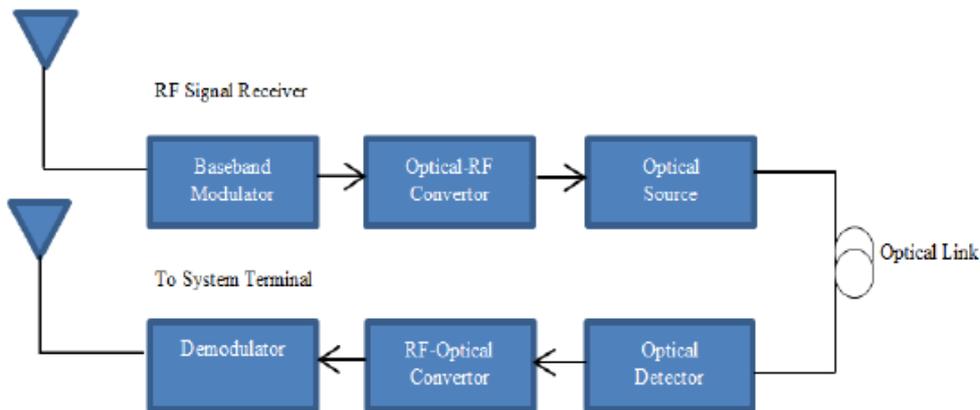


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Komunikasi *Radio over Fiber (RoF)*

Radio over Fiber (RoF) adalah teknologi yang akan datang menyediakan konvergensi jaringan kabel dan nirkabel solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan permintaan bandwidth sistem komunikasi. Dalam teknologi ini, cahaya dimodulasi dengan sinyal frekuensi radio (RF) dan dikirim melalui serat optik untuk memudahkan transmisi nirkabel. Ini menawarkan beberapa keuntungan ekonomi dibandingkan sistem akses nirkabel lainnya karena bandwidth yang lebar dan karakteristik atenuasi rendah. Teknologi RoF memungkinkan pemusatan sinyal RF yang dibutuhkan fungsi pengolahan di satu lokasi bersama disebut central stasiun (CS). Serat optik kemudian digunakan untuk mendistribusikan sinyal RF ke unit akses jarak jauh (RAU) yang memungkinkan untuk penghematan biaya yang signifikan karena RAU hanya perlu melakukan konversi plastik, penyaringan dan amplifikasi fungsi. Seperti skema RAU terpusat dan disederhanakan memungkinkan biaya pengoperasian sistem yang relatif rendah dan pemeliharaan. Hal ini sangat berguna dalam broadband sistem komunikasi yang membutuhkan kepadatan tinggi RAUs. CS melakukan konversi nirkabel elektro-optik (E / O) sinyal yang menggunakan sumber laser termodulasi secara langsung atau modulator elektro-optik eksternal. Ini juga melakukan semua switching, routing dan pemeliharaan administrasi operasi jaringan (OAM). RAUs melakukan optoelektronik (O / E) konversi sinyal nirkabel menggunakan photodetectors atau photoreceivers. Mereka tidak memainkan fungsi apapun dalam sinyal pengolahan. Dengan demikian persyaratan utama link ROF adalah operasi duplex (downlink dan uplink), panjang yang memadai dan komponen optik yang optimal. Konfigurasi dasar untuk Sistem RoF dapat diilustrasikan sebagai berikut pada *Gambar 2.1* dengan komponen uplink dan downlink terhubung melalui optik link serat. (Gomas, Monterio, Gamerio, 2012)



Gambar 2.1 Blok diagram sistem RoF

(Sumber : Seal, Arunava, Samriddhi Bhutani, dan Sangeetha A, 2017)

Keuntungan menggunakan *radio over fiber* adalah sebagai berikut.

- Power transmit *RAU (Remote Antenna units)* kecil, rata-rata setiap laser mempunyai *power transmit* sebesar 0 dBm – 10 dBm sehingga tidak memerlukan *High Power Amplifier*.
- Redaman propagasi kecil, sekitar 0,2dB/km sehingga mampu menjangkau jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan komunikasi seluler atau *wireless*.
- Kualitas sinyal yang tinggi dikarenakan tahan terhadap gangguan gelombang elektromagnetik. Bentuk sinyal yang disalurkan dalam media transmisi serat optik adalah cahaya.
- Kemudahan dalam peningkatan kapasitas kanal karena didukung oleh laju yang sangat tinggi
- Mendukung jaringan *broadband* untuk multimedia aplikasi dengan laju data serat optik sangat tinggi yang bisa mencapai orde GHz.
- Besar nilai interferensi kecil karena menggunakan panjang gelombang yang berbeda pada setiap kanal yang disalurkan.
- Efisiensi spektrum frekuensi sehingga memudahkan dalam pengaturan frekuensi tidak seperti pengaturan frekuensi yang ada pada sistem komunikasi seluler.

2.1.1 Model Analisis *Radio over Fiber (RoF)*

Transmisi Radio over Fiber (RoF) berhubungan dengan loss, noise, dan distorsi pada pola sinyal RF dan dalam merancang sebuah RoF sangatlah penting dalam menjaga kinerja sistem. Desain RoF saat ini untuk sistem komunikasi nirkabel dengan dinamis tinggi

sehingga CNR dapat diberlakukan untuk uplink dan downlink. Beberapa yang perlu diperhatikan dalam mendesain sebuah RoF yaitu:

1. *Frekuensi Carrier*

Respon frekuensi pada sumber optik biasanya factor terbatas dari limit frekuensi atas untuk sebuah RoF yang menggunakan *single mode optical fiber*. Konduktor laser mempunyai respon yang baik pada frekuensi yang mencapai GHz, dimana yang frekuensi tersebut biasanya terdalem pada komunikasi wireless.

2. *Channel Bandwidth*

Sistem wireless generasi yang akan datang umumnya akan memiliki bandwidth kanal yang lebih tinggi daripada arus, bandwidth 100MHz sedang dipertimbangkan sistem seperti LTE-A. noise secara linier pada bandwidth dikurangi 3dB oleh CNR untuk setiap penggandaan bandwidth, dampaknya terlihat pada penurunan jangkauan nirkabel itu sendiri dari arah downlink yaitu reduksi daya pancar dan arah uplink sensitivitas receiver.

3. *Number of Channels*

Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk mentransmisikan beberapa sinyal pada satu frekuensi yaitu :

- SDM (Space Division Multiplexing) yaitu pada tiap sinyal carrier dipisahkan dalam fiber. SDM membutuhkan satu sumber optik dan satu serat per sinyal per arah link.
- WDM (Wavelength Division Multiplexing) yaitu pada tiap sinyal yang akan dimodulaai dipisahkan pada sumber optical nya, dimana dibagi menurut panjang gelombangnya.
- SCM (Subcarrier Multiplexing) yaitu setiap sinyal diterjemahkan sebagai intermediet frekuensi secara terpisah. Frekuensi ini dapat digabungkan dan dipecah pada setiap ujung sambungan yang menggunakan komponen RF pasif. SCM menggunakan satu sumber optik untuk semua sinyal, namun memerlukan satu tahap terjemahan frekuensi.

4. *Peak-to-Average-Power Ratio*

Sinyal multicarrier, seperti OFDM, memiliki PAPR tinggi, yang berarti bahwa daya masukan ke RoF harus dikurangi. Hal ini menyebabkan penurunan CNR, yang sekali lagi menyebabkan penurunan jangkauan nirkabel. Dengan tidak adanya modulasi amplitudo

pada subcarrier, seperti pada kasus QPSK, PAPR maksimum menjadi $10 \log(N)$ dimana jumlah subcarrier. Misalnya, untuk 256 subcarrier, PAPR maksimum adalah 24 dB.

5. *Modulation Scheme*

Pada generasi sistem komunikasi sekarang kebanyakan menggunakan modulasi yang kompleks untuk spectral efisiensi untuk high peak data rates. Dengan meningkatnya kompleksitas modulasi menyebabkan persyaratan CNR yang lebih tinggi untuk demodulasi sinyal yang berhasil. CNR minimum yang dibutuhkan untuk QPSK adalah 8 dB, sedangkan untuk 16-QAM adalah 14,4 dB dan untuk 64-QAM itu adalah 20 dB. Ada kenaikan sekitar 6 dB dalam persyaratan CNR minimum untuk setiap empat kali lipat jumlah rasi poin dalam skema modulasi.

6. *Uplink Power Control*

Kontrol daya Uplink digunakan di semua sistem komunikasi seluler karena membantu menghentikan penerimaan pada receiver. Dalam kebanyakan kasus, ia bekerja dengan menggunakan loop kontrol di mana perangkat diinstruksikan oleh stasiun pangkalan untuk mengurangi daya pancarnya saat ia mendekati stasiun base menerima antena.

7. *Optical Source and Receiver Types*

Untuk penerima optik, jenis fotodetektor bisa berupa fotodioda PIN atau sebuah avalanche photodiode (APD). APD memiliki keuntungan listrik internal karena efek perkalian longsor longsor di medan listrik tinggi dan umumnya digunakan bila sensitivitasnya sangat tinggi. Ini bukan kasus untuk link yang dijelaskan di sini, jadi fotodioda PIN biasanya lebih disukai untuk transmisi analog.

Untuk sumber optik, Directly Modulated Laser (DMLs) biasanya lebih disukai, karena kinerja bagus dengan arsitektur yang sederhana. Sebagian besar RoF dengan dynamic-range tinggi menggunakan laser distributed feedback (DFB) lasers, dimana yang memiliki rentang panjang gelombang yang lebar untuk aplikasi analog dengan efisiensi tinggi, noise rendah dan distorsi.

8. Link Budget Calculations

Nilai *gain* (G), *noise factor* (F), dan *noise figure* (NF), dan tidak penguatan pada DML dapat di buat persamaan :

$$G = \frac{\eta_{las}^2 \cdot R_{pd}^2}{L_{opt}^2} \cdot \frac{Z_{out}}{Z_{in}} \dots \dots \dots (2-1)$$

$$F = n_{out} k \cdot T \cdot B \cdot G \dots \dots \dots (2-2)$$

$$NF = 10 \log F \dots \dots \dots (2-3)$$

Keterangan :

η_{las} = efisiensi slope laser

L_{opt} = rugi optic pada fiber atau jaringan

R_{pd} = responsivity photodiode

K = konstanta boltzman

T = temperature absolut

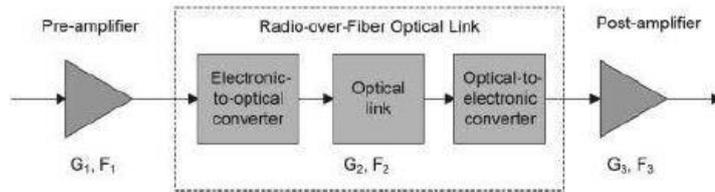
B = noise bandwidth

Z_{in} = impedansi laser masukan

Z_{out} = impedansi laser keluaran

2.1.2 Meningkatkan Kinerja Sistem

Kinerja link RoF perlu dioptimalkan untuk sistem target, dengan batasan dari biaya komponen. Bahkan subsistem uplink dan downlink akan ada persyaratan yang berbeda, downlink diperlukan untuk mengirimkan sinyal daya yang relatif tinggi ke antena transmisi, uplink diperlukan untuk mengirimkan sinyal relatif lemah yang diterima antena ke unitpusat. Secara keseluruhan, orang bisa membayangkan bahwa link RoF harus 'transparan': seharusnya memberikan total gain dengan sedikit distorsi dan tambahan noise mungkin. Kecuali dalam kasus beberapa, daya optik tinggi, optik termodulasi eksternal link, semua link RoF intrinsik (tidak diamplifikasi) adalah lossy. Selain itu, jika sinyal dibagikan ke sejumlah antena, memisahkan kerugian akan meningkatkan keseluruhan kerugian. Jika pemisahan adalah dilakukan di domain optik, kerugian RF dari proses ini meningkat secara kuadratik. Dengan demikian, link RoF umumnya memerlukan amplifier RF untuk mengkompensasi link optik intrinsik kerugian, seperti yang ditunjukkan pada *Gambar 2.2* Menggunakan RF pre-amplifier untuk memperkuat sinyal sebelum link RoF intrinsik berguna bila tingkat sinyal rendah, misalnya untuk memperkuat sinyal lemah yang diterima untuk uplink. Low-noise pre-amplifier dapat digunakan untuk tingkat sinyal kecil.



Gambar 2.2 Amplifier pada link dasar RoF

(Sumber : Gomes, Nathan J, Pailo P. Monteiro, dan Atilio Gameiro, 2012)

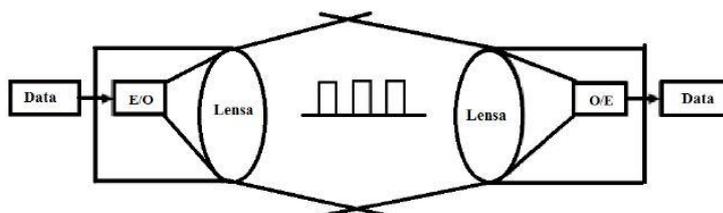
2.2 Sistem Komunikasi *Free Space Optical* (FSO)

Free Space Optic (FSO) adalah teknologi akses *broadband* yang menawarkan *data rate* yang tinggi dari *point to point*. Teknologi ini merupakan jaringan nirkabel *line off sight* (LOS) yang menggunakan *beam* cahaya yaitu mengacu pada laser pada jaringan optik. 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.

Keuntungan dari komunikasi FSO dibandingkan dengan komunikasi kabel konvensional dan komunikasi nirkabel Radio frekuensi (RF) diantaranya :

- Mengonsumsi daya yang relatif rendah
- Menawarkan keamanan yang tinggi selama cakupan *beam* pada daerah yang sangat sempit
- Sensitivitas rendah terhadap interferensi elektromagnetik
- Kapasitas informasi yang besar

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). Gambar 2.3 menunjukkan skema konfigurasi *link* FSO.



Gambar 2.3 Gambar skema konfigurasi *Link* FSO

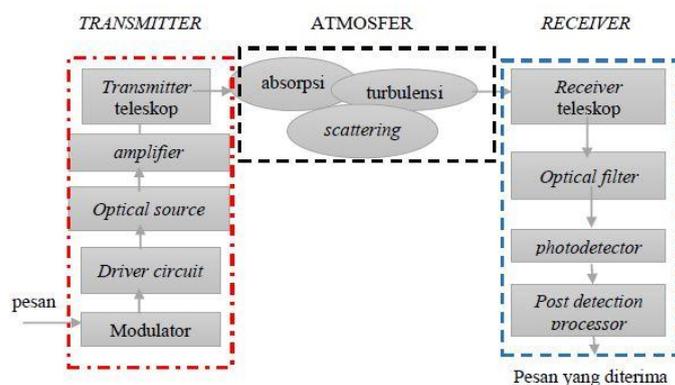
(Digambar ulang setelah sumber: Abd E-Naser dkk, 2009)

Pada *Gambar 2.3* menunjukkan konfigurasi 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 konversi 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.

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 untuk menghubungkan LAN ke LAN dan hubungan antar kampus. Di daerah tropis hujan lebat adalah penyebab utama dari keterbatasan *link* FSO. Curah hujan ada karena adanya hamburan non selektif yang memiliki panjang gelombang yang independen. Sistem dengan frekuensi sinyal dibawah 10 GHz tidak terpengaruh oleh kondisi cuaca. Sistem dengan frekuensi sinyal diatas 10 GHz, yang dalam sistem FSO dipengaruhi oleh hujan (Willebrand dan Ghuman, 2002).

2.2.1 Arsitektur *Free Space Optical* (FSO)

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 2.4*

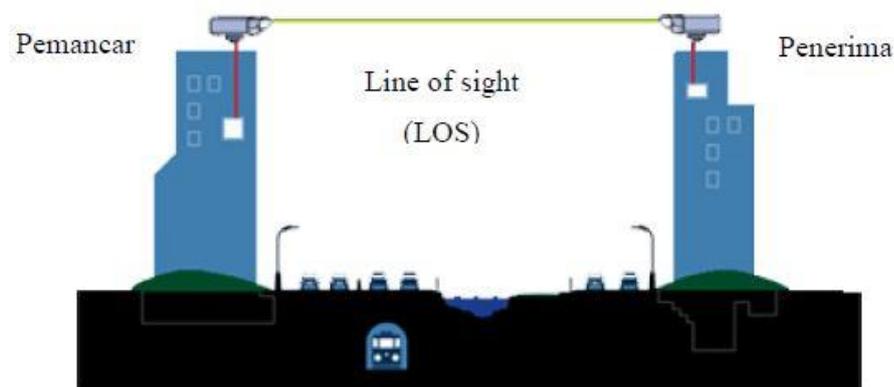


Gambar 2.4 Blok diagram sistem komunikasi *free space optic* secara umum (Sumber: Tri Nopiani, 2012)

Pada *Gambar 2.4* dijelaskan bahwa sistem komunikasi FSO teresterial dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu: *Transmitter (Tx)*, *atmospheric Channel* dan *receiver (Rx)*. Inti dari sistem ini merupakan penggunaan sinar infra-merah atau laser sebagai media transmisi pada jarak antara pemancar dan penerima secara *Line-Of Sight (LOS)*, yang memiliki karakteristik transmisi *half duplex* dan *full duplex* (tergantung aplikasi pada jaringan yang dibutuhkan).

2.2.2 Propagasi *Line of Sight (LoS)*

Propagasi *line of sight*, disebut dengan propagasi dengan gelombang langsung (*direct wave*), karena gelombang yang terpancar dari antenna pemancar langsung berpropagasi menuju antenna penerima dan tidak merambat di atas permukaan tanah. Sesuai dengan namanya, propagasi secara garis pandang yang lebih dikenal dengan *line of sight propagation*, mempunyai keterbatasan pada jarak pandang. Dengan demikian, ketinggian antenna dan kelengkungan permukaan bumi merupakan faktor pembatas yang utama dari propagasi ini. Jarak jangkauannya sangat terbatas, kira-kira 30 –50 mil per *link*, tergantung topologi daripada permukaan buminya. Sistem operasi FSO membutuhkan *line of sight (LOS)* yaitu pemancar dan penerima tidak boleh terdapat penghalang pada sisi transmisinya.



Gambar 2.5 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 berinteraksi 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,

- 3) 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).

2.2.3 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. Redaman bisa terjadi karena adanya *shot noise* dan *thermal noise* pada sistem komunikasi FSO tersebut. *Shot noise* dan *thermal noise* dapat terjadi pada bagian *detector* penerima.

2.2.4 Pengaruh Hujan terhadap Sistem FSO

Hujan merupakan presipitasi uap air yang berasal dari awan yang terdapat di atmosfer. Presipitasi adalah sebuah proses jatuhnya butiran air atau kristal es ke permukaan bumi. Jumlah curah hujan dicatat dalam inci atau milimeter (1 inci=25.4 mm). Curah hujan sebesar 1 mm artinya adalah tinggi air hujan yang terukur setinggi 1 mm pada daerah seluas 1 m² dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir. Berdasarkan Badan Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara dan Geofisika (BMKG) di Indonesia menyatakan terdapat beberapa kriteria intensitas curah hujan yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1

Kriteria Intensitas Curah Hujan di Indonesia Menurut BMKG

KATEGORI	KETERANGAN
Hujan ringan	1-5 mm/jam
Hujan sedang	5-10 mm/jam
Hujan lebat	10-20 mm/jam

Sumber: bmg.go.id

Scattering yang terjadi karena radius hujan (100-1000 μm) secara signifikan lebih besar daripada panjang gelombang yang bekerja pada FSO. Laser dapat melewati partikel hujan, dengan efek *scattering* yang terjadi lebih rendah. Partikel kabut (*haze*) sangatlah kecil dan berada lebih lama di atmosfer, tetapi partikel hujan sangat besar dan berada tidak lama di atmosfer. Koefisien *scattering* hujan dapat dihitung menggunakan hukum *Stroke* pada persamaan (2-4) berikut ini: (Fadhil, 2012)

$$\beta_{rain\ scat} = \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \dots \dots \dots (2-4)$$

Dimana

a : radius hujan (cm)

N_a : distribusi hujan (cm^{-3})

Q_{scat} : Efisiensi *scattering*

Distribusi hujan N dapat dihitung dengan persamaan (2-5) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$N_a = \frac{R}{1,33 (\pi a^3) V_a} \dots \dots \dots (2-5)$$

Dimana

R : rata-rata hujan turun (cm/s)

V_a : batas kecepatan hujan

Batasan kecepatan hujan diberikan oleh persamaan (2-6) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \dots \dots \dots (2-6)$$

Dimana

ρ : kerapatan air ($\rho= 1 \text{ gr/cm}^3$)

g : konstanta gravitasi ($g=980 \text{ cm/sec}^2$)

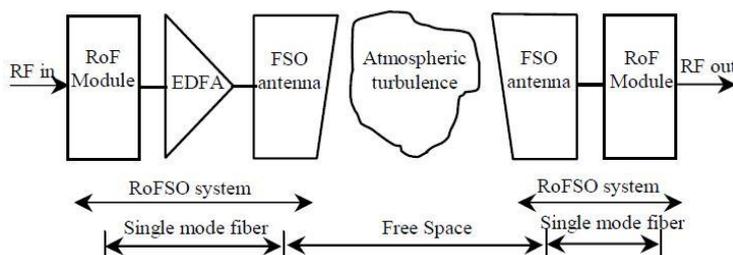
η : viskositas udara ($\eta=1.8 \cdot 10^{-4} \text{ gr/cm.sec}$)

Redaman hujan dapat dihitung dengan persamaan *Beer* (2-7): (Fadhil, 2012)

$$\tau = \exp(-\beta_{rain\ scat} L) \dots \dots \dots (2-7)$$

2.3 Sistem Komunikasi RoFSO

Serat optik telah berhasil dimanfaatkan untuk transmisi dari kedua sinyal digital dan analog. Transmisi sinyal RF modulasi intensitas melewati serat optik telah banyak diselidiki dan diterapkan. Konsep ini disebut Radio over-Fiber (RoF) dan melibatkan pengangkutan informasi serat optik dengan memodulasi cahaya dengan sinyal radio. Dengan menggunakan RoF, kapasitas jaringan optik bisa digabungkan dengan fleksibilitas dan mobilitas jaringan akses nirkabel. Konsep RoFSO dalam hal ini adalah transmisi RF sinyal menggunakan link FSO. Dalam hal ini, RF dimodulasi sinyal optik disebarkan secara langsung melalui ruang bebas menggunakan FSO mentransmisikan antenna ke penerima. Pada sinyal penerima sinyal difokuskan langsung ke inti serat dengan menggunakan optik receiver. *Gambar 2.6* menunjukkan sistem RoFSO.

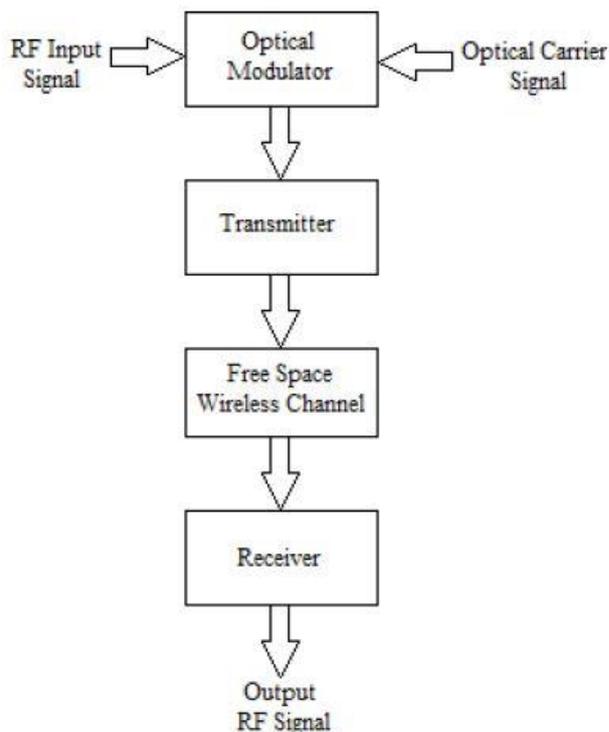


Gambar 2.6 Konsep Sistem RoFSO
 (Sumber : H. Al-Raweshidy and S. Komaki , 2002)

Berbeda dengan link serat optik, transmisi RF Sinyal yang menggunakan link FSO dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk efek atmosfer. *Gambar 2.6* menggambarkan konsep Sistem transmisi RoFSO. Karena RoF pada dasarnya adalah transmisi analog, stabilitas dan keandalan yang lebih tinggi akan dibutuhkan untuk RoFSO link. Misalnya, sinar optik lebih akurat dan efisien pelacakan dan mekanisme kopling serat untuk mengurangi sinyal memudar yang terjadi selama periode atmosfer yang kuat. Turbulensi harus dipertimbangkan dalam proses perancangan.

2.4 Arsitektur *Radio over FSO*

Prinsip dasar transmisi radio over FSO adalah melibatkan pengangkutan sinyal radio analog melalui sambungan serat optik, sinyal radio digunakan untuk memodulasi gelombang cahaya, bukan sinyal digital baseband yang biasa ditemukan pada sebagian besar jalur komunikasi optik. Penggunaan sinyal radio berarti bahwa jalurnya bersifat analog dan performansinya harus dikarakteristikan. Gambar di bawah ini menunjukkan blok diagram sistem RoFSO.



Gambar 2.7 Blok diagram sistem RoFSO

(Sumber : Prabu K, Sumanta Bose, dan Sriram Kumar, 2012)

2.4.1 Line Coding

Proses pengkodean saluran pada prinsipnya mengubah informasi data menjadi bentuk sinyal yang lain sehingga sinyal tersebut cocok dengan saluran yang digunakan. Blok diagram *line encoder* dan *decoder* digunakan sebagai *transmitter* dan *receiver* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Blok diagram *Line Coding*
(Sumber: Vaishali Et Al, 2011)

Faktor yang menentukan kesuksesan *receiver* dalam mengartikan sinyal ditentukan oleh perbandingan sinyal terhadap *noise*, *data rate* dan *bandwidth* (Stalling. W, 2001). Ada faktor lain yang dapat dipergunakan untuk meningkatkan kinerja yaitu skema pengkodean. Skema pengkodean adalah pemetaan sederhana mulai dari bit-bit data sampai menjadi elemen-elemen sinyal. Skema pengkodean yang lebih kompleks digunakan untuk meningkatkan kinerja dengan cara mengubah spektrum sinyal serta dengan menyediakan kemampuan sinkronisasi (Stalling. W, 2001).

2.4.2 Non Return to Zero (NRZ)

Non Return to Zero (NRZ) adalah format modulasi yang paling banyak diaplikasikan saat ini. Teknik untuk membangkitkan pulsa NRZ dikenal dengan teori telekomunikasi klasik. *Non Return to Zero* (NRZ) adalah skema modulasi yang dominan digunakan di sistem komunikasi *Free Space Optic* (FSO) sistem komunikasi komersial. Format kode NRZ merupakan cara termudah dalam mengefisienkan penggunaan *bandwidth*. Kelemahan utama untuk sinyal NRZ adalah keberadaan komponen DC dan kurangnya kemampuan sinkronisasi. NRZ memiliki sistem yang sederhana dan tahan terhadap *nonlinearities* laser dan modulator eksternal. (Liu et al., 2008).

Pulsa NRZ memiliki spektrum optik yang sempit selama transisi *on-off* yang lebih rendah dalam aliran bit NRZ. Spektrum NRZ difokuskan di sekitar frekuensi pembawa. Spektrum yang sempit dari pulsa NRZ memberikan hasil yang lebih baik dari spasi kanal dalam sistem DWDM. Memungkinkan pemanfaatan yang lebih baik dari *bandwidth* sistem dan membuat pulsa NRZ lebih kuat terhadap dampak dispersi kromatik, sehingga toleransi dispersi tinggi. Sebuah toleransi dispersi yang besar penting dalam sistem 40 Gbps WDM

dengan sejumlah besar saluran, karena adanya dispersi residual permanen yang besarnya tergantung pada sistem total *bandwidth* dan jenis serat transmisi yang digunakan.

2.4.3 Return to Zero (RZ)

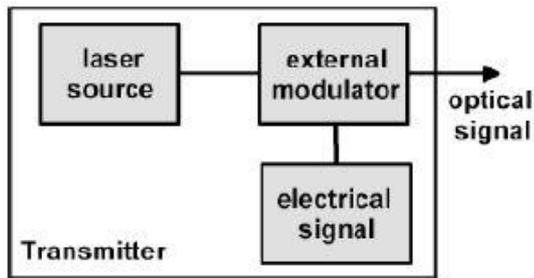
Pada format pengkodean RZ, transisi level sinyal timbul selama beberapa atau semua periode bit yang mengandung *timing* informasi. Pada unipolar RZ, bit “1” direpresentasikan oleh setengah periode bit pertama atau kedua. Bit “0” direpresentasikan pada saat tidak adanya sinyal yang masuk selama periode bit. Kekurangan format RZ *unipolar* adalah jika terlalu banyak bit “0” selama periode bit yang lama, maka akan menimbulkan rugi-rugi waktu sinkronisasi. Format data yang umum untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan pengkodean *optical Manchester code*. Sinyal pengkodean ini didapatkan karena terdapat penambahan secara langsung pada sinyal *baseband* (NRZ-L) dan pada *clock* sinyal. Karena pengkodean ini termasuk pengkodean RZ, maka kode ini membutuhkan dua kali *bandwidth* NRZ dan juga tidak terdapat kemampuan koreksi dan deteksi *error*. (Gerd Keiser, 2010).

2.4.4 Pemancar Optik

Peran pemancar optik menjadi penting dengan peningkatan *data rate* pada sistem. Pada saat pemancar optik berada pada kanal yang lebih rendah, *data rate* menjadi lebih sederhana dan lebih mudah untuk direalisasikan menggunakan modulasi langsung dari laser dioda. Realisasi menjadi lebih kompleks dengan menaikkan kanal *data rate*. Dengan demikian, persyaratan komponen elektrik dan optik pada pemancar optik ditingkatkan. Pemancar optik konvensional menggunakan modulasi amplitudo/intensitas dari cahaya laser, biasa dikenal dengan *on-off keying* (OOK), karena level sinyal yang berbeda untuk menandai dan memberikan jarak ditandai dengan adanya daya optik.

Modulasi amplitudo dapat direalisasikan secara langsung atau menggunakan modulator eksternal dari laser dioda. Untuk merealisasikan sistem transmisi dengan kanal *data rate* lebih besar dari 10 Gbps, modulasi eksternal mewakili solusi yang lebih baik karena dampak dari *laser internal chirp* dari sinyal optik dapat dikurangi secara efisien. Tetapi di sisi lain, kompleksitas dari pemancar optik meningkat. Modulasi eksternal direalisasikan dengan modulasi dari cahaya laser dalam modulator eksternal seperti pada *Gambar 2.10*. Modulator eksternal dapat berupa *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) atau *Electroabsorption Modulator* (EAM). Modulator eksternal dikendalikan oleh sinyal elektrik yang sesuai dengan *data rate*.

Berdasarkan sinyal elektrik yang mengendalikan dan aturan operasional dari modulator eksternal, AM berbeda yang berbasis format modulasi dapat direalisasikan.



Gambar 2.9 Konfigurasi pemancar dengan modulasi eksternal
(Sumber: Hodžić, 2004:9)

2.4.5 Optical Modulator

Proses modulasi adalah suatu proses pengubahan sinyal-sinyal informasi ke dalam bentuk tertentu, sehingga dapat ditransmisikan ke tujuan. Modulasi optik atau modulasi cahaya adalah teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya berupa pulsa-pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa. Berkas cahaya yang digunakan di sini adalah berkas cahaya yang dihasilkan oleh suatu sumber cahaya. Teknik modulasi optik mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan teknik modulasi konvensional yang menggunakan sinyal elektrik sebagai sinyal pembawa informasi. Selain, ketahanannya terhadap derau yang sangat tinggi karena sinyal tidak dapat dipengaruhi oleh medan elektromagnetik, kecepatan pengiriman sinyal atau *bit rate* yang mencapai ratusan gigabit per detik juga menjadi keunggulan tersendiri.

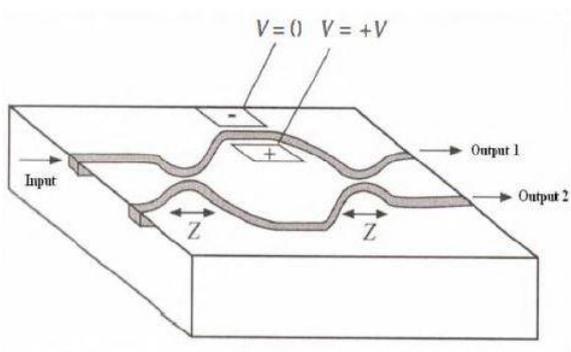
Berdasarkan tempat terjadinya modulasi cahaya, terdapat dua macam modulator optik yaitu modulator internal dan modulator eksternal. Modulator internal memodulasi cahaya di dalam perangkat sumber cahayanya, sedangkan modulator eksternal memodulasi cahaya di luar perangkat sumber cahayanya. Laser dan LED pada aplikasi sistem telekomunikasi menggunakan 2 metode untuk modulasi yaitu modulasi langsung dan modulasi eksternal.

Modulator eksternal memiliki karakteristik umum yaitu modulasi dan generasi cahaya dipisahkan, menawarkan *bandwidth* yang lebih luas hingga 60 GHz, lebih mahal dan kompleks, digunakan dalam sistem *high end*. Modulasi eksternal biasanya digunakan dalam aplikasi kecepatan tinggi seperti telekomunikasi jarak jauh. Kelebihan modulasi eksternal adalah jauh lebih cepat dan dapat digunakan dengan sumber daya laser yang lebih tinggi. Pada penelitian ini akan dibahas garis besar mengenai modulator eksternal *Mach Zehnder* dan *Electroabsorption*.

2.4.6 Mach-Zehnder Modulator

Teknik modulasi merupakan proses pengubahan sinyal informasi dalam bentuk tertentu. Modulasi optik merupakan teknik modulasi yang menggunakan berkas cahaya sebagai sinyal pembawa, berkas cahaya yang digunakan yaitu keluaran dari sumber optik LED dan Laser. Teknik modulasi yang biasa digunakan dalam komunikasi serat optik yaitu *Mach Zehnder Modulator* (MZM). (Sary, 2012)

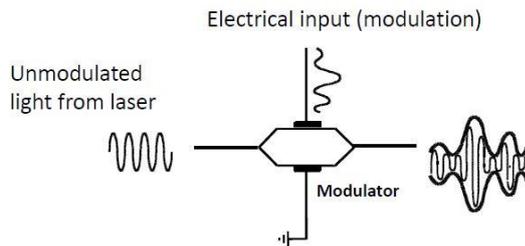
Mach Zehnder Modulator (MZM) adalah salah satu jenis modulator eksternal yang memanfaatkan interaksi sinyal masukan elektrik dengan media interaksi adalah modulator *electro-optic Mach Zehnder*. Interaksi elektro-optik itu sendiri merupakan perubahan indeks bias media interaksi optik akibat pengaruh medan elektrik yang diberikan kepada media interaksi tersebut. Sehingga karakteristik pandu gelombang optik atau karakteristik media interaksi menjadi berubah. Berubahnya karakteristik tersebut maka mode perambatan berkas cahaya akan berubah. Modulasi eksternal biasanya dicapai menggunakan modulator optik terintegrasi yang menggabungkan pandu *mach zehnder interferometer* dibuat pada lempengan *niobate lithium* (LiNbO₃). Berikut gambar perangkat dari modulator *Mach zehnder* pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Mach Zehnder Modulator (MZM)
(Sumber: Zaiton Binti Abdul Mutalip, 2010)

Secara umum Modulator *Mach-Zehnder* terdapat dua bagian sistem modulasi yaitu modulasi fasa untuk menjelaskan efek elektro optik dan modulasi amplitudo untuk menjelaskan proses interferometer. Pada Gambar 2.10 ditampilkan sinyal pembawa (cahaya) yang memasuki modulator dibagi menjadi dua jalur, satu jalur tidak diubah (*unmodulated*) dan satu jalur lainnya dimodulasi. Ketika cahaya tersebut direkombinasi kembali, dua gelombang tersebut saling mengganggu satu sama lain. Jika dua gelombang berada dalam fasa maka terjadi gangguan yang konstruktif dan *output* adalah ON. Jika keluar dari fasa maka akan terjadi interferensi destruktif dan gelombang akan saling membatalkan

satu sama lain, maka *output* adalah OFF. Untuk lampu ON diwakili biner 1 dan untuk OFF cahaya diwakili biner 0. (Norizan,2008). Berikut *Gambar 2.11* operasi dari modulator eksternal berdasarkan prinsip interferometer.



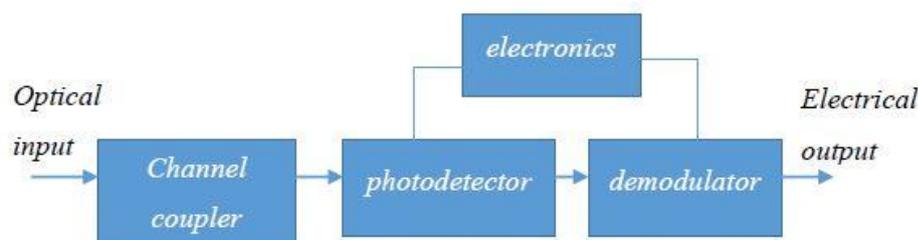
Gambar 2.11 Proses Modulator Eksternal
(Sumber : Stavros Lezekiel, 2015)

Modulator ini digunakan untuk mendukung kinerja sistem komunikasi optik, dan bekerja berdasarkan prinsip perpaduan (*interfering*) dua berkas cahaya. Perpaduan dua berkas cahaya ini akan menghasilkan intensitas maksimum ataupun minimum, tergantung dari perbedaan fasa antara kedua berkas cahaya tersebut. (Mangiwa, 2012).

Prinsip kerja Modulator *Mach Zehnder* ini, medan elektrik dari elektroda pemodulasi digunakan untuk mempengaruhi karakteristik pandu gelombang. Perubahan karakteristik ini selanjutnya akan mengubah mode perambatan berkas optik sehingga karakteristik berkas optik ikut berubah. Karena secara tidak langsung karakteristik berkas optik berubah sebagai akibat dari medan elektrik maka proses ini disebut efek elektro-optik. Bahan yang mempunyai sifat demikian disebut bahan elektro-optik.

2.4.7 Receiver

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 menjadi pulsa elektrik secara langsung. (Scott Bloom, 2002). *Gambar 2.12* menunjukkan diagram blok dari penerima optik yang terdiri dari coupler, *photodetector*, dan demodulator.

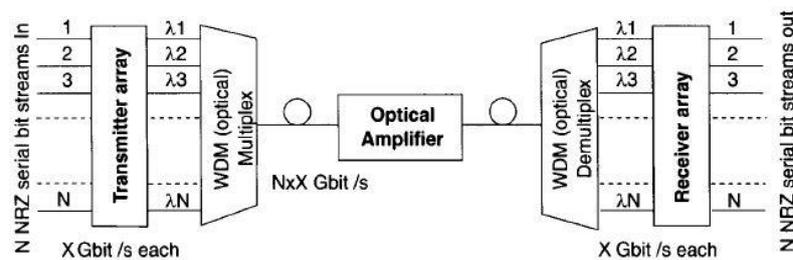


Gambar 2.12 Komponen penerima optik
(Sumber: Agrawal, 2002)

Komponen utamanya adalah *photodetector* yang mengubah cahaya menjadi listrik melalui efek fotolistrik. *Photodetector* harus memiliki sensitivitas tinggi, respon yang cepat, *noise* rendah, biaya rendah, dan kehandalan yang tinggi. Persyaratan ini paling baik dipenuhi oleh *photodetector* yang terbuat dari bahan semikonduktor (Agrawal, 2002).

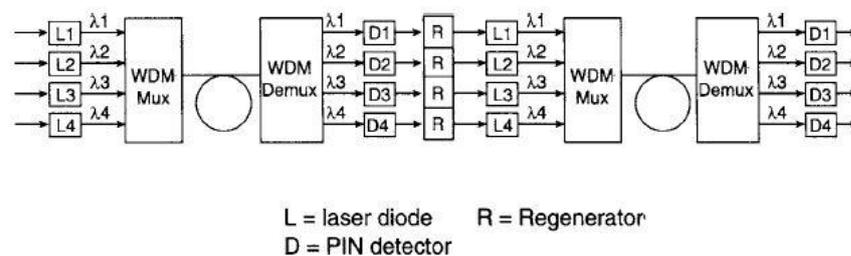
2.5 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Wavelength division multiplexing (WDM) hanyalah nama lain untuk pembagian frekuensi multiplexing (FDM). Pada bagian ini kita akan tahan dengan istilah konvensional, WDM. Konsep WDM diilustrasikan pada *Gambar 2.13*.



Gambar 2.13 Konsep WDM
(Sumber : Freeman, 2005)

WDM bisa melipatgandakan kapasitas transmisi serat optik banyak kali lipat. Misalnya, jika kita memiliki satu serat pembawa 10,0 Gbps, dan dikonversi untuk operasi WDM dengan 20 saluran WDM, di mana masing-masing dari saluran ini membawa 10,0 Gbps, total kapasitas serat tunggal ini sekarang 10.0×20 atau 200 Gbps. Band 1550-nm adalah aplikasi WDM yang paling menarik karena panjang gelombang sinyal WDM dapat diperkuat dengan total kumpulannya oleh EDFA tunggal, ini adalah keuntungan besar. Di sisi lain, jika kita ingin meregenerasi kembali turunan digital dari sinyal WDM dalam repeater, harus dipecah menjadi komponennya seperti ditunjukkan pada *Gambar 2.14*.



Gambar 2.14 Penggunaan repeater regeneratif pada link WDM.
(Sumber : Freeman, 2005)

Pertanyaan yang meyakinkan adalah, berapa banyak sinyal panjang gelombang individu yang bisa kita multipleks pada satu serat? Hal ini tergantung pada pendekatan multiplexing / demultiplexing yang digunakan, jumlah EDFA yang saling terkait, bandwidth yang tersedia, pemisahan saluran (dalam nm), dan gangguan yang khas pada sistem cahaya yang beroperasi pada kekuatan yang lebih tinggi dan teknik WDM yang digunakan. Seperti yang telah kami sebutkan di atas, jumlah kanal WDM yang bisa ditampung tergantung pada bandwidth yang tersedia dan jarak antara parameter dan karakteristik parameter lainnya. Misalnya, pada pita 1330 nm sekitar 80 nm bandwidth tersedia dan pada band 1550 nm, sekitar 100 nm bandwidth tersedia, yang meliputi bandwidth operasional dan guardbands 20 nm. Saat ini, hanya amplifier EDFA yang memadai keuntungan untuk mendukung WDM. Amplifier ini beroperasi hanya di band 1550-nm. Membiarkan sekitar 50 GHz pemisahan antara pembawa optik, serat optik dapat mendukung beberapa 100 saluran DWDM dimana masing-masing pembawa optik akan melakukan perintah sebesar 40 Gbps menggunakan frekuensi ITU (panjang gelombang) matriks. Dengan demikian, kapasitas bit rate agregat per serat akan 40 x 100 Gbps atau 4000 Gbps hanya menggunakan band 1550-nm dengan arus teknologi (Freeman, 2005).

2.6 Parameter Performansi

Parameter performansi merupakan parameter yang diamati untuk mengetahui kinerja yang dihasilkan oleh sistem. Pada penelitian ini parameter yang akan diamati adalah *bit error rate* dan *Q-factor*.

2.9.1 Bit Error Rate (BER)

BER adalah perbandingan banyaknya bit yang salah dengan banyaknya bit yang ditransmisikan. BER dalam sistem transmisi serat optik berkisar antara $10^{-6} - 10^{-10}$ (Keiser, 1991:275). Untuk menghitung BER pada sebuah sistem komunikasi terdapat beberapa cara. Secara teori dapat menggunakan perbandingan *error bit* (E_b) terhadap total bit yang ditransmisikan (T_b) dalam periode t detik.

$$BER = \frac{E_b}{T_b} \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana :

E_b = Error bit

T_b = Total bit

Performansi sistem gelombang cahaya digital ditandai dengan *bit error rate* (BER). BER dapat ditentukan sebagai jumlah *error* dalam satu detik. BER biasanya digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan rata-rata bit yang salah. Oleh karena itu, BER senilai 10^{-6} setara dengan rata-rata satu *error* per jutaan bit. Kebanyakan gelombang cahaya menentukan BER 10^{-9} sebagai persyaratan operasi. Beberapa bahkan menggunakan persyaratan BER hingga 10^{-14} .

2.9.2 *Q-factor*

Kriteria *Q-factor* untuk evaluasi kinerja pada sistem transmisi optik sering digunakan dalam kombinasi dengan pengukuran BER memungkinkan representasi terkait statistik noise secara efisien.

Hubungan antara BER dan *Q-factor*:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \dots \dots \dots (2-9)$$

Di sisi lain, *Q-factor* dapat ditandai sebagai fungsi dari *optimum decision threshold* (I_D).

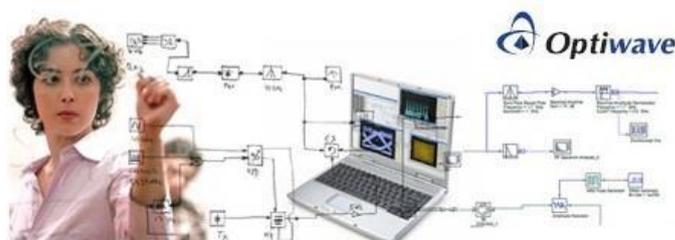
$$Q = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} \dots \dots \dots (2-10)$$

dengan :

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \dots \dots \dots (2-11)$$

Q-factor = 6 sesuai dengan BER = 10^{-9} . Untuk perhitungan *Q-factor* yang benar, jumlah minimum dari bit yang disimulasikan harus ditentukan melalui beberapa perhitungan *Q* dengan menaikkan panjang urutan bit.

2.7 *Software Optisystem*



Gambar 2.15 *Software* simulasi OptiSystem

(Sumber: www.optiwave.com)

OptiSystem merupakan piranti lunak desain yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, menguji, dan mensimulasikan jaringan optik modern (www.optiwave.com, diakses November 2017). *Optisystem* menyediakan virtual komponen optik yang lengkap dan komprehensif sehingga pengguna dapat mendesain dan menganalisis sistem jaringan

sesuai dengan kondisi nyata. Hal ini juga dimaksudkan untuk penghematan biaya, karena tidak perlu mengadakan komponen-komponen jaringan optik nyata yang *notabene* memiliki harga yang sangat mahal (Setiyadi, 2012). *Library* komponen *Optisystem* mencakup ratusan komponen yang memungkinkan Anda memasukkan parameter yang dapat diukur dari perangkat sebenarnya. Ini terintegrasi dengan alat uji dan pengukuran dari vendor yang berbeda. Pengguna dapat menggabungkan komponen baru berdasarkan subsistem dan perpustakaan yang ditentukan pengguna. Untuk memprediksi kinerja sistem, OptiSystem menghitung parameter seperti BER dan Q-Factor dengan menggunakan analisis numerik atau teknik semi-analitis untuk sistem yang dibatasi oleh interferensi dan gangguan interferensi.