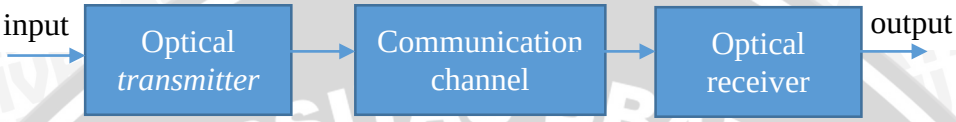
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Komunikasi Optik

Sistem *lightwave* berbeda dari sistem *microwave* hanya dalam rentang frekuensi gelombang pembawa digunakan untuk membawa informasi. Kedua jenis sistem dapat dibagi menjadi tiga bagian besar. Berikut ini menunjukkan diagram blok komunikasi optik secara umum pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram blok sistem komunikasi optik secara umum

(Sumber: Agrawal, 2002)

Diagram blok terdiri dari pemancar, saluran komunikasi, dan penerima, tiga elemen umum untuk semua sistem komunikasi. Sistem komunikasi optik dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori besar: *guided* dan *unguided*. Sesuai namanya, pada sistem *guided lightwave*, sinar optik yang dipancarkan oleh pemancar spasial terbatas. Dalam prakteknya sistem serat optik menggunakan *guided lightwave*. Istilah sistem *lightwave* juga kadang digunakan untuk sistem komunikasi serat optik, meskipun secara umum harus mencakup kedua sistem *guided* dan *unguided*.

Dalam kasus sistem komunikasi optik *unguided*, sinar optik yang dipancarkan oleh pemancar menyebar dalam ruang, mirip dengan penyebaran *microwave*. Namun, sistem optik *unguided* kurang cocok untuk aplikasi penyiaran daripada sistem *microwave* karena *beam* optik menyebar kearah depan. Maka dari itu sistem tersebut hanya memiliki jarak propagasi yang pendek. Penggunaannya umumnya menuju titik yang akurat pada pemancar dan penerima. Dalam kasus propagasi terestrial, sinyal dalam sistem *unguided* dapat memburuk karena terjadi hamburan dalam atmosfer. Hal tersebut menjadi masalah karena data yang dikirim *error* bahkan hilang. Maka dari itu terdapat sistem komunikasi *free space optic* yang akan dibahas pada Bab 2 ini.

2.2 *Free space optic* (FSO)

Komunikasi optic FSO (*free space optic*) 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 (Monika Mehra, 2007).

Hubungan antara daya yang ditransmisikan dan daya yang diterima ditunjukkan oleh persamaan 2.1. (Zuliyana, 2015)

$$P_R = P_T \left(\frac{A_{RX}}{(\theta L)^2}\right) . e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

Dimana :

P_R : daya di *receiver* (dBm)

P_T : daya di *transmitter* (dBm)

A_{RX} : *receiver* aperture area (m^2)

θ : sudut divergensi (mrad)

α : redaman atmosfer (dB)

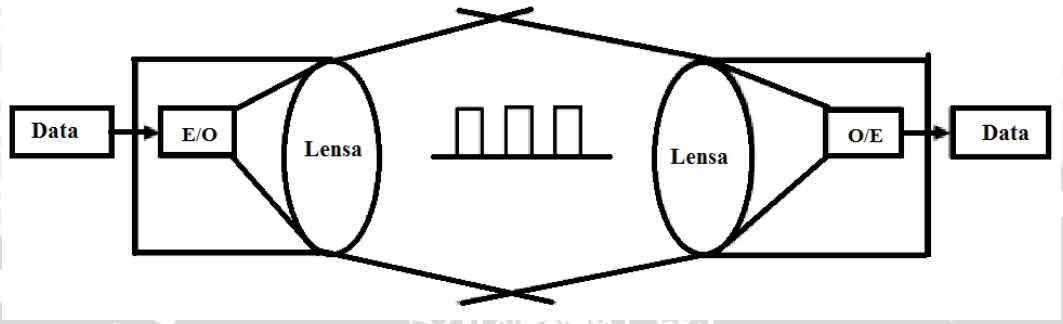
L : jarak antara *transmitter* and *receiver* (m)

Persamaan 2.1 menunjukkan bahwa daya di *receiver* sebanding dengan daya yang ditransmisikan dan luas aperture. Namun, daya di *receiver* berbanding terbalik denagan jarak *link* dan sudut divergensi. Faktor lain yang menambah redaman berkas sinyal adalah divergensi *beam*. Margin *link* FSO akan menurun dengan meningkatkanya curah hujan yang diukur dalam mm / jam untuk hujan (Soni dan Banga, 2013).

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

a) Mengkonsumsi daya yang *relative* rendah
b) Menawarkan keamanan yang tinggi selama cakupan *beam* pada daerah yang sangat sempit
c) Sensitivitas rendah terhadap interferensi elektromagnetik
d) 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 2.2 menunjukkan skema konfigurasi *link* FSO.



Gambar 2.2. Gambar Skema Konfigurasi *Link* FSO

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

Pada Gambar 2.2 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 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.

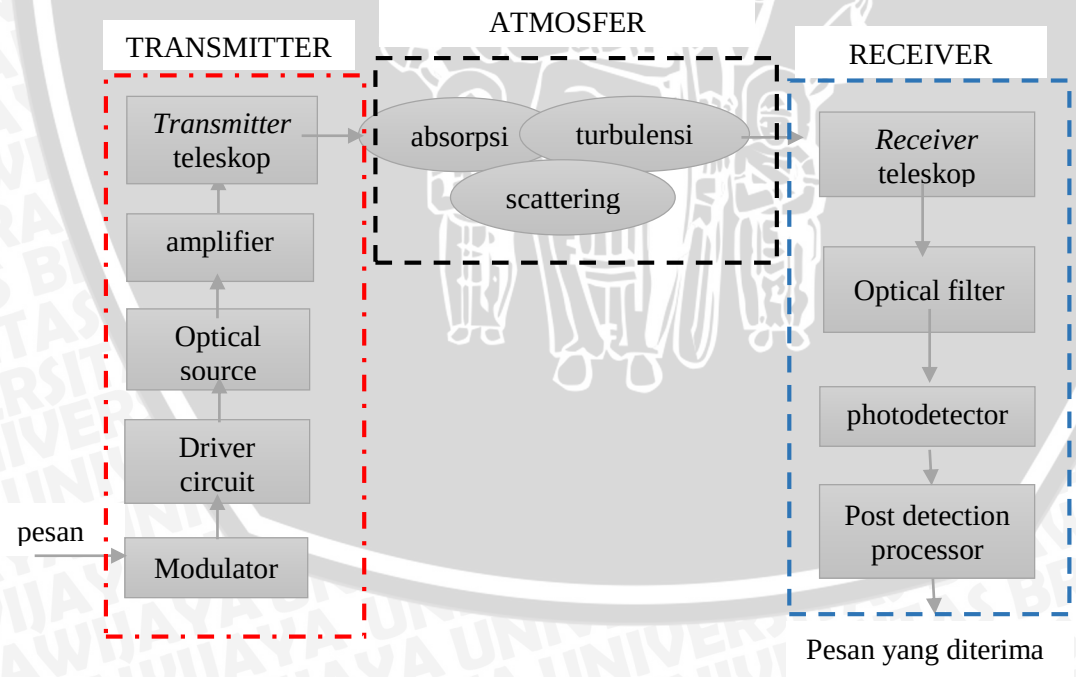
Sistem komunikasi FSO adalah teknologi yang mengalamatkan konektivitas yang diinginkan kedalam jaringan optik. Dalam *Metropolitan Area Network* (MAN), FSO dapat digunakan untuk memperluas jaringan yang sudah ada. FSO dapat digunakan untuk menghubungkan LAN ke LAN dan hubungan antar kampus. Selain itu, FSO adalah kandidat utama untuk konektivitas *last-mile*. 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 terpangaruh oleh kondisi cuaca. Sistem dengan frekuensi sinyal diatas 10 GHz, yang dalam sistem FSO dipengaruhi oleh hujan (Willebrand dan Ghuman, 2002).

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.*

2.3 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.



Gambar 2.3 Blok diagram sistem komunikasi *free space optic* secara umum (Sumber: Tri Nopiani, 2012)

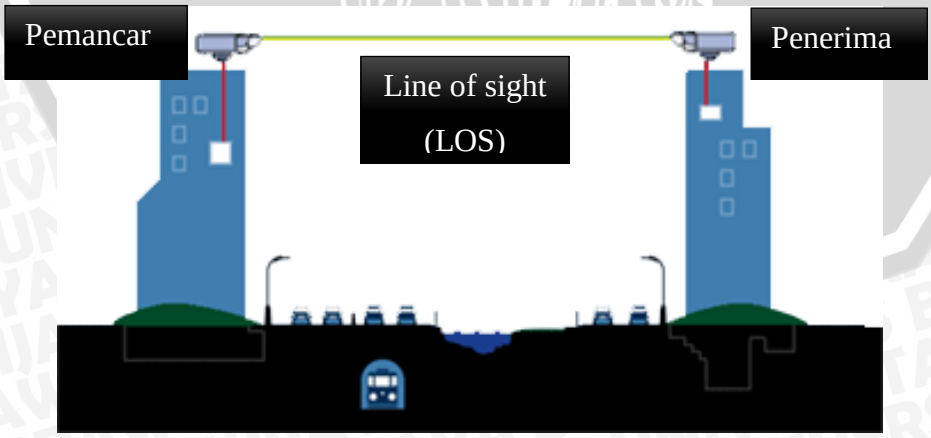
Pada gambar 2.3 dijelaskan bahwa sistem komunikasi FSO teresterial dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu: *Transmitter* (TX), atmospheric Channel dan *receiver* (RX). Inti dari sistem ini merupakan penggunaan sinar infra-merah atau LASER sebagai media transmisi pada jarak antara pemancar dan penerima secara *Line-Of Sight* (LOS), yang memiliki karakteristik transmisi *half duplex* dan *full duplex* (tergantung aplikasi pada jaringan yang dibutuhkan).

2.4 Propagasi *Line of Sight*

Propagasi *line of sight*, disebut dengan propagasi dengan gelombang langsung (*direct wave*), karena gelombang yang terpancar dari antena pemancar langsung berpropagasi menuju antena penerima dan tidak merambat di atas permukaan tanah. Oleh karena itu, permukaan bumi/tanah tidak meresamnya.

Sesuai dengan namanya, propagasi secara garis pandang yang lebih dikenal dengan *line of sight propagation*, mempunyai keterbatasan pada jarak pandang. Dengan demikian, ketinggian antena 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 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. *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).

2.5 Pemancar *Free space optic*

Transmitter terdiri dari *driver*, sumber cahaya, *encoder* dan *modulator*, seperti diperlihatkan pada gambar 2.5.

Gambar 2.5 Komponen *Transmitter* FSO

(Sumber : Perencanaan)

Blok diagram fungsi *transmitter* memiliki tugas utama modulasi sumber data ke pembawa optik, yang kemudian disebarkan melalui atmosfer ke penerima. Jenis modulasi yang paling banyak digunakan adalah modulasi intensitas (IM), di mana sumber data dimodulasi ke radiasi dari radiasi optik. Selain itu modulator eksternal juga sering digunakan dalam sistem komunikasi FSO, seperti modulator *Mach-Zehnder*. Pemancar teleskop mengumpulkan, kolimasi dan mengarahkan radiasi optik menuju teleskop penerima di ujung lain dari saluran. (Saurabh Dubey, 2014)

Peran pemancar optik adalah untuk mengkonversi sinyal listrik menjadi bentuk optik dan meneruskan sinyal optik yang dihasilkan ke dalam media optik bertindak sebagai saluran komunikasi. Pemancar optik terdiri dari sumber optik, modulator, dan sirkuit elektronik untuk mengoperasikan dua perangkat.

2.5.1 Sumber Optik

Dalam sistem FSO modern, berbagai sumber cahaya yang digunakan untuk transmisi data optik. 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 (10^9), sementara LED hanya terbatas pada rentang operasi MHz (10^6) saja.

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).

Berikut perbedaan kelebihan dan kekurangan *LED* dan *LD* diperlihatkan pada tabel 2.1 (Steve Hrlanilovic, 2005).

Tabel 2.1 Klasifikasi penggunaan laser sebagai sumber optik untuk *Wireless Optic*

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

Sumber: IEC 825-1 publication, 1993

Pembahasan fokus pada sumber transmisi berbasis semikonduktor karena laser semikonduktor saat ini adalah media transmisi utama dalam sistem FSO komersial. Laser semikonduktor merupakan golongan laser yang sangat penting saat ini, bukan hanya karena berbagai aplikasi secara langsung, namun juga sebagai pembangkit untuk laser zat padat. Material aktif laser semikonduktor menggunakan material semikonduktor direct-gap, sehingga semikonduktor elementer seperti silikon dan germanium tidak dapat digunakan. Ada beberapa jenis laser yang biasa digunakan, diantaranya adalah sebagai berikut (Norizan, 2008):

1. CW (*Continuous Wave*)

CW laser memiliki kemampuan untuk memancarkan sinyal optik secara terus menerus. Hal ini membuat perbedaan mendasar dalam konstruksi. Sehingga dalam pengoperasianya, output dari laser relatif konsisten terhadap waktu.

2. VCSEL(*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*)

Laser jenis ini hanya beroperasi pada panjang gelombang 850 nm dan sebagian besar adalah *multimode*. Biaya sangat rendah karena diproduksi dalam volume tinggi untuk aplikasi komunikasi data.

3. FP (*Fabry-Perot Laser*)

Laser ini biasa beroperasi pada panjang gelombang (1310 atau 1550 nm) dengan beberapa *longitudinal mode*. Biaya menengah antara VCSEL dan DFB.

4. DFB (*Distributed Feedback Laser*)

DFB mampu beroperasi pada panjang gelombang (1310 atau 1550 nm) dengan *single longitudinal mode*. Biaya lebih tinggi daripada VCSEL atau FP.

Pada Bab ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai laser semikonduktor jenis CW Laser.

2.5.2 CW Laser

Sebuah gelombang terus menerus atau *Continous Wave* (CW) adalah gelombang elektromagnetik yang memiliki amplitudo dan frekuensi yang konstan, durasi tak terbatas. Laser ini dibangun untuk memancarkan isnyal yang terus menerus (kontinyu). Hal ini membuat perbedaan mendasar dalam konstruksi. Dalam pengoperasiannya, output dari laser relatif konsisten terhadap waktu.

Sumber Optik yang digunakan yaitu *Continous Wave* (CW) laser. CW laser dipilih karena memiliki daya keluaran yang lebih besar dan *spectrum* yang lebih

kecil pada pola radiasi lebih kecil. Pada penelitian ini digunakan CW laser type DS-7009 yang bekerja pada panjang gelombang 1550 nm memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi CW laser type DS-7009

Frekuensi (f)	193.1 Thz
Daya output (P)	40-100 mW
Linewidth	1 MHz
Temperature	-40 – 85 ^{o}C

Sumber : *Datasheet* CW laser type DS-7009

2.5.3 Panjang Gelombang

Memilih panjang gelombang transmisi yang benar melibatkan banyak faktor, seperti ketersediaan komponen, harga, jarak yang dibutuhkan transmisi, pertimbangan keamanan mata, dan sebagainya. Ada beberapa *window* yang mendekati transparansi (atenuasi < 0.2 dB/km), yaitu *window* antara range 780 nm dan 1600 nm. Panjang gelombang yang sering digunakan adalah di 850 nm dan 1550 nm.

a. Panjang gelombang 850 nm

Panjang gelombang ini cocok untuk operasi FSO, dan beberapa vendor menyediakan sumber daya laser yang lebih tinggi yang beroperasi di wilayah ini. Panjang gelombang 850 nm dapat diandalkan, murah, performansi yang tinggi dari komponen *transmitter* dan detektor dapat dan umumnya digunakan pada peralatan transmisi dan jaringan.

b. Panjang gelombang 1550 nm

Panjang gelombang ini sangat cocok untuk transmisi ruang bebas, kualitas yang tinggi dari pemancar dan detektor. Kombinasi redaman yang rendah dan kemampuan komponen yang tinggi pada panjang gelombang ini membuat kemungkinan pengembangan dari WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) pada sistem FSO. Bagaimanapun juga komponen tersebut secara umum lebih mahal, dan detektor yang digunakan memiliki sensitivitas yang rendah serta memiliki daerah penerimaan yang lebih kecil. Oleh karena itu, panjang gelombag ini juga digunakan pada sistem fiber *long haul*, dan banyak perusahaan terus berusaha untuk

mengurangi biaya dan meningkatkan performansi pada komponen 1520-1600 nm. Lebih dari itu, panjang gelombang ini cocok dengan teknologi EDFA (*Erbium-doped Fiber amplifier)*, yang penting untuk daya tinggi (>500 mW) dan sistem dengan data rate yang tinggi (>2.5 Gbps). Sebagai akibatnya, sebesar 20-65 kali daya dapat ditransmisikan pada daerah panjang gelombang 1520-1600 nm daripada yang dapat ditranmsmisikan pada dareah 780 – 850 nm untuk keamanan mata yang sama. (Scott Bloom, 2003)

Persamaan panjang gelombang, frekuensi, atau energi. Panjang gelombang (λ) , frekuensi (v) dihubungkan dengan persamaan (2.2) (Altowij: 162, 2014)

$$\lambda = \frac{c}{v} \qquad (2.2)$$

Dimana c adalah kecepatan cahaya (3 x 10^8 m/s). Energi berbagai komponen dari spektrum elektromagnetik ditunjukkan dengan persamaan :

$$E=hv \qquad (2.3)$$

Dimana h adalah konstanta Planc (6.63×10^{-34} Joule second). Satuan panjang gelombang adalah mikrometer (μm atau sama dengan 10^{-6} m) dan nanaometer (10^{-9} m). Frekuensi dalam Hertz (Hz), dengan Hertz sama dengan satu putaran pada satu putaran gelombang sinusoidal per sekon. Satuan energi adalah elektron-volt.

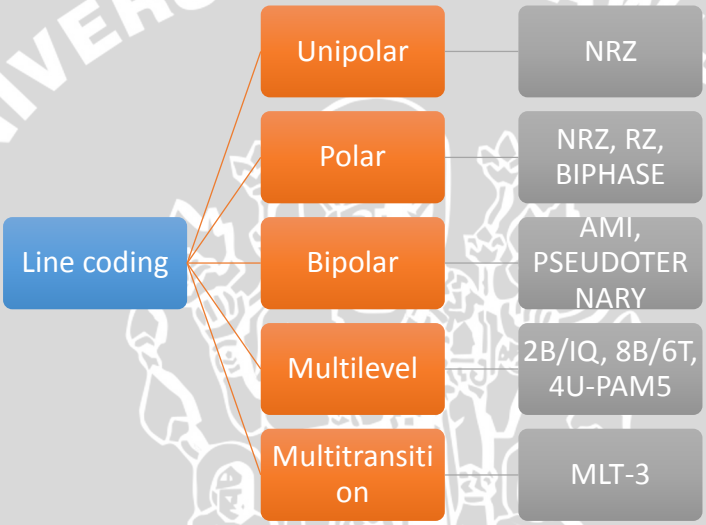
2.5.4 *Line Coding*

Line coding adalah metode pengkodean setiap bit data ke beberapa elemen sinyal dimana setiap elemen sinyal pulsa tegangan diskrit dan terputus-putus. Salah satu fungsi dasar *line coding* pada sistem komunikasi serat optik adalah untuk menambahkan bit-bit *redundancy* ke dalam suatu *stream* data untuk meminimalisir *error* karena adanya *Interchannel Interference.* 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* ditunjukan pada gambar 2.6

Gambar 2.6. 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). Skema pengkodean dibagi menjadi lima kategori besar seperti yang ditunjukan pada Gambar 2.7.

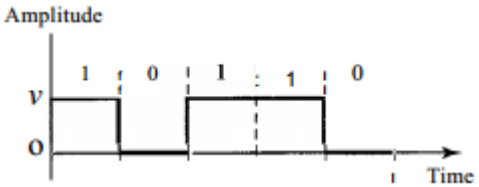


Gambar 2.7. *Line Coding schemes*

(Digambar ulang setelah sumber: Forouzan, 2007)

➢ ***Unipolar***

Dalam skema *unipolar*, semua level sinyal pada satu sisi sumbu waktu, baik di atas atau di bawah. Pada umumnya skema *unipolar* dirancang sebagai skema *Non-Return-to-Zero* (NRZ) di mana tegangan positif mendefinisikan bit 1 dan tegangan nol mendefinisikan bit 0. Oleh karena itu disebut NRZ karena sinyal tidak kembali ke nol pada bit tengah. Gambar 2.3 menunjukkan skema *unipolar* NRZ.



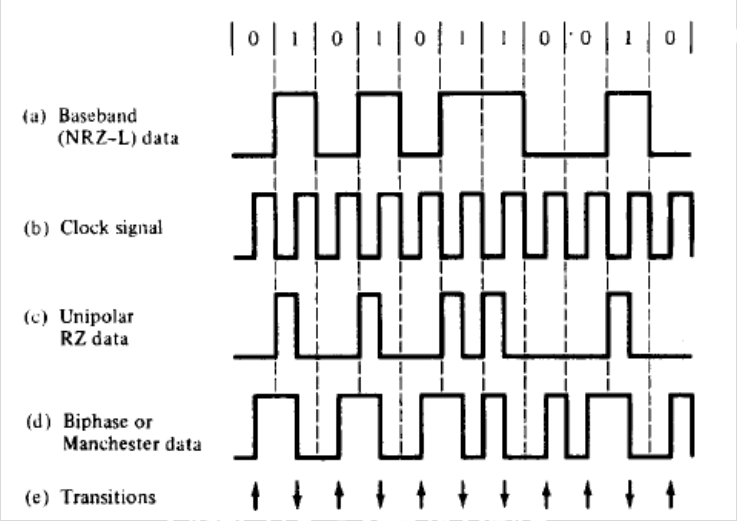
Gambar 2.8. Skema *Unipolar* NRZ

(Sumber: Forouzan, 2007)

- ***Polar***

Dalam skema *polar*, tegangan berada di kedua sisi dari sumbu waktu. Dalam sinyal *polar*, satu logika diwakili oleh level tegangan positif, dan yang lainnya dengan level tegangan negatif.

Tiga tipe dasar *binary line code* yang umum digunakan pada komunikasi serat optik adalah *Return to Zero* (RZ) , *Non Return to Zero* (NRZ) dan *Phase Encoded* (PE) atau lebih dikenal dengan *Manchester*. Pada format pengkodean NRZ setiap data yang dikirim menempati periode bit secara penuh sedangkan pada RZ lebar pulsa dua kali lebih kecil daripada NRZ. Untuk format pengkodean *Phase Encoded* kedua hal itu digabungkan (Gerd Keiser, 2010). Beberapa teknik *line coding* yang paling sering digunakan pada serat optik ditunjukan pada Gambar 2.9



Gambar 2.9. (*a)NRZ-L baseband data; (b)Clock signal ; (c)Unipolar RZ data ; (d)Biphase atau Manchester data ; (e) Transitions occurring within a bit period for Manchester data*

(Sumber: Gerd Keizer, 2010)

- ***Bipolar***

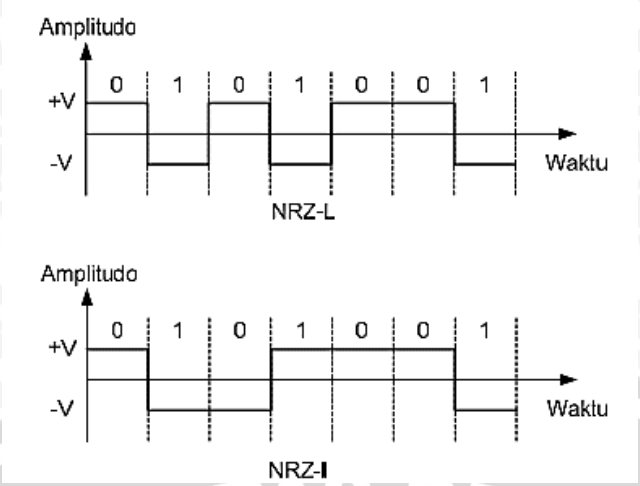
Pada pengkodean bipolar (*multilevel binary*), terdapat tiga level tegangan yaitu, positif, negatif, dan nol. Level tegangan untuk satu elemen data adalah pada nol, sementara level tegangan untuk elemen lain bergantian antara positif dan negatif.

2.5.5 *Non Return to Zero* (NRZ)

Format kode NRZ merupakan cara termudah dalam mengefisienkan penggunaan *bandwidth*. Kelemahan utama untuk sinyal NRZ adalah keberadaan komponen DC dan kurangnya kemampuan sinkronisasi. Format pengkodean NRZ yang paling sederhana adalah NRZ-*level* (NRZ-L). Pengkodean NRZ-L sering dipergunakan untuk membangkitkan atau mengartikan data digital melalui terminal atau perangkat-perangkat tetapi tidak ada kemampuan untuk koreksi dan deteksi *error* serta tidak dapat melakukan *self clocking (timing).* Untuk setiap data *stream* yang dikirim serial, sebuah *on-off (unipolar)* sinyal direpresentasikan sebagai bit 1 dari masukan arus atau cahaya yang masuk pada periode bit dan bit 0 direpresentasikan sebagai tidak adanya pulsa yang ditransmisikan. Aplikasi dari NRZ-L diantaranya dapat digunakan pada sirkuit digital dan digunakan pada gelombang PCM (Latha et al, 2011)

Variasi lain dari *line coding* NRZ yaitu *Non Return to Zero Invert* (NRZ-I). Sama halnya dengan NRZ-L, NRZ-I mempertahankan pulsa dengan tegangan konstan untuk durasi waktu bit. Pada NRZ-I bit 1 dan bit 0 dibedakan oleh ada atau tidak adanya perubahan level teganggan dari sinyal. Bit 1 pada NRZ-I merepresentasikan kode dimana suatu transisi (rendah ke tinggi atau tingi ke rendah) pada awal suatu bit time sedangkan bit 0 merepresentasikan tidak adanya transisi. Hal ini mengindikasikan bahwa NRZ-I merupakan salah satu contoh dari diferensial encoding dimana informasi yang akan dikirim diwakilkan dengan perubahan antara elemen sinyal. Keuntungan menggunakan pengkodean difrensial ini adalah lebih dapat diandalkan untuk mendeteksi transisi saat adanya *noise.*

Konversi data digital menjadi sinyal digital dengan menggunakan NRZ-L dan NRZ-I ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Pada NRZ-L level tegangan menentukan nilai bit, bit 1 dan bit 0 direpresentasikan dengan level tegangan dari sinyal, sedangkan pada NRZ-I bit 1 dan bit 0 dibedakan oleh ada atau tidaknya perubahan level tegangan dari sinyal. Berdasarkan bentuk sinyal NRZ-L dan NRZ-I dapat dilihat bahwa kedua modulasi polar ini masih akan mengalami apa yang disebut dengan *baseline wandering.* Pada NRZ-L *baseline wandering* akan terjadi apabila terdapat deretan panjang bit 1 atau bit 0, sedangkan pada NRZ-I *baseline wandering* hanya terjadi pada deretan panjang bit 0 saja sehingga NRZ-I lebih baik dari pada NRZ-L



Gambar 2.10. Jenis *line coding* yang sering digunakan pada komunikasi *fiber optic*

(Sumber: Forouzan, 2007)

2.5.6 *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. Kekuarangan 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 bandwith NRZ dan juga tidak terdapat kemampuan koreksi dan deteksi *error.* (Gerd Keiser, 2010).

2.5.7 Modulator Optik

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 bitrateyang 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

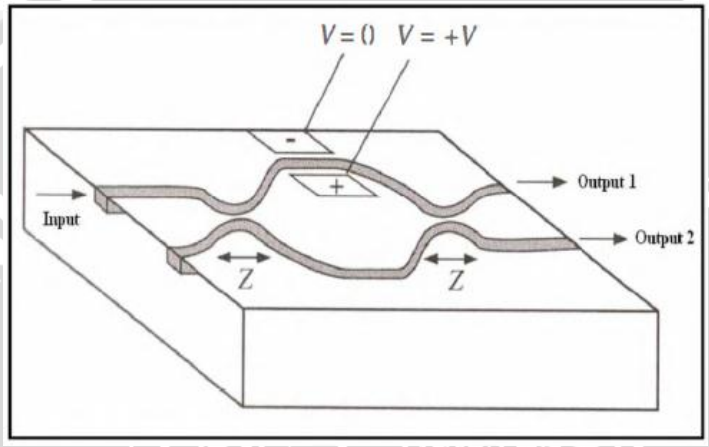
Pada modulator eksternal memiliki karakteristik umum yaitu Modulasi dan generasi cahaya dipisahkan, Menawarkan *bandwidth* yang lebih luas hingga 60 GHz, Lebih mahal dan kompleks, Digunakan dalam sistem *high end*. Modulasi eksternal biasanya digunakan dalam aplikasi kecepatan tinggi seperti telekomunikasi 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 Zhender* dan *Electroabsorption.*

2.5.8 *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 interaksimenjadi berubah. Dengan berubahnya karakteristik tersebut maka mode perambatan berkascahayaakan berubah.

Modulasi eksternal biasanya dicapai menggunakan modulator optik terintegrasi yang menggabungkan pandu mach zhender interferometer dibuat pada lempengan *niobate lithium* (LiNbO3). *Waveguide* dibuat menggunakan proses litograf sama dengan yang digunakan dalam pembuatan semikonduktor. Wilayah pandu sedikit didoping dengan ketidakmurnian untuk meningkatkan indeks bias sehingga cahaya dipandu melalui perangkat. Berkut gambar perangkat dari modulator *Mach zhender* pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Mach-Zhender Modulation*

(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 2.11 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)

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

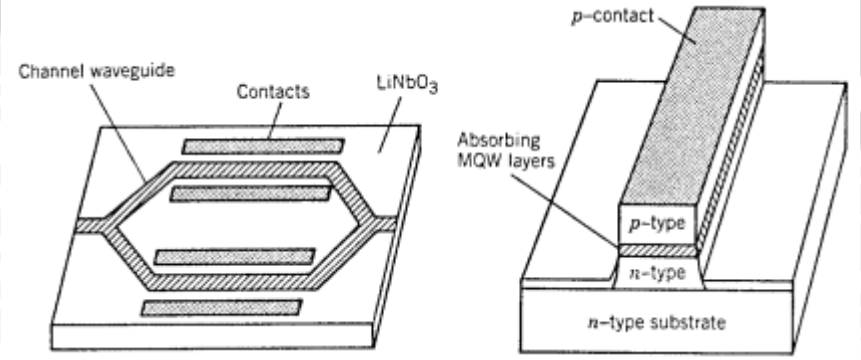
minimum, tergantung dari perbedaan fasa antara kedua berkas cahaya tersebut. (Mangiwa, 2012).

Prinsip kerja Modulator *Mach Zhender* 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.

Modulator *Mach Zehnder* suatu perangkat optik yang bekerja berdasarkan prinsip perpaduan atau interferensi dua berkas cahaya koheren yang diperoleh dari satu berkas asal dimana berkas tersebut dibagi dan disatukan kembali untuk dipadukan pada tempat yang berbeda. Modulator ini bekerja mempengaruhi berkas cahaya yang melintas dengan menggunakan medan elektrik dari elektroda pemodulasi. Sehingga akan mengubah mode perambatan berkas cahaya akibatnya karakteristik berkas cahaya ikut berubah.

2.5.9 Modulator *Electroabsorption*

Modulator *Electroabsorption* (EAM) adalah perangkat semikonduktor yang dapat digunakan untuk modulasi intensitas sinar laser melalui tegangan listrik. *Electro-Absorption* Modulator (EAM) merupakan modulator yang memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan modulator lainnya. EAM memiliki keunggulan yaitu : modulasi berkecepatan tinggi, pengaturan dengan tegangan rendah, *extinction* ratio yang tinggi, mudah diintegrasikan dengan device lainnya. Berikut gambar modulator optik pada gambar 2.12.



(a) **(b)**

Gambar 2.12 (a) Konfigurasi Modulator LiNbO3 pada *Mach–Zehnder*; (b) Semiconductor Modulator berdasarkan Electroabsorption
(Sumber: Agrawal, 2002)

Electro-Absorption Modulator (EAM) bekerja menggunakan prinsip dasar efek *electroabsorption* yaitu perubahan koefisien absorbsi berdasarkan pada perubahan medan listrik. Pada EAM bulk semikonduktor, absorbsi disebabkan oleh bergeraknya elektron ke energi yang lebih rendah seiring dengan bertambahnya medan listrik yang disebabkan oleh kombinasi dari absorbsi *band-to-band* dan proses *tunneling* (*Franz-Keldysh effect*) Sedangkan pada EAM *Quantum Well* (QW), transisi energi antara elektron dan *hole* yang terperangkap (*confined*) pada energi level berkurang ketika terdapat medan listrik yang diberikan pada *growth direction* (Quantum Confined Stark Effect, QCSE).

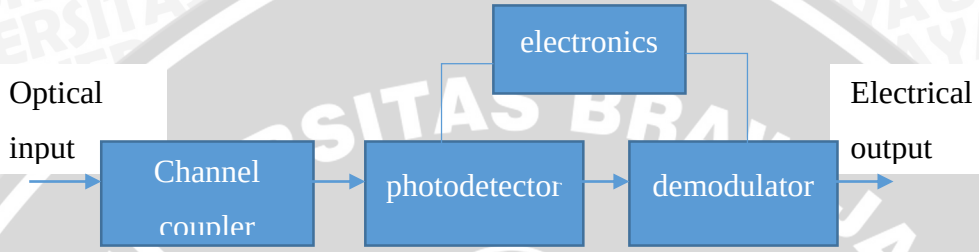
Kebanyakan EAM dibuat dalam bentuk *waveguide* dengan elektroda untuk menerapkan medan listrik dalam arah tegak lurus terhadap sinar termodulasi. Dibandingkan dengan modulasi *Electro-optic* (EOM), EAM dapat beroperasi dengan tegangan jauh lebih rendah (beberapa volt bukan sepuluh volt atau lebih). Mereka dapat dioperasikan pada kecepatan yang sangat tinggi, *bandwidth* modulasi puluhan gigahertz dapat dicapai, yang membuat perangkat ini berguna untuk komunikasi serat optik. Sebuah fitur nyaman adalah bahwa EAM dapat diintegrasikan dengan umpan balik didistribusikan dioda laser pada satu *chip* untuk membentuk pemancar data dalam bentuk sirkuit terpadu fotonik.

Modulator elektro-penyerapan didasarkan pada struktur semikonduktor dimana cahaya diserap bila tegangan diterapkan untuk semikonduktor. Mereka sering dibuat dari bahan yang sama seperti laser semikonduktor, membuat mereka berguna dalam membentuk perangkat terintegrasi elegan. Sejak itu, menempati ruang yang sangat sedikit. Modulator ini beroperasi di reverse bias, sehingga konsumsi daya bisa sangat rendah. Selain itu, mereka memiliki efisiensi modulasi tinggi, dan mereka dapat bekerja dengan frekuensi IF kurang dari 10GHz sedangkan MZM mampu bekerja dengan frekuensi IF kurang dari 1GHz. Selain itu, tegangan bias dari 1-3V biasanya cukup untuk EAM sedangkan untuk MZM tegangan DC 4-5 V diperlukan. EAM telah ditunjukkan dengan rasio kepunahan per panjang perangkat melebihi 20 dB / mm pada tegangan 4 V. (Razali ngah, 2008)

2.6 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)

Gambar 2.13 menunjukkan diagram blok dari penerima optik yang terdiri dari coupler, photodetektor, dan demodulator.



Gambar 2.13 Komponen penerima optik
(Sumber: Agrawal, 2002)

Komponen utamanya adalah photodetektor yang mengubah cahaya menjadi listrik melalui efek fotolistrik. Persyaratan untuk photodetektor mirip dengan sumber optik. Photodetektor harus memiliki sensitivitas tinggi, respon yang cepat, *noise* rendah, biaya rendah, dan kehandalan yang tinggi. Ukurannya harus kompatibel dengan ukuran inti *fiber*. Persyaratan ini paling baik dipenuhi oleh *photodetector* yang terbuat dari bahan semikonduktor (Agrawal, 2002).

2.6.1 Detektor

Detektor berfungsi untuk mendeteksi cahaya yang datang dan mengubahnya ke besaran listrik. Syarat-syarat yang harus dimiliki oleh sebuah detektor optik adalah sebagai berikut:

1. Mempunyai sensitivitas tinggi.
2. Responnya cepat.
3. Derau yang dihasilkan kecil.
4. Tersedia cukup *bandwidth* untuk menyalurkan data rate yang diinginkan.
5. Tidak sensitif terhadap perubahan suhu.
6. Secara fisik kompatibel dengan dimensi kabel.
7. Mempunyai waktu operasi yang lama.

Detektor penerima terhubung ke *aperture* penerima melewati *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 2.3 Perbandingan *PIN Photodiode dan avalanche photodiode (APD)*.

Tabel 2.3 Perbandingan Karakteristik Detektor Optik

No.	Karakteristik	Jenis detektor optik	
		PIN	APD
1.	Responsivitas	0,35 – 0,55	50 – 120
2.	*Noise*	Kecil	Lebih besar
3.	Penguatan	1	150 – 250
4.	Arus cahaya	Kecil	Lebih besar
5.	Waktu jangkit (ns)	0,06 – 1	0,1 – 2

Sumber: Muflihatin, 2002:16

Photodetector PIN Phototodiode pada panjang gelombang 1550 nm menggunakan material InGaAs dengan spesifikasi ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.4 Spesifikasi *photodetector* PIN

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Quantum efficiency	η	%	75–90	50–55	60–70
Dark current	I_d	nA	1–10	50–500	1–20
Rise time	T_r	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	V_b	V	50–100	6–10	5–6

Sumber : Agrawal, 2002

APD pada panjang gelombang 1550 nm menggunakan bahan InGaAs dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Spesifikasi APD **InGaAs**

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R_{APD}	A/W	80–130	3–30	5–20
APD gain	M	—	100–500	50–200	10–40
k-factor	k_A	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Dark current	I_d	nA	0.1–1	50–500	1–5
Rise time	T_r	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.2–1	0.4–0.7	1–10
Bias voltage	V_b	V	200–250	20–40	20–30

Sumber : Agrawal, 2002

Photodetector APD memiliki gain internal yang menghasilkan sinyal-to-*noise* rasio lebih baik bila dibandingkan dengan menggunakan tahap amplifikasi eksternal, seperti eksternal sirkuit transistor. *Gain* dari APD (*Avalanche Photodiode)* meningkat dengan meningkatnya tegangan bias menurut rumus (2.4) sebagai berikut: (Willebrand, 2002: 31).

$$M = \frac{1}{1-(\frac{v_d}{V_{BR}})^n} \qquad (2.4)$$

dimana V_{BR} adalah tegangan balik *breakdown* kebalikan dari dioda, v_d adalah tegangan bias cadangan, dan n merupakan faktor empiris yang lebih dari 1. Tegangan *breakdown* tergantung pada struktur diode yang spesifik dan dapat bervariasi kira-kira antara 20 dan 500 volt.

Responsivitas ρ untuk *gain* yang dihasilkan APD dioda dapat ditulis pada persamaan (2.5) sebagai berikut: (Willebrand, 2002: 31).

$$\rho = \frac{Me\lambda\eta}{hc} \qquad (2.5)$$

dimana η adalah kuantum efisiensi dengan gain. Responsivitias *avalanche* berkisar antara 20-80 A / W. Nilai ini jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan dioda PIN silikon yang memiliki responsivitas antara 0,5-0,7 A / W.

Responsivitas ρ dapat diubah ke dalam bentuk arus *photo I* dengan menggunakan rumus berikut : (Willebrand, 2002: 31).

$$i = \frac{Me\lambda\eta P}{hc} \qquad (2.6)$$

Dimana *P* adalah daya input optik.

Untuk keperluan deteksi sinyal multi Gbps, meningkatnya *noise bandwidth* membatasi sensitivitas dari penerima. *Avalanche Photo Diode (APD)* dapat meningkatkan sensitivitas hingga 10 dB. *Forward Error Correction* juga dapat meningkatkan sensitivitas hingga lebih dari 4 dB. Mungkin tantangan paling signifikan dari meningkatnya rate menuju multi Gbps adalah ukuran (diameter) detektor. Karena kapasitansi, detektor dengan *bandwidth* yang lebih tinggi memiliki ukuran yang lebih kecil. *Photodetector* komersial memiliki variasi ukuran mulai dari 30 μm untuk 10 Gbps hingga 70 μm untuk 2,5 Gbps. Bidang permukaan yang terbatas ini, mengakibatkan detektor ini membutuhkan *pointing* yang akurat.

2.7 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.

2.7.1 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).

a. 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 2.6:

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

Tabel 2.6 Nilai visibilitas internasional untuk kondisi cuaca dan pengendapan

International visibility code				
Weather conditions	**Precipitation**	**mm/h**	**Visibility (m)**	**Attenuation (dB/km)**
			0	
Dense fog			50	315
Thick fog			200	75
Moderate fog			500	28.9
Light fog	Storm	100	770	18.3
Very light fog			1 000	13.8
	Strong rain	25	1 900	6.9
Light mist	Snow		2 000	6.6
	Average rain	12.5	2 800	4.6
Very light mist			4 000	3.1
	Light rain	2.5	5 900	2
Clear air			10 000	1.1
	Drizzle	0.25	18 100	0.6
Very clear air			20 000	0.54
			23 000	0.47
			50 000	0.19

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

2.7.2 Efek Hujan Terhadap Sistem FSO

Hujan merupakan prespitasi uap air yang berasal dari awan yang terdapat di atmosfer. Prespitasi 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 m^2 dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir. Tinggi curah hujan diasumsikan sama disekitar tempat penakaran, luasan yang tercakup dalam sebuah penakaran curah hujan tergantung pada homogenitas daerahnya maupun kondisi cuaca lainnya (Universitas Sumut). Berdasarkan Badan Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara dan Geofisika (BMKG) di Indonesia menyatakan terdapat beberapa kriteria intensitas curah hujan yang ditunjukkan pada tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.7 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 : bmkg.go.id

Scattering yang terjadi selama hujan disebut *non-selective scattering,* ini 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. Ini adalah alasan utama bahwa redaman yang ditimbulkan hujan lebih rendah daripada yang ditimbulkan kabut. Hal penting yang perlu diingat adalah teknologi *wireless* RF yang menggunakan frekuensi mendekati diatas 10 GHz akan mengalami dampak dari hujan dan sedikit terkena dampak dari asap. Ini karena kesesuaian yang mendekati dari gelombang RF ke radius hujan, keduanya lebih besar dari tetesan embun pada kabut. Koefisien *scattering* hujan dapat dihitung menggunakan hukum *Stroke* pada persamaan 2.7 berikut ini: (Fadhil, 2012)

$$\beta_{rain\ scat} = \pi a^2 N_a Q_{scat} \left(\frac{a}{\lambda}\right) \qquad (2.7)$$

Dimana

a : radius hujan (cm)

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

Q_{scat}: Efisiensi *scattering*

Distribusi hujan $N_a$dapat dihitung dengan persmaan (2.8) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$N_a = \frac{R}{1.33\ (\pi a^3) V_a} \tag{2.8}$$

Dimana

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

V_a: batas kecepatan hujan

Batasan kecepatan hujan dibrikan oleh persamaan (2.9) sebagai berikut: (Fadhil, 2012)

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \tag{2.9}$$

Dimana

ρ : kerapatan air (ρ= 1 gr/cm^3)

g: konstanta gravitasi (g=980 cm/sec^2)

η: viskositas udara (η=1.8*10^{-4} gr/cm.sec)

Redaman hujan dapat dihitung dengan persamaan *Beer* (2.10): (Fadhil, 2012)

$$\tau = \exp(-\beta_{rain\ scat} L) \tag{2.10}$$

2.7.3 Jarak *Free space optic*

Penggunaan sistem FSO kira-kira antara range 25-25000 m dan sistem satelit dapat mencapai 2000 km. Sebagian besar sistem dapat menjangkau lebih besar dari 1 km dengan menggabungkan tiga atau lebih pengoperasian laser yang diparelel untuk mengurangi masalah terkait dengan jarak. FSO dapat mencapai jarak ribuan km di ruang vakum (Willebrand, 2002). Tabel 2.8 menunjukkan klasifikasi jarak propagasi pada sistem komunikasi FSO.

Tabel 2.8 Klasifikasi jarak propagasi sistem FSO

Klasifikasi jarak propagasi	Jarak
Sangat dekat	1-10 m
Dekat	10-100 m
Menengah	100-1000 m
Jauh	>1000 m

Sumber: Sudaryanto, 2004

2.8 Parameter Performansi *Free Space Optic*

2.8.1 *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). Salah satu hal utama yang dapat menyebabkan kesalahan deteksi (*error*) pada penerima adalah *noise*. *Shot noise* dan thermal *noise* adalah dua jenis *noise* yang memberikan kontribusi paling besar atas terjadinya *error* deteksi ini. *Shot noise* merupakan dampak adanya sifat diskrit yang dimiliki elektron yang menimbulkan gangguan pada sinyal. *Shot noise* direpresentasikan dalam rumus: (A Zainol Rachman, 2008)

$$Ssh = 2qI_L\mathrm{B} \qquad (2.11)$$

Sedangkan thermal *noise* terjadi akibat panas yang ditimbulkan resistor dalam detektor. Energi panas ini menghasilkan aliran elektron sehingga membentur salah satu elektrode yang pada akhirnya menghasilkan arus. Arus ini dapat tercampur dengan arus yang berasal dari sinyal info sehingga memungkinkan terjadi salah deteksi. Secara matematis, thermal *noise* dituliskan dalam rumus berikut: (A Zainol Rachman, 2008)

$$S_{th} = \frac{4KTB}{R} \qquad (2.12)$$

Kedua *noise* tersebut biasa digabung menjadi: (A Zainol Rachman, 2008)

$$Q = \frac{(I_1 - I_{th})}{\sigma_1} = \frac{(I_{th} - I_0)}{\sigma_0} \quad \sigma = 2qIB + \frac{4kTB}{R} \tag{2.13}$$

Untuk menghitung BER pada sebuah sistem komunikasi terdapat beberapa cara. Secara teori dapat menggunakan perbandingan *error bit* (Eb) terhadap total bit yang ditransmisikan (Tb) dalam periode t detik.

$$BER = \frac{Eb}{Tb} \tag{2.14}$$

Keterangan :

Eb = *Error bit*

Tb = Total bit

Dapat juga dihitung dengan rumus matematis : (A Zainol Rachman, 2008)

$$BER = \frac{e^{\frac{Q^2}{2}}}{Q\sqrt{2\pi}} \tag{2.15}$$

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}.

2.8.2 *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. *Q-factor* ditandai dengan: (Vorgelegt, 2004:78)

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \tag{2.16}$$

dimana μ_1,μ_0 dan σ_1,σ_0 adalah deviasi rata-rata dan deviasi standar dari angka dan nol secara berturut-turut. Di sisi lain, *Q-factor* dapat ditandai sebagai fungsi dari *optimum decision threshold* (I_D). (Vorgelegt, 2004:78).

$$Q = \frac{I_D - \mu_0}{\sigma_0} = \frac{\mu_1 - I_D}{\sigma_1} \quad (2.17)$$

Dengan

$$I_D = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (2.18)$$

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.

Hubungan antara BER dan *Q-factor* ditunjukkan pada persamaan (2.19). (Vorgelegt, 2004:78).

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (2.19)$$

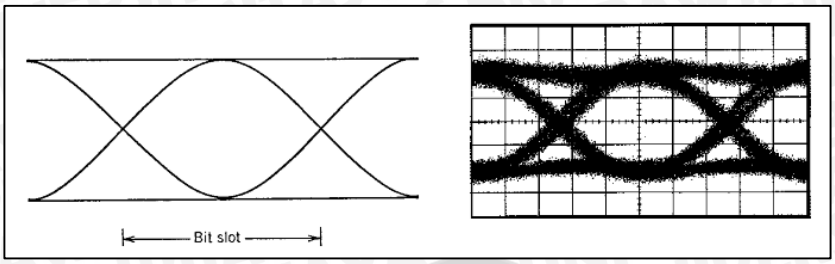
dengan :

$$Q = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} \quad (2.20)$$

Metode perhitungan *Q-factor* memungkinkan estimasi BER yang bagus, tetapi berdasarkan ketidaktelitian distribusi Gaussian nilai BER diprediksi lebih besar daripada BER yang diharapkan. Q-faktor memberikan deskripsi kualitatif pada performansi *receiver* karena ini adalah fungsi dari SNR (*Signal to Noise Ratio*) optik. *Q-Factor* memberikan SNR minimum untuk mempertahankan BER tertentu untuk sinyal. Parameter tersebut saling berhubungan yaitu semakin tinggi nilai *Q-factor*, BER yang terjadi semakin baik.

2.8.3 *Eye pattern (eye diagram)*

Eye Pattern atau *eye diagram* adalah tampilan osiloskop dari sinyal digital yang mengalami proses sampling beberapa kali untuk mendapatkan tampilan karakteristik sinyal tersebut. Dalam pengukuran, parameter yang diperhatikan dari tampilan *eye diagram* adalah *eye opening*. Pengukuran *eye diagram* didasarkan pada domain waktu. Satu *eye opening* menyatakan satu bit slot sinyal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Eye Pattern*

(Sumber: Gerd, 2004)

Eye diagram adalah cara untuk melihat sinyal elektronik dan menentukan seberapa baik sinyal tersebut sebagai pembawa informasi. *Eye diagram* terdiri dari banyak (ratusan hingga jutaan) contoh sinyal yang ditampilkan di atas satu sama lain. Pada peralatan yang sangat cepat hasil yang didapatkan mungkin hanya satu atau dua titik pada jejak dalam satu penyisiran. Tetapi menampilkannya bersama-sama memungkinkan kita untuk melakukan penilaian terhadap kualitas sinyal yang diterima sangat baik (Dutton, 1998:348).

Berikut adalah aspek-aspek penting pada *eye diagram*:

- *Vertical eye opening* mengindikasikan jumlah dari perbedaan *level* sinyal yang muncul untuk mengindikasi perbedaan antara bit 1 dan bit 0. Semakin besar perbedaannya, semakin mudah untuk membedakan antara 1 dan 0. Hal ini dipengaruhi oleh *noise* yang ada pada system.
- *Horizontal eye opening* mengindikasikan jumlah *jitter* yang muncul pada sinyal. Semakin lebar *eye opening* pada sumbu ini semakin kecil masalah kemungkinan munculnya *jitter*.
- Ketebalan dari pita sinyal pada titik persilangan nol juga merupakan pengukuran yang bagus dari *jitter* pada sinyal.
- Indikasi paling utama dari bagus atau tidaknya sinyal tersebut adalah ukuran dari *eye opening* itu sendiri. Semakin besar *eye opening* semakin mudah untuk mendeteksi sinyal dan semakin rendah akan menimbulkan *error rate*. Saat *eye diagram* hampir tertutup akan sangat sulit atau bahkan tidak mungkin memperoleh data yang berarti dari sinyal tersebut.

2.9 *Software Optisystem*

Gambar 2.14 Software *Optisystem*

Optisystem adalah desain *software* rangkaian yang lengkap, yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, tes, dan mensimulasikan *link* optik di lapisan transmisi jaringan optik yang modern. Termasuk pemancar, penerima dan komponen DSP untuk *end-to-end* 16-QAM, DP-16-QAM dan QPSK DP-optik desain sistem dan kinerja analisis yang koheren.

Dalam sebuah industri dimana efektivitas biaya dan produktivitas merupakan hal yang penting untuk kesuksesan.Keunggulan *Optisystem* dapat meminimalkan kebutuhan waktu dan mengurangi biaya yang berkaitan dengan desain sistem optik, *link*, dan komponen. *Optisystem* adalah *software* yang inovatif, berkembang pesat, dan alat desain yang kuat, yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, tes, dan mensimulasikan hampir setiap jenis *link* optik di lapisan transmisi dari spektrum yang luas dari jaringan optik dari LAN, SAN, MAN untuk ultra-jarak jauh. Menawarkan lapisan transmisi desain sistem komunikasi optik dan perencanaan dari komponen ke tingkat sistem, dan secara visual menggambarkan analisis dan skenario.

Optisystem memungkinkan pengguna untuk merencanakan, tes, dan mensimulasikan:

- Desain jaringan WDM / TDM atau CATV
- SONET / SDH desain cincin
- *Transmitter*, saluran, *amplifie*r, dan desain penerima
- Peta desain dispersi
- Estimasi BER dan sistem *penalty* yang berbeda dengan model *receiver* yang berbeda
- Penguatan sistem BER dan perhitungan *Link budget*

a. Komponen *Library*

Komponen *library* dari *optisystem* mencakup ratusan komponen yang memungkinkan Anda untuk memasukkan parameter yang dapat diukur dari perangkat nyata. Hal tersebut terintegrasi dengan uji dan Peralatan pengukuran dari *vendor* yang berbeda. Pengguna dapat menggabungkan komponen baru berdasarkan subsistem dan *user-defined library*, atau memanfaatkan *co*-simulasi dengan alat pihak ketiga seperti MATLAB atau SPICE.

b. Bahasa Script yang kuat

Dalam *Optisystem* kita dapat memasukkan ekspresi aritmatika untuk parameter dan membuat parameter global yang dapat dibagi antara komponen dan subsistem menggunakan standar bahasa VB Script. Bahasa skrip juga dapat memanipulasi dan mengontrol *Optisystem*, termasuk perhitungan, tata letak penciptaan dan pengolahan ketika setelah menggunakan halaman naskah.

c. *Multiple* Layout

Kita dapat dapat membuat banyak desain menggunakan proyek file yang sama, yang memungkinkan untuk membuat dan memodifikasi desain dengan cepat dan efisien. Setiap file proyek *Optisystem* dapat berisi banyak versi desain. Versi desain dihitung dan diubah secara independen, tetapi perhitungan hasil dapat dikombinasikan di versi yang berbeda, memungkinkan untuk perbandingan desain.

d. Optik Ruang bebas (FSO)

Fitur baru yang memungkinkan simulasi *link* komunikasi *intersatellite* kompleks.

e. *Constellation* dan Diagram polar

Sebuah mesin perhitungan baru dalam *Optisystem* digunakan untuk memperkirakan kesalahan simbol dalam daerah dan target yang ditentukan oleh pengguna.

f. Analisis lanjutan *toolsets*

Fotonik penganalisa semua-parameter mengukur mode polarisasi dispersi (PMD) dan mencatat beberapa jejak secara bersamaan. Fitur baru yang kuat ini dapat mengukur rugi-rugi insersi (IL), *differential group delay* (DGD), *polarization chromatic dispersion* (PDC), rata-rata depolarisasi, dispersi, kemiringan disperse dan *group delay* (GD).

g. OptiPerformer

Optiwave memperkenalkan OptiPerformer, perangkat visualisasi sistem komunikasi optik bebas yang memanfaatkan daya penuh dari *optisystem*. Penggunaan OptiPerformer untuk membuat skenario desain yang dapat digunakan oleh kolega non R&D untuk meningkatkan pemahaman mengenai penjualan komponen dan sistem photonic (*Optisystem*, 2009).