BAB II TINJAUAN TEORI

2.1 Free Space Optic (FSO)

Free space optic (FSO) atau *optical wireless* (OW) adalah sebuah teknologi telekomunikasi yang menggunakan propagasi cahaya dalam *free space* untuk mentransmisikan data antara dua titik. Teknologi ini merupakan jaringan nirkabel *line off sight* (LOS) yang menggunakan *beam* cahaya yaitu mengacu pada laser pada jaringan optik. Hal ini berdasar pada konektivitas antar unit nirkabel optik yang masing-masing terdiri dari sebuah *transceiver* optik dengan sebuah *transmitter* dan *receiver* untuk mendapatkan kemampuan komunikasi *full-duplex*. Masing-masing unit *optical wireless* menggunakan sumber optik dengan lensa atau teleskop untuk mentransmisikan informasi cahaya melewati atmosfer menuju lensa pada sisi penerima. FSO dapat bekerja pada jarak ratusan meter sampai beberapa kilo meter (Monika Mehra, 2007).

Pada **Gambar 2.1** ditunjukkan kofigurasi dasar jalur sistem komunikasi optik nirkabel untuk mengirimkan data informasi. Jalur tersebut terdiri dari sebuah alat konversi elektrik/optik (E/O) dan sebuah alat konversi optik/elektrik (O/E). Konversi E/O terdiri dari laser dioda dan modulator eksternal, sementara koversi O/E dilakukan oleh *photodiode* seperti PIN dioda dan APD. Kecepatan transmisi data bergantung pada kecepatan modulasi di sisi perangkat E/O (Abd E-Naser dkk, 2009). Data di konversi menjadi sinyal optik oleh E/O yang kemudian ditransmisikan melalui lensa melalui udara dan diterima oleh lensa di penerima untuk selanjutnya dikonversi lagi menjadi sinyal elektrik oleh O/E sehingga didapatkan data informasi.



Gambar 2.1. Gambar Skema Konfigurasi *Link* FSO (Digambar ulang setelah sumber: Abd E-Naser dkk, 2009)

Sistem komunikasi FSO adalah teknologi yang mengalamatkan konektivitas yang diinginkan kedalam jaringan optik. Dalam Metropolitan Area Network (MAN), FSO dapat digunakan untuk memperluas jaringan yang sudah ada. FSO dapat digunakan

repository.ub.ac.ic

untuk menghubungkan LAN ke LAN dan hubungan antar kampus . Selain itu, FSO adalah kandidat utama untuk konektivitas *last-mile*. Akan tetapi sebuah propagasi gelombang optik melalui udara mengalami fluktuasi amplitudo dan fasa karena turbulensi atmosfer. Intensitas fluktuasi yang juga dikenal dengan *scintillation* (sintilasi), adalah satu dari beberapa faktor yang mengurangi performansi jalur komunikasi FSO yang biasanya tetap ada dalam kondisi cuaca cerah (William Shieh, 2010).

Tantangan utama dari komunikasi FSO meningkat sesuai dengan kondisi media propagasi. Walaupun secara relatif tidak dipengaruhi oleh hujan dan salju, akan tetapi sistem FSO sangat dipengaruhi oleh kabut dan turbulensi atmosfer. Kabut dapat mengubah karakteristik cahaya dan dapat menghalangi lintasan cahaya dengan sebuah kombinasi penyerapan, penyebaran dan pemantulan sehingga dapat mengakibatkan penurunan kerapatan daya *beam* transmisi, sehingga mengurangi jarak FSO. Turbulensi atmosfer dapat menyebabkan sintilasi yang dapat mengakibatkan peningkatan *bit error rate*. Gambaran utama tantangan sistem komunikasi FSO ditunjukkan dalam **Gambar 2.2** (Monika Mehra, 2007).



Gambar 2.2. Tantangan Sistem Komunikasi FSO (Digambar ulang setelah sumber: Monika Mehra, 2007)

Sistem FSO menggunakan panjang gelombang cahaya infra merah (IR) dan mempunyai kemampuan *bandwidth* transmisi yang hampir sama dengan transmisi serat optik. Pada umumnya FSO menggunakan format modulasi ON-OFF Keying (OOK)

BRAWIJAYA

yang merupakan standar modulasi yang sama dengan yang digunakan pada sistem serat optik digital (Scott Bloom dkk, 2003). Akan tetapi pada kanal dengan turbulensi atmosfer yang menginduksi *fading* modulasi ini membutuhkan *adaptive threshold* yang sulit diperoleh untuk bekerja optimal (Bobby Barua). Selain itu, sistem dengan multiple subcarrier mempunyai performansi yang lebih baik daripada OOK dengan kebutuhan daya yang lebih rendah untuk menghadapi turbulensi (MD. Zoheb Hassan, 2011).

Keunggulan sistem komunikasi FSO bila dibandingkan dengan sistem komunikasi nirkabel lainnya yaitu memiliki *bandwidth* yang lebih lebar, biaya instalasi yang lebih murah bila dibandingkan dengan serat optik, lebih mudah dan cepat dalam proses penyebaran, tidak membutuhkan lisensi, dan praktis karena *transceiver* FSO dapat diletakkan didekat jendela maupun pada atap gedung (Octiana Widyarena dkk, 2012).

2.2 Arsitektur Free Space Optic

Dalam sistem transmisi dasar *point-to-point*, *transceiver* FSO diletakkan pada kedua sisi transmisi. Kebutuhan utama dari sistem FSO adalah kondisi *line-of-sight* antara dua lokasi jaringan. Sistem FSO menggunakan cahaya untuk komunikasi yang tidak dapat melewati halangan padat seperti dinding atau pohon. Skema sederhana dari sistem transmisi *free-space optic* ditunjukkan dalam **Gambar 2.3** (Heinz Wilebrand& Baksheesh S Ghuman, 2002).



Gambar 2.3. Diagram Blok Sebuah Intensitas Optik, Kanal Komunikasi Deteksi Langsung (Sumber: Steve Hrlanilovic, 2005)

Intensitas optik dari sebuah sumber didefinisikan sebagai daya optik yang dipancarkan per sudut putar. Jalur optik nirkabel mentransmisikan informasi dengan memodulasi intensitas optik I(t) dari sebuah aliran sinyal elektrik masukan x(t). Informasi yang dikirimkan dalam kanal ini tidak termuat dalam amplitudo, frekuensi maupun fasa bentuk gelombang optik, akan tetapi dalam intensitas sinyal transmisi. Konversi elektik-optik dalam bentuk *optical intensity modulation* dan biasanya

dilakukan oleh *light-emitting diode* (LED) atau *laser diode* (LD). Konversi optikelektrik secara tipikal dilakukan oleh sebuah *silicon photodiode*.

Detektor photodiode dikenal dengan menghasilkan *direct-detection* dari intensitas sinyal optik yang terjadi karena dapat menghasilkan sebuah *output* aliran foto elektrik, y(t) yang sesuai dengan pancaran yang diterima oleh *photodiode* dalam satuan Watt per satuan luas. Secara elektrik, detektor merupakan sebuah dioda bias pembalik, sehingga dapat menghasilkan sebuah aliran *output* elektrik yang merupakan perhitungan dari daya optik yang diterima perangkat (Steve Hrlanilovic, 2005)

2.2.1 Pemancar Free Space Optic

Ada dua jenis pemancar optik yang sering digunakan dalam sistem optik nirkabel yaitu *Light Emitting Diode (LED)* dan *Semiconductor Laser Diode (LD)*. LED merupakan pemancar *large area* yang memiliki standar *eye safety* yang lebih ringan dan relatif aman walaupun menggunakan daya pancar yang tinggi karena memiliki berkas pancar yang relatif luas. Kebanyakan LED modern sekarang menggunakan paduan GaAs dan AlGaAs. (Sigit & Martinus, 2006).

Laser Diode adalah teknologi yang berbasis pada teknik pembuatan LED dan memiliki prinsip yang sama dengan LED yaitu transisi *carrier* pada *band gap* untuk menghasilkan radiasi *photon*. LD menghasilkan pancaran *photon* yang dinamakan *stimulated emission* sehingga waktu tetap rekombinasi kira-kira lebih pendek satu sampai dua jarak orde daripada pancaran spontan yang terjadi pada LED. Hal ini memungkinkan LD beroperasi pada kecepatan pulsa dalam *range* GHz (10⁹), sementara LED hanya terbatas pada rentang operasi MHz (10⁶) saja. Perbandingan penggunaan LED dan LD pada sistem FSO diperlihatkan dalam **Tabel 2.1** (Steve Hrlanilovic, 2005).

Karakteristik	LED	LD
Lebar Spektrum Optik	25 – 100 nm	0,1 – 5 nm
Bandwidth Modulasi	Puluhan KHz hingga	Puluhan KHz hingga
AWIGHAYA	ratusan MHz	puluhan MHz
Kebutuhan rangkaian	N/A	Rangkaian kompensasi
khusus		treshold dan temperatur
Eye Safety	Dapat <i>Flexibel</i>	Harus memenuhi eye
		safety
Reliabilitas	Tinggi	Sedang
Biaya	Rendah	Sedang hinga tinggi

Tabel 2.1. Perbandingan Penggunaan LED dan LD pada Sistem FSO

Sumber: IEC 825-1 Publication, 1993

Sistem *point-to-point outdoor* FSO umumnya menggunakan laser dengan daya tinggi dalam kelas 3B untuk menghasilkan *power budget* yang bagus. Oleh karena itu regulasi yang keras seperti ANSI Z-136 dan IEC 825 digunakan untuk memenuhi standar *eye safety* (Salahudin Qazi, 2007). Standar ketentuan klasifikasi penggunaan laser ditunjukkan dalam **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2. KlasifikasiPengg	unaan Laser S	ebagai Sumber (Optik	untuk FSO
-----------------------------	---------------	-----------------	-------	-----------

IZ 1	650 nm	880 nm	1310 nm	1550 nm
Kelas	Cahaya tampak	Infra merah	Infra merah	Infra merah
Kelas 1	< 0,2 mW	< 0,5 mW	< 8,8 mW	<10 mW
Kelas 2	0,2 – 1 mW	n/a	n/a	n/a
Kelas 3A	1-5 mW	0,5 – 2,5 mW	8,8 – 4,5 mW	10 – 50 mW
Kelas 3B	5 – 500 mW	2,5 – 500 mW	4,5 - 500	50 – 500 mW
Sumber-IEC 825-1 Publication 1993				

Tabel 2.3menunjukkan daftar kelas utama dalam radiasi optik yang dapat terjadi.Untuk jarakjalur *free space* yang jauh biasanya digunakan kelas 3B untukmenghasilkan *data rate* yang tinggi (Steve Hrlanilovic, 2005).

Tabel 2.5. Klaslikasi Keamanaan Sumber Optik oleh iel	Tabel	2.3.	Klasifikasi	Keamanaan	Sumber	Optik	oleh	IEC
---	-------	------	-------------	-----------	--------	-------	------	-----

Kelas	Interpretasi
Kelas 1	Aman untuk dilihat langsung.
Kelas 2	Diperlukan pelindung mata untuk mengatasi kedipan mata.
Kelas 3A	Aman untuk dilihat tanpa pelindung mata. Melihat langsung dapat membahayakan.
Kelas 3B	Melihat langsung sangat membahayakan.
	Sumber:IEC 825-1 publication, 1993

Pada umumnya perangkat sistem optik nirkabel luar ruangan menggunakan panjang gelombang 1550 nm dengan daya yang lebih besar daripada dalam rentang panjang gelombang 780-920 nm. Berkas cahaya pancar antar teleskop dalam sistem ini dapat menembus melewati jendela pada umumnya, yang mana memungkinkan penyedia layanan untuk mengurangi kebutuhan pengadaan pengoperasian diatap gedung (Salahudin Qazi, 2006).

2.2.2 Penerima Free Space Optic

Penerima optik adalah perangkat yang bertugas untuk mengubah sinyal optik menjadi informasi. Penerima untuk sistem optik nirkabel menggunakan *intensity modulation* dengan *direct detection* (IM/DD). Penerima ini langsung mengubah pulsa optik mejadi pulsa elektrik secara langsung. (Scott Bloom, 2002)

Detektor penerima terhubung ke *aperture* penerima melewari *free-space* atau serat. Bergantung pada *data rate* dan jajaran desain optik yang digunakan, maka toleransi sangat dibatasi. Detektor yang biasa digunakan adalah PIN dioda atau *avalanche photodiode* (APD). Untuk aplikasi FSO, APD sangat menguntungkan karena rugi-rugi atmosfer dapat melemahkan sinyal sampai level yang lebih rendah yaitu *noise* elektronik menguasai *signal-to-noise ratio* (SNR). Biasanya penguat *trans-impedance* digunakan setelah *detector* karena dapat menyediakan *gain* yang tertinggi dengan kecepatan yang tinggi (Scott Bloom, 2006). **Tabel 2.4** memperlihatkan perbandingan *PIN Photodiode dan avalanche photodiode (APD)* (Steve Hrlanilovic, 2005).

Karakteristik	p-i-n photodiode	APD
Bandwidth Modulasi	Puluhan MHz hingga	Ratusan MHz hingga
AYAJAUN	puluhan GHz	puluhan GHZ
Kebutuhan rangkain		Sumber tegangan bias
tambahan		yang tinggi, rangkaian
S BRARAU		pengkompensasi suhu
Linearitas	Tinggi	Rendah
Biaya	Rendah	Sedang hingga tinggi

Tabel 2.4. Perbandingan p-i-n Photodiode dan APD untuk FSO

(Sumber: Steve Hrlanilovic, 2005)

Sensitivitas penerima FSO merupakan jumlah minimal dari energi (*power*) optik yang masih dapat terdeteksi oleh penerima untuk *level* performansi (*error-rate*) tertentu. Nilainya ditentukan oleh *vendor FSO* menurut spesifikasi peralatan (Yuli Kurnia Ningsih dkk, 2006).

2.2.3 Propagasi Line of Sight

Sistem operasi FSO membutuhkan *line of sight* (LOS) yaitu pemancar dan penerima dapat melihat satu sama lain ditempatnya tanpa ada halangan. Teknik *transceiver* atap gedung ke atap gedung dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan LOS. Akan tetapi juga memungkinkan untuk meletakkan *transceiver* dibelakang jendela jika akses atap tidak tersedia (Steve Hrlanilovic, 2005).



Gambar 2.4. Kondisi *Line of Sight* (LOS) (Digambar ulang setelah sumber : Monika Mehra, 2007)

Link Free-Space Optic (FSO) melibatkan transmisi, penyerapan dan hamburan cahaya oleh atmosfer bumi. Setiap saat cahaya selalu beinteraksi dengan atmosfer bumi dalam kondisi normal yang terdiri dari berbagai molekul berbeda dan partikel kecil yang disebut *aerosol*. Interaksi ini menghasilkan berbagai fenomena optik:

1) Selektif redaman radiasi yang menyebar di atmosfer,

- 2) Serapan pada panjang gelombang optik tertentu karena molekul,
- Sintilasi yang disebabkan oleh turbulensi suhu dalam media propagasi yang mengakibatkan sel terdistribusi secara acak. Sintilasi menyebabkan gelombang terdistorsi yang menghasilkan pemfokusan beam berkurang (ITU-R. 1817).

2.3 Spesifikasi Redaman dalam FSO

Kekurangan sistem FSO adalah tidak kebal terhadap efek atmosfer seperti redaman dan *scintilation* yang dapat mengurangi kemampuan jalur. Parameter utama dalam desain FSO adalah pertimbangan mengenai *power budget*. Beberapa spesifikasi redaman yang terjadi pada FSO adalah berikut ini.

2.3.1 Konsep Redaman Optik

Redaman optik terjadi pada peralatan optik pemancar maupun penerima mengakibatkan pelemahan sinyal. Teknik yang digunakan untuk memperkecil *optical losses* diantaranya adalah memperkecil permukaan optik dan menggunakan pelapis anti pantul. Untuk mengurangi *shot noise, Band Pass filter* dengan *bandwidth* sempit sering digunakan (Sigit &Martinius, 2006).

2.3.2 Konsep Redaman Geometrik

Redaman geometrik disebabkan oleh penyimpangan *beam* optik transmisi antara pemancar dan penerima. Efek dari penyimpangan beam optik ini cahaya tidak dapat diterima oleh penerima. Hal ini dapat dikarenakan penyebaran *beam* lebih lebar dari *aperture* penerima sehingga menyebabkan pengurangan energi.

Redaman geometrik sama dengan perbandingan luas penerima yang menangkap cahaya relatif terhadap luas penyimpangan *beam* pada penerima. Untuk *beam* tunggal, luas pancaran pada penerima dapat dihitug menggunakan rumus geometri sederhana dengan mengasumsikan penyimpangan terjadi dalam kecepatan konstan selaras dengan pancaran yang meninggalkan pemancar. Untuk sistem yang diasumsikan beropersai pada kondisi mengabaikan propagasi Rayleigh maka perbandingan luas area proyeksi dengan area terima adalah (Heinz & Baksheesh, 2002):

$$\frac{A_R}{A_B} = \left[\frac{d_2}{d_1 + 100L\theta}\right]^2$$
(2.1)

$$L_{geo}(dB) = 10 \log \frac{A_R}{A_B} = 10 \log \left[\frac{d_2}{d_1 + 100L\theta}\right]^2$$
(2.2)

Keterangan:

 L_{aeo} = Redaman geometric (dB)

 A_R = Area penerima

 A_B = Area pancaran atau beam

 d_2 = Diameter optik penerima (cm)

 d_1 = Diameter optik pemancar (cm)

L = Jarak antara pengirim dan penerima (km)

 θ = Sudut divergensi (mrad)

2.3.3 Redaman Pointing

Pada instalasi dengan jarak yang jauh sangat sulit untuk melihat kearah pengirim atau penerima. Ditambah lagi sistem *tracking* yang mengandung *residual steady-state error*. Apabila terjadi kondisi seperti di atas maka akan timbul tambahan redaman karena pemancar tidak terarahkan secara akurat ke penerima. Biasanya efek tersebut timbul untuk jarak yang lebih dari 3 Km (Steve Hrlanilovic, 2005).

2.3.4 Redaman karena Sintilasi

Atmosfer yang terinduksi turbulensi karena sintilasi akan menyebabkan fluktuasi pada sinyal terima. Turbulensi atmosfer ini menghasilkan redaman sementara pada udara dengan perbedaan temperatur, perbedaan densiti dan perbedaan indeks bias. Data dapat hilang karena penyimpangan *beam* dan sintilasi selama *beam* laser berpropagasi melewati indeks bias yang tidak homogen. Secara umum, jika turbulensi sel lebih kecil daripada diameter *beam* laser, maka akan terjadi pembengkokan sinar dan difraksi yang menyebabkan distorsi pada gelombang laser. Fluktuasi sementara pada intensitas laser *beam* ini disebut dengan sintilasi. Nilai variansi sintilasi ini dapat ditunjukkan sebagai berikut (ITU-R P.1814, 2007).

$$\sigma_x^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \tag{2.3}$$

Dan nilai redaman akibat sintilasi adalah sebesar

$$L_{sint} = 2 \times \sigma_x \tag{2.4}$$

dengan:

 σ_x^2 = variansi sintilasi (dB²)

 C_n^2 = konstanta parameter struktur indeks bias (m^{-2/3}) $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ = bilangan gelombang (rad/m)

L = jarak pemancar dan penerima (m)

Pada umumnya pada gelombang optik, nilai C_n^2 berkisar antara 10⁻¹⁶ m^{-2'3} dan 10⁻¹³ m^{-2/3} yaitu tergantung dari rendah sampai tingginya turbulensi atmofer yang terjadi. Nilai maksimum C_n^2 pada turbulensi yang kuat adalah 2 x 10⁻¹³ m^{-2/3} (MD. Zoheb Hasan, 2011). Pada kondisi turbulensi kuat probabilitas intensitas sinyal terima fluktuasi indeks bias dimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas (PDF) *Gamma-Gamma* sebagai berikut (Abdelmoula Bekkali dkk, 2009):

$$X = f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta I}\right)$$
(2.5)

Dimana x > 0 dan dengan nilai $d = \sqrt{\frac{kd_2^2}{4L}}$ maka

$$\alpha = \left[exp\left(\frac{0.49\sigma_x^2}{\left(1 + 0.18d^2 + 0.56\sigma_x^{12/5} \right)^{\frac{7}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1}$$
(2.6)

$$\beta = \left[exp\left(\frac{0.51\sigma_x^2 \left(1+0.69\sigma_x^{12/5} \right)^{-5/6}}{\left(1+0.9d^2+0.62d^2\sigma_x^{12/5} \right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1}$$
(2.7)

Keterangan:

1	= Intensitas sinyal
Г(.)	= fungsi Gamma
$K_n(.)$	= modifikasi fungsi Bessel dengan order $\alpha - \beta$
α	= nilai efektif redaman
β	= nilai efektif konstelasi pergeseran fasa
k	= jumlah gelombang (m ⁻¹)
L	= jarak pemancar dan penerima (m)
d ₂	= Diameter optik penerima (m)

2.3.5 Konsep Redaman Atmosfer dalam Clear Air menurut ITU-R P.1817

Atmosfer dapat mengakibatkan penurunan dan atenuasi sinyal dalam jalur sistem FSO dengan beberapa cara termasuk penyerapan, hamburan maupun kilauan. Semua kejadian ini bergantung terhadap waktu dan bergantung pada kondisi cuaca (Steve Hrlanilovic, 2005).

Dengan:

L _{clear_air}	= Redaman atmosfer pada kondisi cuaca cerah (dB)
Aclear_air	= Parameter atenuasi yang dapat dilihat pada tabel.5 (dB/km)
L	= Jarak pemancar dan penerima (km)

Berdasarkan ITU-R P.1814 spesifikasi dari redaman atmosfer dapat ditulis dengan hasil penjumlahan dari redaman pada cuaca cerah karena molekul gas dan redaman karena kondisi cuaca tertentu.

$$L_{atm} = L_{clear_air} + L_{excess} \tag{2.9}$$

BRAN

Keterangan:

= Redaman atmosfer

 γ_{clear_air}

Yatm

= redaman pada kondisi cuaca cerah

 γ_{excess} = redaman pada kondisi cuaca tertentu (hujan, salju, kabut, dsb) Dalam ITU-R P.1817 dijelaskan spesifikasi redaman pada kondisi cuaca cerah adalah redaman yang disebabkan oleh penyerapan oleh molekul gas, penyerapan atmosfer mempunyai hasil panjang gelombang optik dari interaksi foton dengan atom atau molekul (N₂, O₂, H₂, H₂O, CO₂, O₂) yang menyebabkan absorbsi foton dan meningkatkan temperatur. Hal ini diuraikan sebagai berikut:

a. Redaman karena penyerapan molekul di udara (ITU-R P.1817).

Redaman penyerapan molekul terjadi akibat interaksi antara radiasi optik atom dan molekul media (N2, O2, H2, H2O, CO2, O3, Ar, dan lain-lain). Koefisien penyerapan bergantung pada jenis molekul gas dan konsentrasi di dalamnya. Variasi spektral koefisien penyerapan menentukan spektrum penyerapan. Sifat dasar spektrum ini disebabkan oleh variasi tingkat energy gas yang dihasilkan oleh transisi elektronik, getaran atom, dan rotasi molekul. Penyerapan molekul merupakan fenomena selektif yang secara relative menghasilkan jendela transmisi atmosfer yang transparan dan band penyerapan buram.

Jendela transmisi global dalam rentang optik adalah sebagai berikut:

- 1) Cahaya tampak sampai mendekati IR : 0,4-1,4 μm,
- 2) Near IR atau IR I: 1,4-1,9 μm dan 1,9-2,7 μm,
- 3) Mean IR or IR II : from 2.7 to 4.3 μ m and 4.5 to 5.2 μ m.
- 4) Far IR or IR III : from 8 to 14 μ m.
- 5) Extreme IR or IR IV : from 16 to 28 µm.

Tingkat energi molekul gas telah diukur dengan tepat untuk masing-masing jenis dan dapat menyerap energi foton di bawah pengaruh terjadinya radiasi elektromagnetik dan melakukan transisi dari tingkat awal energy e_i ke tingkat energi yang lebih tinggi e_f . Energi radiasi ini kemudian dilemahkan oleh hilangnya satu atau lebih foton.

Proses ini hanya muncul jika frekuensi gelombang yang terjadi sesuai dengan salah satu frekuensi resonansi molekul yang dipertimbangkan:

$$v_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \tag{2.10}$$

Keterangan:

v_0	= frekuensi gelombang datang (Hz)
h	= konstanta Planck, $h = 6,6262 \ 10^{-34} $ J.s,
e_i dan e_f	= tingkat energi molekul.

Parameter dasar yang diperlukan untuk menentukan serapan yang dihasilkan oleh resonansi molekul adalah tingkat energi yang mungkin dari setiap jenis molekul, probabilitas transisi dari suatu tingkat energi ke sebuah tingkat energi (ef). intensitas baris resonansi dan profil alami tiap baris.

b. Redaman karena hamburan molekul (ITU-R P.1817).

Hamburan molekul merupakan hasil dari interaksi cahaya dengan partikel yang berukuran lebih kecil dari panjang gelombang cahaya masuk. Hamburan oleh molekul gas atmosfer berpengaruh pada redaman total radiasi gelombang elektromagnetik. Koefisien akibat hamburan molekul adalah:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2}\right) \left(\frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}\right)$$
(2.11)

Keterangan:

 $\beta_{\rm m}(\lambda)$ = koefisien hamburan molekul (km^{-1})

 λ = panjang gelombang (µm)

 ρ = densitas molekul (m^{-3})

 δ = faktor depolarisasi udara ($\cong 0,03$)

 $n(\lambda)$ = indeks bias dari udara.

Hamburan molekul dapat diabaikan dalam penjang gelombang *infrared*, dan hamburan *Rayleigh* berpengaruh pada panjang gelombang ultraviolet sampai cahaya tampak.

c. Visibitilas FSO (ITU-R P.1817).

Visibilitas didefinisikan sebagai jarak sebuah obyek pada saat kekontrasan gambar berkurang 2% dari nilai aslinya. Ini dihitung pada panjang gelombang 1550 nm dengan

mempertimbangkan intensitas maksimum spektrum matahari. Kode visibilitas internasional metunjukkan redaman (dB/km) untuk berbagai kondisi cuaca seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 2.5**:

- 1) Kondisi cuaca mulai dari saat cuaca cerah sampai kabut tebal
- 2) Pengendapan (mm/h) : gerimis, hujan, badai
- 3) Visibilitas dari 50 m sampai 50 km

		Internatio	<u>nal visibilit</u>	y code	
Weather conditions		Precipitation		Visibility	Attenuation
			mm/h	(m)	(dB/km)
Dense fog		-17	AS I	50	315
Thick fog	ER	511		200	75
Moderate fog		7		500	28.9
Light fog	-	Storm	100	770	18.3
Very light fog				1 000	13.8
	Snow	Strong rain	25	1 900	6.9
Light mist		THE C		2 000	6.6
		Average rain	12.5	2 800	4.6
				4 000	3.1
Very light mist		Light rain	2.5	5 900	2
	-			10 000	1.1
Clear air		Drizzle	0.25	18 100	0.6
		1 R.A		20 000	0.54
Very clear air				23 000	0.47
ŤŽ.				50 000	0.19

(Sumber: ITU-R P.1817:2007-2012)

2.4 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Teknik *multiple access* terdiri dari beberapa skema, yang pertama yaitu *Frequency Division Multiple Access* (FDMA). Teknik FDMA membagi spektrum frekuensi menjadi beberapa kanal dengan sebuah pengguna diizinkan untuk mentransmisikan dan menerima data pada salah satu kanal. Untuk mencegah interfenensi antar kanal maka digunakan frekuensi pembatas atar kanal (*guard band*)

satu dengan yang lainnya sehingga membuat FDMA tidak efisien dalam hal penghematan *bandwidth*. Ketika sebuah kanal kosong maka langsung diberikan pada pengguna yang baru. Oleh karena itu FDMA hanya dapat menampung pengguna dengan jumlah yang sangat sedikit dan pengguna menunggu dalam waktu lama untuk mendapatkan kanal kosong dan hanya digunakan pada 'Generasi pertama'.

Teknik *multiple acces* yang kedua yaitu *Time Division Multiple Acces* (TDMA) yang membagi spektrum berdasarkan komponen waktu kedalam slot-slot dan pengguna diberi *time slot* tertentu yang dapat berulang secara periodik. TDMA dapat menampung pengguna yang lebih banyak daripada FDMA, sehingga 'Generasi kedua' menggunakan gabungan teknik FDMA dan TDMA.

Teknik *multiple access* yang ketiga yaitu *Code Division Multiple Access* (CDMA) yang membedakan pengguna berdasarkan kode *orthogonal* tiap pengguna. Kode orthogonal ini digunakan untuk menyebarkan energi sinyal keseluruh frekuensi untuk memungkinkan banyak pengguna dapat dikirimkan dan diterima dengan penerima yang tepat.

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) merupakan teknik multiple access yang menggunakan beberapa frekuensi (multicarrier) yang saling tegak lurus (orthogonal). Pada dasarnya OFDMA merupakan gabungan antara Frequency Division Multiple Access (FDMA), Time Division Multiple Access (TDMA) dan Code Division Multiple Access (CDMA). Hal ini berarti bahwa multiple user dialokasikan pada subcarrier yang berbeda secara dinamis (FDMA) dan pada time slot yang berbeda pula (TDMA). Untuk membedakan simbol satu dan yang lain pada subcarrier dan time slot yang berbeda maka digunakan teknik yang sama dengan CDMA (Ergen, Mustafa, 2009).

OFDMA dikembangkan dari teknologi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) tetapi perbedaan yang mendasar antara OFDMA dengan OFDM adalah pada OFDMA dalam satu subcarrier dapat diduduki oleh satu atau beberapa pengguna yang memiliki simbol OFDMA yang berbeda. Sedangkan pada OFDM dalam satu subcarrier hanya dapat diduduki oleh pengguna yang memiliki simbol OFDM yang sama. Perbedaan antara OFDMA dan OFDM ditunjukkan pada Gambar 2.5. Selain itu OFDMA memiliki prinsip kerja yang sama dengan OFDM yaitu mengirimkan beberapa pesan pada satu kanal transmisi tanpa terjadi *inter-carrier interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI). Hal ini dikarenakan adanya proses penambahan cyclic prefix (CP) pada simbol OFDMA (Srikanth, 2007).



Gambar 2.5 Perbandingan Sinyal OFDM dengan OFDMA dilihat dari *Domain* Frekuensi dan Waktu. (Digambar ulang setelah sumber : Srikanth S., 2007)

2.4.1 Definisi Orthogonal

OFDMA menggunakan sinyal *orthogonal* yaitu 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. Sifat *orthogonal* ini dapat memungkinkan *overlapping frekuensi carrier* tanpa mempengaruhi sinyal dan akan menghilangkan adanya *guadband* sehingga penggunaan *bandwidth* akan lebih efisien.



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

Kehilangan orthogonalitas menyebabkan pengkaburan (*blurring*) diantara sinyal-sinyal informasi dan penurunan performansi sistem komunikasi. Dua buah sinyal dikatakan *orthogonal* menurut .P. Lawrey, 2001, jika:

$$\int_0^T \varphi_p(t)\varphi_q^*(t)dt = \begin{cases} K, & jika \ p = q \\ 0, & jika \ p \neq q \end{cases}$$
(2.12)

Dengan T adalah perioda simbol OFDMA, K merupakan konstanta, $\varphi(t)$ adalah fungsi gelombang p, $\varphi_q^*(t)$ adalah *conjugate* dari fungsi gelombang q. Sifat *orthogonal* dalam OFDMA dibangkitkan menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dengan fungsi basis dalam transformasi $\varphi_p = e^{j2\pi pt/\tau}$ yang *orthogonal* pada selang waktu (0,T). Gambaran dari spektrum OFDMA dan orthogonalitas antar *subcarrier* dapat dilihat dalam **Gambar 2.7**.



2.4.2 Pembagian Aliran Data pada OFDMA

Prinsip dasar dari sistem OFDMA adalah membagi sebuah aliran data kecepatan tinggi M menjadi N aliran data kecepatan rendah. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.



(Sumber : K.Fazel & S. Kaiser, 2008)

Menurut Tufvesson, 1998, pada sistem OFDMA, laju transmisi untuk masingmasing *subcarrier* dari laju transmisi total yang tersedia dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$R_{sub} = \frac{R_{tot}}{N} \tag{2.13}$$

Sedangkan durasi simbol untuk suatu modulasi pada masing-masing subcarrier dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$T_{sub} = \frac{\log_2 M}{R_{sub}} \tag{2.14}$$

Keterangan:

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

 R_{tot} : laju transmisi total (bps)

- T_{sub} : durasi simbol masing-masing subcarrier (s)
- N : jumlah subcarrier
- M : jumlah kemungkinan sinyal untuk modulasi QPSK, nilai $M = 2^2 = 4$,

2.4.3 Blok Diagram OFDMA

Blok diagram dasar dari suatu pemancar dan penerima OFDMA ditunjukkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Blok Diagram Pemancar dan Penerima Sistem OFDMA (Sumber : Mustafa Ergen, 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*.



Gambar 2.10 Konversi Serial ke Paralel (Sumber : Johan: 2008)

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 berfungsi untuk mengkodekan informasi dari sebuah pesan menjadi simbol yang cocok untuk dikirimkan. 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*. Teknik modulasi yang digunakan adalah QPSK.

QPSK merupakan salah satu bentuk modulasi digital *phase shift keying* yang mengkodekan informasi kedalam fasa sinyal yang ditransmisikan. QPSK merupakan MPSK dengan M=4 yang artinya dapat mengkodekan 2 bit persimbol. Pada QPSK frekuensi dan amplitudo sinyal *carrier*-nya konstan, sedangkan perubahan *phase* sinyal *carrier*-nya berubah sesuai dengan perubahan amplitudo sinyal informasinya. Diagram konstelasi QPSK dilakukan dengan hubungan informasi dengan fasa sinyal yang berdekatan satu dengan lainnya dibedakan dengan nilai 1 bit seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 2.11** (Goldsmith, andrea, 2005).



Gambar 2.11 Diagram Konstelasi Modulasi QPSK (Sumber: Andrea Goldsmith 2005)

Prinsip kerja teknik modulasi QPSK seperti terlihat pada **Gambar 2.12** (a). Aliran data biner unipolar dengan kecepatan R_b dikonversi menjadi aliran data bipolar nonreturn-to-zero (NRZ) menggunakan converter unipolar ke bipolar. Aliran bit m(t) selanjutnya dipecah menjadi dua aliran data m_1 (t) dan m_Q (t) (aliran Inphase dan quadratur) yang masing-masing memiliki kecepatan R_s = R_b/2. Aliran data m_1 (t) disebut aliran genap dan m_Q (t) disebut aliran ganjil. Kedua sinyal ini selanjutnya dimodulasi secara terpisah oleh dua carrier Φ_1 (t) dan Φ_2 (t) yang saling quadrature. Kedua sinyal termodulasi selanjutnya ditambahkan untuk mendapatkan sinyal QPSK dan diteruskan ke Bandpass Filter untuk kemudian dipancarkan.

Pada sisi penerima, sinyal melewati Bandpass Filter terlebih dahulu untuk menghilangkan *noise out-of-band*. Sinyal hasil pemfilteran selanjutnya dipecah menjadi dua bagian, dan masing-masing di demodulasi menggunakan *carrier in-phase* dan *quadrature* yang dihasilkan oleh *carrier cecovery circuit* yang sudah diteruskan menuju *decision circuit* untuk menghasilkan aliran biner *in-phase* dan *quadrature*. Selanjutnya kedua sinyal ini dimultipleks untuk menghasilkan aliran biner yang sesuai dengan yang dikirimkan (Rappaport, Theodore S, 2002).



Gambar 2.12 Blok Diagram (a)Modulator QPSK (b) Demodulator QPSK (Sumber : Theodore S. Rappaport, 2002)

Keluaran dari blok diagram **Gambar 2.12** berupa sinyal termodulasi QPSK ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Sinyal pada *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK). (Sumber : Behrouz A. Forouzan, 2000)

c. Fast Fourier Transform pada 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 olek blok IFFT. Penggunaan IFFT akan menjamin *orthogonalitas* antar *subcarrier*. *Orthogonolitas* antar tiap *subcarrier* dalam satu kanal transmisi terjadi pada waktu yang berbeda dengan frekuensi sama. 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 analog* (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

Pada komunikasi nirkabel ada masalah yang terpenting yaitu *delay spread* yang dapat menyebabkan *Intersymbol Interference* (ISI). Selain itu, ISI dapat pula terjadi karena meningkatnya *bandwidth carrier* dan laju simbol *subcarrier*. Pendekatan yang sering digunakan untuk mengatasi ISI adalah dengan menyisipkan *guard interval* (interval penghalang) secara periodik pada tiap simbol OFDMA. Bila panjang *guard interval* melebihi *multipath delay*, maka ISI dapat dihilangkan.

Akan tetapi penggunaan *guard interval* tidak dapat mencegah terjadinya Interchannel Interference (ICI) sehingga orthogonalitas antar subcarrier tidak mampu dijaga. Untuk mengatasi masalah ini, maka harus dilakukan penambahan cyclic prefix dengan cara mencuplik beberapa frame OFDMA pada bagian akhir dan meletakkannya dalam guard interval. Dengan penambahan cyclic prefix maka masalah interferensi (ISI dan ICI) yang terjadi pada komunikasi nirkabel dapat diatasi. Proses penambahan cyclic prefix dapat dilihat pada **Gambar 2.14**. ISI dan ICI dapat dicegah jika panjang cyclic prefix melebihi panjang delay spread maksimum (Amitabh Kumar, 2008).



Gambar 2.14 Penyisipan Cyclic Prefix pada Simbol OFDMA (Sumber : Eric Lawrey: 1997)

Ol Al ma du

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 2.15** berikut.



Gambar 2.15 Representasi Waktu dari OFDMA (Sumber : Zhang Di: 2004)

2.5 Parameter OFDMA pada Long Term Evolution (LTE)

LTE merupakan teknologi yang mengarah ke 4G yang dikenalkan oleh 3GPP sebagai *Release* 8 yang mempunyai data rate lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi sebelumnya HSPA. Spesifikasi LTE ditunjukkan pada **Tabel 2.6**.

Kelebihan dari sistem transmisi OFDMA adalah efisiensi penggunaan *bandwidth* dan dapat menjaga setiap *subcarrier* agar tetap *orthogonal* serta dapat mencegah terjadinya *intesymbol* dan *intercarrier inteference* (ISI dan ICI) sistem dengan menggunakan *cyclic prefix* (CP). CP merupakan duplikat bagian akhir simbol OFDMA yang diletakkan pada bagian awal simbol. Pada kanal dengan *delay spread*, untuk mengurangi ISI maka waktu CP harus memenuhi $\tau_{CP} \ge \tau_{max}$ dengan τ_{max} adalah *delay spread* maksimum kanal (Hyung, 2008). Pada OFDMA dengan standar LTE *release* 8 pada dasarnya *bandwidth* transmisi akan lebih kecil dari *bandwidth* kanal, karena disediakan sebesar 10% untuk CP pada kedua sisi. Cyclic prefic normal yang digunakan pada OFDMA LTE dengan kanal 20 MHz adalah sebesar 7.14% (Farooq khan, 2009).

Parameter

Tabel	2.6 Spesifikasi LTE
Values	
SC-OFI	OMA

Access Scheme UL	SC-OFDMA
Access Scheme DL	OFDMA
Bandwidth	1,4, 3, 5, 10, 15, and 20 MHz
Minimum TTI	1 ms
Subcarrier spacing	15 kHz
Cyclic prefix short	4.7 μs
Cyclic prefix long	16.7 µs
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Spatial multiplexing	Single layer for UL per UE, up to four layers for DL per UE, MU-MIMO supported for UL and DL

(Sumber: Tara Ali-Yahiya, 2011)

LTE menggunakan teknologi OFDMA disisi *downlink* dengan struktur frame radio umum dijelaskan dalam **Gambar 2.16** (Harri holma, 2007).



Struktur frame LTE yang mana 10 ms frame terdiri dari sepuluh 1 ms *subframe*. Jumlah simbol per 0,5 ms subframe pertama adalah 3 sampai 6 simbol data, dan untuk 0,5 ms kedua berjumlah 7 data untuk normal *cyclic prefix*. Dengan mengetahui jumlah simbol per 1 ms *subframe* maka dapat dihitung nilai peak bit rate sebagai berikut (Harri Holma, 2007).

Peak bit rate =
$$\frac{bit/simbol}{Hz} \times N \times \frac{jumlah \ simbol \ persubframe}{1 \ ms} \left(1 - \alpha_{cp}\right)$$
 (2.15)

Dengan:

N = jumlah subcarrier $\alpha_{cp} =$ faktor cyclic prefix

2.6 Performansi OFDMA pada Free Space Optic

Sistem FSO-OFDMA menyediakan kecepatan data tinggi dengan membagi sebuah aliran data berkecepatan tinggi menjadi beberapa aliran data dengan kecepatan rendah untuk ditransmisikan melalui beberapa *subcarrier* dengan band sempit yang lebih tahan terhadap distorsi dan tidak membutuhkan equalisasi. Selain itu pemrosesan sinyal lebih banyak dilakukan dalam domain RF(Shieh, william & Djordjevic, ivan, 2010).

Konfigursai pemancar dan penerima FSO-OFDMA ditunjukkan pada Gambar 2.17. Konsep diagram sistem FSO-OFDMA terdiri dari lima blok fungsi dasar yaitu RF-OFDMA transmitter, RF-to-optical (RTO) up-converter, FSO link, optical-to-RF (OTR) down-converter, and RF OFDM receiver. Kata RF menunjukkan sinyal elektrik untuk membedakan dengan domain optik. Dalam pemancar RF-OFDMA, sinyal input dikonversi dari serial menjadi paralel. Simbol informasi ini kemudian dipetakan kedalam sinyal kompleks. Sinyal masuk ke blok IFFT dan terjadi penambahan cyclix prefix. Sinyal digital selanjutnya diubah ke analog menggunakan DAC dan difilter oleh LPF. Pada RTO up-converter mengubah sinyal baseband menjadi sinyal optik menggunakan modulator MZM untuk selanjutnya ditransmisikan.



Gambar 2.17. Konfigurasi sistem FSO-OFDMA (Digambar ulang setelah: William Sieh & Ivan Djordjevic, 2010)

Pada sisi penerima terjadi proses kebalikan dari pemancar FSO-OFDMA. Sinyal diterima oleh penerima optik selanjutnya dikuatkan oleh EDFA dan diubah dari

gelombang optik menjadi gelombang elektrik oleh *Optical-to-RF down-converter*. Selanjutnya Sinyal difilter menggunakan LPF dan diubah dari sinyal analog ke digital. Sinyal digital selanjutnya masuk ke blok FFT untuk diubah dari domain waktu ke domain frekuensi dan masuk ke blok *data symbol decision* untuk dilakukan peroses demodulasi. Setelah itu sinyal paralel diubah menjadi data serial untuk didapatkan data aslinya.

Untuk mengetahui performansi sistem FSO dengan mengimplementasikan teknik OFDMA dilakukan berhitungan beberapa parameter berikut ini:

2.6.1 Link Margin

Link margin merupakan parameter utamaa dalam mendesain sistem FSO. *Link margin* merupakan daya yang tersedia dengan memperhitungkan sensitivitas penerima. Nilai *link margin* sistem FSO dalam cuaca cerah dapat dihitung (ITU-R P.1814) dengan persamaan:

$$M_{link} = P_t - S_r - L_{sistem} - L_{Geo} - L_{clear_air} - L_{sint}$$
(2.16)

Dengan:

P _t	= Daya transmisi (dBm)
Sr	= Sensitivitas <i>Receiver</i> (dBm)
L _{Geo}	= Rugi-rugi geometrik (dB)
L _{sistem}	= Rugi-rugi sistem (dB), termasuk rugi-rugi pointing, optik
L _{clear_air}	= Rugi-rugi atmosfer pada kondisi cuaca cerah(dB)
L _{sint}	= Rugi-rugi sintilasi (dB)

2.6.2 Daya Terima (Received Power) Sistem

Pada FSO sinyal ditrnsmisikan dengan media udara sehingga mengalami penurunan level daya sinyal akibat atenuasi seperti penyerapan, penyebaran dan kilauan. Daya terima pada sistem *free space optic* dipengaruhi oleh besarnya daya transmisi, luas *arperture* yang tertangkap, divergensi *beam*, redaman atmosfer, sintilasi dan jarak. Persamaan untuk menghitung daya terima (Abdelmoula Bekali dkk, 2009) adalah sebagai berikut:

$$P_r = P_t L_{atm} L_{\alpha} X + n_{FSO}(t) \tag{2.17}$$

Keterangan:

$$P_r$$
 = Daya yang diterima(mW)
 P_t = Daya yang di pancarkan (mW)

 L_{atm} merupakan rugi-rugi atmosfer yang meliputi rugi pada cuaca cerah (L_{clear_air}) dan rugi sintilasi (L_{sint}) seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2.9). Sedangkan L_{α} meliputi rugi geometrik (L_{Geo}), dan rugi-rugi sistem (L_{sistem}) yang terdiri dari rugi-rugi optik dan rugi-rugi pointing.

2.6.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) dihitung pada sisi penerima optik yaitu merupakan perbandingan arus sinyal terima (*i*_s) dengan *noise* yang terjadi. Sumber *noise* utama yang dimodelkan dalam AWGN adalah *noise* pada proses deteksi yang disebabkan oleh shot noise $\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD}$, dan thermal noise atau Johnson noise $\langle i_{JN}^2 \rangle$. Shot noise adalah noise yang diakibatkan sumber cahaya lain yang masuk ke detektor yang memiliki panjang gelombang yang sama dengan sinyal informasi. Thermal noise diakibatkan oleh elemen resistif dalam preamplifier.

Nilai arus sinyal terima (i_s) dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$i_s = \Re P_R \tag{2.18}$$

dan nilai shot noise dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD} = 2q i_s B \tag{2.19}$$

sedangkan Thermal noise dapat dihitung sebagai berikut:

$$\langle i_{JN}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L} \tag{2.20}$$

Sehingga nilai SNR FSO dapat dihitung dengan perbandingan variansi arus sinyal terima dengan variansi *noise* yang terjadi (Y.Zang dkk, 2011).

$$SNR_{FSO} = \frac{i_s^2}{\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD} + \langle i_{JN}^2 \rangle}$$
(2.21)

$$SNR_{FSO} = \frac{\left(\Re P_R\right)^2}{2q\,i_s B + 4kTB\,/R_L} \tag{2.22}$$

Keterangan:

$\Re = \eta q / h v$	= Responsivitas pada λ =1550 nm
P_R	= Daya yang di terima (W)
7	= Besar muatan elektron (C)
В	= Bandwith (Hz)

<i>i</i> s	= Arus sinyal yang diterima (A)
k	= Konstanta Boltzman (J/K)
Τ	= Temperatur (K)
R_L	= Resistansi beban (Ω)

Sedangkan, besarnya nilai SNR efektif sistem yang menggunakan *air interface* OFDMA (Hara, 2003) diperoleh dari persamaan 2.23 berikut.

$$SNR_{FSO-OFDMA} = (1 - \alpha_{cp}) SNR_{FSO}$$
(2.23)

Keterangan:

2.6.4 Kapasitas Sistem

Kapasitas sistem yang dihitung pada skripsi ini adalah pada kanal AWGN. Pada kanal AWGN Besarnya kapasitas sistem ditunjukkan oleh persamaan berikut (Mustafa ergen, 2009).

$$C = \log_2 \left(1 + SNR_{\text{FSO-OFDMA}} \right) \tag{2.24}$$

Keterangan :

С

= Kapasitas sistem (bps/Hz)

SNR_{FSO-OFDMA} = Signal to noise ratio sistem

2.6.5 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 sistem FSO dengan tipe modulasi QPSK (Andrea Goldsmith, 2005) dapat ditulis sebagai:

$$BER_{sistem} = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_o}}\right)$$
 (2.21)

Dengan

$$Q(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \tag{2.22}$$

Dan Nilai erfc(x) atau *complementary error function* (x) didefinisikan sebagai fungsi kesalahan dari variabel (x) dapat dinyatakan sebagai:

$$erfc(x) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x^2}$$
 (2.23)

Dan E_b/N_o adalah Energy Bit-to-Noise Ratio yang dinyatakan sebagai (William Stallings, 2007):

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR_{FSO-OFDMA} - 10 \log \frac{B}{R_{tot}}$$
(2.24)

Dengan :

BER _{sistem}	= <i>Bit error rate</i> sistem
SNR _{FSO-OFDMA}	= Signal to noise ratio sistem (dB)
$\frac{E_b}{N_o}$	= Energy bit-to-noise ratio (dB)
В	= Bandwidth sistem (Hz)
R _{tot}	= Laju data (bps)
erfc	= Error function complementary
Z	