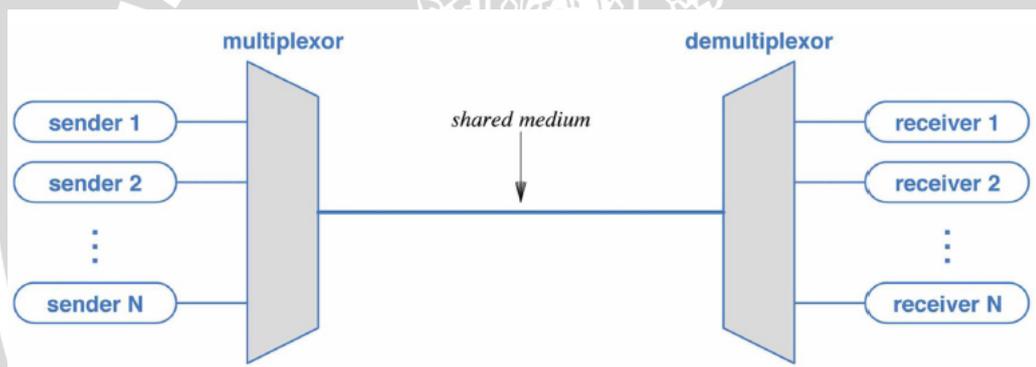


## BAB II DASAR TEORI

Dasar teori berisi tinjauan bahan bacaan yang bersifat akademik untuk menyelesaikan masalah. Bahan bacaan yang digunakan didasarkan pada referensi-referensi dan hasil penelitian yang telah diuji kebenarannya. Teori yang dibahas adalah tentang prinsip kerja TDM, karakteristik POF, proses penjalaran cahaya pada serat optik, fenomena *macrobending*, dan parameter performansi sistem komunikasi serat optik yang terdiri atas BER dan *eye pattern*.

### 2.1. *Time Division Multiplexing* (TDM)

*Multiplexing* adalah metode menggabungkan beberapa sinyal informasi (analog atau digital) untuk ditransmisikan secara bersamaan melalui satu media atau saluran transmisi.



Gambar 2.1. Konsep teknik *multiplexing*  
(Sumber : Pierson Prentice Hall, Inc., 2009)

Sinyal *multiplexing* ditransmisikan melalui sebuah medan atau saluran transmisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. *Multiplexing* membagi kapasitas saluran komunikasi tingkat tinggi ke dalam beberapa saluran logis tingkat rendah, satu untuk setiap sinyal pesan atau aliran data yang ditransfer. Sebuah proses sebaliknya, yang dikenal sebagai *demultiplexing*, dapat mengekstrak saluran asli di sisi penerima.

Beberapa alasan penggunaan *multiplexing* adalah :

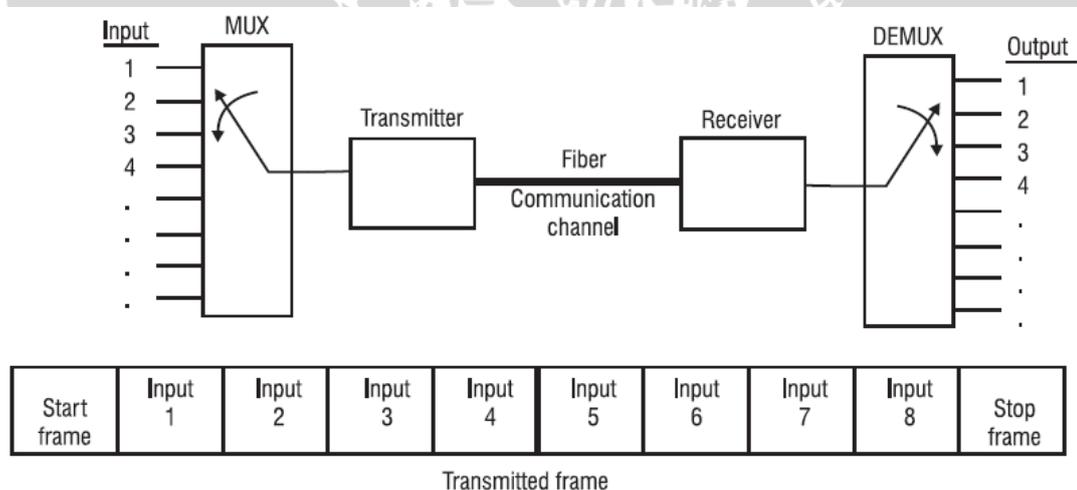
- Menghemat biaya penggunaan saluran komunikasi
- Memanfaatkan sumber daya seefisien mungkin
- Kapasitas terbatas dari saluran komunikasi digunakan semaksimal mungkin
- Karakteristik permintaan komunikasi pada umumnya memerlukan penyaluran data dari beberapa terminal ke titik yang sama

Tujuan dari *multiplexing* adalah untuk berbagi *bandwidth* dari saluran transmisi tunggal diantara beberapa pengguna. Metode *multiplexing* yang umum digunakan dalam sistem komunikasi serat optik adalah *Time Division Multiplexing* (TDM).

*Time Division Multiplexing* (TDM) adalah sebuah proses pentransmisiian beberapa sinyal informasi melalui satu media transmisi dengan masing-masing sinyal ditransmisikan pada periode waktu tertentu.

Pada TDM, periode waktu dari saluran informasi atau *fiber* dibagi diantara banyak sumber data. *Multiplexer* MUX dapat digambarkan sebagai sejenis “*rotary switch*” yang berputar pada kecepatan yang sangat tinggi, secara masing-masing menghubungkan setiap *input* ke saluran komunikasi untuk jangka waktu yang tetap. Proses sebaliknya terjadi pada *output* dengan perangkat yang dikenal sebagai *demultiplexer* atau DEMUX. Setelah masing-masing saluran telah terhubung secara berurutan, proses akan berulang terus. Satu siklus yang lengkap disebut sebagai *frame*.

Untuk memastikan bahwa setiap saluran pada *input* terhubung ke saluran yang sesuai pada *output*, *start* dan *stop frame* akan ditambahkan untuk mensinkronisasi *input* dengan *output*. Sistem TDM dapat mengirimkan informasi menggunakan skema modulasi digital. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem *Time Division Multiplexing* (TDM)  
(Sumber : Massa, 2000)

Jumlah data yang dapat ditransmisikan menggunakan TDM ditentukan oleh tingkat *Output* MUX dan didefinisikan oleh Persamaan (2-1) (Massa, 2000).

$$\text{MUX output rate} = N \times \text{Maximum input rate} \quad (2-1)$$

Dimana  $N$  adalah jumlah saluran (*channel*) input dan *Maximum input rate* adalah kecepatan data (*data rate*) tertinggi dalam *bits/second* dari berbagai input. *Bandwidth* dari saluran komunikasi harus setidaknya sama dengan MUX output rate. Parameter lain yang umum digunakan dalam menggambarkan kapasitas informasi dari sistem TDM adalah *channel switching rate* dan didefinisikan oleh Persamaan (2-2) (Massa, 2000).

$$\text{Channel switching rate} = \text{Input data rate} \times \text{Number of channels} \quad (2-2)$$

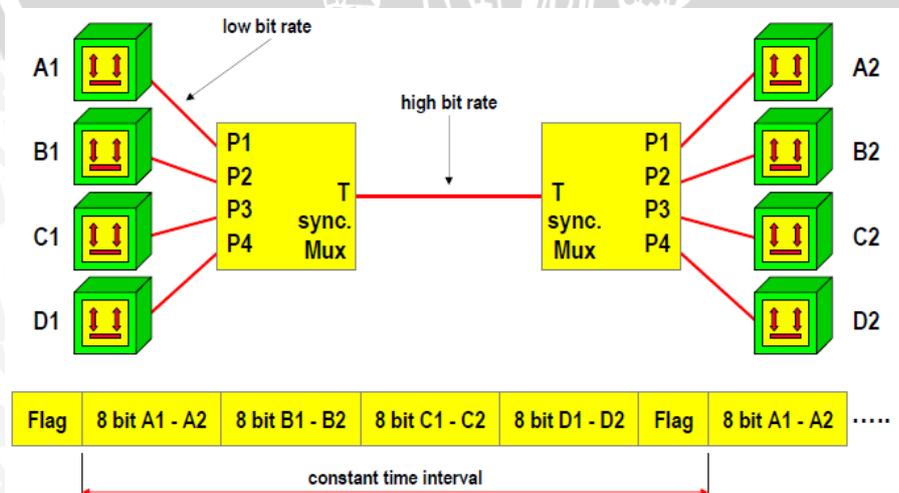
Sistem TDM tidak memerlukan filter yang mahal, dan jumlah filter yang digunakan lebih sedikit, sehingga biaya peralatan terminal sistem ini lebih rendah. Kabel dengan spesifikasi rendahpun dapat digunakan untuk sistem TDM, hal ini dikarenakan TDM memiliki *regenerative repeating* yang dapat menghilangkan pengaruh buruk dari *noise*, kecacatan dan *crosstalk* yang rendah.

Perubahan level (*level fluctuation*) *channel* hanya dipengaruhi oleh karakteristik peralatan terminal itu sendiri dan tidak tergantung sama sekali dengan perubahan *loss* pada saluran (*line loss fluctuation*).

Pada prakteknya TDM dibagi menjadi dua jenis yaitu *synchronous* TDM dan *asynchronous* TDM.

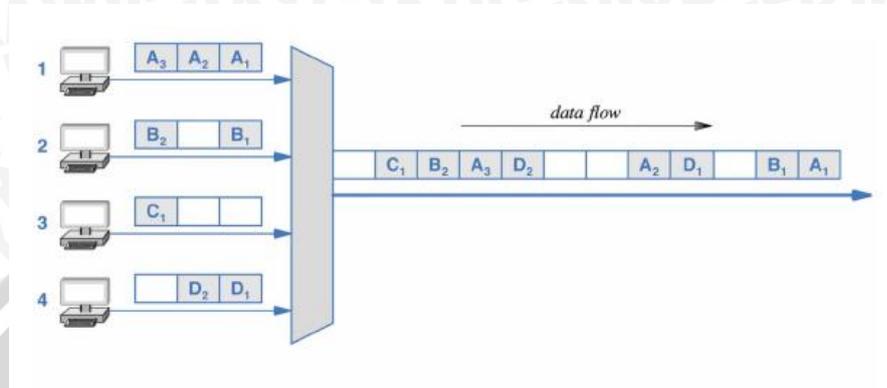
### 2.1.1 Synchronous TDM

*Synchronous* TDM mentransmisikan *time slot* dari semua sumber meskipun ada sumber yang tidak mempunyai data untuk dikirim. *Synchronous* TDM dimungkinkan apabila *data rate* yang dapat dicapai oleh media transmisi lebih besar daripada *data rate* sinyal digital yang akan di kirim. Sistem *synchronous* TDM ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Sistem *Synchronous* TDM  
(Sumber: D.I Lindner / D.I Haas, 2012)

*Synchronous* TDM secara periodik membuat *frame* dengan jumlah dan panjang *time slot* yang tetap. Tiap *frame* diawali dengan *flag* sebagai *frame synchronization* yang digunakan untuk membedakan satu *frame* dengan *frame* lainnya. *Framing* digunakan untuk sinkronisasi, manajemen jaringan dan deteksi eror antara *multiplexer* dan *demultiplexer*. Prinsip kerja *synchronous* TDM ditunjukkan oleh Gambar 2.4.

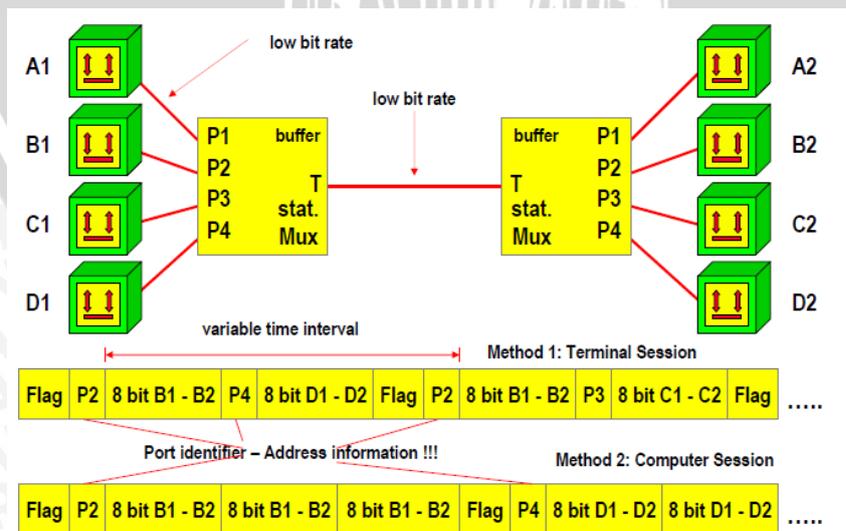


Gambar 2.4. Prinsip Kerja *Synchronous* TDM  
(Sumber : Pearson Prentice Hall, 2009)

### 2.1.2 *Asynchronous* TDM

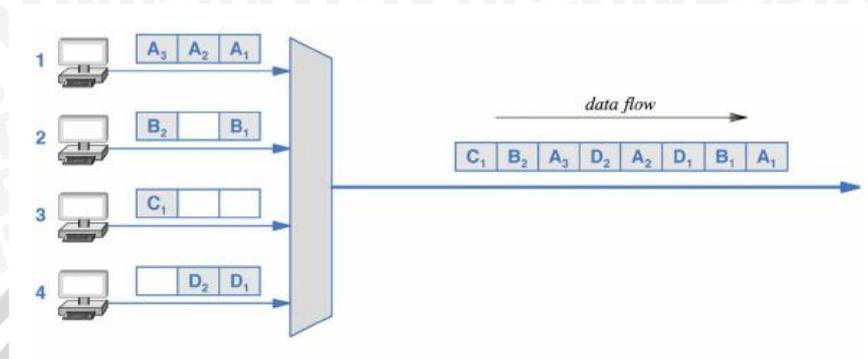
*Asynchronous* TDM juga dikenal sebagai TDM (STDM). *Asynchronous* TDM memiliki *data rate* saluran *output* yang lebih kecil dari total *data rate* dari semua sumber.

Untuk menghindari adanya slot waktu yang kosong akibat tidak adanya data (atau tidak aktifnya pengguna) pada saat *sampling* setiap *input line*, maka proses *sampling* hanya dilakukan untuk *input line* yang aktif saja, sehingga diperlukan penambahan informasi kepemilikan data pada setiap *time slot* berupa identitas pengguna atau identitas *input line* yang bersangkutan. Sistem *asynchronous* TDM ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Sistem *Asynchronous* TDM  
(Sumber: D.I Lindner / D.I Haas, 2012)

Pada sisi pengirim, fungsi *multiplexer* adalah *scanning buffer*, mengumpulkan data sampai *frame* penuh, kemudian mengirimkan *frame* tersebut. Hal ini mengakibatkan adanya tambahan *overhead*, karena diperlukan *field address* dan *length*. Informasi *address* ini dibutuhkan untuk memastikan bahwa data diantarkan kepada penerima yang tepat. Prinsip kerja *asynchronous TDM* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Prinsip Kerja *Asynchronous TDM*  
(Sumber : Pearson Prentice Hall, 2009)

## 2.2. *Plastic Optical Fiber (POF)*

*Plastic Optical Fiber (POF)* atau serat optik plastik merupakan salah satu media transmisi komunikasi optik yang terbuat dari plastik polimer, dimana lapisan inti dibuat dari *Polymethyl methacrylate (PMMA)* sedangkan lapisan *coating* dibuat dari *Perfluoropolimer*. Penggunaan POF saat ini telah meluas di berbagai bidang yakni telekomunikasi, instrumentasi medis, transmisi data serta dapat juga digunakan sebagai sensor suhu. POF Secara teori POF mampu menyediakan 1 Gbps di atas 50 meter. Selain itu instalasi konektor dapat dilakukan sendiri dan sangat mudah.

Jenis sumber cahaya yang potensial untuk digunakan pada POF adalah LED maupun diode laser merah (650-670 nm) yang lebih ekonomis daripada LED atau diode laser inframerah (800 – 1500 nm). POF dapat digunakan sebagai saluran transmisi sepanjang puluhan meter dengan menggunakan LED dan sepanjang ratusan meter dengan menggunakan diode laser.

POF mempunyai beberapa kelebihan yang tidak dimiliki oleh media transmisi lain, di antaranya adalah *bandwidth* yang sangat lebar, ukuran kecil, lebih ringan, bebas dari interferensi elektromagnetik, tidak mengalirkan arus sehingga tidak akan terjadi percikan api, tidak berkorosi, serta memiliki *Numerical Aperture (NA)* yang besar sehingga kemampuan untuk mengumpulkan energi cahaya tinggi. *Plastic optical fiber* juga lebih fleksibel dan tak mudah putus atau patah dibandingkan serat optik kaca. Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan spesifikasi beberapa jenis media transmisi yang

digunakan untuk sambungan tetap ke pelanggan (*fixed telecommunication*) termasuk *plastic optical fiber*.

Tabel 2.1 Perbandingan Spesifikasi Media Transmisi Sambungan Tetap ke Pelanggan (*Fixed Telecommunication*)

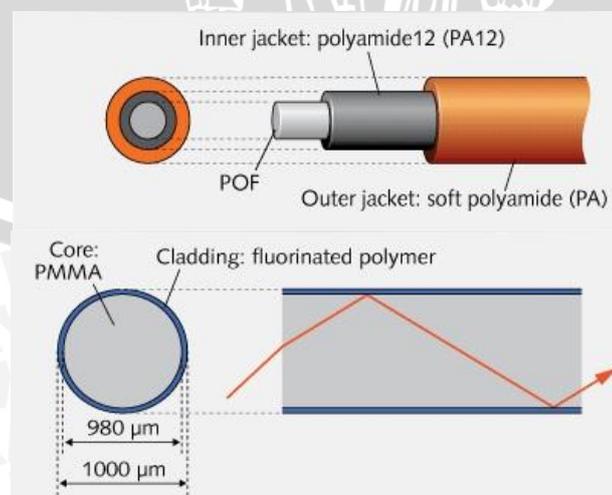
Karakteristik	Kabel Tembaga	Koaksial	CAT5e	POF
Bandwidth	<100 MHz	<300 MHz	<350 MHz	<300 MHz
Ketebalan	0.5-1 cm	1-1.5 cm	1-1.5 cm	1-2 mm
Brown/Greenfield	Brownfield	Kebanyakan Brownfield	Kebanyakan Greenfield	Greenfield
Instalasi Konektor	Kompleks	Mudah	Kompleks	Sangat mudah
Bend radius	Kecil	Medium	Medium	Kecil
EMI	Ya	Sangat rendah	Sangat rendah	Tidak

(Sumber: Genexis, 2013)

### 2.2.1. Struktur POF

Struktur dasar *plastic optical fiber* sebagaimana serat optik kaca adalah silinder konsentris yang bagian dalamnya disebut inti (*core*) dan bagian luarnya disebut selubung (*cladding*). Cahaya menjalar di dalam inti berdasarkan prinsip *total internal reflection* akibat perbedaan indeks bias pada bidang batas inti – selubung.

POF yang paling umum digunakan adalah yang intinya terbuat dari *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) dengan indeks bias sekitar 1.49. Sebagai selubung umumnya digunakan bahan-bahan kopolimer dari *methacrylate*, *fluoro-alkyl*, dan *tetrafluoroethylene* dengan indeks bias sekitar 1.40 – 1.42. Serat optik PMMA dapat dioperasikan pada temperatur -40 hingga 85°C, kelembaban hingga 95%, pembebanan hingga 9 kg, serta jari-jari kelengkungan 15-17 cm. Terkait dengan *bandwidth* transmisi, SI-POF dengan *numerical aperture* 0.5 memiliki *bandwidth* sebatas 5 MHz (Yu *et al*, 2007). Pada Gambar 2.7 diperlihatkan struktur bagian POF.

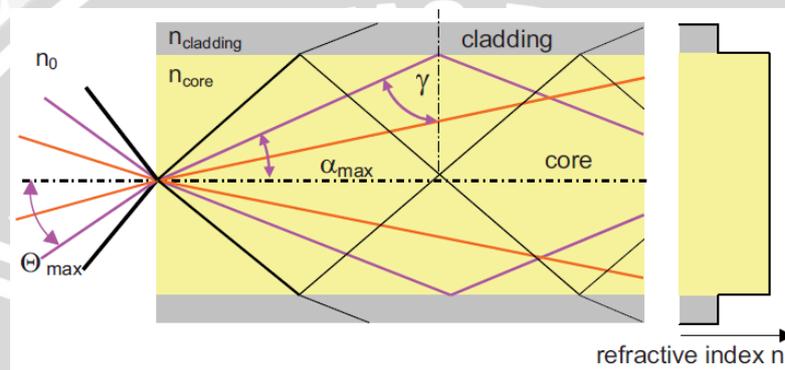


Gambar 2.7. Struktur Bagian POF  
(Sumber: Otake, 2012)

Diameter serat umumnya sekitar 1 mm dan 90% merupakan inti karena selubungnya merupakan lapisan tipis yang menyelimuti inti sehingga lebih mudah menerima cahaya dibandingkan dengan serat optik kaca *multimode*.

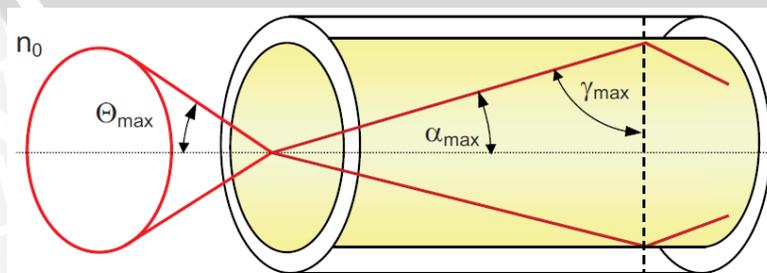
### 2.3. Penjalaran Cahaya Serat Optik

Proses transmisi sinyal cahaya pada serat optik menggunakan prinsip pemantulan sempurna (*total internal reflection*). Cahaya dapat merambat di dalam serat optik melalui proses pemantulan sempurna yang disebabkan oleh perbedaan indeks bias inti dan indeks bias selubung seperti pada Gambar 2.8. Panjang jangkauan sinar ditentukan oleh proses pemantulan sempurna ini.



Gambar 2.8. Prinsip Penyaluran Cahaya Dalam Serat Optik  
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Dalam serat optik terdapat parameter *Numerical Aperture* (NA). *Numerical aperture* adalah ukuran kemampuan sebuah serat untuk menangkap cahaya. NA merupakan parameter yang merepresentasikan sudut penerimaan maksimum dimana berkas cahaya masih bisa diterima dan merambat didalam inti serat. Sudut penerimaan ini dapat beraneka macam tergantung kepada karakteristik indeks bias inti dan selubung serat optik. Nilai NA biasanya sekitar 0,20 sampai 0,29 untuk serat gelas, *plastic optical fiber* memiliki NA yang lebih tinggi dapat melebihi 0,5. Gambar 2.9 menunjukkan sudut penerimaan pada serat optik.



Gambar 2.9 Sudut Penerimaan pada Serat Optik  
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Jika sudut datang berkas cahaya lebih besar dari NA atau sudut kritis maka berkas tidak akan dipantulkan kembali ke dalam serat melainkan akan menembus cladding dan akan keluar dari serat. Semakin besar NA maka semakin banyak jumlah cahaya yang diterima oleh serat. Akan tetapi sebanding dengan kenaikan NA menyebabkan lebar pita berkurang, dan rugi penyebaran serta penyerapan akan bertambah. Oleh karena itu, nilai NA besar hanya baik untuk aplikasi jarak pendek dengan kecepatan rendah. Besarnya NA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-3) (Ziemann, 2008) :

$$NA = \sin \theta_{maks} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-3)$$

dengan:

$n_1$  = indeks bias inti

$n_2$  = indeks bias cladding

$\Delta$  = beda indeks bias relatif

Serat optik terdiri dari beberapa jenis. Namun secara umum terdapat dua jenis serat optik yaitu:

#### 1. *Singlemode*

Serat optik jenis *singlemode* mempunyai inti yang kecil antara 8-10 mikron. Karena dimensinya sangat kecil, maka hanya ada satu *mode* cahaya yang lewat di dalamnya. Biasanya digunakan untuk transmisi jarak jauh dengan kecepatan tinggi dan memiliki *loss* yang lebih kecil dari serat optik *multimode*.

#### 2. *Multimode*

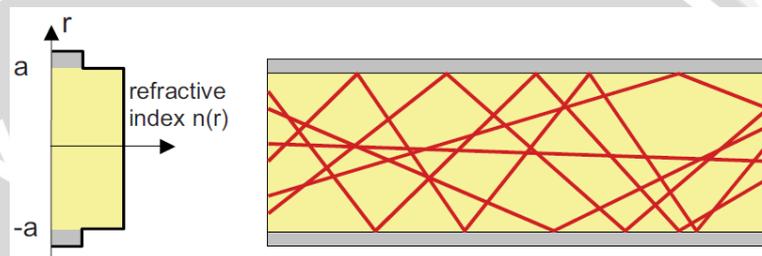
Serat optik jenis multimode mempunyai inti yang lebih besar dari *singlemode* dengan diameter 50-80 mikron. Pada jenis ini banyak *mode* cahaya yang lewat di dalamnya. Pada saat sebuah pulsa cahaya masuk ke serat optik *multimode*, daya pulsa didistribusikan hampir ke seluruh *mode* dimana setiap *mode* memiliki kecepatan yang berbeda, sehingga *mode* dengan kecepatan yang lebih tinggi akan sampai terlebih dahulu. Fenomena ini disebut *modal dispersion* dan mengakibatkan pulsa yang dikirim mengalami pelebaran. Serat optik jenis ini biasanya digunakan untuk transmisi jarak pendek dengan kecepatan rendah karena memiliki *loss* yang besar.

Berdasarkan mode perambatannya, serat optik *multimode* dibagi dua yaitu:

##### a. *Step index multimode*

Serat optik *step index multimode* memiliki nilai indeks bias inti yang seragam di seluruh bagian inti. Keseragaman ini mengakibatkan adanya selisih yang cukup besar antara indeks bias inti dengan indeks bias selubung. Mode perambatan cahaya *step index multimode* ditunjukkan pada Gambar 2.10. Perbedaan indeks bias (*refractive index*) inilah yang disebut dengan beda indeks ( $\Delta$ ) dan secara sistematis dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-4) (Keiser, 1991):

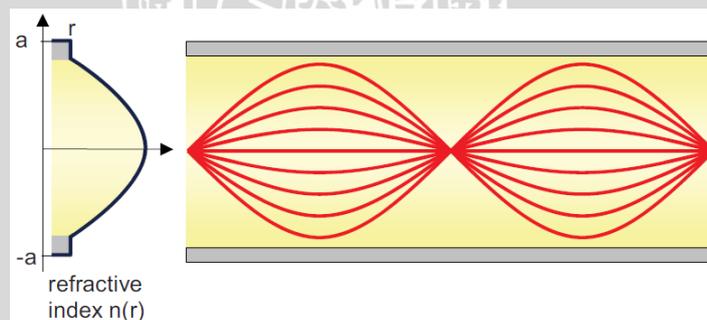
$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-4)$$



Gambar 2.10. Mode Perambatan Cahaya dalam Serat Optik *Step Index* (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

b. *Graded index multimode*

Jenis ini memiliki inti dengan indeks bias yang berangsur-angsur mengecil ketika jaraknya semakin jauh dengan sumbu inti dan akan membentuk *mode* parabola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Mode Perambatan Cahaya dalam Serat Optik *Graded Index* (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

## 2.4. Sistem Komunikasi Serat Optik

Sistem komunikasi secara umum terdiri dari pemancar (*transmitter*) sebagai sumber pengirim informasi, detektor penerima (*receiver*) informasi, dan media transmisi sebagai sarana untuk melewatkannya. Pengirim bertugas untuk mengolah informasi yang akan disampaikan agar dapat dilewatkan melalui suatu media sehingga informasi tersebut

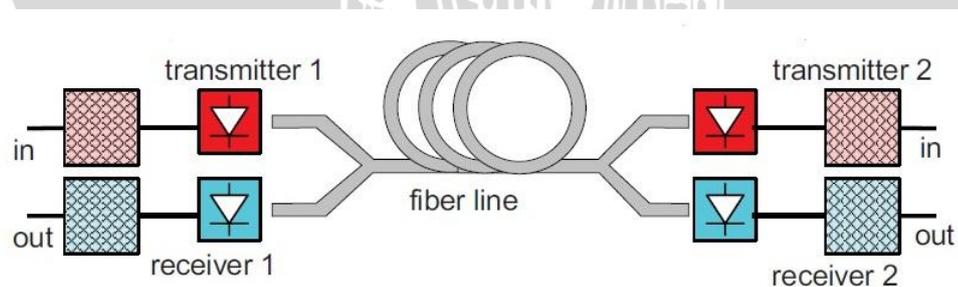
dapat sampai dan diterima dengan baik dan benar di penerima. Perangkat yang ada di penerima bertugas untuk menerjemahkan informasi kiriman tersebut sehingga maksud dari informasi dapat dimengerti.

Perbedaan sistem komunikasi optik dengan sistem komunikasi biasa terletak pada proses pengiriman sinyalnya. Pada sistem komunikasi biasa sinyal informasi diubah ke sinyal listrik. Sedangkan pada sistem komunikasi optik, sinyal informasi diubah ke sinyal listrik lalu diubah lagi ke optik atau cahaya. Sinyal ini kemudian dilewatkan melalui serat optik, yang setelah sampai di penerima nanti, cahaya tersebut diubah kembali ke listrik dan akhirnya diterjemahkan menjadi sinyal informasi. Gambar 2.12 menjelaskan proses *transmitter* dan *receiver* pada sistem komunikasi serat optik.



Gambar 2.12. Sistem Komunikasi Serat Optik  
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Sedangkan sistem komunikasi serat optik dengan TDM diilustrasikan pada Gambar 2.13. Sistem komunikasi serat optik dengan TDM merupakan solusi yang sangat baik terutama untuk sistem dengan kecepatan data (*data rate*) yang sedang (*medium*) dan jarak yang pendek. Dan dengan menggunakan serat optik jenis POF maka sistem dapat diimplementasikan dengan biaya rendah karena seluruh pengolahan data dilakukan dalam rangkaian terpadu.



Gambar 2.13 Sistem Komunikasi Serat Optik Dengan TDM  
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

#### 2.4.1. Sumber Optik

Sumber pengirim adalah perangkat pembangkit gelombang elektromagnetik (GEM) pada frekuensi optik yaitu  $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{16}$  Hz. Gelombang tersebut dibangkitkan untuk membawa informasi yang akan ditransmisikan. Terdapat dua tipe sumber pengirim

optik yang digunakan untuk mengirim cahaya informasi melalui serat optik, yaitu *Light Emitting Diode* (LED) dan *Laser Diode* (LD). LED biasanya dipakai pada serat optik *multimode*, karena memiliki spektrum cahaya yang lebar. Sedangkan LD yang memiliki spektrum cahaya yang lebih sempit biasanya digunakan untuk komunikasi menggunakan serat optik *singlemode*.

Berikut adalah penjelasan untuk masing-masing jenis sumber optik.

**a. *Light Emitting Diode* (LED)**

LED adalah salah satu jenis *diode* yang disusun dari bahan semi konduktor jenis P dan N. Kelebihan utama dari LED adalah harganya yang murah. Namun LED memiliki efisiensi yang sangat rendah, bandwidth yang terbatas, dan keluaran daya optik yang rendah. Oleh karena itu transmitter LED lebih cocok digunakan pada saluran optik yang beroperasi pada bit rate yang paling rendah (kurang dari 100 Mbits/s) pada jarak yang relatif dekat.

**b. *Laser Diode* (LD)**

*Laser Diode* mempunyai efisiensi yang jauh lebih baik daripada LED dan menghasilkan daya optik yang jauh lebih tinggi (lebih dari 1W). DFB Laser biasanya menjadi pilihan utama dibandingkan dengan FP laser untuk saluran jarak jauh berkecepatan tinggi karena DFB Laser memiliki *noise* yang lebih kecil dan *side mode suppression ratio* yang tinggi pula.

Masing-masing sumber optik ini memiliki parameter dan karakteristik yang merupakan bahan pertimbangan dalam pemilihan yang akan digunakan. Pada Tabel 2.2 dibandingkan beberapa karakteristik dari dua jenis sumber optik.

Tabel 2.2 Perbandingan Karakteristik LED dan LD

No.	Karakteristik	LED	LD
1.	Waktu Jangkit	2 – 10	0,3 – 1,0
2.	Daya Keluaran (mW)	0,5 – 4,0	1,5 – 8,0
3.	Lebar Spektrum (nm)	30 – 150	1 – 10
4.	Rugi-rugi kopling	Lebih besar	Lebih kecil
5.	Kepekaan suhu	Lebih tahan	Peka perubahan

(Sumber : Syauki, 2008)

**2.4.2. Detektor Penerima Optik**

Detektor penerima optik adalah alat yang dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik kembali. Detektor optik bekerja berdasarkan prinsip emisi fotolistrik yaitu terjadinya pembebasan elektron dari permukaan laser sebagai hasil penyerapan energy

foton. Terdapat 2 (dua) tipe detektor optik, yaitu PIN (*Positive-Intrinsic Negative*) dan APD (*Avalanched Photo Diode*). Perancangan dan pemilihan perangkat penerima sangat menentukan dalam suatu analisis sensitivitas dari besarnya daya optik minimum yang didapat dideteksi oleh detektor. Pada Tabel 2.3 dibandingkan karakteristik antara 2 tipe detektor optik, yaitu PIN dan APD.

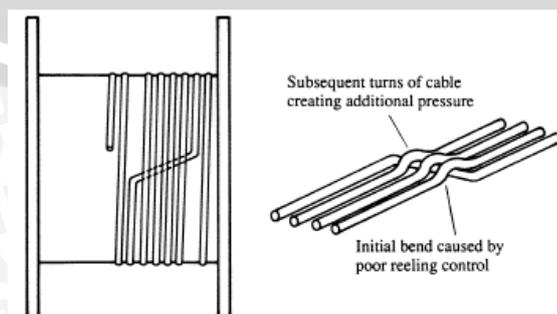
Tabel 2.3 Perbandingan Parameter dan Karakteristik PIN dan APD

No.	Karakteristik	PIN	APD
1.	Daya optik minimum	Lebih besar	Lebih kecil
2.	Responsitivitas	0,35 – 0,8	2,5 – 120
3.	Penguatan	1	10 – 250
4.	Derau Detektor	Lebih kecil	Lebih besar
5.	Waktu Jangkit	0,06	0,1 – 0,3

(Sumber : Syauki, 2008)

## 2.5. *Macro bending*

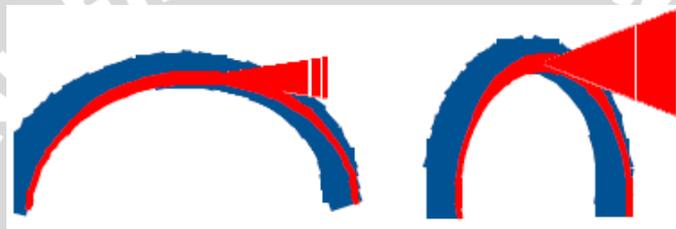
*Bending* adalah adalah pembengkokan serat optik yang menyebabkan cahaya yang merambat pada serat optik berbelok arah transmisi dan hilang. Atenuasi akibat pembengkokan serat optik dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pembengkokan makro (*macro bending*) dan pembengkokan mikro (*micro bending*). Kerugian akibat *macro bending* terjadi ketika sinar atau cahaya melalui serat optik yang dibengkokkan dengan jari-jari lebih lebar dibandingkan diameter serat optik sehingga menyebabkan kerugian. Sedangkan pembengkokan mikro (*micro bending*) terjadi karena ketidakrataan pada permukaan batas antara inti dan selubung secara acak atau random pada serat optik karena proses pengkabelan ataupun ketika proses penarikan saat instalasi (Andre, 2006). Beberapa bengkakan tidak bisa dihindari seperti pada saat pengiriman dan penyimpanan, pembuatan dan instalasi, serta terminasi sehingga menyebabkan terjadinya *macro bending*. *Macro bending* yang terjadi karena kesalahan instalasi diilustrasikan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Macro bending* karena kesalahan instalasi  
(Sumber: Elliot et al, 2002)

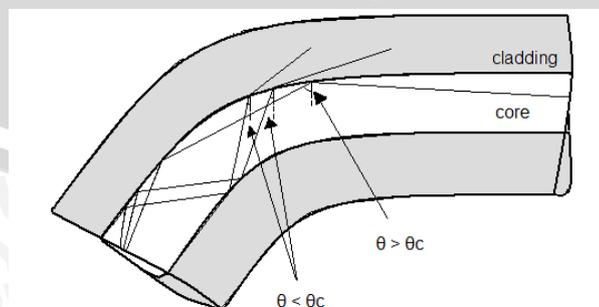
Penyelidikan secara teoritis tentang pembengkokan pada serat optik telah dimulai pada tahun 1970-an, ketika Dietrich Marcuse menjelaskan persamaan rugi-rugi bengkokan (Marcuse, 1976: 216). Pada tahun 1980-an, Harris dan Peters melakukan percobaan pengukuran rugi-rugi sebagai fungsi panjang gelombang dan jari-jari bengkokan (Harris et al, 1986). Penelitian terbaru ini Ross Schermer dan James Cole mempresentasikan persamaan yang sama seperti Marcuse tapi dengan koreksi terhadap tekanan induksi (Schermer et al, 2007).

*Macrobending* pada serat optik merupakan redaman yang disebabkan oleh bengkokan atau lilitan serat. Cahaya dapat keluar dari kabel ketika serat dibengkokkan. Ketika bengkokan semakin tajam, semakin banyak cahaya yang keluar. Fenomena ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.15.



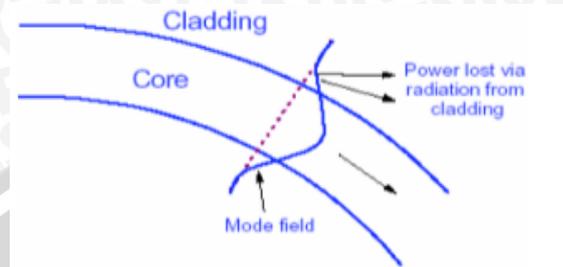
Gambar 2.15 Ilustrasi Skematik *Macrobending*  
(Sumber: Jay, 2010)

Pada Gambar 2.15 bagian kiri terlihat hanya sedikit bagian dari cahaya yang terbias keluar dari jalur gelombang ketika dibengkokkan. Sedangkan gambar di kanan mengilustrasikan lebih banyak cahaya yang terbias keluar ketika serat dibengkokkan dengan diameter lebih kecil. Dapat disimpulkan ketika serat dibengkokkan, beberapa cahaya terbias keluar dari jalur. Jika bengkokkan semakin tajam, semakin banyak cahaya yang keluar dari serat. Pada Gambar 2.16 menjelaskan skema *macrobending* dengan berkas cahaya yang ada pada inti serat optik.



Gambar 2.16 Skema *Macrobending* pada Serat Optik  
(Sumber: Andre et al, 2006)

Dari Gambar 2.16 terlihat cahaya keluar dari inti ke selubung ketika sudut sinar datang tidak memenuhi sudut kritis *total internal reflection*. Bengkokan pada serat optik mengakibatkan cahaya pada inti berpindah menuju batas permukaan inti-selubung dengan sudut kurang dari sudut kritis sehingga energi cahaya tidak akan dipantulkan internal, tapi hilang di material selubung (Lemlem, 2012).



Gambar 2.17 Radiasi daya ke selubung saat bengkokan  
(Sumber: Lemlem, 2012: 16)

Pada Gambar 2.17 terlihat ketika terjadi bengkokan tajam, *mode field* terluar harus menjalar lebih cepat dari yang berada di dalam untuk mempertahankan penjarangan gelombang. Akibatnya bagian luar harus menjalar lebih cepat dari kecepatan cahaya di medium. Namun karena hal itu tidak memungkinkan maka bagian luar tersebut terdispersi ke bagian selubung.

Bengkokan pada serat optik akan menyebabkan bagian dalam serat optik termampatkan dan bagian luar menjadi tertarik lebih panjang. Fenomena ini akan mengakibatkan perubahan pada penjarangan cahaya pada serat optik, sehingga cahaya tidak lagi mengalami *total internal reflection*. Cahaya akan dibiaskan keluar selubung sehingga menimbulkan rugi-rugi atau *losses* yang disebut dengan *macrobending losses*.

Secara empiris, *macrobending loss* dapat dinyatakan pada Persamaan (2-5) (Maharani et al, 2009).

$$\gamma_{bend} = 10 \log \frac{\alpha + 2}{2\alpha \left(\frac{a}{R\Delta}\right)} \quad (2-5)$$

Keterangan:

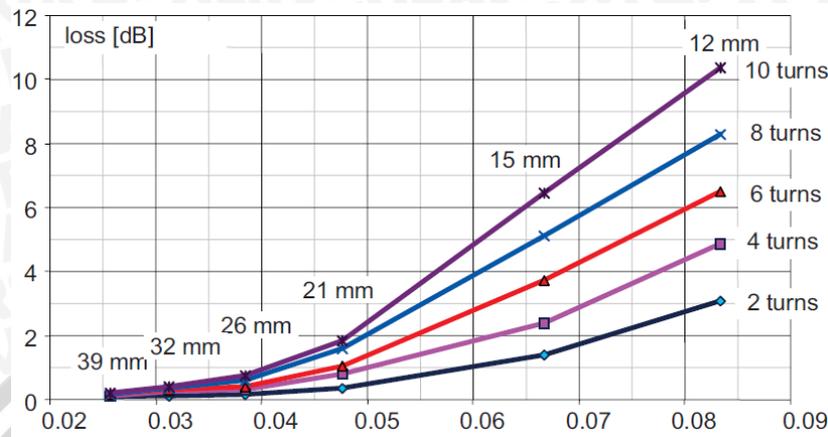
$\Delta$  = beda indeks bias inti dan selubung

$R$  = jari-jari lengkungan (*bending radius*)

$a$  = jari-jari inti serat optik

$\alpha = \infty$  untuk *step profile*, 2 untuk *parabolic profile*

*Macrobending losses* dipengaruhi oleh diameter bengkokan dan jumlah bengkokan yang tersusun dalam bentuk lilitan. Pengaruh diameter bengkokan dan jumlah bengkokan yang tersusun dalam bentuk lilitan pada POF diperlihatkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Pengaruh Diameter Bengkokan dan Jumlah Bengkokan Pada POF (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

*Bending radius* serat optik yang perlu diukur adalah radius paling kecil ketika serat optik dapat dilengkungkan tanpa membuatnya kusut, menghancurkannya ataupun memperpendek umur dari serat optik tersebut. *Bending radius minimum* merupakan bagian yang penting dalam pengelolaan kabel serat optik yang sering digunakan dalam telekomunikasi. *Bending radius minimum* akan bervariasi untuk desain kabel yang berbeda. Produsen serat optik biasanya memberikan spesifikasi *bending radius* yang aman selama proses instalasi. Jika tidak terdapat spesifikasi *bending radius minimum*, salah satu cara untuk mengamankan serat optik adalah mengasumsikan *bending radius long-term low-stress* tidak kurang dari 15 kali diameter kabel (Maharani *et al*, 2009).

Perubahan signifikan pada rugi-rugi macrobending terlihat ketika nilai *bending radius minimum* atau *critical radius* dicapai. *Critical radius* adalah jari-jari dimana rugi-rugi bengkokan naik secara drastis. Ketika  $R$  sama dengan  $R_c$  maka rugi-rugi *macrobending* yang terjadi akan minimum dan dapat dihiraukan karena rugi-rugi yang terjadi bukan karena adanya bengkokan tapi karena faktor intrinsik dari serat optik seperti *scattering*, *absorption*, dan rugi-rugi lainnya (Lemlem, 2012: 31).

*Critical radius* atau  $R_c$  untuk serat optik *multimode* dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-6) (Dutton, 1998).

$$R_c = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi[n_1^2 - n_2^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2-6)$$

Untuk jari-jari bengkokan yang sama, NA yang besar akan menghasilkan  $R_c$  yang kecil, sehingga rugi-rugi karena bengkokannya pun kecil. Dengan mengetahui *critical*

*bend radius*, kinerja jaringan dapat dioptimalkan dan memberikan panduan pada instalasi sehingga redaman sinyal dapat diminimalkan.

## 2.6. Performansi Sistem Komunikasi Serat optik

Performansi sistem komunikasi serat optik dipengaruhi oleh besar rugi-rugi (*losses*) yang terjadi. Nilai *losses* dalam serat optik dituliskan dalam satuan *decibel* (dB) atau dalam dBm. Nilai daya atau tegangan masukan dan keluaran harus diketahui untuk menghitung besar redaman. Persamaan (2-7) menunjukkan cara perhitungan *losses* (Bhargava, 1984).

$$L = 10 \log \frac{P_i}{P_o} = 10 \log \left( \frac{V_i^2}{V_o^2} \right) = 20 \log \frac{V_i}{V_o} \quad (2-7)$$

dengan :

$L$  = *losses* (dB)

$P_i$  = daya masukan (Watt)

$P_o$  = daya keluaran (Watt)

$V_i$  = tegangan masukan (Volt)

$V_o$  = tegangan keluaran (Volt)

Dalam pengukuran performansi suatu sistem, tegangan menjadi parameter utama untuk dinilai dan ditelaah. Karena hal tersebut maka digunakan Persamaan (2-7) untuk menghitung nilai *losses* dari nilai tegangan masukan dan keluaran.

Selain tegangan, juga terdapat beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mengukur kualitas sistem komunikasi digital, termasuk sistem komunikasi serat optik, diantaranya *Bit Error Rate* (BER) dan *eye pattern*. Berikut adalah penjelasan untuk masing-masing parameter tersebut.

### 2.6.1. Bit Error Rate (BER)

Dalam sistem digital, perhitungan kinerja yang paling dasar adalah dengan menganalisis probabilitas bit tidak tertransmisi dengan baik (*error*). Probabilitas tersebut diukur menggunakan BER *Tester* atau BERT. BER adalah rasio atau perbandingan *bit error* ( $E_b$ ) terhadap total bit yang ditransmisikan ( $T_b$ ) dalam suatu periode waktu  $t$  detik. Secara matematis BER dituliskan pada Persamaan (2-8).

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

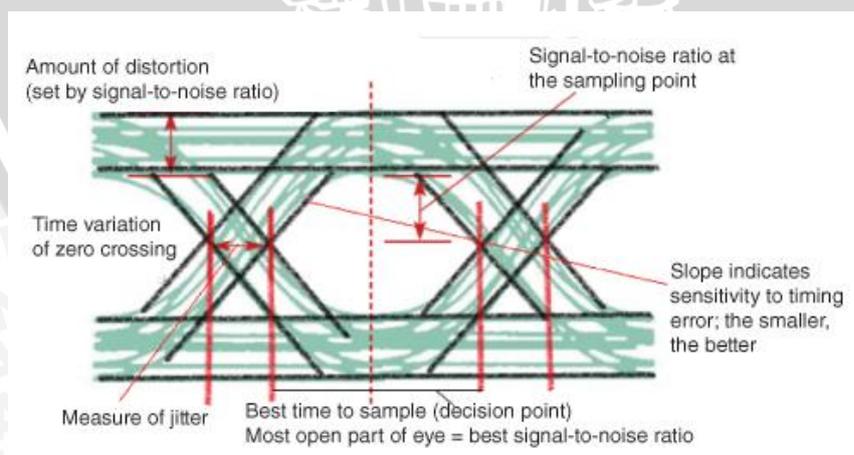
BER atau dengan sebutan lain probabilitas *bit error* ( $P_e$ ) merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER menyatakan berapa jumlah *bit error* yang terjadi dalam dalam satuan detik. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit error terhadap total bit yang diterima dengan rentang nilai BER 0-1.

Menurut *European FP7 Integrated Project*, kebutuhan BER untuk layanan internet saat ini adalah kurang dari  $10^{-8}$ , yang berarti hanya satu kesalahan yang terjadi dari 108 bit yang ditransmisikan. *Error rates* yang telah dispesifikasi dalam sistem komunikasi serat optik berkisar antara  $10^{-9}$  sampai dengan  $10^{-15}$ .

### 2.6.2. Eye Pattern

*Eye pattern* atau *eye diagram* adalah tampilan osiloskop dari sinyal digital yang mengalami proses *sampling* beberapa kali untuk mendapatkan tampilan dari karakteristik sinyal tersebut. Pengukuran *eye diagram* menggunakan domain waktu dan ditampilkan dalam osiloskop.

Pada sistem optik, karakteristik sinyal dari pemancar yang terdiri dari *rise time*, *fall time*, *pulse overshoot*, *pulse undershoot*, dan *ringing* dispesifikasikan dalam bentuk *mask* dari *eye diagram* pemancar. Untuk mengevaluasi sinyal yang dipancarkan, penting halnya untuk mengevaluasi tidak hanya *eye opening*, tapi juga batas *overshoot* dan *undershoot*. Pada Gambar 2.19, secara spesifik ditunjukkan informasi yang didapatkan dari *eye diagram* seperti waktu terbaik untuk melakukan *sampling* yaitu ketika *eye opening* terbesar, *Signal to Noise Ration* (SNR), dan besar *jitter* serta distorsi.



Gambar 2.19. Informasi yang Terdapat pada *Eye Diagram*  
(Sumber: Behera *et al*, 2011)

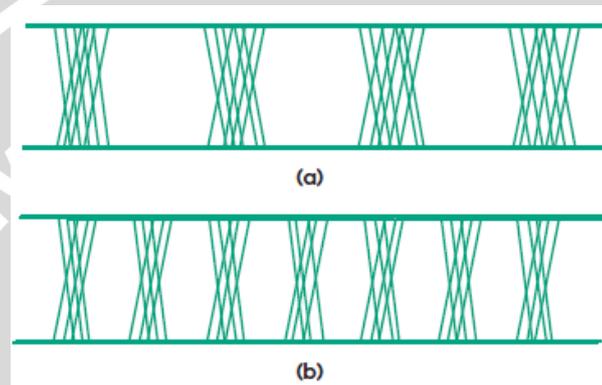
Hal yang terpenting dalam mengevaluasi *eye diagram* adalah besar *eye opening* yang menunjukkan SNR ketika proses *sampling* terjadi dan besar amplitudo serta *timing*

error. Gambar 2.20 menunjukkan gambar *eye diagram* dengan *eye opening* yang besar dan lebar, sehingga dapat dikatakan sebagai kondisi ideal.



Gambar 2.20. *Eye diagram* Ideal dengan *Finite Rise* dan *Fall Time*  
(Sumber: Breed, 2005)

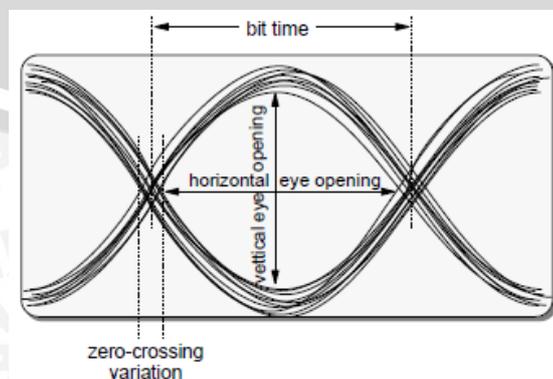
Ketika ditransmisikan dengan kecepatan tinggi, sering terjadi *timing error* pada sinyal. Bentuk *eye diagram* pada sinyal tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 *Timing Error* pada *Eye Diagram*  
(Sumber: Breed, 2005)

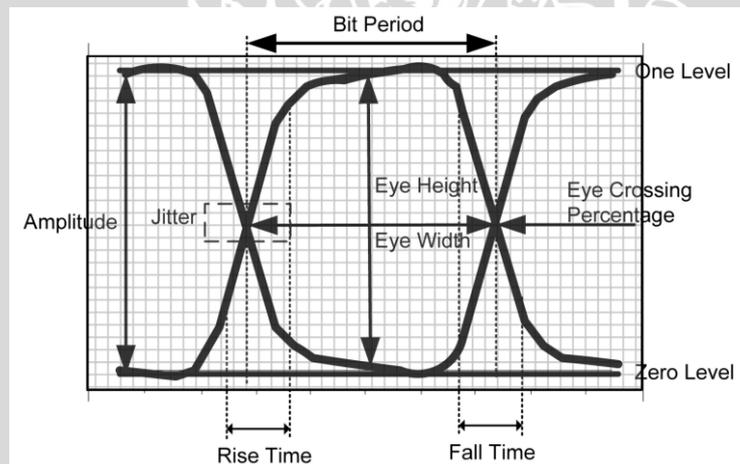
Jenis *timing error* pada Gambar 2.21 disebut dengan *jitter*. *Jitter margin* pada Gambar 2.21(b) lebih kecil daripada Gambar 2.21(a) tetapi *eye opening* lebih kecil karena *bit rate* yang lebih tinggi. Semakin tinggi *bit rate*, semakin kecil ukuran *eye opening*. Sehingga potensi *data error* semakin besar (Behera *et al.*, 2011). *Timing jitter* atau *eye jitter* pada sistem serat optik disebabkan oleh *noise* pada penerima dan distorsi pulsa pada serat optik. *Timing jitter* disebut juga sebagai *phase distortion*.

Berikut adalah hal-hal yang harus diperhatikan dalam menganalisis skema *eye diagram* pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22. Skema *Eye Diagram*  
(Sumber: Dutton, 1998)

- *Vertical eye opening* menunjukkan besar perbedaan level sinyal yang menunjukkan perbedaan bit satu dan bit nol. Semakin besar perbedaannya maka akan semakin mudah untuk membedakan nol dan satu. Hal ini menunjukkan pengaruh *noise* pada sistem.
- *Horizontal eye opening* menunjukkan nilai *jitter* pada sinyal. Semakin lebar *eye opening* pada sumbu ini, maka semakin sedikit *jitter* yang terjadi.
- Ketebalan pita pada *zero-crossing point* juga mengukur besar *jitter* pada sinyal.
- Parameter terbaik untuk menentukan baik tidaknya sinyal adalah pada ukuran *eye opening* sinyal tersebut. Semakin besar ukurannya maka akan semakin mudah untuk mendeteksi sinyal dan semakin kecil *error rate*-nya. Ketika kondisi *eye* menutup maka akan sangat sulit bahkan hampir tidak mungkin untuk mengetahui data dari sinyal tersebut. Hal ini berkaitan dengan BER dan SNR dari sinyal. Semakin besar *eye opening*, semakin kecil BER sinyal tersebut.
- Ukuran sinyal di bagian atas dan bawah merepresentasikan *noise* pada sinyal. Semakin tipis, maka semakin baik karena *noise* sedikit.



Gambar 2.23 Parameter pada *Eye Diagram*  
(Sumber: <http://onsemi.com>, 2012)

Selain itu, dari *eye diagram* pada Gambar 2.23 dapat dihitung parameter-parameter berikut:

- *Noise margin* adalah kekebalan terhadap *noise* yang ditunjukkan dengan lebar panjang *eye opening* pada waktu *sampling*. *Noise margin* dihitung dari rasio persentase dari puncak sinyal  $V_1$  yang dilihat dari besar *eye opening* terhadap tegangan maksimum sinyal  $V_2$ . Secara matematis dituliskan pada Persamaan (2-9) (Keiser, 2004):

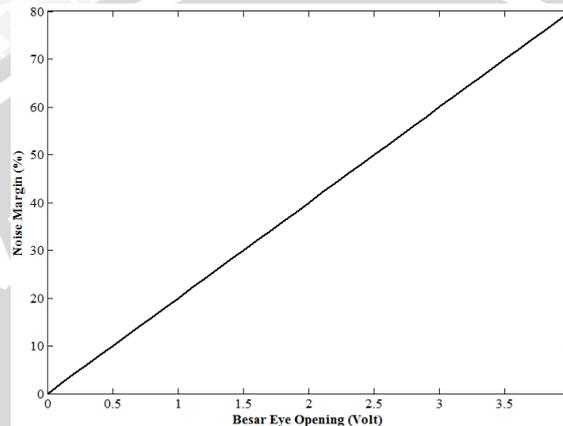
$$\text{Noise margin (\%)} = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (2-9)$$

dengan :

$V_1$  = puncak sinyal dilihat dari besar *eye opening* (Volt)

$V_2$  = tegangan maksimum sinyal (Volt)

Nilai *noise margin* naik secara linier terhadap besarnya *eye opening*, hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.24.



Gambar 2.24. Grafik hubungan *eye opening* terhadap *noise margin*

- *Timing Jitter* pada sistem komunikasi serat optik disebabkan oleh noise pada penerima dan distorsi pulsa pada serat optik. *Timing jitter* merupakan pergeseran waktu dari transmisi ideal pada data bit yang diterima oleh *receiver*. *Timing jitter* dapat diukur dari tampilan *eye pattern* pada bagian *zero crossing point*. Semakin besar perbedaan *zero crossing point* mengindikasikan semakin besar keterlambatan sinyal dan ditampilkan di *eye opening* yang kecil. *Timing jitter* dapat dihitung dari jumlah distorsi waktu ( $\Delta T$ ) dan waktu *bit interval* ( $T_b$ ) dengan Persamaan (2-10) (Keiser, 2004):

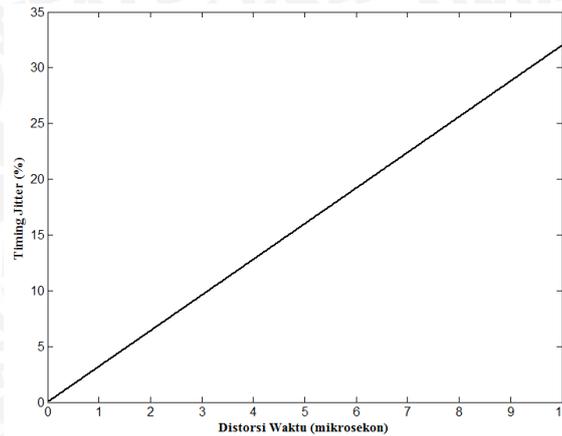
$$\text{Timing Jitter (\%)} = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100\% \quad (2-10)$$

dengan :

$\Delta T$  = jumlah distorsi (s)

$T_b$  = waktu *bit interval* (s)

Nilai *timing jitter* naik secara linier terhadap kenaikan nilai distorsi waktu, hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Hubungan distorsi waktu terhadap *timing jitter*

- *Signal to noise ratio* (SNR) merupakan perbandingan daya sinyal transmisi dengan *noise*. SNR dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-11) (Ziemann *et al*, 2008) :

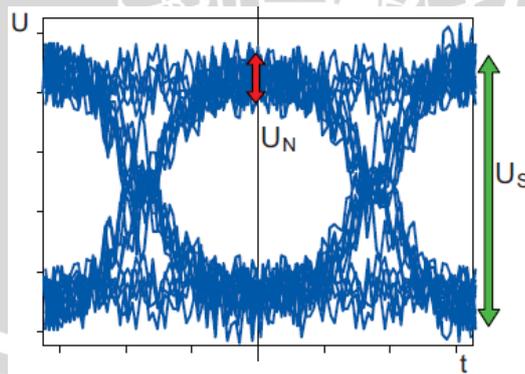
$$\text{SNR (dB)} = 20 \log \frac{U_s}{U_n} \quad (2-11)$$

dengan :

$U_s$  = Amplitudo Sinyal (V)

$U_n$  = *Noise* Maksimum (V)

Semakin besar nilai SNR maka semakin baik kualitas dari sinyal tersebut. SNR pada *eye pattern* dihitung dengan cara menentukan nilai  $U_s$  dan  $U_n$ . Nilai  $U_n$  merupakan selisih  $V_1$  dan  $V_2$ , sedangkan nilai  $U_s$  merupakan besarnya *eye amplitude*. Pengukuran nilai SNR dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26. Pengukuran nilai SNR pada *Eye Diagram*