$$P_{b(16-QAM)} = \frac{3}{8} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{5}{2(E_b/N_o)}}} \right] \quad (2-20)$$

Dengan :

$P_{b(16-QAM)}$ = probabilitas *bit error* pada saat transmisi menggunakan modulasi 16-QAM

$\frac{E_b}{N_o}$ = rasio *energy bit* terhadap *noise* (dB)

c) 64-QAM

$$P_{b(64-QAM)} = \frac{7}{24} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{7}{E_b/N_o}}} \right] \quad (2-21)$$

Dengan :

$P_{b(64-QAM)}$ = probabilitas *bit error* pada saat transmisi menggunakan modulasi 64-QAM

$\frac{E_b}{N_o}$ = rasio *energy bit* terhadap *noise* (dB)