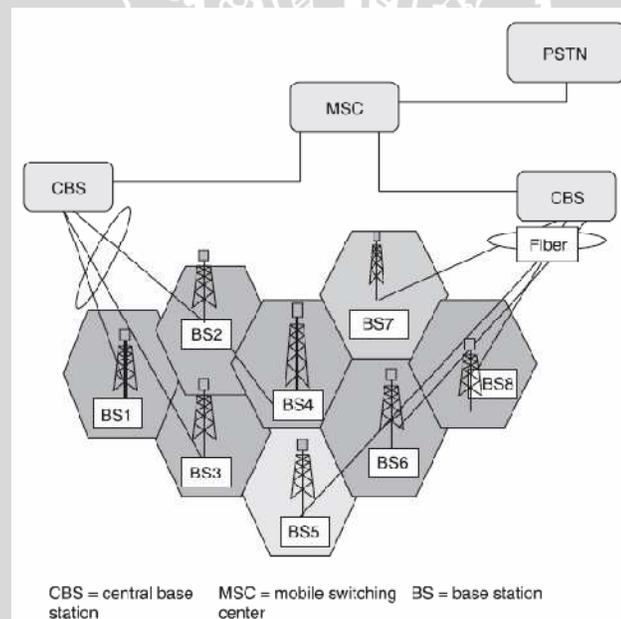


BAB II TINJAUAN TEORI

2.1 *Radio over Fiber* (RoF)

Jaringan *wireless* yang akan datang menggunakan kombinasi dari beberapa metode *air-interface* pada kanal dan *cell* yang berbeda-beda yang dapat diubah secara dinamis untuk memenuhi variasi kondisi trafik. Metode akses yang sekarang seperti TDMA, TD-CDMA, dan WCDMA pada jaringan dapat menggunakan *software-radio* pada *base station*, tetapi hal ini dapat meningkatkan kompleksitas dan biaya yang lebih tinggi, sehingga dibutuhkan teknologi baru yang dapat mengatasi kekurangan tersebut.

Radio over Fiber (RoF) merupakan suatu teknologi baru dalam transmisi yang mengintegrasikan teknik transmisi *wireless* dengan *wireline*. Pada RoF, sinar laser dimodulasi oleh sinyal radio dan dikirimkan melalui media serat optik. *Remote antenna unit/base station* dan sentral, antar-*remote antenna unit* maupun antar-*base station* dihubungkan oleh serat optik, seperti terlihat pada **Gambar 2.1**.

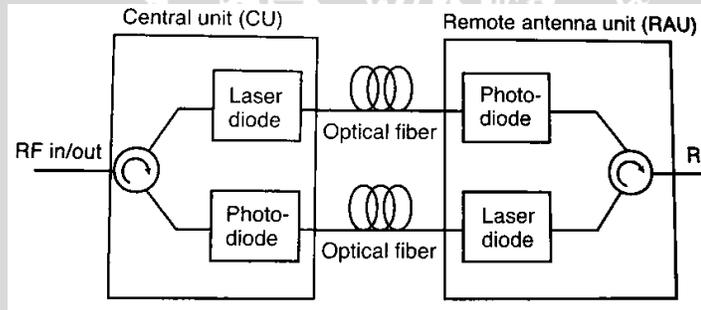


Gambar 2.1. Konsep *Radio over fiber*
(Sumber: Hamed Al Raweshdy, 2002)

Pada sistem komunikasi *wireless* yang umum, fungsi pemrosesan sinyal RF seperti menaikkan frekuensi, modulasi *carrier* dan *multiplexing* dilakukan di BS dan kemudian diteruskan ke antenna. RoF memungkinkan untuk melakukan pemusatan fungsi pemrosesan sinyal RF pada *central base station* (BSC), dan kemudian menggunakan serat optik untuk mendistribusikan sinyal RF ke RAU sehingga konfigurasi RAU

menjadi lebih sederhana. Fungsi komunikasi seperti pengkodean, modulasi, serta konversi dapat dilaksanakan pada sentral. Sentralisasi fungsi pemrosesan sinyal RF memungkinkan pemakaian peralatan secara bersama, alokasi *resource* secara dinamis, dan menyederhanakan sistem operasi dan perawatan yang berarti penghematan besar pada instalasi dan operasional sistem.

Gambar 2.2 menunjukkan jalur transmisi RoF sederhana. Konfigurasi dasar RoF terdiri dari *interface bidirectional*, yaitu *transmitter* laser serta penerima fotodiode yang terletak pada *base station* atau *remote antenna unit*, yang dipasangkan dengan *transmitter* laser serta penerima fotodiode yang terletak pada *radio processing unit*. Sinyal masukan RF diaplikasikan pada *laser diode* untuk memodulasi intensitas dari *carrier* optik dan sinyal tersebut dideteksi secara langsung pada *photodiode* untuk dikonversi kembali menjadi sinyal asli yang dikirimkan. Tipe ini disebut dengan *intensity modulated-direct detection (IM-DD)*, yang sering digunakan karena sederhana dan biaya yang lebih rendah. Untuk transmisi dengan *loss* rendah melalui serat optik digunakan panjang gelombang 1310 atau 1550 nm. Serat optik yang digunakan dapat berupa *multi mode* maupun *single mode*. *Single mode* digunakan pada jaringan dengan kebutuhan *bandwidth* yang lebih besar dan jarak transmisi yang jauh.



Gambar 2.2. Bagan Jalur Optik *Bidirectional* Menggunakan Modulasi Langsung Dari Laser Diode.

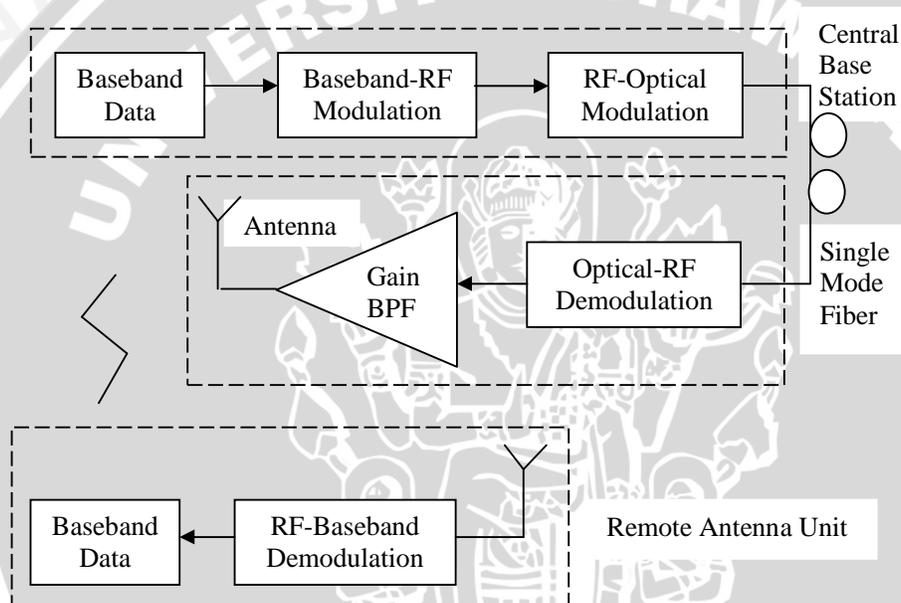
(Sumber: Siti Harliza, 2007)

Radio over fiber merupakan teknologi yang ideal untuk jaringan *microcellular* di mana setiap *port* radio *microcell* terdiri dari *repeater* optoelektronik yang dihubungkan melalui jalur serat optik menuju sentral radio dan peralatan kontrol, diletakkan pada daerah *macrocell* yang sudah ada. Sistem ini menggunakan *microcell* dan *picocell* untuk menyediakan *bandwidth* yang lebar. Sistem *microcell* dapat memecahkan masalah keterbatasan frekuensi karena beberapa *base station* dapat dipasang, sehingga radius kerja setiap *base station* dapat dikurangi dan frekuensi radio dapat digunakan kembali

pada beberapa zona. Level daya yang lebih tinggi mengeliminasi kebutuhan multipleks frekuensi atau *amplifier* berdaya tinggi yang biasa digunakan pada *base station*. Daerah cakupan yang terbatas akibat ketinggian antenna yang kecil mengurangi interferensi antar kanal dari *cell* lainnya. Sistem RoF digunakan untuk cakupan selular di dalam bangunan, seperti kantor, *mall*, maupun bandara.

2.2 Arsitektur Radio over Fiber

Radio over fiber merupakan penggabungan antara komunikasi *wireline* dan *wireless*, sehingga dalam arsitekturnya terdapat komponen transceiver dari komunikasi *wireless* yaitu BTS dan menggunakan media transmisi berupa serat optik.



Gambar 2.3. Arsitektur Radio over Fiber
(Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Pada **Gambar 2.3** dapat dilihat bahwa sinyal yang dikirim oleh BTS disalurkan melalui serat optik. Untuk mengubah sinyal elektrik yang dikirimkan oleh BTS menjadi sinyal optik, dibutuhkan konverter dari elektrik menjadi optik di sisi *transmitter*, serta sebaliknya, konversi optik menjadi elektrik di sisi *receiver*.

Pada sistem RoF, sinyal RF memodulasi sinyal optik kemudian ditransmisikan melalui link serat optik menuju penerima. Untuk memodulasi sinyal optik ini dilakukan dengan sistem IMDD (*Intensity Modulation Direct Detection*). Sistem IMDD mempunyai dua kemungkinan metode implementasi. Sinyal pembawa optik dapat dimodulasi secara langsung atau eksternal. Untuk frekuensi standar *wireless* (GSM, WiFi, 802.11a/b/g, UMTS), lebih sesuai apabila menggunakan modulasi langsung dan

fiber jenis *single mode*, dikarenakan *loss* transmisi kecil, kemudahan instalasi, biaya murah dan ukuran kecil.

Sinyal RF digunakan untuk memodulasi langsung laser diode di BSC. Hasil dari intensitas modulasi sinyal optik kemudian dikirimkan melalui fiber ke *remote antenna unit* (RAU). Pada RAU, sinyal RF yang ditransmisikan dibangkitkan kembali dengan deteksi langsung menggunakan fotodetektor PIN. Sinyal tersebut kemudian dikuatkan dan diradiasikan oleh antena. Sinyal *uplink* dikirimkan dari RAU ke BS dengan cara yang sama. Komponen dasar arsitektur RoF adalah:

a. Base station

Base station yang digunakan dapat berupa *transceiver* jenis apapun yang digunakan untuk kepentingan WLAN, WMAN, maupun WiMAX dan sistem komunikasi lainnya, bergantung pada aplikasi *radio over fiber*. BTS ini menghasilkan sinyal RF untuk ditransmisikan oleh serat optik ke *subscriber*. Sisi *base station* ini terdiri dari pemrosesan data *baseband* melalui modulator RF, sumber optik serta modulator optik.

- **Sumber Optik**

Sumber optik yang digunakan dalam RoF adalah laser, karena laser memiliki intensitas yang lebih tinggi dan spektrum cahaya (*line width spectral*) yang lebih kecil dibandingkan LED sehingga cahaya dapat melalui serat optik dengan dispersi yang lebih sedikit.

Pada laser, terdapat *noise* yang disebut dengan *Relative Intensity Noise* (RIN). RIN merupakan noise laser yang diukur secara langsung di sisi *transmitter*. *Noise* ini muncul akibat fluktuasi acak pada intensitas sinyal optik. RIN dapat mengakibatkan fluktuasi nyata dari intensitas cahaya yang dihasilkan oleh laser dan fluktuasi frekuensi cahaya yang dapat menurunkan sinyal jika serat optik terdispersi. Menurut Abd El-Naser A. Mohamed, et al. 2011, nilai RIN dinyatakan dengan:

$$\langle I_{RIN}^2 \rangle = RIN \cdot I_D^2 \cdot B \quad (2.1)$$

dengan:

$\langle I_{RIN}^2 \rangle$ = *Relative Intensity Noise*

RIN = parameter RIN (dB/Hz)

I_D = arus DC rata-rata (A)

B = *bandwidth* sistem (Hz)

- **Modulator Optik (Konverter Elektrik-Optik)**

Sinyal informasi ditransmisikan melalui jalur optik dengan menggunakan sinyal elektrik untuk memodulasi intensitas cahaya yang disuntikkan ke dalam kanal serat

optik. Konversi E/O ini dapat dicapai dengan modulasi langsung atau dengan menggunakan sumber berintensitas konstan yang diikuti dengan modulator eksternal.

Pada modulasi langsung, cahaya dari laser dimodulasi secara langsung oleh sinyal radio. Metode ini efektif dan memberikan performansi yang cukup baik untuk frekuensi sinyal radio yang kurang dari orde GHz. (Fernando, 2001).

b. Serat Optik

Sinyal yang telah dimodulasi dipropagasikan menuju penerima melalui serat optik berbahan silica yang dirancang memiliki rugi-rugi yang kecil pada panjang gelombang yang dimiliki sumber optik. Sinyal ini mengalami atenuasi dan distorsi ketika melalui media optik. Beberapa jenis rugi-rugi yang mempengaruhi performansi serat optik adalah (Muttaqien, 2008):

1. Redaman karakteristik serat optik

Redaman karakteristik serat optik tergantung dari panjang gelombang cahaya yang digunakan. Koefisien redaman karakteristik serat optik biasanya diberikan oleh pabrik dalam satuan dB/km.

2. Redaman sambungan

Kabel serat optik biasanya dibuat dengan panjang antara 1 km sampai dengan 5 km, oleh karena itu diperlukan beberapa kabel yang harus disambungkan untuk menghubungkan antar transmisi. Besarnya redaman sambungan tergantung dari teknik penyambungan yang digunakan dan besarnya redaman antara 0,1 sampai 0,5 dB.

3. Redaman konektor

Konektor optik adalah perangkat mekanik yang berfungsi untuk menghubungkan serat optik secara meyakinkan, dengan disekrup secara bersama-sama, sehingga *core* dari kedua ujung tersebut akan tersambung menjadi satu, namun demikian tidak dapat dihindarkan adanya redaman konektor.

Ketiga redaman tersebut memberikan redaman total saluran optik L_{op} sebesar (Fernando, 2006):

$$L_{op} = 2(n_c l_c + n_s n_s + \alpha(\lambda) l_f) \quad (2.2)$$

dengan:

L_{op} = redaman total dalam saluran optik (dB)

n_c = jumlah konektor yang digunakan

l_c = koefisien redaman konektor (dB)

n_s = jumlah sambungan sepanjang jalur serat optik yang digunakan

- l_s = koefisien redaman sambungan (dB)
 $\alpha (\lambda)$ = koefisien redaman serat optik (dB/km)
 l_f = panjang serat optik yang digunakan (km)

Selain redaman, terdapat *noise* yang terjadi pada saluran optik, yaitu *shot noise* dan *thermal noise*.

1. Shot Noise

Shot noise terjadi karena cahaya dikomposisikan menjadi paket energi diskrit yang disebut foton, yang membawa sinyal sebagai sebuah aliran energi kuantum yang sangat kecil, bukan sebagai energi yang mengalir dengan lancar. Sifat acak dari waktu sampai setiap foton menghasilkan *noise* acak pada arus keluaran fotodiode. Menurut Mohamed, et al. 2011, nilai *shot noise* dinyatakan dengan:

$$\langle I_{shot}^2 \rangle = 2 \cdot q \cdot \langle I_D \rangle \cdot B \quad (2.3)$$

dengan:

- $\langle I_{shot}^2 \rangle$ = *shot noise*
 q = muatan electron (1.6×10^{-19} C)
 $I_D (t)$ = arus DC rata-rata yang terdeteksi (A)
 B = *bandwidth* sistem (Hz)

2. Thermal Noise

Thermal noise merupakan *noise* yang timbul akibat komponen yang terdapat dalam sisten, misalnya akibat adanya komponen resistif di dalam sistem. Ketika sistem digunakan, komponen resistif akan menyerap arus yang mengalir dan mengubahnya menjadi energi panas. Energi panas di dalam sistem ini menjadi *noise* karena dapat menurunkan performansi sistem. Menurut Mohamed, et al. 2011, nilai *thermal noise* dinyatakan dengan:

$$\langle I_{th}^2 \rangle = \frac{4 \cdot K \cdot T \cdot B}{R} \quad (2.4)$$

dengan:

- $\langle I_{th}^2 \rangle$ = *thermal noise*
 K = konstanta Boltzmann (1.38×10^{-20} mW/kHz)
 T = suhu absolute (300 K)
 B = *bandwidth* sistem (kHz)
 R = hambatan beban (ohm)

Noise dalam saluran optik dinyatakan dalam (Mohamed, et al. 2011):

$$E[n_{op}^2(t)] = (\langle I_{shot}^2 \rangle + \langle I_{RIN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle) \quad (2.5)$$

Selain *noise* dan redaman tersebut, dalam transmisi serat optik terjadi dispersi sinyal optik, yaitu pelebaran sinyal optik pada daerah waktu yang akan menimbulkan perubahan bentuk sinyal atau penyatuan beberapa sinyal optik pada kecepatan transmisi yang tinggi. Dengan demikian dispersi merupakan salah satu pembatas kecepatan transmisi dalam system transmisi serat optik.

Pada *radio over fiber* yang menggunakan serat optik *single mode*, dispersi yang terjadi adalah dispersi material (Mohamed, et al. 2011). Dispersi material disebabkan oleh variasi indeks bias dengan panjang gelombang atau frekuensi cahaya yang digunakan dalam serat optik. Ini menimbulkan dispersi pulsa karena sumber cahaya tidak terdiri dari frekuensi tunggal sehingga akan menjalar dengan kecepatan yang berbeda.

$$\tau_m = \Delta\lambda.l.D_m \quad (2.6)$$

Dengan:

τ_m = dispersi bahan (ps)

$\Delta\lambda$ = lebar spektrum sumber optik (nm)

D_m = koefisien dispersi bahan (ps/nm.km)

l = panjang serat optik (km)

c. *Radio Access Point*

RAP berfungsi untuk mengubah sinyal optik yang ditransmisikan melalui serat optik menjadi sinyal RF untuk ditransmisikan kembali ke *subscriber*. Proses yang terjadi di RAP hanya proses perubahan sinyal optik menjadi sinyal RF untuk ditransmisikan melalui antena ke *subscriber*, sehingga konfigurasi RAP tidak sesekompleks BTS. RAP ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu *photodetector*, *Gain BPF*, dan antena.

- *Photodetector (Konversi Optik-Elektrik)*

Photodetector (PD) digunakan untuk melakukan proses konversi O/E. sebuah fotodiode biasa digunakan sebagai *photodetector* pada komunikasi optik. *Photodiode* merupakan sebuah alat yang menghasilkan arus listrik dari daya optik yang diterima. Setelah pendeteksian, sinyal elektrik dikuatkan dengan *amplifier* elektrik dengan gain G_{op} yang besarnya bervariasi, bergantung pada spesifikasi alat yang digunakan.

- *Gain BPF*

Gain yang diberikan di sisi RAP hanya diberikan pada rentang frekuensi tertentu yang merupakan frekuensi kerja sistem.

- **Antena**

Digunakan untuk memancarkan sinyal RF ke *subscriber*.

d. Portable Unit/Mobile Station

Portable unit merupakan *mobile station subscriber*, yaitu *handset* yang digunakan oleh *subscriber* untuk melakukan komunikasi. Dalam MS, terjadi proses demodulasi sinyal RF menjadi frekuensi *baseband*.

2.3 Aplikasi *Radio over Fiber*

Saat ini, *Radio over Fiber* telah digunakan pada *Asian Games 2010*. Teknologi ini diimplementasikan oleh perusahaan telekomunikasi Foxcom, yang mentransmisikan sinyal L-Band dan frekuensi 70 MHz dengan jarak 110 km tanpa amplifier atau repeater dengan CNR yang dicapai adalah 41 dB.

Sinyal *uplink* 70 MHz ditransmisikan dari IBC di distrik Panyu menuju stasiun bumi Guangdong. Sedangkan sinyal *downlink* pada L-Band ditransmisikan kembali ke *central base station* untuk tujuan pengawasan. Generasi selanjutnya dari seri Sat-Light/Platinum™ menggunakan laser berdaya tinggi untuk memenuhi kebutuhan pelanggan. Sat-Light/Platinum™ merupakan salah satu aplikasi teknologi RoF yang dirancang untuk memenuhi permintaan yang semakin tinggi akan performansi yang lebih baik dan pengawasan RF. (Foxcom, 2011)

Beberapa aplikasi teknologi RoF lainnya adalah (Siti Harliza, 2011):

a. Komunikasi satelit

Salah satu aplikasi RoF dalam komunikasi satelit melibatkan peletakan *remote antenna* pada lokasi yang cocok di stasiun bumi menggunakan jaringan serat optik dengan panjang kurang dari 1 km dan frekuensi operasi antara 1 GHz hingga 15 GHz, sehingga peralatan frekuensi tinggi dapat dipusatkan. Sehingga antena yang digunakan tidak perlu berada di area kontrol.

b. Mobile Broadband System (MBS)

Konsep MBS diaplikasikan untuk memperluas pelayanan yang tersedia pada *fixed Broadband Integrated Services Digital Network (B-ISDN)* kepada pengguna layanan bergerak. Karena digunakan kecepatan data yang tinggi sekitar 155 Mbps untuk setiap pengguna, frekuensi karier yang digunakan termasuk dalam gelombang millimeter, sehingga mengalokasikan frekuensi pada 60 GHz. Rentang frekuensi 62-63 GHz dialokasikan untuk *downlink* sedangkan 65-66 GHz untuk *uplink*.

Ukuran diameter *cells* sekitar beberapa ratus meter (*microcell*), sehingga kepadatan *cell* radio tinggi dibutuhkan untuk mencapai cakupan yang diinginkan. *Microcell* dapat dihubungkan dengan *fixed* B-ISDN melalui serat optik. Jika teknologi RoF digunakan untuk menghasilkan gelombang millimeter, *base station* dapat dibuat lebih sederhana. Hal ini memungkinkan pengembangan jaringan MBS secara luas.

c. **Wireless LANs melalui jaringan optik**

Generasi pita lebar WLAN selanjutnya diproyeksikan untuk mencapai 54 Mbps dan akan membutuhkan frekuensi *carrier* yang lebih tinggi pada rentang 5 GHz (IEEE 802.11a/D7.0). Frekuensi *carrier* yang lebih tinggi ini menuju generasi *microcell* dan *picocell*. Cara efektif untuk mengatasinya adalah memanfaatkan teknologi RoF.

d. **Jaringan seluler**

Jaringan *mobile* merupakan daerah aplikasi yang penting untuk teknologi RoF. Jumlah pengguna yang semakin meningkat dengan permintaan untuk layanan pita lebar menekan jaringan bergerak untuk meningkatkan kapasitas. Maka dari itu, trafik *mobile* (GSM atau UMTS) dapat diaplikasikan secara efektif antara *switching centers* dan *base stations* dengan mengeksplorasi keuntungan teknologi *single mode fiber*. Fungsi RoF lainnya seperti alokasi kapasitas secara dinamis menawarkan keuntungan operasional yang signifikan pada jaringan seluler.

2.4 Kelebihan dan Kekurangan *Radio over fiber*

2.4.1 Kelebihan *Radio over Fiber*

a. **Rugi-Rugi Rendah**

Distribusi elektrik sinyal gelombang mikro dengan frekuensi tinggi dalam ruang bebas mengalami rugi-rugi akibat penyerapan dan pemantulan serta memiliki nilai impedansi saluran yang nilainya berbanding lurus dengan frekuensi, sehingga pengiriman sinyal radio frekuensi tinggi secara elektrik untuk jarak yang jauh membutuhkan peralatan regenerasi. Solusi alternatif untuk masalah ini adalah mendistribusikan sinyal *baseband* atau *intermediate frequencies* (IF) dari *Switching center* (SC) menuju *base stations* (BS). Sinyal tersebut kemudian dikonversi untuk memenuhi frekuensi gelombang mikro atau milimeter pada setiap BS, dikuatkan, kemudian diradiasikan. Sistem ini memiliki persyaratan khusus untuk penguat, *repeater*, *equalizers*, serta osilator local yang digunakan. Solusi alternatifnya adalah menggunakan serat optik, yang menawarkan rugi-rugi yang lebih rendah.

Serat optik *single mode* dipilih untuk diaplikasikan dalam teknologi *radio over fiber* pada skripsi ini. Serat optik *single mode* yang terbuat dari kaca memiliki rugi-rugi di bawah 0.2 dB/km dan 0.5 dB/km pada panjang gelombang 1.5 μm dan 1.3 μm . Sedangkan serat optik yang terbuat dari polimer memiliki atenuasi yang lebih tinggi, antara 10-40 dB/km pada daerah panjang gelombang 500-1300 nm. Rugi-rugi ini lebih rendah daripada propagasi ruang bebas dan transmisi kabel tembaga untuk gelombang mikro frekuensi tinggi, sehingga jarak transmisi dapat dinaikkan dan mengurangi daya transmisi yang dibutuhkan.

b. Bandwidth yang Lebar

Serat optik memiliki *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan media *wireless*. Saat ini *bandwidth* yang dapat disediakan oleh serat optik mencapai 1.6 THz.

c. Tahan Terhadap Interferensi Radio Frekuensi

Komunikasi serat optik memiliki imunitas terhadap interferensi elektromagnetik karena sinyal ditransmisikan dalam bentuk cahaya melalui serat optik, bukan dalam bentuk gelombang elektromagnetik.

d. Instalasi dan Perawatan yang Mudah

RoF menghilangkan kebutuhan akan osilator lokal dan peralatan lain pada *remote stations* (RS) karena peralatan modulasi dan *switching* disimpan di SC dan digunakan bersama oleh beberapa RS. Hal ini menyebabkan RS yang lebih ringan dan kecil, mengurangi biaya instalasi dan perawatan.

2.4.2 Kekurangan Radio over Fiber

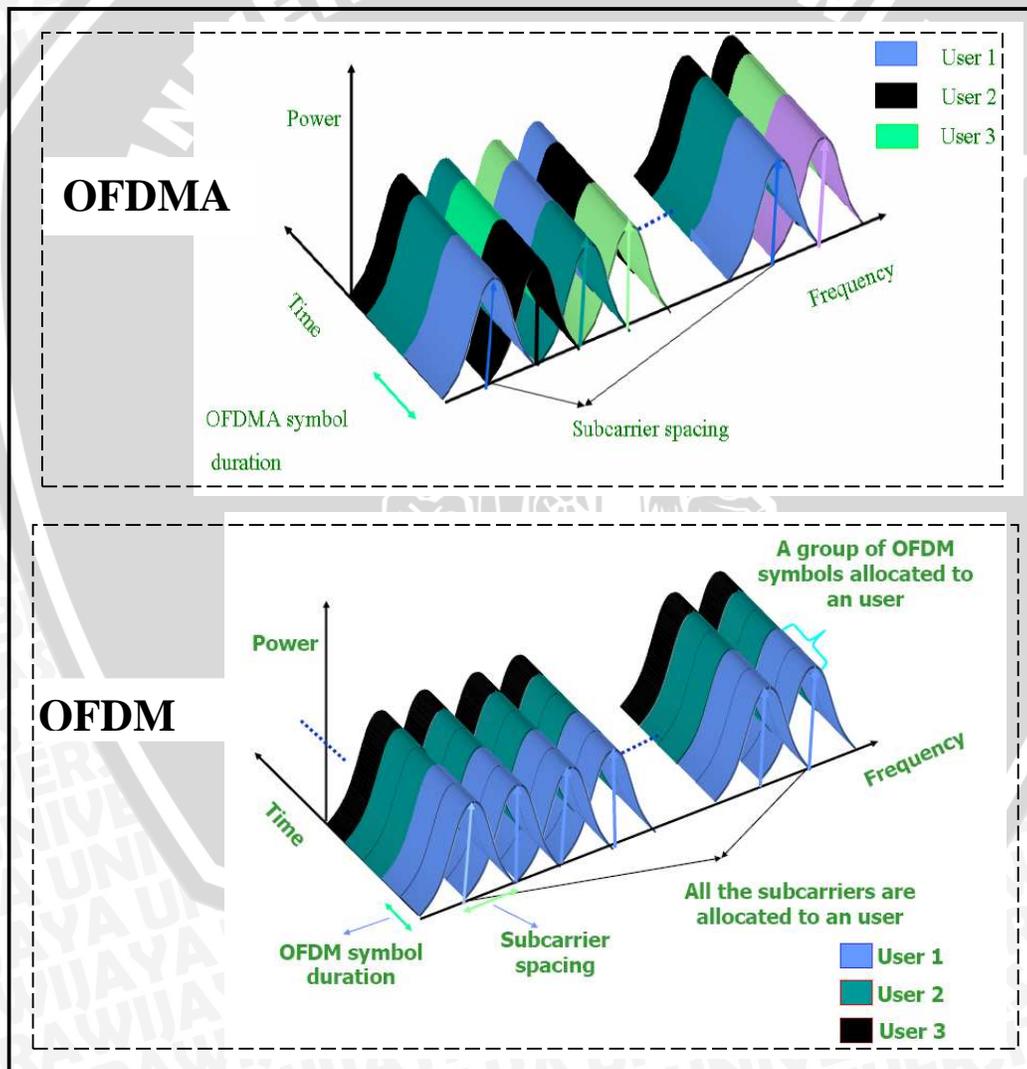
RoF melibatkan modulasi analog dan deteksi cahaya yang merupakan dasar transmisi analog, sehingga *noise* dan distorsi yang terjadi pada komunikasi analog terjadi juga pada RoF (Ng'oma, 2005). Hal ini membatasi *noise figure* (NF) dan rentang dinamik jaringan RoF (Powell, 2002). Rentang dinamik ini penting untuk sistem komunikasi bergerak seperti GSM karena daya yang diterima pada *base stations* dari *mobile unit* berubah-ubah, sehingga dalam *cell* yang sama, daya RF yang diterima oleh *mobile unit* yang dekat dengan *base station* lebih tinggi dibandingkan yang diterima oleh *mobile unit* yang lebih jauh.

2.5 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) pada dasarnya merupakan gabungan antara *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) dan *Time Division Multiple Access* (TDMA). Hal ini berarti bahwa *multiple user* dialokasikan

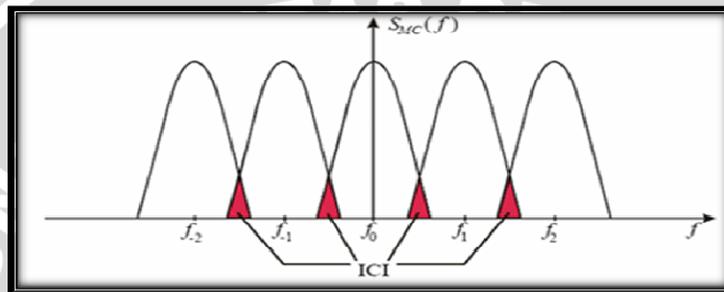
pada *subcarrier* yang berbeda secara dinamis (FDMA) dan pada *time slot* yang berbeda pula (TDMA).

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) merupakan teknik *multiple access* yang dikembangkan dari teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), tetapi OFDMA memiliki perbedaan dengan OFDM, 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. Perbedaan antara OFDMA dan OFDM ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. [Srikanth, 2007]



Gambar 2.4. Perbandingan Sinyal OFDM dengan Sinyal OFDMA
 Dilihat dari *Domain* Frekuensi dan Waktu.
 (Sumber : Srikanth S., 2007)

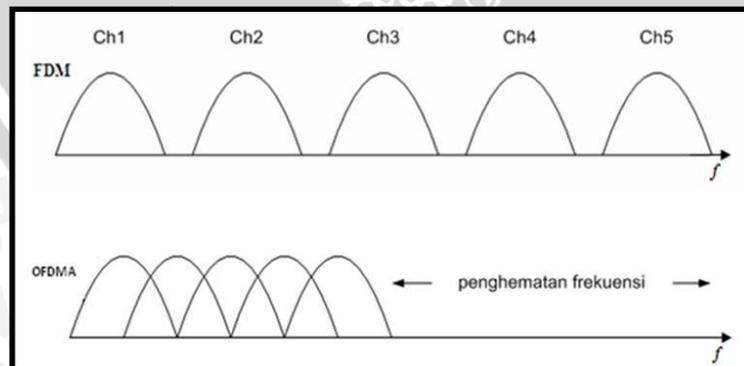
Karena *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) merupakan teknik *multiple access* yang dikembangkan dari teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), maka OFDMA memiliki semua kelebihan dan kelemahan OFDM. OFDMA juga memiliki prinsip kerja yang sama dengan OFDM yaitu 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. Terjadinya ICI misalnya pada teknik *Frequency Division Multiplexing* (FDM) ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. [Srikanth, 2007]



Gambar 2.5. *Inter Carrier Interference* (ICI).
(Sumber : <http://enr.sjsu.edu>)

OFDMA menggunakan sinyal *orthogonal*, yang dapat menghilangkan adanya *guard band*, sehingga penggunaan *bandwidth* lebih efisien. **Gambar 2.6** menunjukkan bahwa teknologi OFDMA mampu menekan penggunaan *bandwidth*.

Selain mampu menekan penggunaan *bandwidth*, aplikasi OFDMA pada *mobile WiMAX* memberikan pengaruh terhadap performansinya. Menurut Intan Lestari, 2009, nilai BER *mobile WiMAX* dengan penggunaan OFDMA masih dapat ditoleransi karena nilainya di bawah batas toleransi, yaitu 10^{-3} .



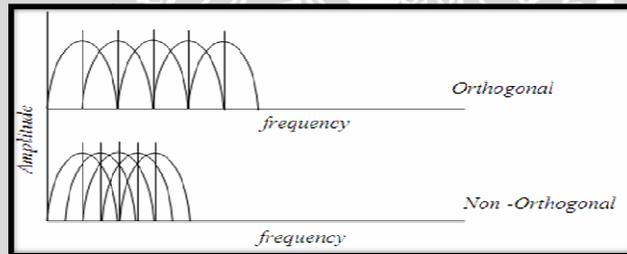
Gambar 2.6 Efisiensi Penggunaan *Bandwidth* pada OFDMA.
(Sumber : Ramjee Prasad, 2004)

2.5.1 Definisi Orthogonal

Teknologi OFDMA menggunakan sinyal *orthogonal*, *orthogonal* merupakan keadaan 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. Kehilangan orthogonalitas menyebabkan pengkaburan (*blurring*) diantara sinyal-sinyal informasi dan penurunan performansi sistem komunikasi. Istilah *orthogonal* didalam OFDMA mengandung makna hubungan matematis diantara frekuensi-frekuensi yang digunakan. Menurut E.P. Lawrey, 2001, dua buah sinyal dikatakan *orthogonal* jika:

$$\int_0^{T_s} \psi_p(t) \psi_q^*(t) dt = \begin{cases} k; & p = q \\ 0; & p \neq q \end{cases} \quad (2.7)$$

Dimana T_s adalah periode symbol OFDMA, ψ_p adalah fungsi gelombang p dan ψ_q^* adalah konjugate dari fungsi gelombang q. Hal ini didasarkan pada fungsi basis transformasi Fourier $\psi_p(t) = e^{j2\pi pt}$ yang orthogonal pada (0, T). Gambaran dari spektrum OFDMA dan orthogonalitas antar *subcarrier* dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7. Representasi Orthogonalitas Antar *Subcarrier*.
(Sumber : <http://www.ee.ccu.edu.tw>)

Setiap *subcarrier* dalam suatu sinyal OFDMA dijaga sedekat mungkin secara teoritis agar diperoleh orthogonalitas pada setiap *subcarrier*. OFDMA mencapai orthogonalitas di dalam *domain* frekuensi dengan mengalokasikan setiap sinyal informasi yang terpisah ke dalam *subcarrier* yang berbeda. Jarak antar *subcarrier* (Δf) pada spektrum sinyal dapat dinyatakan dengan persamaan [Hara & Prasad, 2003]:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2.8)$$

dengan :

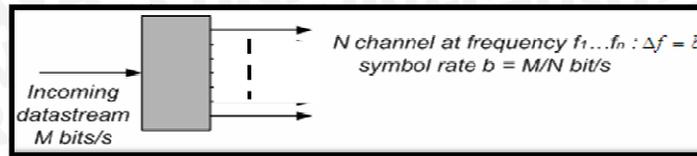
Δf = selang antar frekuensi tiap *subcarrier* (Hz)

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

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

2.5.2 Pembagian Aliran Data pada OFDMA

Prinsip dasar sistem OFDMA adalah membagi sebuah M laju data yang tinggi menjadi N laju data rendah, seperti yang terlihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8. Pembagian Aliran Data.
(Sumber : <http://www.cogitamus.it>)

Pada sistem OFDMA, laju transmisi total yang tersedia dibagi kedalam beberapa *subcarrier* agar dapat mentransmiskikan data dengan laju data rendah. Laju transmisi untuk masing-masing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [Tufvesson, 1998] :

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \quad (2.9)$$

dengan :

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

R_{tot} = laju tranmsi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

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

$$T_{sub} = \frac{\log_2 \cdot M}{R_{sub}} = \frac{N \cdot \log_2 \cdot M}{R_{tot}} \quad (2.10)$$

dengan :

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

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

R_{tot} = laju tranmsi total (bps)

N = jumlah *subcarrier*

M = jumlah kemungkinan sinyal

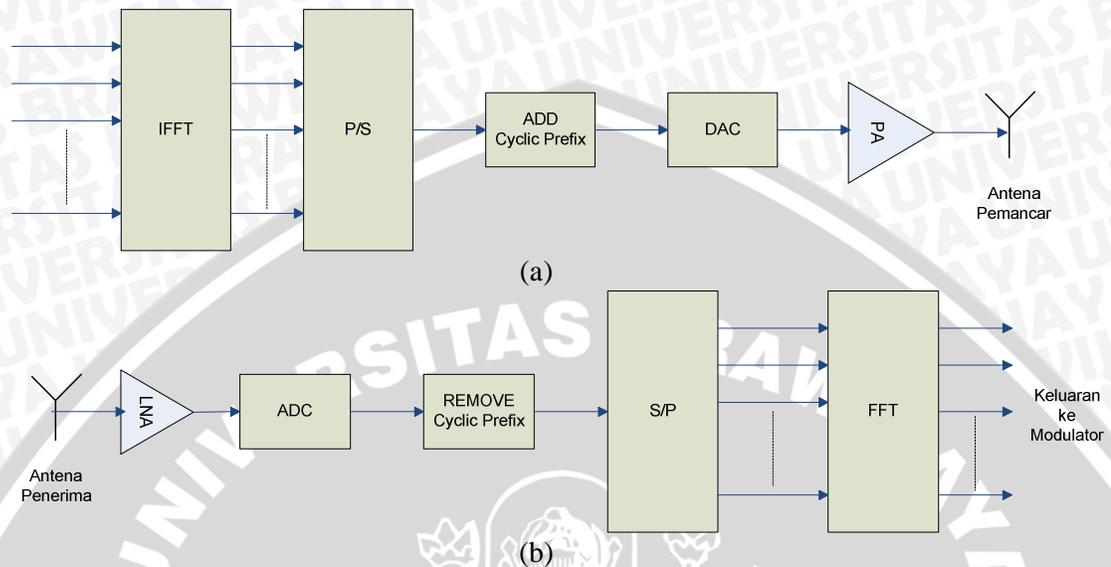
untuk modulasi QPSK nilai $M = 2^2 = 4$

untuk modulasi 16-QAM nilai $M = 2^4 = 16$

untuk modulasi 64-QAM nilai $M = 2^6 = 64$

2.5.3 Blok Diagram OFDMA

Gambar 2.9 merupakan blok diagram dasar dari suatu pemancar dan penerima OFDMA.



Gambar 2.9. Blok Diagram (a) Pemancar dan (b) Penerima Sistem OFDMA.
(Sumber : Farouq Khan, 2009)

a. Konversi Serial ke Paralel (S/P)

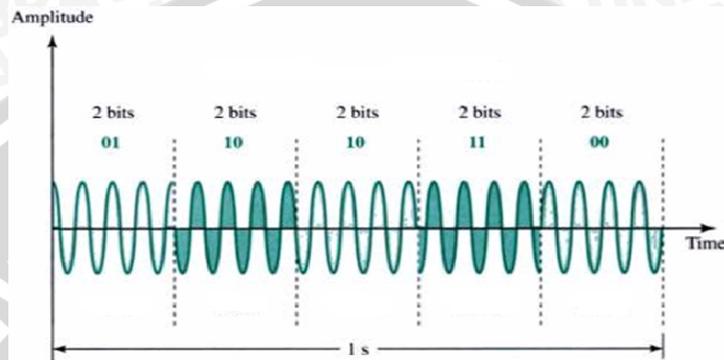
Data yang akan dipancarkan umumnya dalam bentuk aliran data serial. Pada OFDMA, proses konversi serial ke paralel dibutuhkan untuk mengubah masukan aliran bit data serial ke dalam data-data yang akan dipancarkan dalam setiap simbol OFDMA. Data yang dialokasikan untuk setiap simbol tergantung pada teknik modulasi yang digunakan dan jumlah *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.

b. Modulator dan Demodulator Baseband

Modulator bertugas mengkodekan informasi dari sebuah pesan menjadi simbol yang cocok untuk pengiriman. Karena pada sistem ini 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 *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

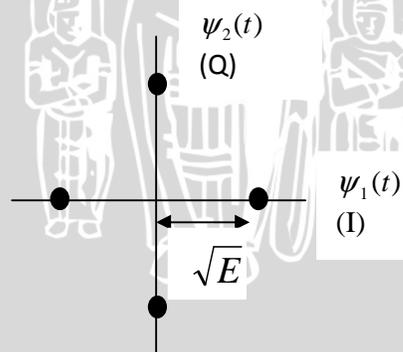
i. *Phase Shift Keying*

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. **Gambar 2.10** memperlihatkan konsep dari sinyal QPSK.

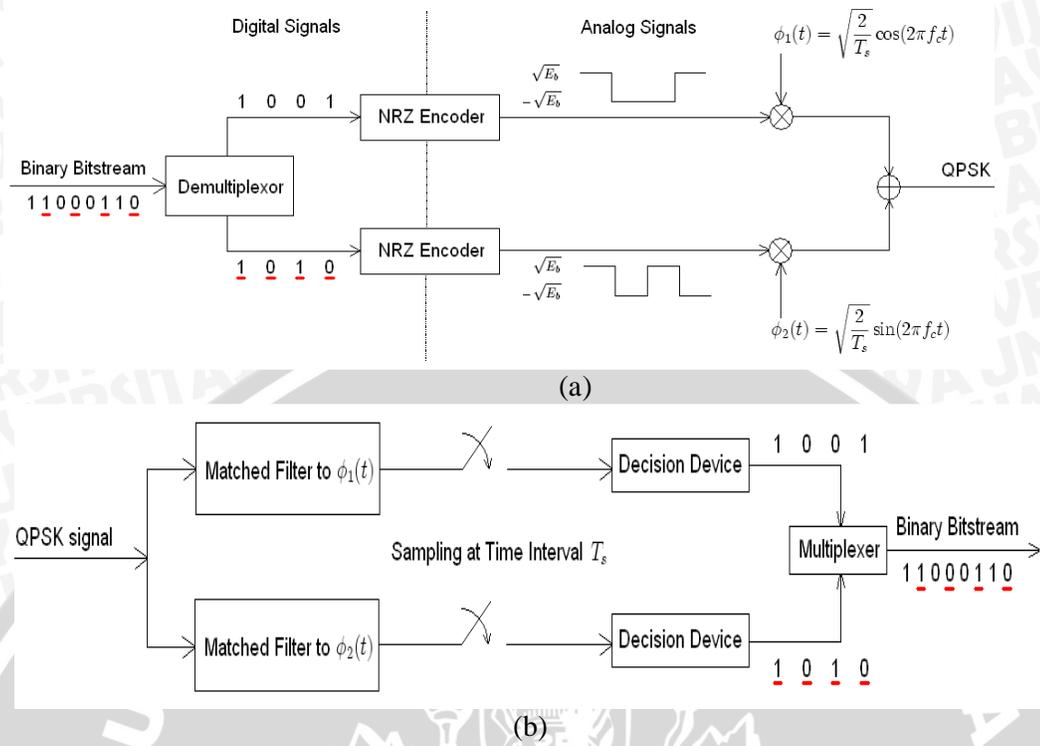


Gambar 2.10. Sinyal pada *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).
(Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

Sedangkan pada **Gambar 2.11** di bawah menjelaskan hubungan antara *phase* dengan bit pada QPSK. **Gambar 2.11** juga disebut dengan *constellation* atau *phase state diagram* yang menunjukkan hubungan yang sama dengan mengilustrasikan *phase*-nya. [Behrouz A. Forouzan, 2000]



Gambar 2.11. *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) *Constellation*.
(Sumber : Krouk, 2011)



Gambar 2.12 . QPSK (a) Modulator (b) Demodulator
(Sumber: Akter, Shanaz *et.al*, 2010)

Gambar 2.12 merupakan blok modulator dan demodulator QPSK, di mana pada sisi modulator data biner dipisahkan menjadi komponen fasa dan *quadrature*, kemudian dimodulasi secara terpisah menjadi dua fungsi dasar *orthogonal*. Pada penerapannya, digunakan dua buah sinusoida. Kemudian, kedua sinyal tersebut digabungkan dan menghasilkan sinyal QPSK. *Encoder* NRZ yang diletakkan sebelum sumber data biner, tetapi pada gambar di atas diletakkan setelah sumber data biner untuk menggambarkan perbedaan konseptual antara sinyal analog dan sinyal digital yang ada pada modulasi digital ini.

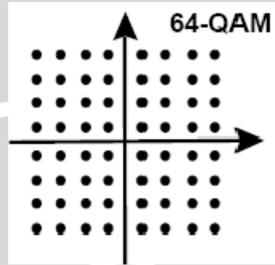
Pada demodulator, filter dapat diganti dengan korelator. Setiap detector menggunakan nilai *threshold* referensi untuk menentukan bit yang terdeteksi.

ii. Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan teknik yang mengkombinasikan antara teknik *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan teknik *Phase Shift Keying* (PSK). Berarti 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 pada QAM dikenal teknik 4-

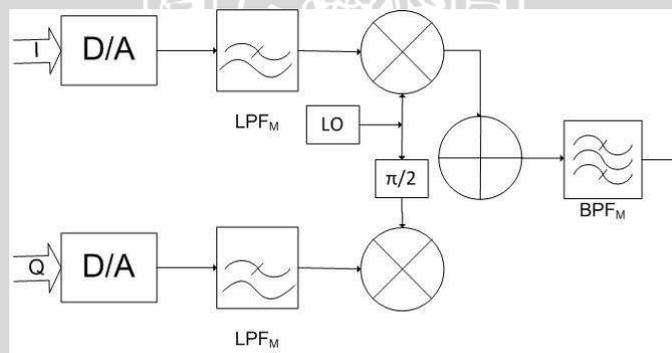
QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, dan 256-QAM tergantung banyaknya jumlah bit dalam satu simbol. Tetapi sesuai standar yang telah diterapkan oleh IEEE 802.16e *mobile* WiMAX, teknik QAM yang digunakan pada teknologi *mobile* WiMAX adalah 16-QAM dan 64-QAM. [WiMAX Forum, 2006]

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*.

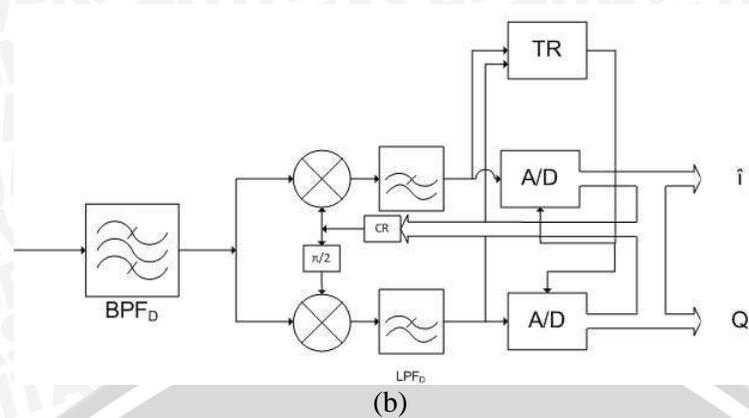


Gambar 2.13. 64-QAM Constellation.
(Sumber : Winch, 1998)

Gambar 2.13 menjelaskan hubungan antara amplitudo dan *phase* dengan bit pada 64-QAM. **Gambar 2.13** juga disebut dengan *constellation* yang menunjukkan hubungan yang sama dengan mengilustrasikan amplitudo dan *phase*-nya. [Behrouz A. Forouzan, 2000]



(a)



Gambar 2.14. QAM (a) Modulator (b) Demodulator
(Sumber: Winch, 1998)

Gambar 2.14 merupakan diagram blok modulator/demodulator QAM. Pada modulator, aliran bit yang ditransmisikan dibagi menjadi dua bagian yang sama. Proses ini menghasilkan dua independen sinyal untuk ditransmisikan. Kedua sinyal tersebut dikoderkan secara terpisah seperti pada modulator ASK. Kemudian kanal *in phase* dikalikan dengan fungsi kosinus, sedangkan kanal *quadrature* dikalikan dengan fungsi sinus. Cara ini akan menghasilkan perbedaan fasa 90° antara kedua sinyal. Keduanya kemudian ditambahkan dan dikirimkan melalui kanal transmisi.

c. Transformasi *Fast Fourier* pada Sistem OFDMA

Simbol OFDMA disusun dalam sebuah frame yang diubah dalam bentuk *domain* waktu dengan menggunakan IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). IFFT dapat berfungsi sebagai *baseband modulator*, dimana setiap simbol akan memodulasi frekuensi *subcarrier* yang dibangkitkan oleh blok IFFT. Penggunaan IFFT akan menjamin *orthogonalitas* antar *subcarrier*. Orthogonalitas antar tiap *subcarrier* dalam satu kanal transmisi terjadi pada waktu yang berbeda. Keluaran dari setiap proses transformasi IFFT akan membentuk sebuah deretan simbol OFDMA. Blok FFT berfungsi sebagai *baseband demodulator* dengan cara mengubah sinyal wilayah waktu ke wilayah frekuensi. Titik FFT diset sama seperti titik IFFT. Kemudian simbol-simbol disusun kembali sesuai dengan teknik pengalokasian *user* yang digunakan di pemancar.

d. Konverter *Digital to Analog* (D/A) dan *Analog to Digital* (A/D)

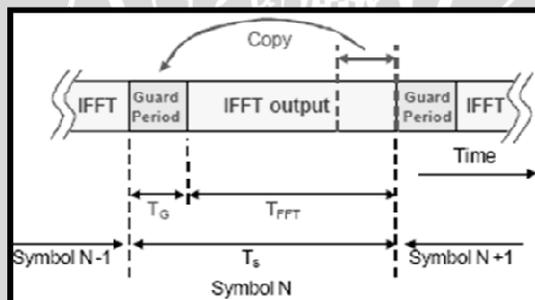
Konverter *digital-to-analogue* (D/A) pada sisi pemancar berfungsi untuk mengkonversikan sinyal digital OFDMA ke dalam format analog. Pada sisi penerima,

konverter *analog to digital* mengkonversikan sinyal analog OFDMA ke dalam format digital.

e. *Add/Remove Cyclic Prefix*

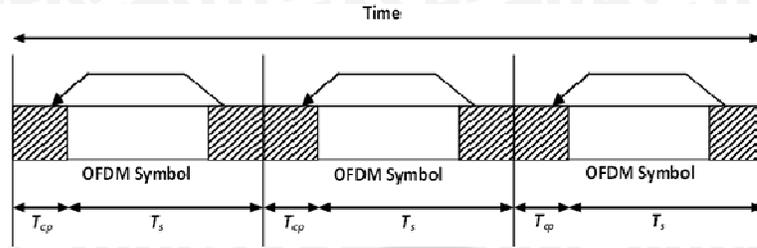
Salah satu masalah yang terpenting dalam komunikasi *wireless* adalah *delay spread*. *Delay spread* dapat menimbulkan *Intersymbol Interference* (ISI). Selain itu, ISI dapat pula terjadi dengan meningkatnya *bandwidth carrier* dan laju simbol *subcarrier*. Untuk mencegah terjadinya ISI maka pada tiap simbol OFDMA disisipkan *guard interval* secara periodik. Bila panjang *guard interval* melebihi *multipath delay*, maka ISI dapat dihilangkan. (Amitabh Kumar, 2008)

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 2.15**. ISI dan ICI dapat dicegah jika panjang *cyclic prefix* melebihi panjang *delay spread* maksimum. [Amitabh Kumar, 2008]



Gambar 2.15. 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 $T_s = T_{sub} + T_{cp}$. Representasi waktu dari total satu simbol OFDMA dapat digambarkan pada **Gambar 2.16** berikut.



Gambar 2.16. Representasi Waktu dari OFDMA.
(Sumber : Zhang Di, 2004)

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

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{sub} - T_{cp}} \quad (2.11)$$

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

$$\begin{aligned} B_{sistem} &= \frac{2}{T_{sub}} + \frac{N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp}) \cdot T_{sub}} \\ B_{sistem} &= \frac{2(1-\alpha_{cp}) + N-1}{(1-\alpha_{cp})} \cdot \frac{N \cdot \log_2 M}{R_{tot}} \\ B_{sistem} &= \frac{R_{tot} [2(1-\alpha_{cp}) + N-1]}{(1-\alpha_{cp}) \cdot N \cdot \log_2 M} \end{aligned} \quad (2.12)$$

dengan :

- B_{sistem} = *bandwidth* sistem (Hz)
- T_s = durasi simbol OFDMA (s)
- T_{sub} = durasi simbol masing-masing *subcarrier* (s)
- T_{cp} = durasi *cyclic prefix* (s)
- R_{tot} = laju bit total yang tersedia (bps)
- M = jumlah kemungkinan sinyal
- N = jumlah *subcarrier*
- α_{cp} = faktor *cyclic prefix*

2.5.4 Keunggulan dan Kelemahan OFDMA

OFDMA memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem yang lain, diantaranya [Srikanth, 2007] :

a. Pemakaian rentang frekuensi yang lebih kecil

OFDMA merupakan jenis modulasi *multicarrier* yang memiliki efisiensi frekuensi yang lebih besar dibandingkan dengan modulasi *multicarrier* yang lainnya (seperti FDM). Hal ini disebabkan sifat orthogonalitas yang memungkinkan adanya *overlap* antar frekuensi. Berbeda dengan *multicarrier* konvensional seperti halnya FDM, untuk menghindari terjadinya interferensi antar sinyal *carrier* maka perlu disisipkannya frekuensi penghalang (*guard band*), dengan adanya *guard band* inilah pemakaian frekuensi tidak efisien. Selain itu *guard band* menyebabkan penurunan kecepatan transmisi dibandingkan dengan sistem *single carrier* dengan lebar spektrum yang sama.

b. Kuat terhadap *frequency selective fading*

Frequency selective fading merupakan sebuah keadaan yang mana terjadi pelemahan daya secara tidak seragam pada frekuensi tertentu yang diakibatkan *bandwidth* dari kanal lebih sempit daripada *bandwidth* transmisi. Pada sistem OFDMA hal ini dapat dihindari dengan cara menggunakan *subcarrier* yang relatif banyak.

c. Tidak sensitif terhadap *delay spread*

Dengan dibaginya kecepatan transmisi ke dalam banyak *subcarrier*, maka kecepatan pada *subcarrier* akan menjadi kecil, sehingga periode simbol menjadi lebih panjang yang akhirnya mampu mengurangi terjadinya *delay spread*.

Sedangkan kelemahan OFDMA antara lain:

a. *Carrier frequency offset* (CFO)

Sistem OFDMA memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap CFO yang disebabkan oleh *jitter* pada gelombang pembawa dan juga terhadap efek Doppler yang disebabkan oleh pergerakan stasiun pengirim atau penerima.

b. *Distorsi nonlinear*

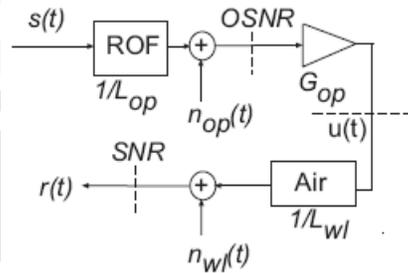
Teknologi OFDMA menggunakan sistem multi-frekuensi dan multi-amplitudo, sehingga sistem ini mudah terkontaminasi oleh *distorsi nonlinear* yang terjadi pada penguat dari daya transmisi.

c. Sinkronisasi sinyal

Menentukan *start point* untuk memulai operasi *Fast Fourier Transform* (FFT) ketika sinyal OFDMA tiba di stasiun penerima relatif sulit.

2.5.5 Performansi Sistem OFDMA pada Teknologi Radio over Fiber (RoF)

Pada aplikasi sistem OFDMA pada teknologi *Radio over Fiber* (RoF) terdapat beberapa proses dan rugi-rugi yang mempengaruhinya. Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 2.17**:



Gambar 2.17. Blok Diagram *Losses*, Penguatan, serta *Noise* pada RoF (Sumber: Xavier Fernando, 2004)

Gambar 2.17 menggambarkan proses jalannya sinyal RoF yang mengalami *losses*, penguatan, maupun *noise*. $s(t)$ adalah sinyal RF yang dikirimkan dari BTS. Ketika sinyal dilewatkan ke saluran optik (blok RoF), sinyal ini mengalami *losses* sebesar L_{op} dan *noise* transmisi n_{op} . Level daya sinyal keluaran optik dengan *noise* dihitung sebagai OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*). Sebelum dipancarkan kembali melalui antenna di *remote antenna unit*, sinyal keluaran optik dikuatkan oleh G_{op} supaya level dayanya sama dengan level daya yang dibutuhkan antenna. $u(t)$ adalah sinyal yang dipancarkan antenna ke *mobile station*. Sinyal ini mengalami *losses* propagasi, yaitu L_{wl} dan mengalami *noise* transmisi, n_{wl} yang berupa AWGN. $r(t)$ adalah sinyal yang diterima oleh *user*. Perbandingan sinyal yang diterima di sisi penerima dengan *noise* dan rugi-rugi total di seluruh sistem adalah SNR.

a. Redaman Propagasi Ruang Bebas

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

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + s + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (2.13)$$

dengan :

- PL = rugi-rugi propagasi (dB)
 - A = *pathloss* referensi (dB)
 - γ = eksponen *pathloss*
 - d = jarak pemancar ke penerima (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 antenna penerima
- dengan *pathloss* referensi (A) dirumuskan sebagai berikut :

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot f \cdot d}{c} \right) \tag{2.14}$$

dengan :

- A = *pathloss* referensi (dB)
- f = frekuensi operasi (Hz)
- d = jarak pemancar ke penerima (m)
- c = kecepatan gelombang radio di udara (m/s)

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

$$\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \tag{2.15}$$

dengan :

- γ = eksponen *pathloss*
- a, b, c = konstanta yang tergantung pada tipe *terrain*
- h_b = tinggi antenna *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 2.1**.

Tabel 2.1. Parameter untuk Tipe *Terrain* yang Berbeda

Parameter	Tipe A	Tipe B	Tipe C
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)

Keterangan:

Terrain Type A :

- daerah banyak gedung bertingkat/pepohonan maupun berbukit,
- banyak penghalang sinyal,

Terrain Type B

- daerah dengan gedung bertingkat/pepohonan cukup banyak, umumnya kota berkembang,
- sedikit penghalang sinyal,

Terrain Type C :

- daerah dengan gedung bertingkat/pepohonan sedikit,
- jarang atau tidak ada penghalang sinyal.

Faktor koreksi frekuensi pada *mobile* WiMAX dinyatakan dalam:

$$\Delta PL_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (2.16)$$

dengan :

f = frekuensi operasi sistem (Hz)

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

$$\Delta PL_h = -10,8 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } \textit{terrain} \text{ A dan B} \quad (2.17)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log_{10} \left(\frac{h}{2} \right), \text{ untuk tipe } \textit{terrain} \text{ C} \quad (2.18)$$

dengan :

h = tinggi antenna penerima (m)

b. *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Dalam teknologi *radio over fiber* (RoF), terdapat dua macam propagasi, *wireless* dan *wireline*. SNR total sistem merupakan hasil dari dua propagasi tersebut. Fernando, X.N, 2009 menyatakan bahwa SNR *radio over fiber* adalah:

$$SNR = \frac{m^2 I_D^2 P_{RF,in} 10^{(-L_{op}/10)}}{[n_{op}^2(t)] + \left(10^{(n_{el}^2(t))/10} \times \left(\frac{10^{(L_{el})/10}}{10^{(G_{op})/10}} \right)^2 \right)} \quad (2.19)$$

dengan:

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

m = indeks modulasi optik

I_D = arus DC rata-rata yang terdeteksi (A)

$E [s^2(t)] = P_{RF,in}$ = daya masukan RF (daya pancar) (dBm)

L_{op} = rugi-rugi total dalam saluran serat optik (dB)

$[n_{op}^2(t)]$ = total *noise* saluran optik (dB)

L_{el} = rugi-rugi propagasi (dB)

G_{op} = gain *amplifier* optik (dB)

$[n_{el}^2(t)]$ = *noise* saluran *wireless* (dB)

c. Kapasitas Kanal Sistem

Dalam teorema Shannon, besarnya kapasitas kanal diperoleh dari persamaan berikut [Wilson, 1996] :

$$C = B_{sistem} \cdot \log_2(1 + SNR_{sistem}) \quad (2.20)$$

dengan :

C = kapasitas kanal sistem (bps)

B_{sistem} = *bandwidth* sistem (Hz)

SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem

Bandwidth sistem dalam saluran optik ditentukan oleh dispersi yang terjadi di dalam serat optik. Dalam Abd.Naser,2011 dinyatakan bahwa *bandwidth radio over fiber* adalah:

$$B_{sistem} = \frac{0.44}{\Delta\tau_{sistem} \cdot L} \quad (2.21)$$

$$\Delta\tau_{sistem} = \sqrt{(\Delta\tau_{sumber})^2 + (\Delta\tau_{receiver})^2 + (\Delta\tau_{mat})^2} \quad (2.22)$$

dengan:

L = panjang serat optik yang digunakan (km)

$\Delta\tau_{sistem}$ = dispersi sistem (ps)

$\Delta\tau_{sumber}$ = *rise time* sumber (ps)

$\Delta\tau_{receiver}$ = *rise time* penerima (ps)

$\Delta\tau_{mat}$ = dispersi material (ps)

d. Bit Rate

Bit rate yang dibahas dalam skripsi ini merupakan *bit rate* sistem di dalam saluran optik saja, hal ini dirumuskan oleh Xavier Fernando, 2004 dalam:

$$B_{R(NRZ)} = \frac{0.7}{\Delta\tau_{sistem}} \quad (2.23)$$

dengan:

$B_{R(NRZ)}$ = *bit rate* sistem dengan teknik pengkodean NRZ (bps)

$\Delta\tau_{sistem}$ = dispersi sistem (ps)

e. **Bit Error Rate (BER)**

BER (*bit error rate*) bit merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit *error* terhadap total bit yang diterima. Nilai BER dipengaruhi oleh *signal to noise ratio* sistem. BER sistem dinyatakan dalam [Hara, 2003] :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR_{sistem}}) \quad (2.24)$$

dengan :

BER = *bit error rate* sistem

SNR_{sistem} = *signal to noise ratio* sistem (dB)

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

