

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Voice over Internet Protocol (VoIP)*

Voice over Internet Protocol (VoIP) dikenal juga dengan istilah *IP Telephony*, *Internet Telephony* atau *Digital Phone*. Secara umum, VoIP merupakan teknologi yang memanfaatkan *Internet Protocol (IP)* untuk menyediakan komunikasi suara secara *real-time*. VoIP mentransmisikan sinyal suara dengan mengubahnya kedalam bentuk digital melalui proses *voice coding*, dan dikelompokkan menjadi paket-paket data yang dikirim dengan menggunakan platform IP. Jaringan IP sendiri adalah jaringan komunikasi data yang berbasis *packet-switch* (Winarno, 2007).

Manfaat berkomunikasi dengan menggunakan jaringan data antara lain efisiensi alokasi *bandwidth*, kemampuan untuk menggunakan metode kompresi suara, menekan biaya penggunaan, kemampuan menggunakan *single interface*, meningkatkan keandalan (*reliability*) jaringan komputer.

2.2 **Komponen VoIP**

VoIP memiliki empat komponen utama, yaitu *User Agent*, *Proxy*, *Protokol*, dan *Codec*. Berikut penjelasan mengenai masing-masing komponen dalam jaringan VoIP.

2.2.1 *User agent*

User agent merupakan suatu perangkat yang berfungsi untuk melakukan panggilan atau menerima telepon. *User agent* dapat berupa *software* yang disebut dengan *softphone*. Contoh *user agent* dengan jenis *softphone* adalah : *Sjphone*, *X-Lite*, *QuteCom*, *Ekiga*, *ZoIPer*, *NetMeeting*, *VoIP Rakyat Communicator* dan masih banyak yang lainnya. Gambar 2.1 menunjukkan salah satu *interface user agent* dengan jenis *softphone*, yakni *X-Lite softphone*.



Gambar 2.1 X-Lite softphone yang digunakan sebagai user agent

Jenis *user agent* yang berupa *hardware* disebut *hardphone*. *Hardphone* saat ini memiliki ragam dan kemampuan serta fitur yang berbeda. Beberapa *hardphone* yang dapat digunakan sebagai *user agent* dalam jaringan VoIP adalah:

- a. **IP-Phone**, bentuknya menyerupai telepon biasa pada umumnya. Cara penyambungannya dengan mengkoneksikan ke jaringan komputer berbasis TCP/IP, dapat juga melalui *switch* pada jaringan komputer yang telah memiliki fasilitas VoIP.



Gambar 2.2 IP-Phone tipe KX-NT400

- b. **USB-Phone**, bentuknya seperti telepon seluler. Koneksi yang digunakan melalui USB port dari komputer. Umumnya digunakan berdampingan dengan *softphone*, oleh karena itu biasanya beberapa *softphone* memiliki *driver* tersendiri agar mengenali perangkat USB-Phone ini.



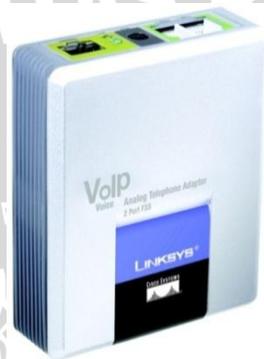
Gambar 2.3 USB-Phone tipe US Robotics 9601A

- c. **Internet Telephony Gateway (ITG)**, adalah user agent VoIP yang memiliki dua jenis port, yaitu port FXS yang terhubung ke telepon biasa dan FXO yang terhubung ke PSTN langsung atau bisa juga melalui PABX.



Gambar 2.4 Internet Telephony Gateway Tipe ITG-800

- d. **Analog Telephone Adapter (ATA)**, ini merupakan alat yang digunakan agar telepon rumah dapat digunakan menjadi user agent VoIP. ATA sama dengan ITG namun hanya memiliki satu port saja, yaitu FXS.



Gambar 2.5 Analog Telephone Adapter tipe Linksys PAP2T

- e. **Mobile Phone**, dengan berkembangnya *mobile* WiMAX maka diciptakan *mobile phone* yang telah mendukung layanan *mobile* WiMAX. Beberapa perusahaan telekomunikasi seperti HTC, Nokia dan Samsung telah membuat beberapa tipe yang telah terintegrasi terhadap layanan WiMAX.



Gambar 2.6 Mobile phone yang mendukung layanan WiMAX

2.2.2 Proxy

Proxy yang dimaksud dalam teknologi VoIP merupakan aplikasi *server* yang mengatur jaringan VoIP. *Proxy* merupakan komponen yang menerima registrasi *user agent* dan bertugas mengatur penomoran dan *call routing*. Terdapat dua jenis *Proxy* yang digunakan, yaitu berupa *hardware* mesin IPPBX dan berupa *software* yang

disebut sebagai *softswitch*. *Softswitch* versi *open source* yang terkenal dan teruji kehandalannya adalah *Asterisk* dan *SER (SIP Express Router)*, dan *Yate*, sedangkan untuk versi *non-open source* adalah *Axon* dan *OnDo SIP server*.

2.2.3 Protocol

Protokol adalah komponen berupa seperangkat aturan atau *rule* komunikasi antar *User Agent*, antar *Proxy* atau *User Agent* dengan *Proxy*. Protokol tersebut harus dipenuhi agar akses komunikasi dalam hal ini komunikasi VoIP dapat melewati jaringan Internet. Protokol yang saat ini digunakan untuk membangun jaringan VoIP adalah H.323 dan *Session Initiation Protocol (SIP)*.

H.323 merupakan rekomendasi dari *International Telecommunication Union – Telecommunication (ITU-T)* yang mendefinisikan protocol mengenai komunikasi multimedia melalui internet. SIP adalah protocol *signaling* yang dikembangkan oleh *Internet Engineering Task Force (IETF)*. Dalam spesifikasinya, H.323 mengambil pendekatan lebih tradisional dibanding SIP. H.323 merupakan protocol yang sangat kompleks yang terdiri dari beragam sub-protokol, sedangkan SIP protocol yang lebih sederhana dan berfungsi menciptakan, mengatur dan mengakhiri *session* (pertukaran data) antar internet *end-point*.

2.2.4 Codec

Codec merupakan kependekan dari *Compression/Decompression*. *Codec* merupakan teknologi yang memaketkan data *voice* ke dalam format lain dengan perhitungan matematis tertentu, sehingga menjadi lebih teratur dan mudah dipaketkan. *Codec* bertujuan untuk mengurangi penggunaan *bandwidth* di dalam transmisi sinyal pada setiap pemanggilan tanpa mengorbankan kualitas suara.

ITU-T membuat beberapa standar untuk *voice coding* yang direkomendasikan untuk implementasi VoIP. Beberapa standar yang populer digunakan antara lain: G.711, G.723.1, G.726, G.728, dan G.729.

G.711 adalah suatu standar internasional untuk kompresi audio dengan menggunakan teknik *Pulse Code Modulation (PCM)* dalam pengiriman suara. Standar ini banyak digunakan oleh operator telekomunikasi sebagai standar dalam pengkodean suara analog menjadi digital.

Tabel 2.1 Standarisasi kompresi suara menurut ITU-T

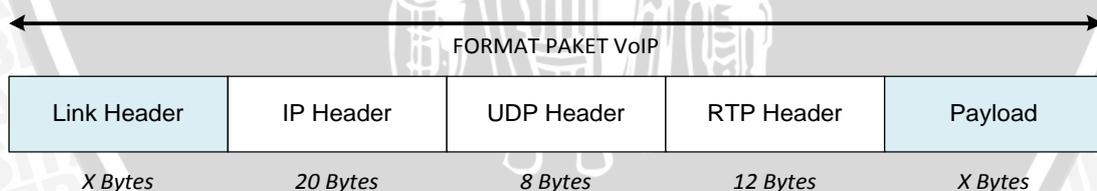
Teknik Kompresi	Bit Rate (Kbps)	Payload Size (Byte)	Sample/Frame Size (ms)	MOS
G.711	64	80	10	4.1
G.726	32	60	20	3.85
G.728	16	40	2.5	3.61
G.729	8	20	10	3.92
G.723. 1a	6.3	24	30	3.9
G.723. 1b	5.3	20	30	3.65

(Sumber : ITU-T codec)

Tabel 2.1 menunjukkan variasi standarisasi kompresi suara yang dikeluarkan ITU-T. Kolom *bit rate* menunjukkan lebar *bandwidth* yang digunakan untuk mengirimkan suara yang dikompres menggunakan teknik kompresi tertentu. *Sample/Frame size* adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan kompresi. *Mean Opin Score* (MOS) adalah nilai opini pendengar di penerima

2.3 Format Paket VoIP

Format paket yang digunakan dalam VoIP terdiri atas dua bagian, yaitu *header* dan *payload* (beban). Header terdiri atas *header IP*, *User Datagram Protocol* (UDP), *Real-time Transport Protocol* (RTP) dan *link header* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7 Format Paket VoIP

(Sumber : www.cisco.com)

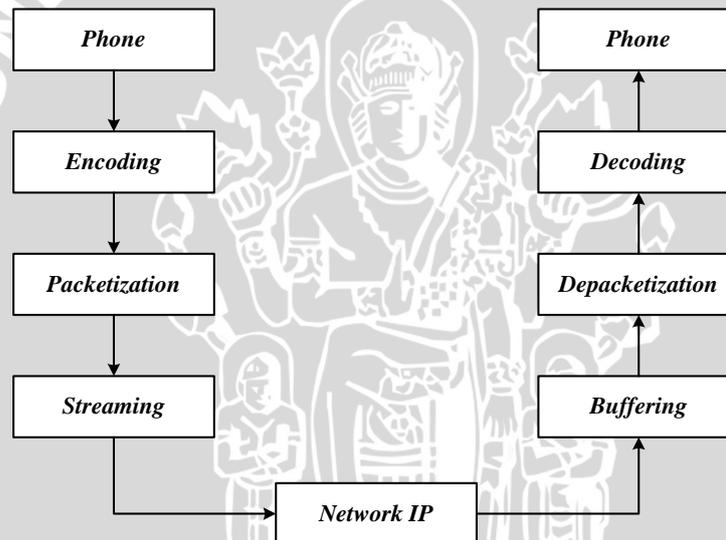
IP header berisikan informasi *routing* untuk mengirimkan paket-paket ke tujuan. Pada tiap *header IP* disertakan tipe layanan atau *type of service* (ToS) yang memungkinkan paket tertentu seperti paket suara diperlakukan berbeda dengan paket yang *non real time*.

UDP *header* memiliki ciri tertentu yaitu tidak menjamin paket akan mencapai tujuan sehingga UDP cocok digunakan pada aplikasi *real time* yang sangat peka

terhadap *delay* dan *latency*. RTP header adalah *header* yang dapat dimanfaatkan untuk melakukan *framing* dan *segmentasi* data *real time*. Seperti UDP, RTP juga mendukung realibilitas paket untuk sampai di tujuan. RTP menggunakan protokol kendali yang mengendalikan RTCP (*real-time transport control protocol*) yang mengendalikan QoS dan sinkronisasi media *stream* yang berbeda.

2.4 Cara Kerja VoIP

VoIP merupakan teknologi yang mengirimkan komunikasi suara melalui jaringan computer seperti Internet atau jaringan lain berbasis IP. Teknologi VoIP diimplementasikan untuk menyediakan layanan telepon dan memberikan penghematan biaya dengan memanfaatkan kemampuan Internet berupa *packet-switching*. Desain arsitektur jaringan VoIP secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.8 sebagai berikut (Ebna Masum, 2011) :



Gambar 2.8 Desain arsitektur jaringan VoIP
(Sumber : Ebna Masum, 2011)

Konsep cara kerja VoIP yaitu dengan melakukan pengiriman sebuah sinyal secara digital. Sebelum proses transmisi (pengiriman) dilakukan, data yang berupa sinyal analog akan dikonversikan dengan ADC (*Analog to Digital Converter*) menjadi bentuk data digital. Selain diubah menjadi format digital, data suara juga mengalami proses kompresi agar penggunaan *bandwith* di dalam proses transmisi dapat dikurangi. Data digital yang telah dikompresi kemudian dienkapsulasi kedalam paket-paket sehingga dapat dengan mudah ditransmisikan melalui IP.

Setelah itu, data digital akan ditransmisikan ke tujuan. Setelah sampai, data digital akan didekapsulasi dan dikonversi kembali menjadi sinyal analog dengan DAC (*Digital to Analog Converter*) sehingga dapat diterima sesuai dengan data sinyal yang ditransmisikan.

2.5 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) 802.16 rev. E

2.5.1 Broadband Wireless Access (BWA)

Broadband wireless merupakan perpaduan dari dua teknologi telekomunikasi yaitu teknologi *wireless* dan *broadband*, keduanya menjadi populer dan berkembang cepat karena kebutuhan masyarakat akan komunikasi data sangat tinggi. Perpaduan antara teknologi *broadband* dan *wireless*, menjadi solusi dari keterbatasan kedua teknologi tersebut.

Teknologi *broadband* berawal dari munculnya teknologi *Digital Subscriber Line* (DSL), dan keterbatasan teknologi ini masih menggunakan media kabel sebagai media transmisinya. Namun, teknologi ini mampu memberikan berbagai macam layanan *multimedia* dan Internet dengan kecepatan tinggi. Sedangkan teknologi *wireless* menjadi sangat populer karena pengguna dapat menikmati layanan dimana-mana, sebatas masih dalam jangkauan jaringan *wireless* tersebut. Tetapi keterbatasan teknologi ini adalah masih kurangnya layanan yang diberikan karena keterbatasan kecepatan akses data, sehingga kurang mendukung layanan *multimedia* dan Internet kecepatan tinggi. Dari keterbatasan kedua teknologi tersebut, hadirlah teknologi *broadband wireless access* (BWA) yang memberikan layanan *broadband* dengan kecepatan tinggi tanpa kabel.

Standar *Broadband Wireless Access* (BWA) yang saat ini umum diterima dan secara luas 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).

2.5.2 Mobile Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)

Mobile WiMAX merupakan salah satu teknologi sistem *Broadband Wireless Access* (BWA) yang menyediakan *data rate* tinggi. *Mobile WiMAX* merupakan

pengembangan dari standar WiMAX yang sebelumnya. Sehingga *mobile* WiMAX merupakan solusi *broadband wireless access* yang juga memungkinkan penggabungan antara jaringan *mobile broadband* dan *fixed broadband* dengan cakupan area layanan yang luas serta arsitektur jaringan yang fleksibel. Sistem ini memiliki standar *bandwidth* 5 MHz hingga 10 MHz. Sedangkan jumlah *subcarrier* yang dapat digunakan pada *mobile* WiMAX bersifat *scalable*, sehingga memungkinkan laju data dapat diatur dengan mudah sesuai dengan lebar pita yang tersedia. Skalabilitas ini hanya didukung pada mode OFDMA (Amitabh Kumar, 2008).

2.5.3 Standar WiMAX 802.16

Varian-varian WiMAX dimaksudkan untuk mengembangkan performansi dan kemampuan dari teknologi yang digunakan, agar menjadi lebih handal dan dapat meluas penggunaannya. Untuk mengembangkan jangkauan dan daya jualnya, maka standar IEEE 802.16 direvisi menjadi IEEE 802.16a. Standar teknis IEEE 802.16a inilah yang banyak digunakan oleh perangkat-perangkat dengan sertifikasi WiMAX. Selain IEEE 802.16a, varian lainnya adalah IEEE 802.16b yang banyak menekankan segala keperluan dan permasalahan dengan *quality of service* (QoS), IEEE 802.16c banyak menekankan pada *interoperability* dengan protokol-protokol lain, IEEE 802.16d merupakan revisi dari IEEE 802.16c ditambah dengan kemampuan untuk *access point*, serta IEEE 802.16e menekankan pada masalah mobilitas. Varian-varian standar IEEE 802.16 dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Varian Standar IEEE 802.16

Parameter Perbandingan	802.16	802.16a/ Rev d	802.16e
Lisensi Keluaran	Desember, 2001	802.16a Jan 2003 802.16 Revd : Juni 2004	Pertengahan 2005
Spectrum	10–66 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz
Aplikasi	<i>Backhaul</i>	<i>Wireless DSL</i> dan <i>Backhaul</i>	<i>Internet Mobile</i>
Kondisi Kanal	<i>Line of Sight</i> (LOS)	<i>Non Line of sight</i> (NLOS) dan LOS	NLOS dan LOS
Bit Rate	32-134 Mbps pada lebar	Mencapai 70 Mbps pada lebar kanal 20 MHz	Mencapai 15 Mbps pada kanal 5 MHz

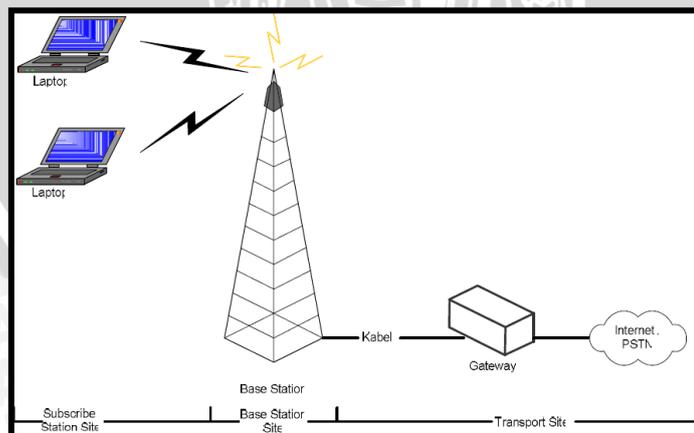
Parameter Perbandingan	802.16	802.16a/ Rev d	802.16e
Modulasi	kanal 28 MHz QPSK, 16QAM dan 64 QAM	OFDM 256 sub-carriers, QPSK, dan 64 QAM	OFDMA
Pergerakan	Tetap	Tetap	Mobile pedestrian
Bandwidth Kanal	20, 25 dan 28 MHz	Bandwidth kanal disesuaikan antara 1,5 dan 20 MHz	Up-Link sub kanal untuk penghematan daya
Tipe Radius sel	1 – 3 mil	4 – 6 mil	1 – 3 mil

(Sumber : Siyamta, 2005)

2.5.4 Konfigurasi Jaringan WiMAX

Konfigurasi jaringan WiMAX secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.9. Konfigurasi tersebut dibagi dalam tiga bagian utama antara lain:

- *subscriber station (SS) site*: terdiri dari *Customer Premise Equipment (CPE)* yang berfungsi sebagai peralatan yang digunakan oleh *subscriber/pelanggan*. Berdasarkan letak CPE dibagi menjadi dua tipe yaitu *Outdoor CPE* dan *Indoor CPE*.
- *base station (BS)*: terdiri dari *base station (BS)* yang berfungsi menghubungkan *subscriber station (SS) site* dengan *transport site*.
- *transport site* (bagian *backend*): terdiri dari jaringan Internet/PSTN yang berfungsi untuk menghubungkan *base station* dengan jaringan Internet.



Gambar 2.9. Konfigurasi Jaringan WiMAX

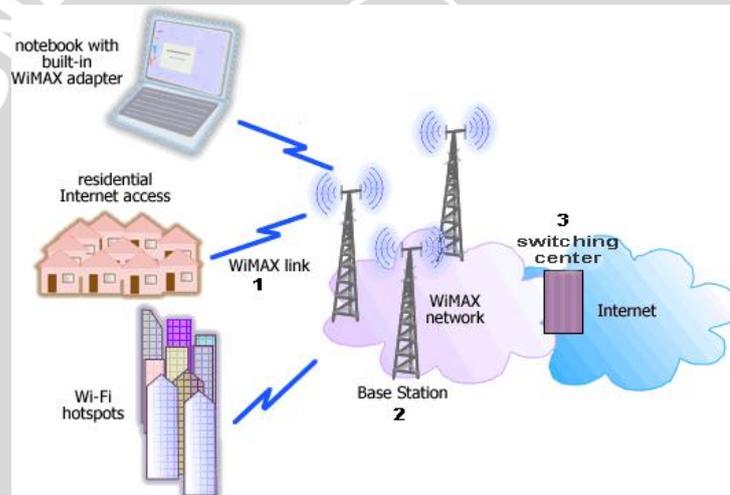
(Sumber : Gunawan Wibisono, 2009)

SS berada pada lingkungan *subscriber* pelanggan, dalam sistem IEEE 802.16e terdapat dua tipe *user* yaitu *fixed* dan *mobile user*. Posisi BS biasanya berada satu lokasi dengan bagian operator (jaringan Internet atau jaringan PSTN).

2.5.5 Prinsip Kerja WiMAX

Secara umum, WiMAX yang merupakan teknologi *broadband wireless* memiliki prinsip kerja sebagai berikut (Gunawan Wibisono, 2009) :

1. Pelanggan mengirimkan data dengan kecepatan 2 – 155 Mbps dari *subscriber station* (SS) ke *base station* (BS) melalui media gelombang radio,
2. BS akan menerima sinyal dari berbagai pelanggan dan mengirimkan pesan melalui wireless atau kabel ke *switching center* melalui protokol 802.16,
3. *Switching center* akan mengirimkan pesan ke internet *service provider* atau *public switched telephone network* (PSTN) melalui kabel.



Gambar 2.10 Prinsip kerja WiMAX

(sumber : www.conniq.com/slashInternetAccess/WiMAX.gif)

Ketiga proses tersebut di atas dapat dilihat pada Gambar 2.10. Pada Gambar 2.10, terdapat tiga jenis *subscriber station* (SS) yaitu *laptop*, *Wi-Fi hotspot* dan *residential Internet access*, sedangkan *tower*, *antena*, beserta perangkatnya berfungsi sebagai *base station* (BS) dan *switching center* sebagai pengatur pilihan koneksi ke *internet service provider* (ISP).

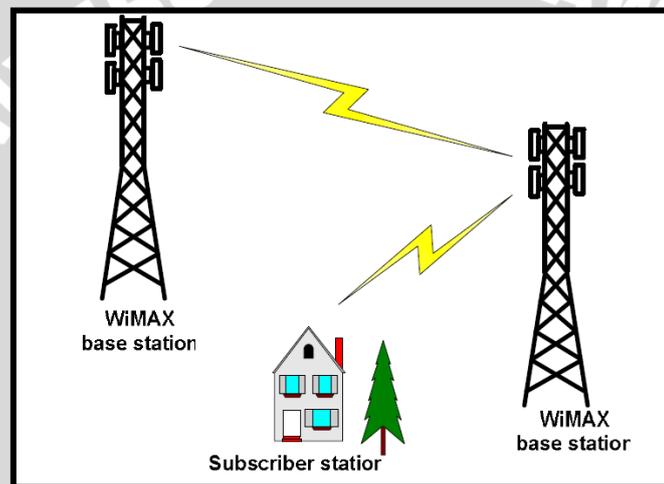
2.5.6 Topologi Jaringan WiMAX

Terdapat beberapa jenis topologi jaringan WiMAX yang dapat digunakan antara lain: *Point to Point* (PtP) dan *Point to Multi Point* (PtMP) serta dapat

dikembangkan menjadi jaringan berbentuk *mesh*. Pada topologi *mesh*, *base station* (BS) digunakan sebagai *interface* ke *core network*. Untuk menjangkau pelanggan yang berada di luar jangkauan suatu *base station* (BS), *Customer Premise Equipment* (CPE) yang dapat bertindak sebagai *router* atau *repeater* bagi terminal pelanggan lainnya (Gunawan Wibisono, 2009).

2.5.6.1 Topologi Point to Point (PtP)

Komunikasi dalam topologi *Point to Point* (PtP) dilakukan antara sebuah *base station* (BS) dengan sebuah *base station* (BS), atau sebuah antara *base station* dengan *single subscriber station* (SS). Gambar 2.11 menunjukkan topologi *Point to Point* (PtP).



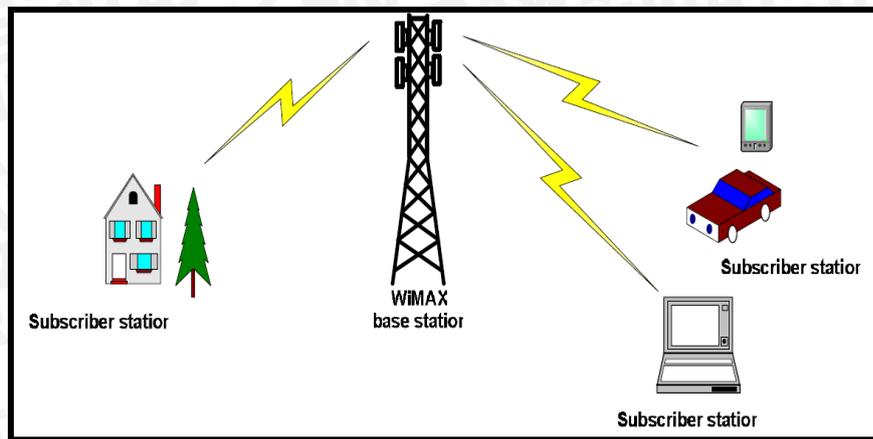
Gambar 2.11 Topologi point to point (PtP)

(Sumber : <http://www.sinauonline.50webs.com/GSM.html>)

Pada Gambar 2.11 dijelaskan bahwa komunikasi dalam topologi *point to point* (PtP) dilakukan satu lawan satu.

2.5.6.2 Topologi Point to Multi Point (PtMP)

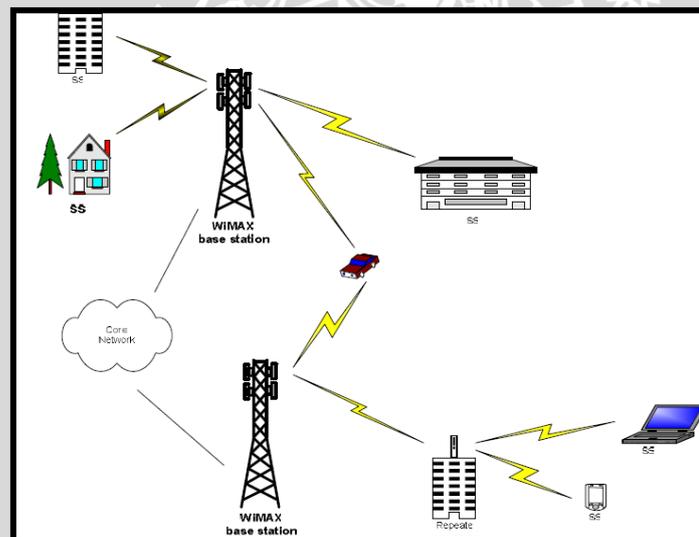
Topologi *Point to Multi Point* (PtMP) digunakan untuk melayani akses langsung ke pelanggan. Gambar 2.12 menunjukkan WiMAX yang diimplementasikan dengan menggunakan topologi PtMP. Dalam topologi ini sebuah *base station* (BS) WiMAX berfungsi untuk mengontrol beberapa *subscriber station* (SS) yang terdapat dalam satu *cell*.



Gambar 2.12 Topologi *point to multi point* (PtMP)
(Sumber : <http://www.sinauonline.50webs.com/GSM.html>)

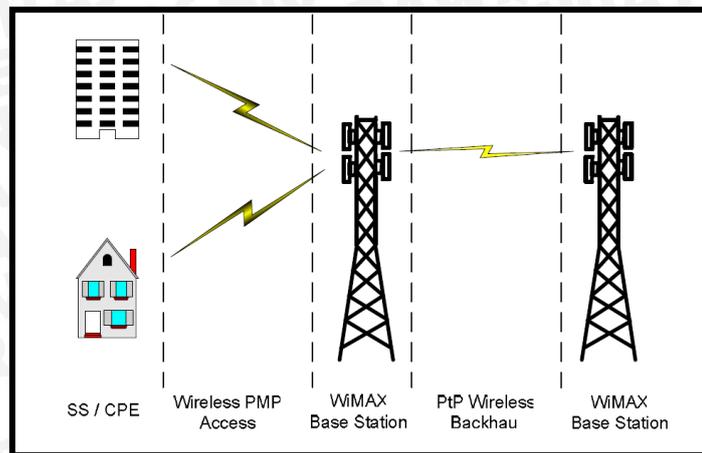
2.5.6.3 Topologi Pengembangan

Topologi pengembangan merupakan topologi gabungan dari beberapa topologi dasar. Dengan penggabungan beberapa topologi dasar tersebut, terbentuklah topologi pengembangan. Contoh topologi pengembangan antara lain topologi *mesh*, topologi gabungan antara *point to point* dan *point to multipoint*. Gambar 2.13 menunjukkan konfigurasi topologi *mesh*.



Gambar 2.13 Topologi *mesh*
(Sumber : <http://www.sinauonline.50webs.com/GSM.html>)

Gambar 2.14 menunjukkan konfigurasi topologi gabungan antara topologi PtMP yang digunakan untuk ke CPE dengan topologi PtP yang digunakan untuk menghubungkan BS dengan BS yang lain.



Gambar 2.14 Topologi gabungan PtP dengan PtMP
(Sumber : <http://www.sinauonline.50webs.com/GSM.html>)

2.5.7 Kelebihan dan Kelemahan WiMAX 802.16e

Ada beberapa kelebihan dan kelemahan yang dimiliki oleh WiMAX 802.16e, diantaranya adalah sebagai berikut (Gunawan Wibisono, 2009) :

a. Kelebihan

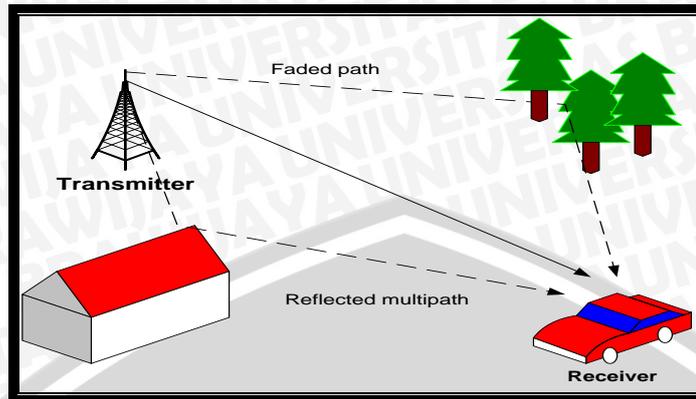
- *bandwidth* yang digunakan bersifat *scalable*,
- dapat melayani *user* baik *fixed user* maupun *mobile user*,
- arsitektur yang lebih sederhana, dibandingkan dengan teknologi akses lainnya seperti CDMA dan GSM,
- jaringan telah berbasis IP, WiMAX mudah diintegrasikan dengan jaringan berbasis IP tanpa memerlukan *layer adaptation*, dan
- mudah dikembangkan.

b. Kelemahan

WiMAX 802.16e memiliki kelemahan di dalam sistemnya, yaitu timbulnya *fading* yang diakibatkan adanya penghalang pada saat sebuah sinyal dikirimkan, sehingga sinyal tersebut terpantulkan oleh penghalang. Pada saat sinyal terpantulkan, maka akan terbentuk sinyal-sinyal pantulan. Pada saat sinyal utama mencapai *receiver*, maka sinyal pantulan akan juga berusaha mencapai *receiver*. Ketika keduanya berada pada posisi yang sama, maka keduanya akan saling menguatkan atau saling melemahkan.

Gambar 2.15 menunjukkan terjadinya proses perambatan lintasan jamak (*multipath*) yang disebabkan oleh pantulan-pantulan dari struktur bangunan

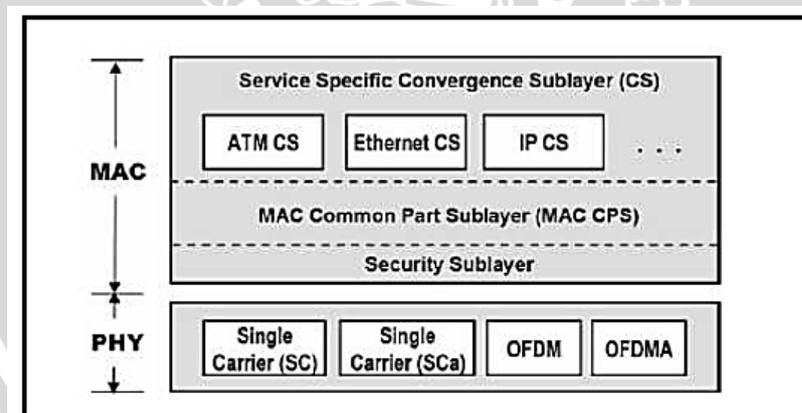
gedung atau medan (*terrain*) yang tidak rata antara antena pemancar dengan penerima. Hal inilah yang akan menyebabkan terjadinya *multipath fading*.



Gambar 2.15 *Multipath* (lintasan jamak) pada sistem komunikasi *wireless*
(Sumber : <http://www.complextoreal.com>)

2.5.8 Protokol IEEE 802.16e

Fungsi-fungsi komunikasi dibagi menjadi suatu rangkaian *layer* yang hierarkis. Masing-masing lapisan menampilkan subrangkaiian fungsi-fungsi yang masih berkaitan yang diperlukan untuk berkomunikasi dengan sistem yang lain. Karakteristik standar 802.16e ditentukan oleh spesifikasi teknis dari *layer Physical* (PHY) dan *Medium Access Control* (MAC). Gambar 2.16 menunjukkan protokol IEEE 802.16/16e (Kwang-Cheng Chen, 2008).



Gambar 2.16 Protokol IEEE 802.16/16e
(Sumber : Kwang-Cheng Chen, 2008)

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. MAC *layer* juga berfungsi untuk mengakomodasi *throughput* data kecepatan tinggi melalui *physical layer* (Kwang-Cheng Chen, 2008).

2.5.8.1 Physical Layer (PHY)

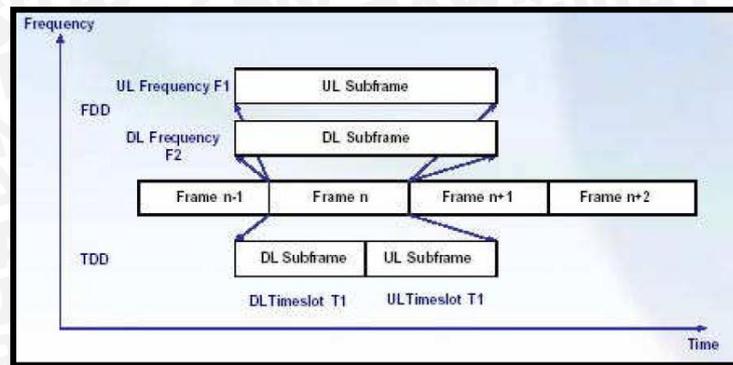
Berdasarkan Gambar 2.16, terdapat 4 pilihan standar *air interface* yang digunakan dalam *physical layer* IEEE 802.16/16e dengan masing-masing standar memiliki spesifikasi yang berbeda diantaranya adalah (Kwang-Cheng Chen, 2008):

- *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.

Dalam skripsi ini akan digunakan standar *air interface* *Wireless MAN-OFDMA* dengan jumlah *carrier* hingga 512. Selain pemilihan standar *air interface* yang akan digunakan, hal-hal lain yang berkaitan dengan *physical layer*, yaitu :

- **Sistem Dupleks**

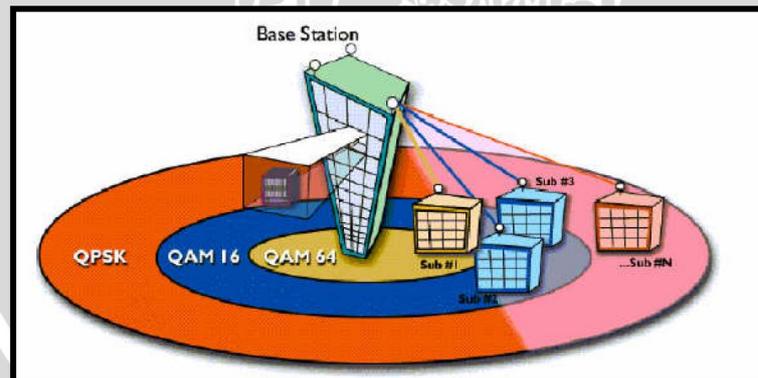
Untuk sistem dupleks pada standar WiMAX dapat diterapkan *Frequency Division Duplexing* (FDD) dan *Time Division Duplexing* (TDD) atau keduanya FDD dan TDD. Fitur ini memberikan kemudahan pengaturan spektrum frekuensi yang akan digunakan agar diperoleh efisiensi spektrum yang optimal. Hal ini juga sejalan dengan fleksibilitas penggunaan kanal yang diperkenankan. Gambar 2.17 menggambarkan perbandingan sistem dupleks FDD dan TDD. Dalam sistem FDD, digunakan dua frekuensi yang berbeda untuk transmisi *uplink* dan *downlink* sedangkan dalam sistem TDD, digunakan 1 frekuensi yang sama untuk transmisi *uplink* dan *downlink*. Namun sistem dupleks yang digunakan pada *mobile WiMAX* adalah *Time Division Duplexing* (TDD) (Amitabh Kumar, 2008).



Gambar 2.17 Perbandingan FDD dan TDD.
(Sumber : Jakob Wolnicki, 2005)

- **Modulasi Adaptif**

Mekanisme modulasi adaptif mampu mengatur kualitas sambungan (*link quality*) yang dapat diukur melalui *Signal to Noise Ratio* (SNR), jika kualitas sinyal baik, maka akan digunakan modulasi yang lebih tinggi sehingga diperoleh *bandwidth* lebih besar, namun apabila kualitas sinyal buruk, modulasi digeser ke level modulasi yang lebih rendah untuk menjaga kestabilan dan kualitas sambungan. Perpindahan modulasi diatur secara otomatis dan dinamis dari 64 QAM, 16 QAM, dan QPSK. Semakin jauh jarak yang ditempuh, maka redaman akan semakin besar dan ini akan menyebabkan laju bit data akan semakin rendah. Gambar 2.18 memperlihatkan hubungan antara radius jangkauan dengan sistem modulasi yang digunakan (Amitabh kumar, 2008).



Gambar 2.18 Hubungan radius jangkauan dengan sistem modulasi.
(Sumber : <http://en.wikipedia.org>)

Gambar 2.18 menunjukkan bahwa SS yang lokasinya dekat dengan BS akan menggunakan system modulasi tinggi seperti 64 QAM. Modulasi 64 QAM memiliki kualitas sinyal paling baik dan jika terjadi penurunan kualitas sinyal modulasi ini akan terdegradasi ke level yang lebih rendah seperti QPSK untuk

memperoleh jangkauan yang lebih jauh. Hal ini bertujuan untuk memperoleh *throughput* dan jarak yang diinginkan sesuai dengan kondisi lingkungan.

- **Forward Error Correction (FEC)**

Forward Error Correction (FEC) atau teknik perbaikan kesalahan diterapkan pada sistem WIMAX untuk menurunkan kebutuhan minimum SNR dan meningkatkan *throughput*. Beberapa teknik pengkodean yang digunakan antara lain adalah sebagai berikut (Maode Ma, 2009) :

- *Convolutional Encoding* (CC)
- *Turbo Coding* (TC), dan
- *Low Density Parity Check* (LDPC).

CC bersifat *mandatory* sedangkan TC, dan LDPC bersifat *optional*.

- **Smart Antena**

WiMAX mendukung penggunaan teknologi *smart* antena untuk mentransmisikan sinyalnya. Beberapa teknologi *smart* antena adalah SISO (*Single Input Single Output*), MISO (*Multiple Input Single Output*), SIMO (*Single Input Multiple Output*), dan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) yang memungkinkan penggunaan antena lebih dari satu baik pada sisi *receiver* maupun *transmitter* (Ramjee Prasad, 2009).

2.5.8.2 Media Access Control Layer (MAC)

Mekanisme pengalokasian MAC protokol pada WiMAX dipersiapkan untuk menangani ratusan SS atau CPE per kanal dan setiap SS dimungkinkan lagi untuk menggunakan secara bersama dengan beberapa pengguna akhir. Digunakan dua jalur berkecepatan data tinggi untuk komunikasi dua arah antara BS dan SS, masing-masing disebut dengan *uplink* (UL) untuk komunikasi menuju BS dan *downlink* (DL) untuk komunikasi dari BS. Pada penggunaan sistem TDD, ditentukan waktu pancaran untuk *downlink* dan *uplink*. (Gunawan Wibisono, 2009).

MAC *layer* dibagi lagi menjadi tiga sub *layer* yaitu

1. *Service Spesific Convergence Sublayer* (SS-CS)

SS-CS bertugas untuk Menerima PDU dari protokol lapis yang lebih tinggi, seperti ATM, *voice* TDM, *ethernet*, IP, dan protokol masa depan yang belum diketahui.

2. MAC *Common Part Sublayer* (CPS)

CPS berada pada bagian tengah lapis MAC. CPS merupakan inti dari protokol MAC dan bertanggung jawab untuk mengatur alokasi bandwidth, pembangunan koneksi dan Memelihara koneksi diantara pengirim dan penerima.

3. *Security Sublayer*

Sublayer ini berfungsi untuk memberikan autentikasi, mengamankan pertukaran key, serta mengatur enkripsi dan integritas data.

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. Dalam mekanisme sambungan antar SS dengan BS, terdapat tiga jenis manajemen sambungan (*connection*) untuk setiap arah, yang masing-masing memerlukan tingkat penanganan QoS yang berbeda. Ketiga sambungan tersebut adalah (Gunawan Wibisono) :

- *Basic Connection*, menjalankan transfer yang relatif singkat. Melibatkan *radio link control* (RLC) dan kritis terhadap waktu,
 - *Primary Management Connection*, menjalankan transfer relatif lama, lebih toleran terhadap *delay*, dan digunakan untuk pengaturan sambungan,
 - *Transport Connection*, digunakan untuk pengaturan layanan, QoS, dan parameter-parameter trafik.
- **Automatic Repeat request (ARQ)**

Pada jaringan nirkabel, *error* terjadi selama proses transmisi data. Oleh karena itu diperlukan adanya suatu metode koreksi agar paket yang salah dapat diproses lebih lanjut. Metode koreksi yang dapat digunakan pada sistem *mobile* WiMAX antara lain metode Automatic Repeat request (ARQ) atau Forward Error Correction (FEC) atau kombinasi dari keduanya yang dikenal dengan Hybrid Automatic Repeat request (HARQ).

Automatic Repeat reQuest (ARQ) juga dikenal sebagai *Automatic Repeat Query* merupakan metode *error-control* untuk transmisi data yang menggunakan *acknowledgement* (pesan yang dikirim oleh *receiver* yang menunjukkan bahwa *receiver* menerima paket atau frame data benar) dan waktu *timeout* (suatu periode waktu tertentu yang diperbolehkan untuk dilalui sebelum *acknowledgment* diterima) untuk mencapai transmisi data yang *reliable* melalui suatu layanan yang *unreliable*.

ARQ adalah sebuah mekanisme kontrol pada layer data link, *receiver* akan meminta *transmitter* untuk mengirim lagi blok data ketika terdeteksi adanya kesalahan. Mekanisme ARQ ini berdasarkan pada *acknowledgment* (ACK) atau *No acknowledgment* (NACK), ditransmisikan oleh *receiver* kepada *transmitter* untuk mengindikasikan diterimanya frame sebelumnya dengan baik (ACK) atau diterima dalam kondisi buruk (NACK). Jika *transmitter* tidak menerima *acknowledgment* sebelum mencapai waktu *timeout*, *transmitter* akan kembali mengirimkan frame atau paket data sampai *transmitter* menerima *acknowledgment* atau jika telah melebihi proses *re-transmissions* yang diperbolehkan

Mekanisme ARQ menggunakan *channel feedback* untuk pengiriman ulang (*re-transmission*) paket yang salah. Metode ini dapat meningkatkan *throughput* jaringan jika *radio channel* dalam kondisi buruk. Namun metode ARQ berdampak terhadap meningkatnya *delay* yang terjadi dalam pengiriman paket, karena diperlukan waktu tambahan untuk mengirimkan ulang paket yang salah.

2.5.8.3 Quality of Service (QoS)

QoS adalah kemampuan suatu jaringan untuk menyediakan layanan yang lebih baik pada trafik data tertentu pada berbagai jenis platform teknologi. Berdasarkan sifat pelayanannya, maka QoS pada WiMAX dapat dikelompokkan menjadi lima jenis (Onno W. Purbo, 2001) :

a. Unsolicited Grant Service (UGS)

UGS mendukung penggunaan pada ukuran paket data yang tetap (*fixed-size*) pada laju bit konstan. Contoh aplikasi UGS adalah T1/E1 dan VoIP tanpa *silence suppression*. QoS ini efektif untuk layanan yang sensitif terhadap *throughput*, latensi, dan *jitter*.

b. Real-Time Polling Service (rtPS)

rtPS mendukung layanan *real-time* dengan laju bit yang bervariasi, seperti aplikasi video MPEG dan *video conference*. QoS ini efektif untuk layanan yang sensitif terhadap *throughput* dan latensi namun dengan toleransi yang lebih longgar bila dibandingkan dengan UGS.

c. *Non-Real-Time Polling Service* (nrtPS)

nrtPS mendukung aliran data yang tidak memerlukan jaminan terhadap *delay* dan membutuhkan aliran data ukuran variabel *non-real time* dengan laju minimum. QoS ini efektif untuk aplikasi yang membutuhkan *throughput* yang tinggi seperti pada FTP (*File Transfer Protocol*).

d. Best-Effort (BE)

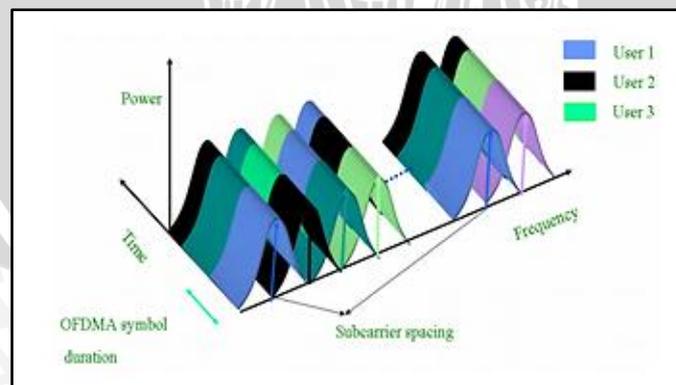
BE *service* mendukung aliran data yang tidak memerlukan jaminan pelayanan minimum, seperti *web browsing* dan *email*. QoS ini tidak memberikan garansi terhadap laju data dan *delay*.

e. Extended Real Time - Variable Rate (ERT-VR)

ERT-VR *service* mendukung aplikasi *real-time* yang mempunyai laju data variabel dan memerlukan jaminan terhadap laju data dan *delay*, seperti VoIP dengan *silence supression*. Layanan ini hanya terdapat pada IEEE 802.16e-2005 dan sering juga disebut sebagai *extended real-time polling service* (ErtPS).

2.5.9 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) merupakan salah satu teknik *multiple access* yang menggunakan beberapa frekuensi (*multicarrier*) yang saling tegak lurus (*orthogonal*). OFDMA pada dasarnya 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) (Srikanth, 2007).



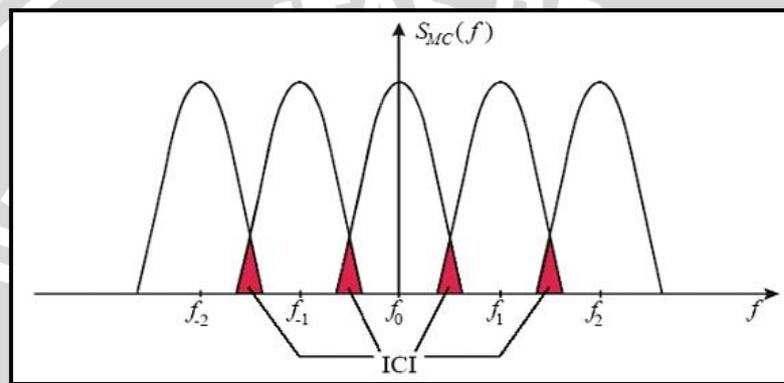
Gambar 2.19. Sinyal OFDMA dilihat dalam domain frekuensi dan domain waktu.

(Sumber : Srikanth S., 2007)

OFDMA akan membagi M laju data yang tinggi (*single high-rate bit stream*) menjadi N bit laju data. N bit laju data tersebut digunakan oleh satu *user* atau lebih

yang memiliki simbol OFDMA berbeda. Setiap bit data paralel akan dimodulasikan pada sebuah *subset subcarrier*. Setiap *subset subcarrier* dapat dimodulasikan secara berbeda, misalnya *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) atau *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

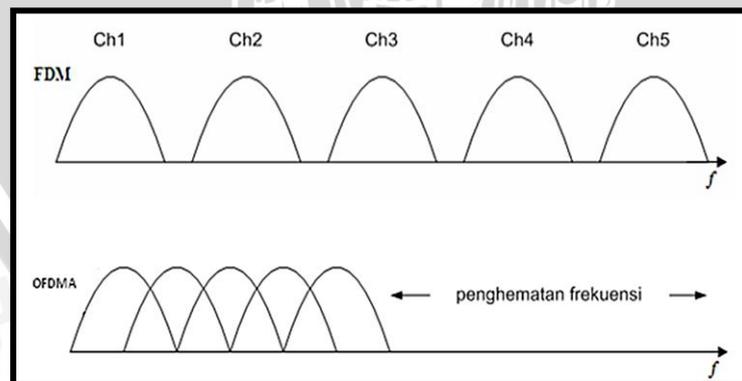
OFDMA merupakan teknik *multiple access* berdasarkan pada *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Oleh karena itu, OFDMA mewarisi segala keunggulan yang dimiliki oleh OFDM. Salah satunya adalah mengatasi masalah terjadinya tumpang tindih frekuensi yang berbeda yang disebut dengan istilah *Inter Carrier Interference* (ICI) yang terjadi pada *Frequency Division Multiplexing* (FDM).



Gambar 2.20 *Inter Carrier Interference* (ICI)

(Sumber : http://enr.sjsu.edu/rmorelos/ee252s03/Tutorial_Hiperlan2.pdf)

Hal ini dikarenakan pada OFDMA menggunakan sinyal *orthogonal*, dimana awal spektrum frekuensi berada tepat di spektrum sebelumnya sehingga *overlapping* dari frekuensi *carrier* tidak mempengaruhi sinyal. Dengan demikian akan menghilangkan adanya *band Guard*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien.

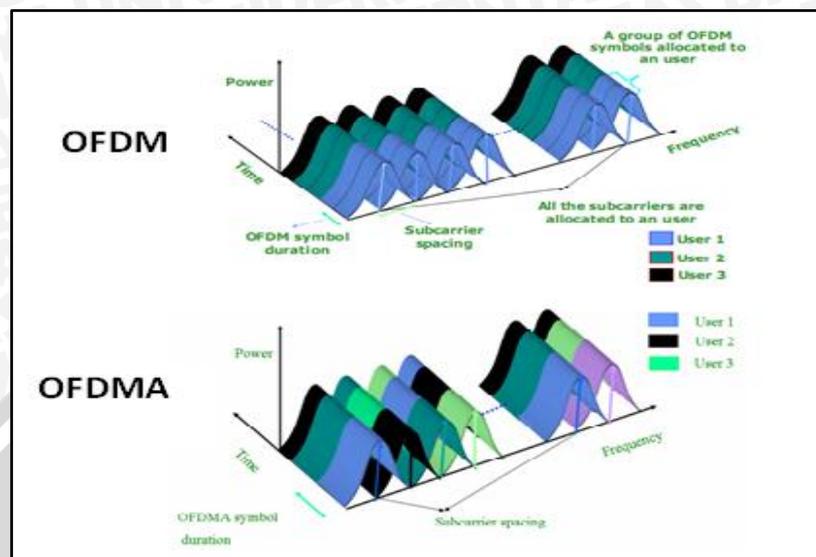


Gambar 2.21 Efisiensi penggunaan *bandwidth* pada OFDMA

(Sumber : Ramjee Prasaad, 2004)

Perbedaan yang mendasar antara OFDMA dengan OFDM adalah 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.



Gambar 2.22 Perbandingan sinyal OFDM dan sinyal OFDMA dilihat dalam domain frekuensi dan domain waktu.

(Sumber : Srikanth S., 2007)

Salah satu keuntungan OFDMA bila dibandingkan dengan OFDM adalah memungkinkannya mengurangi daya transmisi. Hal ini dapat terjadi karena dengan teknologi OFDMA masing-masing *mobile station* (MS) akan menduduki *subset* kecil dari *subcarrier*. Oleh karena itu, masing-masing *mobile station* (MS) mentransmisikan daya yang lebih rendah (Jeffrey G. Andrews, 2006).

2.5.10 Teknik Modulasi dan Pengkodean

Modulasi merupakan proses penumpangan sinyal informasi pada sinyal *carrier* agar sinyal informasi dapat ditransmisikan ke tempat yang lebih jauh. Pada OFDMA setiap bit data paralel akan dimodulasikan pada sebuah *subset subcarrier*. Setiap *subset subcarrier* dapat dimodulasikan secara berbeda, teknik-teknik modulasi yang digunakan adalah (WiMAX Forum, 2006) :

2.5.10.1 Phase Shift Keying (PSK)

Pada *Phase Shift Keying* (PSK), *phase* sinyal *carrier* divariasikan untuk merepresentasikan biner 1 dan 0. Amplitudo dan frekuensi sinyal *carrier*-nya konstan, sedangkan perubahan *phase* sinyal *carrier*-nya berubah sesuai dengan perubahan amplitudo sinyal informasinya.

QPSK merupakan teknik modulasi yang paling sering digunakan diantara teknik modulasi M -ary PSK lainnya karena tidak mengalami penurunan *bit error rate* (BER) ketika efisiensi *bandwidth* ditingkatkan. Sinyal QPSK didefinisikan sebagai :

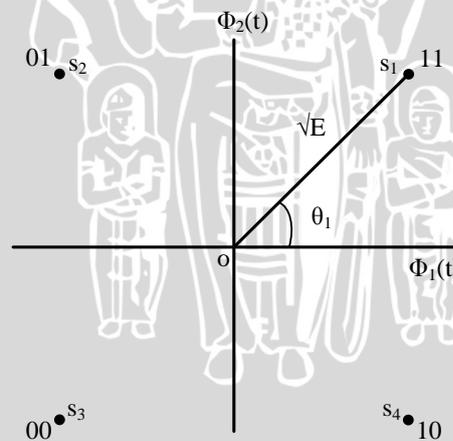
$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, i = 1, 2, 3, 4$$

dengan:

$$\theta_i = \frac{(2i - 1)\pi}{4}$$

Fasa sinyal awal adalah $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$. Frekuensi pembawa dipilih sebagai kelipatan dari *symbol rate* (laju simbol). Oleh karena itu, fasa sinyal awal merupakan salah satu dari empat fasa sinyal QPSK.

Pada QPSK, setiap konstelasi simbol merepresentasikan 2 bit biner (*dibit*) sehingga terdapat $2^n = 4$ simbol yang ditransmisikan. Setiap simbol yang ditransmisikan merepresentasikan *dibit* 00, 01, 10, dan 11. Misalnya, *phase* 0° merepresentasikan bit 00, *phase* 90° merepresentasikan bit 01, *phase* 180° merepresentasikan bit 10, dan *phase* 270° merepresentasikan bit 11. Gambar 2.23 menunjukkan hubungan antara *phase* dengan bit pada QPSK yang disebut juga dengan *constellation* atau *phase state diagram*.



Gambar 2.23 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) constellation
(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

Koordinat dari titik-titik sinyal ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut ini:

Tabel 2.3 Koordinat Sinyal QPSK

Dibit	Fasa θ_i	$s_{i1} = \bar{E} \cos \theta_i$	$s_{i2} = \bar{E} \sin \theta_i$
11	$\pi/4$	$+\frac{\bar{E}}{2}$	$+\frac{\bar{E}}{2}$
01	$3\pi/4$	$-\frac{\bar{E}}{2}$	$+\frac{\bar{E}}{2}$
00	$-3\pi/4$	$-\frac{\bar{E}}{2}$	$-\frac{\bar{E}}{2}$
10	$-\pi/4$	$+\frac{\bar{E}}{2}$	$-\frac{\bar{E}}{2}$

Sinyal QPSK untuk setiap saat pada sumbu t dapat ditulis sebagai :

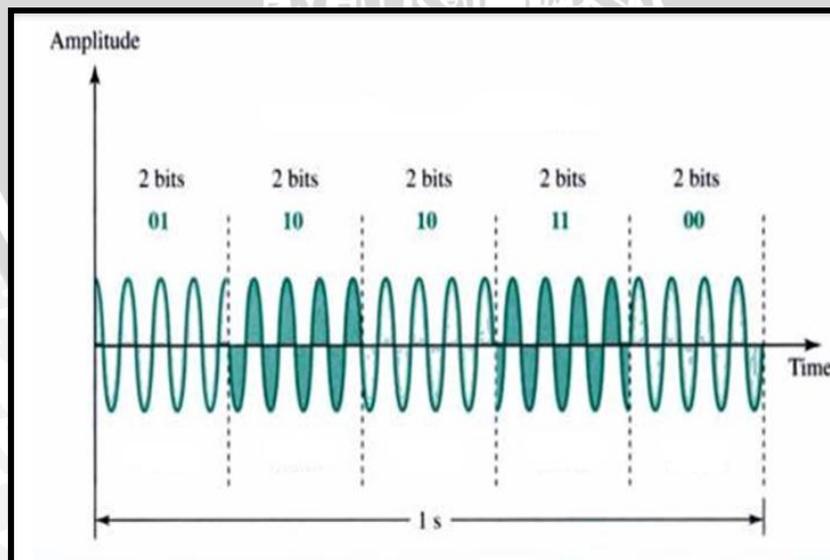
$$s(t) = \frac{A}{2} I(t) \cos 2\pi f_c t - \frac{A}{2} Q(t) \sin 2\pi f_c t, \quad -\infty < t < \infty$$

dengan $I(t)$ dan $Q(t)$ adalah deretan pulsa yang ditentukan oleh bit-urutan ganjil dan bit-urutan genap secara berturut-turut.

$$I(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k p(t - kT)$$

$$Q(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Q_k p(t - kT)$$

dengan $I_k = \pm 1$ dan $Q_k = \pm 1$. Pemetaan diantara *logic data* dan I_k atau Q_k adalah 1 untuk 1 dan 0 untuk -1. $P(t)$ adalah fungsi pembentuk sinyal *rectangular*. Bentuk gelombang sinyal QPSK dengan menggunakan konstelasi QPSK pada Gambar 16 ditunjukkan pada Gambar 2.23 berikut ini:



Gambar 2.24 Bentuk sinyal pada Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

2.5.10.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan teknik modulasi yang mengombinasikan antara teknik *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan teknik *Phase Shift Keying* (PSK). Hal ini berarti pada QAM, amplitudo dan *phase* sinyal *carrier* berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi, sehingga sinyal termodulasi direpresentasikan dalam besaran amplitudo dan pergeseran *phase*.

Dikatakan *quadrature* karena jumlah minimum bit pada tiap simbolnya adalah 2 bit. Sehingga pada QAM 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).

Sinyal pada QAM didefinisikan sebagai:

$$s_i t = A_i \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Untuk sinyal *M*-ary *square* QAM (seperti 16 QAM dan 64 QAM), persamaan sinyal dapat didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} s_i t &= I_i \frac{\overline{E_0}}{E_p} p t \cos 2\mu f_c t - Q_i \frac{\overline{E_0}}{E_p} p t \sin 2\mu f_c t \\ &= I_i \frac{\overline{E_0}}{2} \phi_1 t - Q_i \frac{\overline{E_0}}{2} \phi_2 t \end{aligned}$$

dengan E_0 adalah energi sinyal dengan amplitudo terendah, dan (I_i, Q_i) merupakan pasangan bilangan bulat yang menunjukkan lokasi titik-titik sinyal pada konstelasi QAM. Nilai minimum dari (I_i, Q_i) adalah $(\pm 1, \pm 1)$. Pasangan (I_i, Q_i) adalah elemen dari matriks $L \times L$, yaitu :

$$I_i, Q_i = \begin{pmatrix} -L+1, L-1 & -L+3, L-1 & \dots & L-1, L-1 \\ -L+1, L-3 & -L+3, L-3 & \dots & L-1, L-3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-L+1, -L+1) & -L+3, -L+1 & \dots & L-1, -L+1 \end{pmatrix}$$

dengan $L = \overline{M}$, $M = 4^n$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Titik-titik konstelasi sinyal disusun dalam bidang vertikal dan horizontal sehingga membentuk suatu bidang persegi. Jumlah titik-titik pada bidang merupakan 2^n (2, 4, 8,). Makin banyak jumlah titik konstelasi yang digunakan, makin besar

kemungkinan untuk mentransmisikan bit-bit data untuk tiap simbol. Konstelasi sinyal dinyatakan dalam bentuk (I_i, Q_i) . Fasor untuk M-ary square QAM adalah :

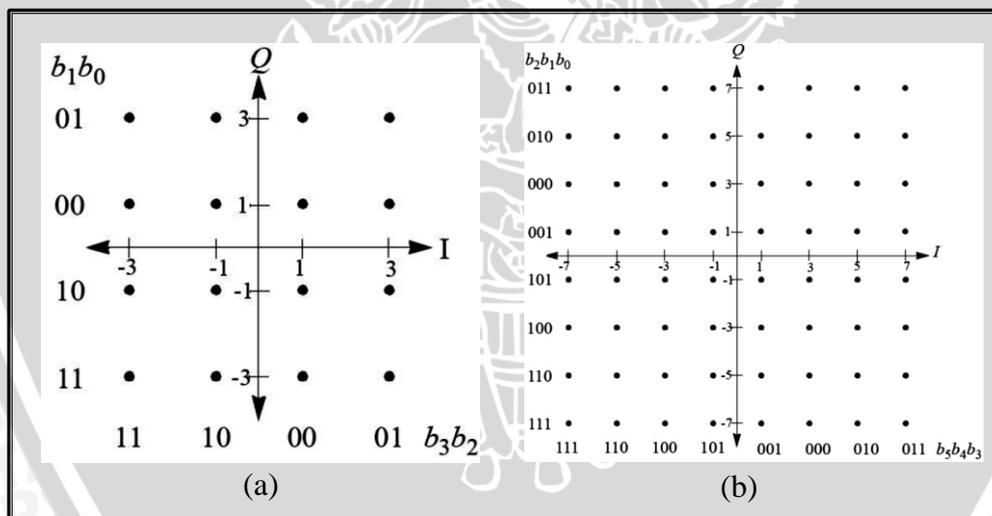
$$s_i = I_i \frac{\sqrt{E_0}}{2}, Q_i \frac{\sqrt{E_0}}{2} \quad i = 1, 2, \dots, M$$

magnitudo dari fasor tersebut adalah:

$$s_i = \frac{\sqrt{E_0}}{2} (I_i^2 + Q_i^2)$$

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 pada teknologi *mobile* WiMAX, karena jumlah bit per simbolnya adalah yang tertinggi dibandingkan dengan teknik modulasi digital yang lain, yaitu 6 bit.

Pada standar IEEE 802.16e, pola yang digunakan adalah 16 QAM dan 64 QAM. Gambar 2.24(a) menunjukkan konstelasi dari sinyal 16 QAM, sedangkan untuk 64 QAM ditunjukkan pada Gambar 2.24(b)



Gambar 2.25 (a) Bentuk konstelasi 16 QAM, (b) Bentuk konstelasi 64 QAM.

(Sumber : Forouzan, 2000)

Perlu dicatat bahwa keuntungan dari semakin besarnya konstelasi sinyal adalah makin banyak bit data yang bisa dikirimkan bersamaan, sehingga laju data yang ditransmisikan akan semakin meningkat. Namun hal ini akan berakibat pada meningkatnya kemungkinan *symbol error* yang terjadi seiring dengan jarak titik-titik yang semakin dekat karena rapatnya konstelasi.

2.5.10.3 Coding Rate

Coding rate merupakan suatu pengkoreksian suatu kesalahan dari informasi bit yang dikirimkan antara suatu *transmitter* dan *receiver*, dimana perbandingan rasionya merupakan banyaknya jumlah koreksi dari total data yang dikirimkan.

Penggunaan teknik koreksi kesalahan, erat kaitannya terhadap *coding rate* yang digunakan didalam modulasi yang ada. Dimana dalam mentransmit suatu bit yang akan dikirimkan didalam modulasi yang akan digunakan pada suatu waktu, bit yang dikirimkan tidak sepenuhnya dikirimkan, akan tetapi dibedakan menjadi bit informasi dan bit *redundanc*. Bit informasi merupakan bit yang akan diterima dalam mengirimkan suatu data, sedangkan bit *redundancy* mengecek adanya kesalahan didalam penerimaan suatu bit data tersebut.

Jika *coding rate* adalah k/n , maka k menunjukkan jumlah bit yang berisi informasi data, dari total n bit data yang dikirimkan, sedangkan bit *redundancy* diperoleh sebesar $n-k$ bit

Tabel 2.4 di bawah ini menunjukkan laju data kanal 5 MHz pada masing-masing tipe modulasi yang digunakan dalam *mobile* WiMAX berdasarkan pada standar IEEE 802.16e :

Tabel 2.4 Laju data pada tiap-tiap tipe modulasi pada kanal 5 MHz

Type Modulasi	Coding Rate	Laju Data pada Kanal 5 MHz (Mbps)	Coded Bits per Subcarrier
QPSK	$\frac{1}{2}$	3.17	2
	$\frac{3}{4}$	4.75	
16 QAM	$\frac{1}{2}$	6.34	4
	$\frac{3}{4}$	9.5	
64 QAM	$\frac{1}{2}$	9.5	6
	$\frac{3}{4}$	14.26	

(Sumber : WiMAX Forum, 2006)

Tabel 2.4 menunjukkan digunakan 3 modulasi yang berbeda, yaitu QPSK, 16 QAM dan 64 QAM. Pada masing-masing tipe modulasi, digunakan 2 variasi *coding rate* yang berbeda. *Coding rate* merupakan suatu pengkoreksian suatu kesalahan dari informasi bit yang dikirimkan antara suatu *transmitter* dan *receiver*, dimana perbandingan koreksi dari total informasi yang dikirimkan.

Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa masing-masing modulasi menghasilkan jumlah bit data yang berbeda untuk setiap simbolnya. QPSK membawa 2 bit data, 16 QAM membawa 4 bit data, sedangkan 64 QAM membawa 6 bit data untuk tiap simbolnya. Dengan demikian, 64 QAM memiliki laju data paling tinggi dibandingkan dengan modulasi 16 QAM dan QPSK.

2.5.11 Performansi VoIP melalui *Mobile WiMAX IEEE 802.16 rev. E*

2.5.11.1 Perhitungan *Bandwidth*

Bandwidth adalah kecepatan maksimum yang dapat digunakan untuk melakukan transmisi data antarkomputer pada jaringan IP dan internet. Dalam VoIP, *bandwidth* merupakan suatu hal yang harus diperhitungkan agar mendapatkan kualitas suara yang baik (Winarno, 2007).

Nilai *payload* paket data pada audio ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$P_{LA} = B_{\text{codec}} \times \text{frame rate} \quad (2-1)$$

maka banyaknya bit yang terisi dalam paket VoIP ditentukan dengan persamaan :

$$P_{A\text{-size}} = \text{header}_{\text{UDP/RTP/IP}} + P_{LA} \quad (2-2)$$

Sedangkan jumlah paket audio yang dihasilkan tiap detik dihitung dengan persamaan:

$$P_A = \frac{B_{\text{codec}}}{P_{LA}} \quad (2-3)$$

Sehingga *bandwidth* audio dapat diperoleh dengan persamaan :

$$B_A = P_{A\text{-size}} \times P_A \quad (2-4)$$

Karena satu kanal *voice* pada VoIP digunakan untuk dua arah transmisi (pada satu pembicaraan telepon ada dua arah transmisi), maka *bandwidth* satu kanal *voice* adalah *bandwidth* pada masing-masing arah transmisi.

2.5.11.2 Perhitungan *Path Loss*

Path loss mencakup semua pelemahan yang diperkirakan akan dialami sinyal ketika berjalan dari *base station* ke *subscriber station*. *Path loss* yang terjadi pada sinyal yang diterima dapat ditentukan melalui suatu model propagasi tertentu. Dengan daya penerima minimum yang disesuaikan dengan Peraturan Dirjen Pos dan Telekomunikasi maka *path loss* referensi dapat dihitung dengan persamaan (V. Erceg, 2001) :

$$P_L = P_t + G_t + G_r - P_r \quad (2-5)$$

dengan :

P_L = Path loss/rugi-rugi propagasi (dB)

P_t = daya pancar (dBm)

G_t = gain antena pemancar (dBi)

G_r = gain antena penerima (dBi)

P_r = daya terima (dBm)

Tabel 2.5 Daya penerima minimum pada *bandwidth* kanal 5 MHz

Jenis Modulasi	Batas Daya Terima Minimum
QPSK-1/2	-88 dBm
QPSK-3/4	-86 dBm
16QAM-1/2	-81 dBm
64QAM-3/4	-79 dBm
16QAM-1/2	-74 dBm
64QAM-3/4	-73 dBm

(Sumber : Peraturan Dirjen Pos dan Telekomunikasi, 2008)

2.5.11.3 Perhitungan *Signal to Noise Ratio*

Besarnya pengaruh redaman sinyal terhadap sinyal yang ditransmisikan dapat dinyatakan dengan perbandingan antara sinyal dengan noise (SNR) yang dinyatakan dalam persamaan berikut (E. Glatz, 1999) :

$$SNR_{(dB)} = P_r \text{ (dBm)} - N_o \text{ (dBm)} \quad (2-6)$$

dengan :

SNR = signal to noise ratio (dB)

P_r = daya yang diterima (dBm)

N_o = daya *noise* saluran transmisi (dBm)

Pada analisis performansi VoIP melalui *mobile* WiMAX ini, daya yang diterima disesuaikan dengan daya terima minimum sesuai dengan Peraturan Dirjen Pos dan Telekomunikasi, 2008. Sedangkan untuk perhitungan daya noise dinyatakan dalam persamaan berikut (E. Glatz, 1999) :

$$N_o \text{ (dBm)} = 10 \log k \cdot T + 10 \log B_{\text{system}} + NF \quad (2-7)$$

dengan :

- N_o = daya *noise* saluran transmisi (dBm)
 k = konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T = suhu *absolute* (300° K)
 NF = *noise figure* (11,2 dB)
 B_{sistem} = *bandwidth* sistem (Hz)

Besarnya nilai SNR sistem yang menggunakan *air interface* OFDMA diperoleh dari persamaan berikut (Hara, 2003) :

$$SNR_{sistem} = (1 - \alpha_{cp}) SNR \quad (2-8)$$

dengan :

- SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)
 SNR = *signal to noise ratio* (dB)
 α_{cp} = faktor *cylic prefix* (1/8)

2.5.11.4 Perhitungan kapasitas kanal

Dalam teorema Shannon, besarnya kapasitas kanal diperoleh dari persamaan berikut (Wilson, 1996) :

$$C = B_{kanal} \cdot \log_2 (1 + SNR_{sistem}) \quad (2-9)$$

dengan :

- C = kapasitas kanal sistem (bps)
 B_{kanal} = *bandwidth* kanal (Hz)
 SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)

2.5.11.5 Perhitungan jarak jangkau

Pada propagasi gelombang radio, semakin jauh jarak antara *base station* dan *subscriber station* akan mengakibatkan daya sinyal yang diterima oleh penerima semakin kecil. Hal ini disebabkan adanya redaman saat pentransmisian sinyal dari *base station* ke *subscriber station* maupun sebaliknya, baik pada kondisi *line of sight* (LOS) maupun *non-line of sight* (NLOS). WiMAX 802.16e bekerja pada kondisi NLOS, maka jarak jangkau antara *base station* dan *mobile station* dapat ditentukan dengan persamaan [Kwang-Cheng Chen, 2008] :

$$PL = A + 10 \gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (2-10)$$

dengan : PL = rugi-rugi propagasi (dB)

A = *pathloss* referensi (dB)

γ = eksponen *pathloss*

d = jarak *base station* ke *subscriber station* (m)

d_0 = jarak referensi *pathloss* (100 m)

s = efek *shadow* (dB)

ΔPL_f = faktor koreksi terhadap frekuensi kerja yang digunakan

ΔPL_h = faktor koreksi terhadap tinggi antena penerima

dengan *pathloss* referensi (A) dirumuskan sebagai berikut :

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot f \cdot d}{c} \right) \quad (2-11)$$

dengan : A = *pathloss* referensi (dB)

f = frekuensi operasi (Hz)

d = jarak *base station* ke *subscriber station* (m)

c = kecepatan gelombang radio di udara (m/s)

dengan eksponen *pathloss* (γ) dirumuskan sebagai berikut :

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \quad (2-12)$$

dengan :

γ = eksponen *pathloss*

a, b, c = konstanta yang tergantung pada tipe *terrain*

h_b = tinggi antena *base station* (m)

Besarnya nilai a , b , c dan s adalah konstanta berdasarkan daerah yang akan dilayani, yaitu berdasarkan tipe daerah/ bangunan yang ada di daerah tersebut.

Adapun nilai a , b , c dan s dapat dilihat dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Model parameter 802.16 rev. E untuk tipe *Terrain* yang Berbeda

Parameter	Type	Type	Type
	Urban	Suburban	Rural
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20
Efek shadow (s)	10.6	9.6	8.2

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

Untuk faktor koreksi frekuensi pada *mobile* WiMAX dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2 \times 10^9} \right) \quad (2-13)$$

dengan : f = frekuensi operasi sistem (Hz)

Sedangkan untuk faktor koreksi tinggi antenna *subscriber station* pada *mobile* WiMAX dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\Delta PL_h = -10,8 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } terrain \text{ A dan B} \quad (2-14)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } terrain \text{ C} \quad (2-15)$$

dengan :

h = tinggi antenna penerima (m)

2.5.11.6 Probabilitas *Packet Los*

Analisis Probabilitas paket salah ini merupakan analisis probabilitas bit salah (*error bit probability*) P_{be} pada penerima. Besarnya P_{be} dipengaruhi oleh perbandingan *energy bit* terhadap *noise* ($\frac{E_b}{N_0}$).

Energy bit to noise ($\frac{E_b}{N_0}$) merupakan rasio energi sinyal per bit terhadap energi *noise* per Hertz. ($\frac{E_b}{N_0}$) adalah *Signal to Noise Ratio* (SNR) ternormalisasi, yang juga dinamakan SNR per bit. ($\frac{E_b}{N_0}$) berguna saat membandingkan kinerja *Bit Error Rate* (BER) dari skema modulasi digital yang berbeda tanpa memperhitungkan *bandwidth*, ($\frac{E_b}{N_0}$) juga digunakan untuk menilai kualitas sinyal yang dikirimkan oleh pemancar.

Energy bit to noise ($\frac{E_b}{N_0}$) dari tipe modulasi tertentu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{E_b}{N_0} = P_t \text{ dBm} + G_t \text{ dBi} - P_L \text{ dB} - N_0 \text{ dBm} + R \text{ dB} \quad (2-16)$$

dengan :

P_L = *Path loss*/rugi-rugi propagasi (dB)

P_t = daya pancar (dBm)

G_t = gain antenna pemancar (dBi)

R = laju data (dB)

N_0 = daya *noise* saluran transmisi (dBm)

Dalam pembahasan sebelumnya, telah disebutkan bahwa semakin banyak bit data yang ditransmisikan, menghasilkan laju data yang semakin tinggi. Semakin meningkatnya laju data, mengakibatkan $(\frac{E_b}{N_0})$ yang dibutuhkan semakin tinggi, hal ini dilakukan untuk tetap mempertahankan transmisi pada nilai BER tertentu. Dengan demikian, tipe modulasi 64 QAM yang membawa 6 bit data tiap simbolnya akan memiliki nilai *energy bit to noise* $(\frac{E_b}{N_0})$ paling besar diantara tipe modulasi lainnya, yaitu QPSK dan 16 QAM.

Untuk melakukan perhitungan Probabilitas bit salah pada teknik *modulasi* QPSK $\frac{1}{2}$ diperlukan parameter $(\frac{E_b}{N_0})$. *Probabilitas packet loss* aplikasi VoIP dengan menggunakan persamaan dan *header*_{UDP/RTP/IP} yaitu :

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2} \quad (2-17)$$

$$\rho_{UDP/RTP/IP} = P_{size} \times \rho_b \quad (2-18)$$

Maka probabilitas bit salah yang terjadi pada tipe modulasi QPSK adalah (Rappaport, 2002) :

$$P_{be} = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2-19)$$

Pada teknik modulasi 16 QAM dan 64 QAM, probabilitas bit salah yang terjadi dapat dihitung sesuai dengan persamaan adalah (Rappaport, 2002) :

$$P_{be} = \frac{4}{K} \left(1 - \frac{1}{M} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3K}{M-1} \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2-20)$$

Persamaan 2-19 dan Persamaan 2-20 menunjukkan hubungan antara probabilitas bit salah dengan *energy bit to noise* $(\frac{E_b}{N_0})$. Berdasarkan kedua persamaan tersebut diperoleh bahwa semakin besar *energy bit to noise* $(\frac{E_b}{N_0})$ yang dibutuhkan pada tipe modulasi tertentu mengakibatkan probabilitas bit salah yang terjadi akan semakin besar, begitu pula sebaliknya.

Probabilitas *packet loss total* merupakan banyaknya probabilitas paket yang diterima dalam keadaan salah di penerima. Probabilitas paket loss total aplikasi VoIP pada suatu jaringan ditentukan berdasarkan pada probabilitas paket loss pada

jaringan tersebut serta probabilitas paket loss aplikasi VoIP yang berbasis protocol UDP/RTP/IP ditunjukkan pada persamaan [Pritchard, et.al.1993]

Maka probabilitas paket loss total pada berbagai tipe modulasi dapat dihitung dengan persamaan [Pritchard, 1993] :

$$\rho_{total} = 1 - (1 - \rho_{network})^{1 - \rho_{UDP/RTP/IP}} \quad (2.21)$$

2.5.11.7 Throughput

Throughput adalah jumlah data yang diterima dengan benar pada sisi penerima setelah melewati media transmisi pada data *link layer* dari *client to client*. *Throughput* merupakan salah satu parameter yang menunjukkan kinerja dari suatu komunikasi data. *Throughput* dalam suatu jaringan dikatakan baik, jika jumlah data yang diterima dengan benar mencapai lebih dari 90%. *Throughput* ditentukan dengan persamaan (Schwartz, Mischa. 1987) :

$$\lambda = \frac{(1-\rho)}{t_{trans}[1+(\alpha-1)\rho]} \quad (2-22)$$

dengan:

$$t_{out} = 2t_{prop} + 2t_{trans}$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{2t_{prop} + 2t_{trans}}{t_{trans}}\right) \quad (2-23)$$

keterangan:

λ = *throughput* (paket/s)

ρ = probabilitas paket *loss* yang diterima

α = konstanta propagasi

Persamaan 2-21 menunjukkan bahwa nilai *throughput* dipengaruhi oleh probabilitas paket *loss*. Berdasarkan persamaan tersebut, semakin besar probabilitas paket *loss* yang terjadi, maka *throughput* yang diterima akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena jumlah data yang diterima dengan benar pada sisi penerima akan semakin berkurang seiring dengan banyaknya paket salah.

2.5.11.8 Delay end-to-end

Delay adalah waktu total yang dibutuhkan untuk mengirimkan paket data dari sumber sampai ke tujuan. *Delay end-to-end* pada jaringan IP merupakan penjumlahan *delay-delay* yang terjadi dalam perjalanan paket dari sumber ke tujuan.

Pada aplikasi VoIP yang bersifat *full duplex*, maka *delay* dihitung dari penerima ke sumber sampai ke penerima lain.

Delay sangat mempengaruhi kualitas layanan suara, karena pada dasarnya suara memiliki karakteristik "*timing*". Urutan pengucapan tiap suku kata yang ditransmisikan harus sampai ke sisi penerima dengan urutan yang sama pula sehingga dapat terdengar dengan baik secara *real-time*. ITU G.114 membagi karakteristik waktu tunda berdasarkan tingkat kenyamanan *user*, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.7 Pengelompokan waktu tunda berdasarkan ITU-T G.114

Waktu Tunda	Kualitas
0-150 ms	Baik
150-300 ms	Cukup
> 300 ms	Buruk

Delay end-to-end dapat dituliskan sebagai berikut:

$$t_{end\ to\ end} = t_{codec} + t_{MAN} \quad (2-24)$$

dengan: $t_{end\ to\ end} = delay\ end\ to\ end$

$$t_{codec} = delay\ codec$$

$$t_{MAN} = delay\ MAN$$

❖ *Delay codec*

Delay codec adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengakumulasi pencuplikan suara ke dalam frame suara, waktu untuk mengkompresi paket suara, waktu untuk memuat frame suara ke dalam paket dan mentransfer paket tersebut ke jaringan transport dan *delay hardware* yang bersifat tetap. *Delay* ini terjadi pada sisi encoder dan decoder.

Delay codec pada aplikasi VoIP dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$t_{codec}\ ms = t_{encoding}\ ms + t_{decoding}\ ms \quad (2-25)$$

dengan :

$$t_{codec}(ms) = delay\ codec\ aplikasi\ VoIP\ (ms)$$

❖ *Delay* pada MAN

Delay MAN merupakan keseluruhan *delay* yang diperlukan untuk mengirimkan data dari sisi *subscriber* sumber ke *subscriber* lain pada jaringan *mobile* WiMAX. *Delay* MAN dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$t_{MAN} = t_{proses} + t_{prop} + t_{trans} + t_w \quad (2-26)$$

dengan: t_{MAN} = *Delay total pada MAN (ms)*

t_{proses} = *Delay proses (ms)*

t_{prop} = *Delay propagasi (ms)*

t_{trans} = *Delay transmisi (ms)*

t_w = *Delay antrian (ms)*

❖ *Delay* proses

Delay proses adalah waktu yang dibutuhkan untuk memproses paket data dan untuk menentukan ke mana data tersebut akan diteruskan. *Delay* proses berupa *delay* enkapsulasi dan *delay* dekapulasi. *Delay* proses terdiri dari beberapa proses sebagai berikut:

$$W_{message} = W_{data} + Header_{RTP}$$

$$W_{segmen} = W_{message} + Header_{UDP} \quad (2-27)$$

dengan: W_{segmen} = panjang segmen pada layer 4 (*byte*)

$Header_{RTP}$ = panjang *header* RTP (12 *byte*)

$Header_{UDP}$ = panjang *header* UDP (8 *byte*)

Dari layer 4 atau layer *transport*, segmen kemudian dikirim ke layer 3 atau layer *network* untuk dienkapsulasi menjadi datagram IP. Apabila panjang segmen pada layer di atasnya melebihi MTU IP yaitu 1500 *byte*, maka segmen perlu untuk difragmentasi sebelum dienkapsulasi. Kemudian datagram IP dienkapsulasi dengan *header* IP, sehingga panjang datagram IP sebagai berikut:

$$W_{datagram} = W_{segmen} + Header_{IP} \quad (2-28)$$

dengan:

W_{segmen} = panjang segmen TCP (*byte*)

$W_{datagram}$ = panjang datagram IP (*byte*)

$Header_{IP}$ = panjang *header* IP (20 *byte*)

Kemudian datagram IP dienkapsulasi dengan *header* pada layer 2, pada penelitian ini akan digunakan Ethernet sebagai layer pada *datalink*.

$$W_{\text{frame}} = W_{\text{datagram}} + \text{Header}_{\text{ethernet}} \quad (2-29)$$

dengan:

W_{frame} = panjang frame Ethernet (*byte*)

W_{datagram} = panjang datagram IP (*byte*)

$\text{Header}_{\text{IP}}$ = panjang header Ethernet (14 *byte*)

Dari Ethernet, frame Ethernet dikirimkan ke layer MAC WiMAX dan mengalami penambahan header MAC. Maka W_{frame} total dapat dicari dengan persamaan:

$$W_{\text{frame total}} = W_{\text{frame}} + \text{Header}_{\text{MAC}}$$

dengan: $\text{Header}_{\text{MAC}}$ = panjang header pada MAC (6 *byte*)

Sedangkan *delay* enkapsulasi adalah:

$$t_{\text{enc}} = \frac{W_{\text{frame total}}}{c} \times 8 \quad (2-30)$$

dengan:

t_{enc} = *delay* enkapsulasi (*ms*)

$W_{\text{frame total}}$ = panjang frame (*byte*)

c = kecepatan transmisi kanal (*bps*)

Sedangkan *delay* dekapsulasi dirumuskan:

$$t_{\text{dec}} = \frac{W_{\text{frame total}}}{c} \times 8 \quad (2-31)$$

dengan:

t_{enc} = *delay* dekapsulasi (*ms*)

$W_{\text{frame total}}$ = panjang frame Ethernet (*byte*)

c = kecepatan transmisi kanal (*bps*)

Sehingga *delay* proses dapat dituliskan sebagai berikut

$$t_{\text{proc}} = t_{\text{enc}} + t_{\text{dec}} \quad (2-32)$$

dengan: t_{proc} = *delay* proses (*ms*)

t_{enc} = *delay* enkapsulasi (*ms*)

t_{dec} = *delay* dekapsulasi (*ms*)

❖ Delay propagasi

Delay propagasi adalah jumlah waktu yang dibutuhkan oleh gelombang radio untuk berpropagasi pada media transmisi. *Delay* propagasi gelombang radio dapat ditulis dengan persamaan:

$$t_{prop} = \frac{d_{max}}{v} \quad (2-33)$$

dengan:

$$\begin{aligned} t_{prop} &= \text{delay propagasi (ms)} \\ d_{max} &= \text{jarak jangkauan base station dan subscriber station (m)} \\ v &= \text{kecepatan sinyal pada media wireless (m/s)} \end{aligned}$$

❖ Delay transmisi

Delay transmisi adalah waktu yang dibutuhkan untuk meletakkan semua data pada media transmisi, dipengaruhi oleh ukuran paket dan kapasitas media transmisi.

Delay transmisi dirumuskan pada persamaan:

$$t_{trans} = \frac{W_{frame\ total}}{c} \times 8 \quad (2-34)$$

dengan: t_{trans} = delay transmisi (ms)

$W_{frame\ total}$ = panjang total frame yang dikirimkan (byte)

c = kecepatan transmisi kanal (bps)

❖ Delay antrian

Delay antrian adalah waktu yang dibutuhkan data selama berada dalam antrian untuk ditransmisikan. Delay ini disebabkan oleh waktu proses yang diperlukan oleh router dalam menangani paket sepanjang jaringan. Pada analisis aplikasi VoIP melalui mobile WiMAX, model antrian yang digunakan adalah M/G/1 dengan disiplin antrian FIFO. Model antrian M/G/1 dapat ditulis dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{c}{W_{frame\ total}} \\ \lambda_w &= \mu x \rho \\ t_w &= \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda_w}{\mu^2(1-\rho)} \end{aligned} \quad (2-35)$$

dengan: t_w = delay antrian (ms)

x = waktu rata-rata pelayanan (ms)

c = kapasitas kanal (bps)

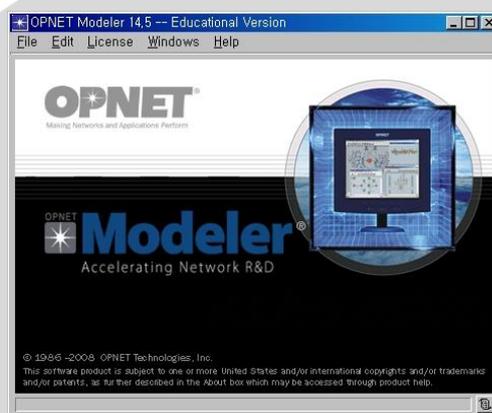
λ_w = kecepatan kedatangan (paket/detik)

μ = kecepatan pelayanan (paket/detik)

ρ = faktor utilitas sistem nirkabel

2.6 *Optimized Network Engineering Tool (OPNET) Modeler versi 14.5*

Optimized Network Engineering Tool (OPNET) Modeler adalah sebuah *network simulator* yang dirancang oleh OPNET Technologies Inc. Dengan menggunakan simulasi, *network designers* dapat mengurangi biaya penelitian dan memastikan kualitas produk yang optimal. Teknologi terbaru OPNET Modeler menyediakan sebuah lingkungan untuk mendesain protokol dan teknologi juga menguji dan mendemonstrasikan dengan skenario yang realistis sebelum diproduksi. OPNET Modeler mengakselerasikan R&D *network*, dan meningkatkan kualitas produk serta digunakan perusahaan perlengkapan jaringan terbesar di dunia untuk meningkatkan desain dari *network devices*, teknologi seperti VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS, IPv6 dan lain-lainnya. Gambar 2.26 menunjukkan tampilan awal dari *software* OPNET Modeler.

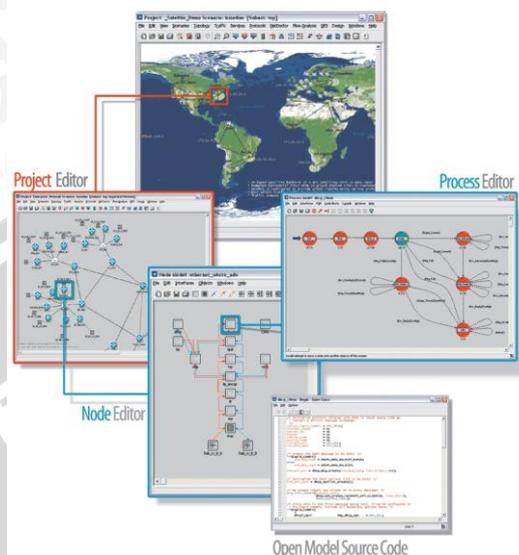


Gambar 2.26 Tampilan awal OPNET Modeler 14.5 – *Educational Version*
(Sumber : <http://www.opnet.com>)

Optimized Network Engineering Tool (OPNET) Modeler menyediakan lingkungan pengembangan yang komprehensif untuk menganalisis spesifikasi, simulasi dan kinerja suatu jaringan komunikasi. Berbagai macam sistem komunikasi dari LAN tunggal hingga jaringan satelit global dapat didukung *software* tersebut. OPNET menggunakan metode *discrete event simulations* sebagai sarana untuk menganalisis kinerja sistem dan perilaku mereka (Xinjie Chang, 1999).

Terdapat beberapa *software* simulasi seperti NS-2. Namun, OPNET adalah salah satu yang paling populer, akurat dan dapat diterapkan di dunia nyata dibidang simulasi jaringan dan diakui memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Oleh karena itu, banyak laboratorium, lembaga publik, dan perusahaan yang terlibat dalam informasi dan komunikasi lebih memilih dan menggunakan *OPNET*.

OPNET menyediakan empat editor untuk mengembangkan representasi dari sistem yang akan dimodelkan. Editor tersebut adalah: *network*, *node*, *process*, and *parameter editors* yang diselenggarakan secara hirarkis, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 OPNET Graphic Editors untuk Network, Node, and Process Models
(Sumber : http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html)

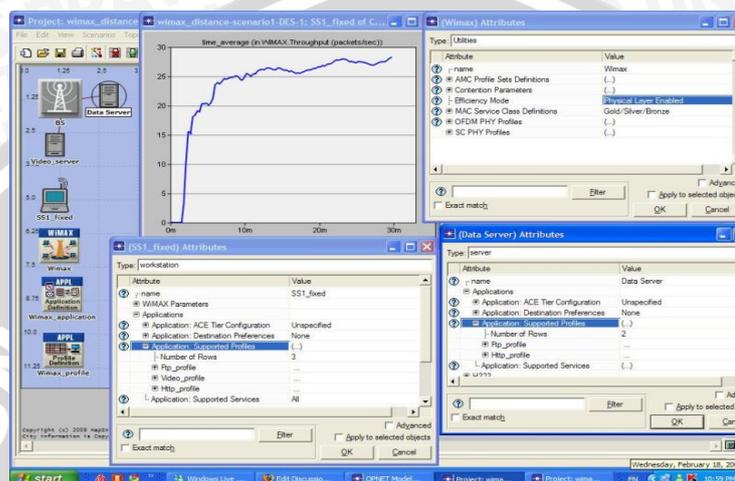
Setiap tingkatan hirarki menggambarkan aspek yang berbeda dari model lengkap yang disimulasikan. Model yang dikembangkan pada satu tingkat hirarki yang digunakan (atau diwariskan) oleh model pada tingkat yang lebih tinggi berikutnya. Ini mengarah ke lingkungan simulasi yang sangat fleksibel di mana generik model dapat dikembangkan dan digunakan dalam berbagai skenario.

2.6.1 Kelebihan OPNET Modeler v.14.5

Berikut adalah beberapa alasan digungkannya OPNET Modeler versi 14.5 dalam penelitian ini (Jinhua Guo, 2007):

- OPNET menyediakan Graphic User Interface (GUI) yang sangat nyaman dan mudah untuk dipelajari,
- OPNET dapat digunakan untuk membuat model pada seluruh jaringan, termasuk router, switch, protokol, server, dan aplikasi lain yang mendukung. Berbagai macam sistem komunikasi mulai LAN tunggal hingga antarnjaringan global dapat didukung,
- *Software* OPNET (dengan model *source code*) tersedia secara gratis untuk penelitian akademis dan mengajar masyarakat,

- *Discrete event simulation* (DES) engine pada OPNET untuk simulasi jaringan adalah tercepat. Biasanya diperlukan waktu beberapa menit untuk menyelesaikan simulasi percobaan laboratorium,
- OPNET memiliki komunitas pengguna yang besar. OPNET telah digunakan lebih dari 500 perusahaan, penyedia layanan, dan organisasi pemerintah di seluruh dunia. siswa yang memiliki pengalaman dengan simulator OPNET akan memiliki peluang kerja jauh lebih baik di masa depan dalam industri.



Gambar 2.28 Tampilan proses simulasi dengan menggunakan OPNET Modeler
(Sumber : <http://www.opnet.com>)

2.6.2 *Discrete event simulation* (DES)

Simulasi adalah proses mendesain suatu model yang dikomputerisasi dari sebuah sistem atau sebuah proses dan menghubungkan percobaan dengan model tersebut untuk tujuan memahami perilaku dari system atau mengevaluasi strategi yang beragam dari operasi pada system tersebut

Kelebihan dari proses simulasi adalah :

- dapat mengendalikan percobaan, dengan mengubah parameter tertentu tanpa harus mengubah atau mengganggu system yang telah ada,
- dapat lebih menghemat waktu,
- merupakan perangkat yang efektif digunakan dalam program pelatihan

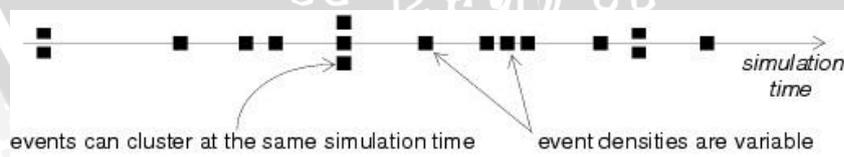
Discrete event simulation (DES) merupakan suatu model simulasi dimana perubahan statusnya terjadi pada titik-titik diskrit dalam waktu yang dipicu oleh suatu kejadian (*event*). Dalam titik waktu tersebut akan terjadi suatu *event*, dimana *event* didefinisikan sebagai suatu kejadian yang dapat mengubah kondisi suatu sistem. Contohnya operator yang sebelumnya menganggur (*idle*), setelah kedatangan

suatu pelanggan akan menjadi sibuk. Atau sebaliknya dari kondisi sibuk ke kondisi *idle*.

Berikut beberapa kejadian yang dapat dimodelkan sebagai sebuah *event*:

- menerima sebuah paket atau sebuah perintah dalam suatu proses,
- mulai / berakhirnya penransmisian atau penerimaan paket-paket pada suatu *link*,
- pembangkitan sebuah pesan baru, perintah, atau tugas oleh sebuah proses aplikasi,
- kegagalan (atau *recovery* dari kegagalan) pada suatu perangkat.

Ada dua pendekatan pokok yang digunakan untuk meningkatkan waktu simulasi yaitu mempercepat waktu *event* berikutnya dan mempercepat interval waktu tetap. Dengan pendekatan mempercepat *event* berikutnya, waktu simulasi diinisialisasi dengan (nol) 0 kemudian banyaknya kejadian dari suatu *event* di masa depan ditentukan. Waktu simulasi kemudian dipercepat ke waktu kejadian *event* paling dekat di masa depan, kemudian titik-titik kondisi sistem diperbarui ke setiap kejadian yang telah terjadi sehingga banyaknya *event* di masa depan juga diperbarui. Kemudian waktu simulasi dipercepat, kondisi sistem diperbarui, banyaknya *event* masa depan ditentukan dst. Proses dari waktu simulasi yang dipercepat ini dari waktu *event* satu ke yang lain kontinu sampai beberapa kondisi berhenti dan telah terpenuhi. Sejak semua perubahan kondisi hanya terjadi pada *discrete event simulation*, dimana periode tidak aktif dilompati dari satu waktu *event* ke waktu *event* lain. Waktu simulasi hanya berubah ketika *event* baru terjadi, selama satu *event* terjadi, waktu tidak dapat berubah. Waktu simulasi sekarang didefinisikan sebagai waktu *event* saat ini dieksekusi. Waktu simulasi tidak perlu dipercepat dengan besar yang sama pada setiap *event*, namun melompat pada waktu *event* selanjutnya.



Gambar 2.29 Distribusi event pada *timeline* simulasi
(Sumber : OPNET tutorial.pdf)

OPNET Modeler mendukung pemodelan dalam sistem terdistribusi, dan OPNET juga memperbolehkan dilakukannya *multiple-event* terjadi secara simultan dalam simulasi dan mempengaruhi komponen-komponen yang berbeda dari sistem. Oleh karena itu, dimungkinkan untuk terjadinya beberapa *event* berbeda dalam waktu simulasi yang sama.