

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisi tinjauan bahan bacaan yang bersifat akademik untuk menyelesaikan permasalahan. Bahan bacaan yang digunakan didasarkan pada referensi-referensi dan hasil penelitian yang telah diuji kebenarannya. Teori yang dibahas adalah tentang karakteristik dan standardisasi POF, proses penjalaran cahaya pada serat optik, sumber pengirim dan detektor penerima dalam sistem komunikasi serat optik, fenomena *macrobending*, dan parameter kinerja serat optik yang terdiri atas BER dan *eye pattern*.

2.1. *Plastic Optical Fiber*

Plastic Optical Fiber (POF) atau serat optik plastik merupakan salah satu media transmisi komunikasi optik yang terbuat dari plastik polimer. POF pertama kali dikembangkan pada tahun 1960-an, hampir bersamaan dengan penemuan serat optik silika. Pada tahun 1966, Du Pont menemukan POF pertama dengan nama “Crofon” yang berjenis *step index* (SI) dengan inti terbuat dari PMMA dan selubung oleh *partially-fluorinated-polymer*. Pada tahun 1975, Mitsubishi Rayon memperdagangkan SI POF pertama dengan nama dagang “Eska” yang lalu diikuti oleh Asahi Chemical dan Toray pada 1970-an. Jenis *Step Index* POF (SI-POF) tersebut dikenal sebagai *Standard SI-POF* (Zieman *et al*, 2008).

POF mempunyai beberapa kelebihan yang tidak dimiliki oleh media transmisi lain selain *glass optical fiber*. Kelebihan tersebut 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. POF mempunyai tingkat fleksibilitas tinggi dan tidak 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 (sambungan rumah atau gedung) termasuk POF.

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

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

(Sumber: Huiszoon, 2013)

Harga kabel POF lebih murah dibandingkan serat optik kaca. Harga serat dan komponen-komponen pendukung POF seperti konektor dan pemotong juga lebih murah. Pada Tabel 2.2 dibandingkan biaya instalasi beberapa media transmisi.

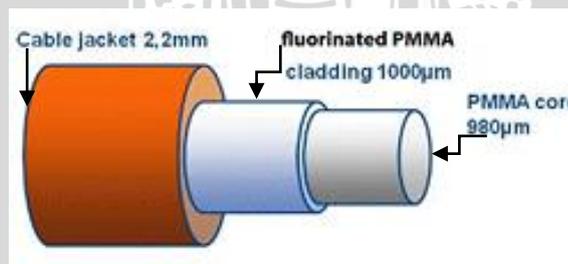
Tabel 2.2. Perbandingan Biaya Media Transmisi Transmisi Sambungan Tetap ke Pelanggan (*Fixed Telecommunication*)

	Cat-5e	POF	SMF	MMF
Kabel (Rp/m)	15.700	4.700	27.300	30.550
Konektor gantung (Rp)	94.000	0	235.000	220.000
Konverter media (Rp/W)	0/0.65	470.000/0.85	1.100.000/1.15	627.00/1.15
Switch (Rp/port)/(W/port)	157.000/0.3	157.000/0.4	157.000/0.5	157.000/0.6

(Sumber: Huiszoon, 2013)

2.1.1 Struktur POF

Struktur bagian serat optik untuk serat optik kaca dan plastik adalah sama, yaitu inti (*core*), selubung (selubung), dan *jacket* yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.

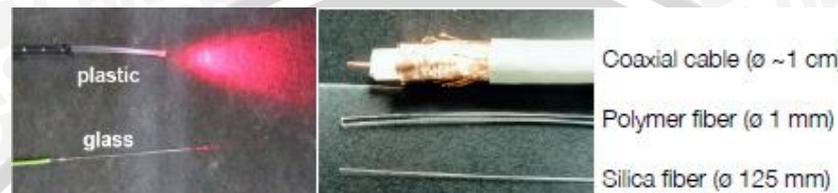


Gambar 2.1 Struktur Bagian POF
(Sumber: Lisi, 2011)

POF dengan inti yang terbuat dari bahan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) dan selubung yang terbuat dari bahan-bahan kopolimer dari *methacrylate*, *fluoro-alkyl*, dan *tetrafluoroethylene* adalah umum digunakan secara aplikasi. Indeks bias inti POF yang terbuat dari bahan ini adalah 1.49 dan 1.40-1.42 untuk indeks bias selubung. Karakteristik lain yang dapat ditunjukkan oleh POF jenis ini adalah kemampuan untuk beroperasi pada temperatur -40 hingga 85°C , pada kelembaban hingga 95%, pada

pembebanan hingga 9 kg, dan pada jari-jari kelengkungan 15-17 cm, serta *bandwidth* hingga 5 MHz (Yu *et al*, 2007).

Ukuran diameter POF pada umumnya adalah 1 mm. Sekitar 90% dari diameter POF adalah inti. Bagian selubung merupakan lapisan tipis yang menyelimuti inti. POF lebih mudah menerima cahaya dibandingkan dengan serat optik kaca *multimode* karena memiliki diameter inti yang lebih besar. Pada Gambar 2.2 ditunjukkan perbandingan fisik kabel koaksial, POF, dan serat optik kaca.



Gambar 2.2. Perbandingan Fisik Kabel Koaksial, POF, dan Serat Optik Kaca (Sumber: Huiszoon, 2013)

Penanganan POF lebih mudah daripada serat optik kaca karena terbuat dari bahan yang lebih lentur dan memiliki dimensi yang lebih besar. Pengupasan (*stripping*) dan pemotongan (*cleaving*) POF cukup menggunakan *precision knife* atau silet tajam, tidak perlu menggunakan *fiber stripper* dan *fiber cleaver* khusus yang harganya cukup mahal seperti serat optik kaca.

2.1.2 Standardisasi POF

Standar untuk POF dibuat pertama kali oleh *The Japanese Industrial Standard*. JIS-C-6837. Standar secara internasional ditetapkan oleh *International Electrotechnical Commission* dalam IEC 60793-2-40 tentang spesifikasi POF jenis *multimode*. Standar tersebut membagi POF dalam delapan kelas, yaitu kelas A4a-A4c untuk POF jenis *step index* yang terbuat dari PMMA, kelas A4d untuk jenis DSI-POF, kelas A4e untuk MSI dan GI-POF, serta kelas A4f-A4h untuk GI-POF yang terbuat dari *perfluorinated fiber*.

Spesifikasi lebih lengkap mengenai masing-masing jenis kabel POF *step index* ditunjukkan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Spesifikasi POF Jenis *Step Index Profile*

Parameter	Satuan	Kelas A4a	Kelas A4b	Kelas A4c	Kelas A4d
Diameter Selubung	Mm	1000 ± 60	750 ± 45	500 ± 30	1000 ± 60
Diameter <i>jacket</i>	Mm	2.2 ± 0.2	2.2 ± 0.1	1.5 ± 0.1	2.2 ± 0.1
Rugi-rugi pada 650 nm	dB/km	≤ 400	≤ 400	≤ 400	≤ 400
<i>Bandwidth</i>	MHz-100m	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 100
Rugi-rugi <i>bending</i>	dB/10 lilitan	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
NA	-	0.5 ± 0.15	0.5 ± 0.15	0.5 ± 0.15	0.3 ± 0.10

(Sumber: IEC, 2009)

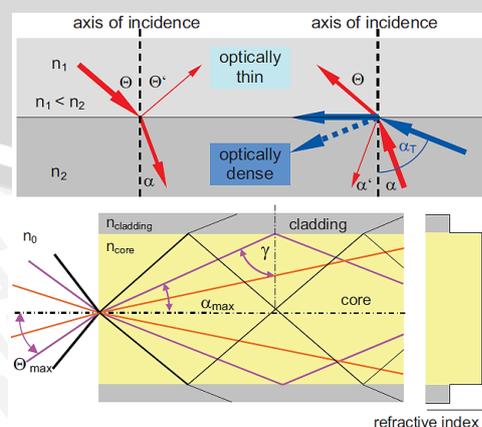
Standar untuk perangkat pada sistem POF telah ditetapkan oleh lembaga-lembaga internasional berikut:

- *European Telecommunications Standardization Institute (ETSI): TS 105 175-1-1*
- *German DKE VDE: 0885-763*
- *European Committee for Electrotechnical Standardization: 50173-1& -4*
- *ITU-T G.hn: G.9960 and related recommendations*

2.2. Penjalaran Cahaya Pada Serat Optik

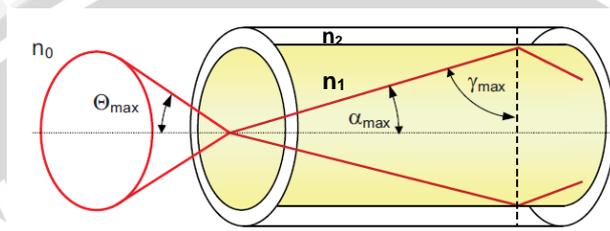
Penemuan serat optik sebagai media transmisi pada suatu sistem komunikasi didasarkan pada hukum Snellius tentang perambatan cahaya pada media transparan yang dibentuk dari dua lapisan utama yaitu lapisan inti dengan indeks bias inti (n_1) dan dilapisi oleh selubung dengan indeks bias (n_2) yang lebih kecil dari n_1 . Hukum Snellius menyatakan jika seberkas sinar masuk pada suatu ujung serat optik dengan sudut lebih besar dari sudut kritis (*critical angle*) dan sinar itu datang dari medium yang mempunyai indeks bias lebih kecil dari udara menuju inti serat optik yang mempunyai indeks bias lebih besar, maka seluruh sinar akan merambat sepanjang inti serat menuju ujung lainnya.

Cahaya dapat merambat di dalam serat optik melalui proses pemantulan sempurna (*total internal reflection*) seperti pada Gambar 2.3. Panjang jangkauan sinar ditentukan oleh proses pemantulan sempurna ini. Ukuran penjalaran sinar ditunjukkan pada Gambar 2.3 bagian bawah dimana sinar yang tidak mengalami proses pemantulan sempurna yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam, tidak dapat menjalar lebih panjang karena terbias keluar dari inti. Sinar yang mengalami proses pemantulan sempurna yang ditunjukkan dengan garis berwarna ungu dan oranye mampu menjangkau jarak yang lebih panjang hingga mencapai 500 meter.



Gambar 2.3. Prinsip Penyaluran Cahaya Dalam Serat Optik
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Parameter penting dalam serat optik adalah *Numerical Aperture* (NA). NA adalah ukuran kemampuan sebuah serat untuk menangkap cahaya. NA merupakan parameter yang merepresentasikan sudut penerimaan maksimum dimana berkas cahaya masih bisa diterima dan merambat di dalam inti serat. Sudut penerimaan ini dapat bervariasi tergantung pada karakteristik indeks bias inti dan selubung serat optik. Nilai NA untuk serat optik kaca sekitar 0,20-0,29 sedangkan POF memiliki NA yang lebih tinggi bahkan dapat melebihi 0,5. Gambar 2.4 menunjukkan sudut penerimaan θ_{max} untuk menentukan NA pada serat optik.



Gambar 2.4. Sudut Penerimaan pada Serat Optik
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Jika sudut datang berkas cahaya lebih besar dari NA maka berkas tidak akan dipantulkan kembali ke dalam serat melainkan akan menembus selubung dan akan keluar dari serat. Semakin besar NA maka semakin banyak jumlah cahaya yang diterima oleh serat. Kenaikan NA menyebabkan lebar pita berkurang dan rugi penyebaran serta penyerapan akan bertambah. Oleh karena itu, nilai NA yang besar hanya baik untuk aplikasi jarak pendek dengan kecepatan rendah. Besar NA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-1) (Ziemann *et al*, 2008).

$$NA = \sin \theta_{maks} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2-1)$$

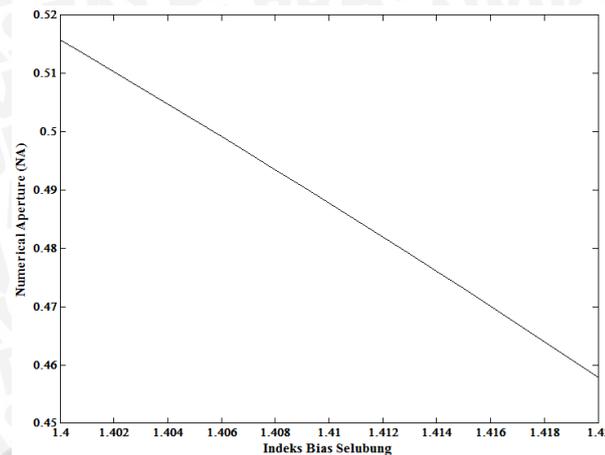
dengan:

θ_{maks} = sudut penerimaan

n_1 = indeks bias inti

n_2 = indeks bias selubung

Berdasarkan Persamaan (2-1), hubungan antara besar indeks bias selubung terhadap NA untuk indeks bias inti POF sebesar 1.492 ditunjukkan pada Gambar 2.5. Nilai indeks bias selubung yang semakin besar membuat nilai NA semakin kecil. Banyak jumlah cahaya yang diterima oleh serat akan semakin berkurang jika nilai indeks bias selubung bertambah untuk nilai indeks bias inti yang tetap.



Gambar 2.5. Karakteristik NA terhadap Indeks Bias Selubung

Serat optik dapat dibagi menjadi beberapa jenis. Berdasarkan mode perambatan cahaya 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. Serat optik *singlemode* secara aplikasi umum digunakan untuk transmisi jarak jauh dengan kecepatan tinggi. Redaman pada serat optik jenis ini lebih kecil dari serat optik *multimode*.

2. *Multimode*

Serat optik jenis *multimode* mempunyai inti yang lebih besar dari *singlemode*. Pada jenis ini mode cahaya yang mampu dilewatkan di dalam serat lebih banyak. Pada saat sebuah pulsa cahaya masuk ke serat optik *multimode*, daya pulsa didistribusikan hampir ke seluruh mode. Setiap mode cahaya pada serat 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 umum digunakan untuk transmisi jarak pendek dengan kecepatan rendah karena memiliki redaman yang besar.

Berdasarkan profil indeks bias, 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. Profil indeks bias untuk *step index* adalah tak terhingga (∞). Perbedaan relatif indeks bias inti dan selubung (Δ) dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-2) (Keiser, 1991):

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

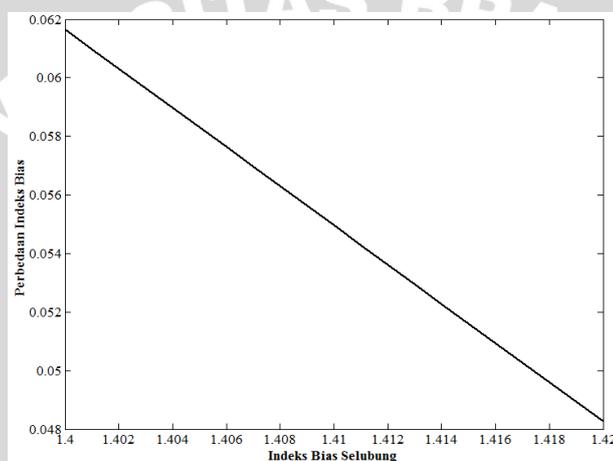
dengan:

n_1 = indeks bias inti

n_2 = indeks bias selubung

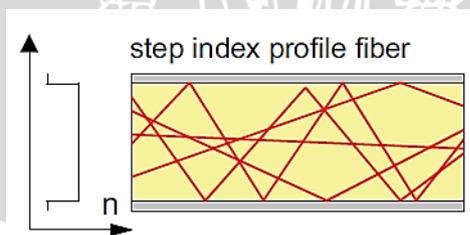
Δ = perbedaan relatif indeks bias

Berdasarkan Persamaan (2-2), hubungan antara besar indeks bias selubung terhadap perbedaan relatif indeks bias untuk indeks bias inti POF 1.492 ditunjukkan pada Gambar 2.6. Nilai perbedaan relatif indeks bias akan semakin kecil dengan pertambahan nilai indeks bias selubung untuk nilai indeks bias inti yang tetap.



Gambar 2.6. Karakteristik Perbedaan Relatif Indeks Bias terhadap Indeks Bias Selubung

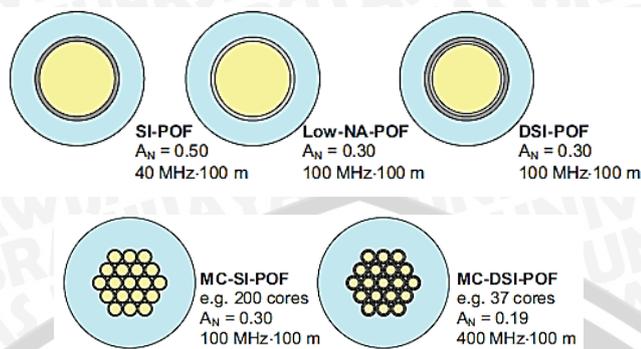
Pada serat optik jenis *step index*, cahaya berpropagasi secara *zigzag*, karena terpantul sempurna pada permukaan inti. Secara jelas skema penjalaran sinar dalam serat optik *step index* diperlihatkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema Jalannya Sinar dalam Serat Optik *Step Index*
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Jenis POF yang pertama kali dibuat dan umum digunakan adalah jenis *step index*. *Step index* umumnya memiliki NA sebesar 0,5. Jenis lain adalah *step index* dengan NA rendah (*Low-NA*), *Double Step Index* (DSI), *Multi Core Step Index*, dan

Double Step Index Multi Core (DSI-MC). Perbedaan masing-masing jenis tersebut secara jelas ditunjukkan pada Gambar 2.8.

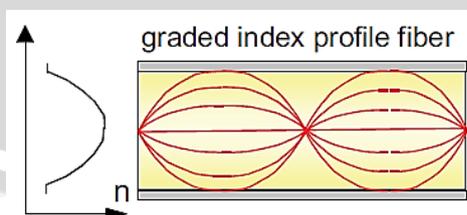


Gambar 2.8. Jenis Serat Optik *Step Index Profile* (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Low-NA POF digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan *bandwidth*. *DSI-POF* memiliki dua lapisan selubung yang menyelimuti inti dengan indeks bias yang berbeda. Pada *DSI-POF* cahaya yang terbias karena bengkokan dapat dipantulkan kembali ke inti oleh selubung. *MC-SI-POF* memiliki banyak inti dalam satu kabel. *MC-DSI-POF* memiliki banyak inti yang terselimuti dengan dua selubung dalam satu kabel. Cahaya dari sumber yang dipancarkan ke *MC-DSI-POF*, akan terbagi ke masing-masing inti dan menjalar dalam inti yang berbeda. Sumber yang digunakan untuk kabel *multi core* pada umumnya adalah *Multi Core Fiber Laser* (MCFL).

b. *Graded index multimode*

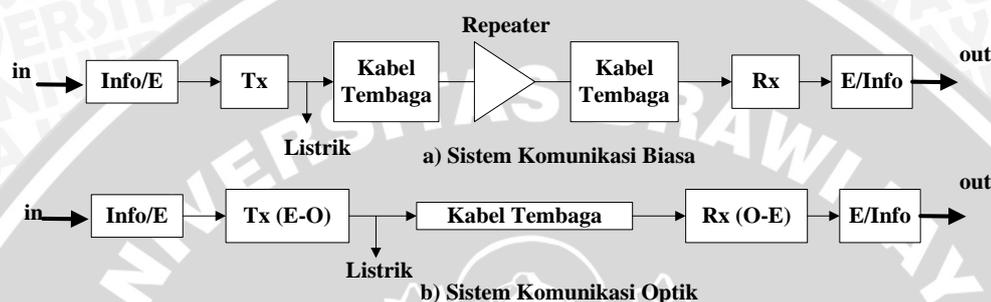
Jenis ini memiliki inti dengan indeks bias yang berangsur-angsur mengecil ketika jaraknya semakin jauh dengan sumbu inti dan akan membentuk *mode* parabola. Nilai profil indeks bias serat jenis ini adalah dua. Pada serat optik jenis *graded index*, cahaya berpropagasi dengan lintasan sinusoidal karena adanya pembiasan. Skema jalannya sinar dalam serat optik *graded index* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Skema Jalannya Sinar Dalam Serat Optik *Graded Index* (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

2.3. Sistem Komunikasi Serat Optik

Sistem komunikasi secara umum terdiri atas sumber pengirim informasi, detektor penerima informasi, dan media transmisi. Pengirim berfungsi 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. Blok diagram sistem komunikasi umum dan serat optik ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Blok Diagram Sistem Komunikasi Biasa dan Serat Optik
(Sumber: Santoso, 2010)

Keterangan:

- Tx : Pengirim
- Rx : Penerima

Perbedaan sistem komunikasi optik dengan sistem komunikasi umum terletak pada proses pengiriman sinyal. Pada sistem komunikasi umum, sinyal informasi diubah ke sinyal listrik. 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 akan diubah kembali ke listrik setelah sampai di penerima. Sistem komunikasi serat optik terdiri atas beberapa unsur komponen yang akan dijelaskan pada sub bab berikut.

2.3.1 Sumber Optik

Sumber optik adalah perangkat pembangkit gelombang elektromagnetik 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 untuk mengirim cahaya informasi melalui serat optik, yaitu *Light Emitting Diode* (LED) dan *Laser Diode* (LD) yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. *Laser Diode* dan *Light Emitting Diode*
(Sumber: *Excelitas Technologies*, 2014)

Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan sumber pengirim optik menurut Robert J. Hoss (1990) adalah:

- Proses penguatan sinyal dari sinyal elektrik ke sinyal optik agar daya yang dikeluarkan optimal.
- Umpan balik sebagai pengontrol kinerja seiring dengan perubahan terhadap panas dan waktu.
- Kestabilan kinerja dan lamanya siklus hidup perangkat atau sumber pengirim.
- Rugi-rugi kopling, yaitu rugi-rugi daya yang ditimbulkan saat pertama kali sinyal optik ditransmisikan ke dalam serat optik.

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 rendah (kurang dari 100 Mbits/s) pada jarak yang relatif dekat. LED umum digunakan pada serat optik *multimode*, karena memiliki spektrum cahaya yang lebar.

b. ***Laser Dioda (LD)***

Laser diode mempunyai efisiensi yang jauh lebih baik daripada LED dan menghasilkan daya optik yang jauh lebih tinggi yaitu lebih dari satu watt. LD memiliki spektrum cahaya yang lebih sempit biasanya digunakan untuk komunikasi menggunakan serat optik *singlemode*.

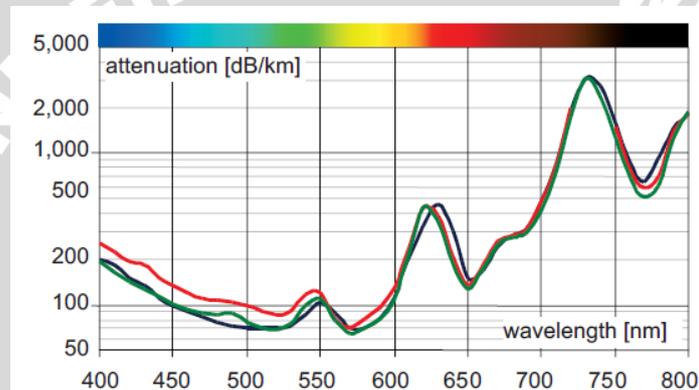
Masing-masing sumber optik ini memiliki parameter dan karakteristik yang merupakan bahan pertimbangan dalam pemilihan yang akan digunakan. Pada Tabel 2.4 dibandingkan beberapa karakteristik dari dua jenis sumber optik.

Tabel 2.4. Perbandingan Karakteristik LED dan LD

No	Karakteristik	LED	LD
1	Waktu jangkit (ns)	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 kopling	Lebih besar	Lebih kecil
5	Kepekaan suhu	Lebih tahan	Peka perubahan

(Sumber : Syauki, 2008)

Jenis sumber cahaya yang potensial untuk digunakan pada POF adalah LED maupun LD merah dengan panjang gelombang 650-670 nm. LED dengan panjang gelombang tersebut lebih murah dan memiliki atenuasi yang cukup rendah. Gambar 2.12 memperlihatkan kurva redaman pada POF jenis *step index* dengan NA 0,5 untuk beberapa panjang gelombang.



Gambar 2.12. Redaman pada SI-POF Standar
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

2.3.2 Detektor Optik

Detektor optik adalah alat yang dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik kembali. Terdapat dua tipe detektor optik, yaitu *Positive-Intrinsic Negative* (PIN) dan *Avalanched Photo Diode* (APD). Perancangan dan pemilihan perangkat penerima sangat menentukan dalam suatu analisis sensitivitas dari besarnya daya optik minimum yang didapat dideteksi oleh detektor. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan menurut Robert J. Hoss (1990) antara lain:

- Pemilihan panjang gelombang optik yang beroperasi. Sifat redaman serat optik sebagai fungsi dari panjang gelombang dan jarak, akan menentukan berapa daya yang diterima detektor.
- *Range* atau jangkauan penerimaan daya optik. *Range* yang lebih lebar akan membuat fleksibilitas yang tinggi dalam penerapan di lapangan.
- Penguatan daya optik sesaat setelah cahaya optik dideteksi. Daya sinyal optik yang sampai di ujung penerima biasanya tidak terlalu besar karena berkurang sepanjang

transmisinya dalam serat optik, sehingga perlu dikuatkan terlebih dahulu sehingga pemrosesan penerjemahan informasi dapat dilakukan dengan sempurna.

- Rugi-rugi kopling yaitu rugi-rugi daya sesaat setelah sinyal keluar dari serat optik dan masuk ke detektor penerima.

Tabel 2.5 menampilkan perbandingan parameter dan karakteristik dua jenis detektor optik.

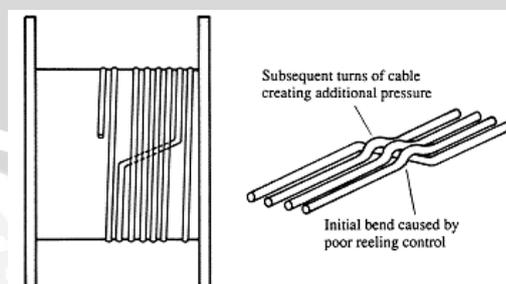
Tabel 2.5. Perbandingan Parameter dan Karakteristik PIN dan APD

No	Karakteristik	PIN	APD
1	Daya optik minimum	Lebih besar	Lebih kecil
2	Responsivitas	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)

2.4. *Macrobending*

Bending 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 (*macrobending*) dan pembengkokan mikro (*microbending*). Batasan terjadinya *macrobending* adalah besar jari-jari bengkakan yang lebih lebar dibandingkan jari-jari serat optik sehingga menyebabkan kerugian. Pembengkokan mikro (*microbending*) terjadi jika jari-jari bengkakan lebih kecil dari jari-jari serat optik karena ketidakteraturan pada permukaan batas antara inti dan selubung secara acak pada serat optik, karena proses pembuatan 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 *macrobending* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13.



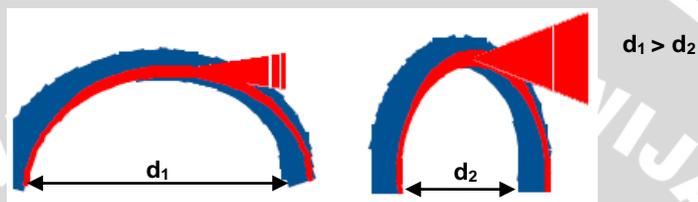
Gambar 2.13. Efek *Macrobending*

(Sumber: Elliot *et al*, 2002)

Penyelidikan secara teoritis tentang pembengkokan pada serat optik telah dimulai pada tahun 1976, ketika Dietrich Marcuse menjelaskan persamaan rugi-rugi

bengkokan (Marcuse, 1976: 216). Pada tahun 1986, Harris dan Peters melakukan percobaan pengukuran rugi-rugi sebagai fungsi panjang gelombang dan jari-jari bengkokan (Harris *et al*, 1986). Ross Schermer dan James Cole mempresentasikan persamaan yang sama seperti Marcuse namun dengan koreksi terhadap tekanan induksi (Schermer *et al*, 2007).

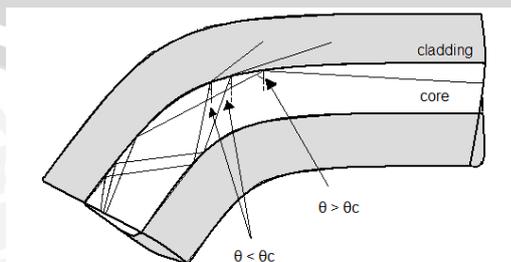
Macrobending pada serat optik mengakibatkan cahaya dapat keluar dari kabel ketika serat dibengkokkan. Ketika bengkokan semakin tajam dengan diameter bengkokan semakin kecil, semakin banyak cahaya yang keluar. Fenomena ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Ilustrasi Skematik *Macrobending*
(Sumber: Jay, 2010)

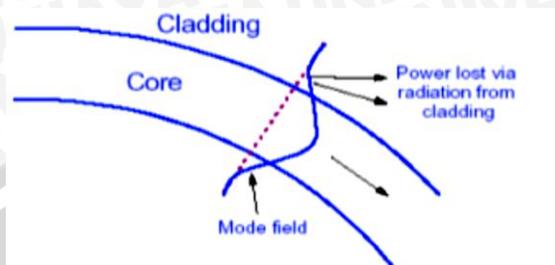
Pada Gambar 2.14 bagian kiri terlihat hanya sedikit bagian dari cahaya yang terbias keluar dari jalur gelombang ketika dibengkokkan. Pada Gambar 2.14 di kanan mengilustrasikan lebih banyak cahaya yang terbias keluar ketika serat dibengkokkan dengan diameter lebih kecil. Gambar 2.14 menunjukkan bahwa jika bengkokkan semakin tajam, semakin banyak cahaya yang keluar dari serat.

Pada serat optik jenis *step index multimode* yang memiliki diameter inti relatif besar, terdapat beberapa mode cahaya yang menjalar pada inti serat. Sebagian mode mengambil jalur pendek di tengah inti dan disebut dengan *low order modes*. Sedangkan mode lain melewati jalur yang lebih panjang dan lama karena terpantul pada dinding selubung dan *core* secara zig zag. Mode cahaya ini datang dengan sudut tajam dan disebut *high order modes*. Gambar 2.15 menjelaskan skema *macro bending* dengan mode cahaya yang ada pada inti serat optik.



Gambar 2.15. Skema *Macrobending* Pada Serat Optik
(Sumber: Andre *et al*, 2006)

Gambar 2.15 memperlihatkan cahaya *high order modes* keluar dari inti ke selubung karena 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 terpantulkan di dalam, tapi hilang di material selubung (Lemlem, 2012).



Gambar 2.16. Radiasi Daya ke Selubung Saat Bengkokan
(Sumber: Lemlem, 2012: 16)

Pada Gambar 2.16 terlihat ketika terjadi bengkokan tajam, *mode field* terluar atau *high order modes* harus menjalar lebih cepat dari mode 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 terdisipasi ke bagian selubung.

Bengkokan pada serat optik akan menyebabkan bagian dalam serat optik termampatkan dan bagian luar menjadi tertarik lebih panjang. Fenomena ini membuat kepadatan material akan berubah. Perubahan kepadatan material karena adanya bengkokan pada serat optik dituliskan pada Persamaan (2-3) (Lau, 1981).

$$N = \frac{\bar{R}}{R} N_0 \quad (2-3)$$

dengan:

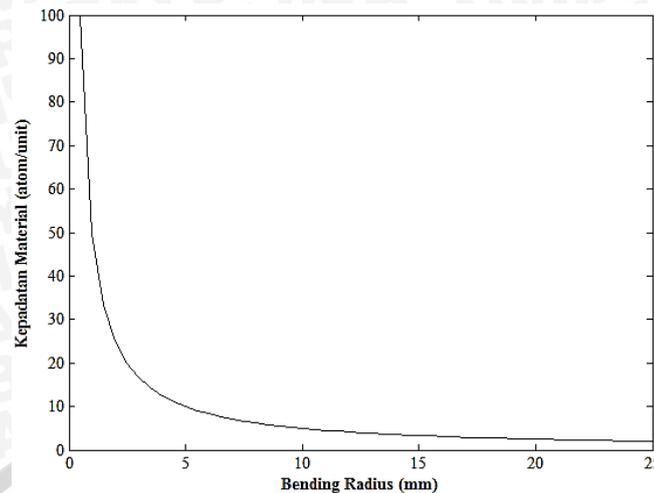
N = kepadatan material setelah bengkokan (atom/unit)

N_0 = kepadatan material sebelum bengkokan (atom/unit)

R = jari-jari bengkokan (m)

\bar{R} = *mean radius* bengkokan (m)

Berdasarkan Persamaan (2-3) dapat ditunjukkan hubungan jari-jari bengkokan terhadap kepadatan material pada Gambar 2.17. Semakin kecil jari-jari bengkokan, kepadatan material akan semakin meningkat.



Gambar 2.17. Karakteristik Kepadatan Material terhadap Indeks Bias

Perubahan nilai kepadatan material akan mempengaruhi nilai indeks bias serat optik. Perubahan nilai indeks bias yang disebabkan oleh perubahan kepadatan material dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-4) (Lau, 1981).

$$n^2 = 1 + \frac{N\alpha}{1 - \frac{N\alpha}{3}} \tag{2-4}$$

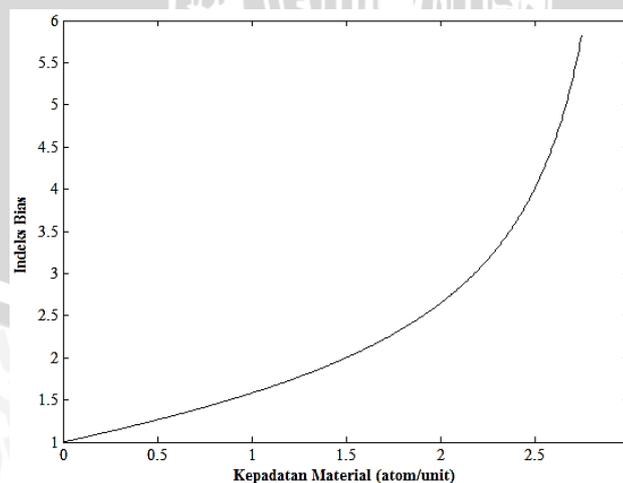
dengan:

n = indeks bias

N = kepadatan material setelah bengkokan (atom/volume unit)

α = polarizabilitas atom (Coulomb².m²/Joule)

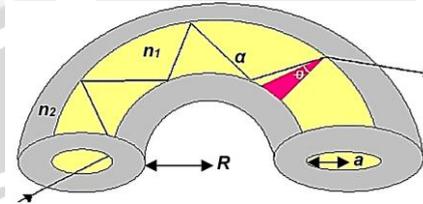
Berdasarkan Persamaan (2-4) dapat ditunjukkan hubungan kepadatan material terhadap indeks bias pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Karakteristik Kepadatan Material terhadap Indeks Bias

Gambar 2.17 dan Gambar 2.18 menunjukkan bahwa terjadinya bengkokan atau *macrobending* mengakibatkan kepadatan material serat optik akan berubah. Semakin

kecil jari-jari bengkokan akan mengakibatkan kepadatan material meningkat. Kepadatan material akan mempengaruhi besar indeks bias. Semakin padat suatu material maka indeks biasnya akan naik. Perubahan indeks bias akan mengakibatkan perubahan pada penjalaran cahaya pada serat optik. Sudut kritis, sudut penerimaan, dan NA akan berubah sehingga cahaya tidak lagi mengalami *total internal reflection*. Cahaya akan dibias keluar selubung dan menjadi menimbulkan rugi-rugi yang disebut dengan *macrobending loss*.



Gambar 2.19. Perhitungan *Macrobending Loss*
(Sumber: *Fiber Optics For Sale*, 2009).

Gambar 2.19 menunjukkan perhitungan *macrobending loss* secara matematis yang dituliskan sebagai Persamaan (2-5) (Maharani *et al*, 2009):

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

Keterangan:

L_{bend} = bend loss (dB)

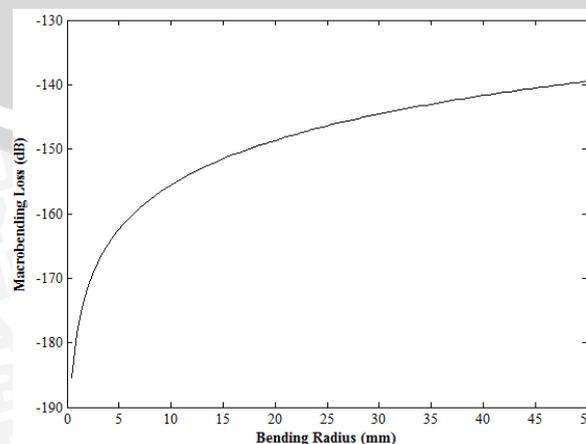
Δ = beda indeks bias inti (n_1) dan selubung (n_2)

R = jari-jari lengkungan (m)

a = jari-jari inti serat optik (m)

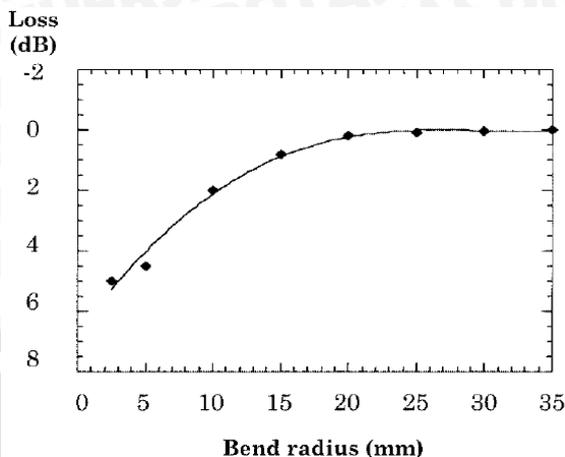
$\alpha = \infty$ untuk serat optik *step index*, 2 untuk serat optik *graded index*

Hubungan antara rugi-rugi *macrobending* dengan *bend radius* dari Persamaan (2-5) ditunjukkan pada Gambar 2.20.



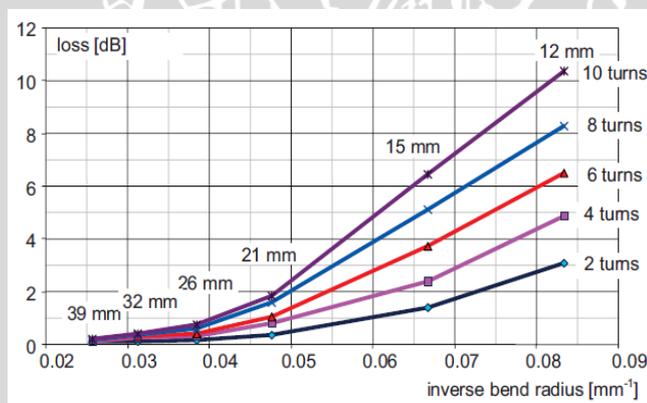
Gambar 2.20. Karakteristik Rugi-rugi *Macrobending* terhadap Jari-jari Bengkokan

Hubungan antara besar *bend radius* terhadap rugi-rugi *macrobending* pada POF berbahan PMMA ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Karakteristik Rugi-rugi *Macro bending* terhadap Jari-jari Bengkokan pada POF Berbahan PMMA (Sumber: Zubia *et al*, 2000)

Rugi-rugi *macro bending* dipengaruhi oleh jari-jari bengkokan, jumlah bengkokan yang tersusun dalam bentuk lilitan, dan panjang gelombang sinyal. Pengaruh jari-jari bengkokan dan jumlah bengkokan yang tersusun dalam bentuk lilitan pada POF dengan NA standar diperlihatkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22. Pengaruh Jari-Jari Bengkokan dan Jumlah Bengkokan yang Tersusun Dalam Bentuk Lilitan Pada Rugi-Rugi *Macro bending* (Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Pada Gambar 2.22, jumlah lilitan (*turns*) yang digunakan bervariasi antara dua, empat, enam, delapan, dan sepuluh lilitan dan jari-jari bengkokan yang digunakan antara 12 mm sampai dengan 39 mm. Hal yang dapat disimpulkan dari Gambar 2.22 adalah nilai rugi-rugi atau *loss* akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah lilitan. Semakin kecil jari-jari bengkokan akan meningkatkan besar rugi-rugi yang terjadi.

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* yaitu 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* (R_c) adalah jari-jari dimana rugi-rugi bengkokan naik secara drastis. Ketika jari-jari bengkokan lebih besar dari 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 dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-6) (Golnabi *et al*, 2011):

$$R_c = R_1 \frac{n_1 + n_2}{n_1 - n_2} \quad (2-6)$$

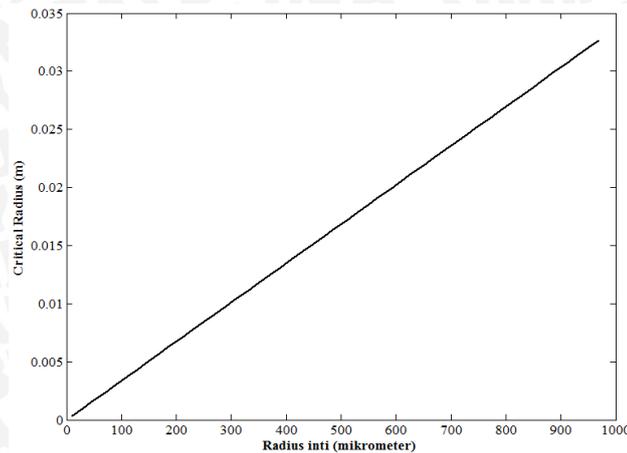
dengan:

n_1 = indeks bias inti

n_2 = indeks bias selubung

R_1 = jari-jari inti (m)

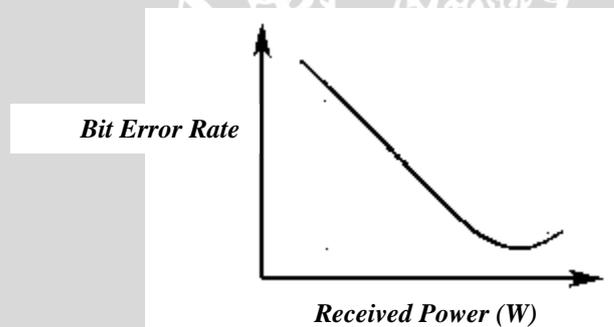
Berdasarkan Persamaan (2-6), hubungan antara besar jari-jari inti terhadap *critical radius* pada POF dengan indeks bias inti 1.492 dan indeks bias selubung 1.406 ditunjukkan pada Gambar 2.23. Semakin besar radius inti R_1 , maka *critical radius* akan semakin besar. Semakin rendah beda indeks bias, maka *critical radius* akan semakin besar.



Gambar 2.23. Karakteristik *Critical Radius* terhadap Jari-jari Inti pada POF Berbahan PMMA

2.5. Kinerja Sistem Komunikasi Serat Optik

Kinerja sistem komunikasi serat optik dipengaruhi oleh besar rugi-rugi yang terjadi. Rugi-rugi pada sistem komunikasi akan mengurangi besar daya yang diterima pada penerima. Hal ini akan mempengaruhi kinerja sistem yang diindikasikan dalam parameter *Bit Error Rate* seperti yang ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.24. Ketika daya yang diterima semakin kecil, nilai *Bit Error Rate* akan tinggi. Hal ini menunjukkan banyak kesalahan data pada data yang ditransmisikan dalam sistem.



Gambar 2.24. Kurva *Bit Error Rate* terhadap Daya yang Diterima (Sumber: *The Fiber Optic Association*, 2009)

Nilai rugi-rugi 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 rugi-rugi (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 = rugi-rugi (dB)

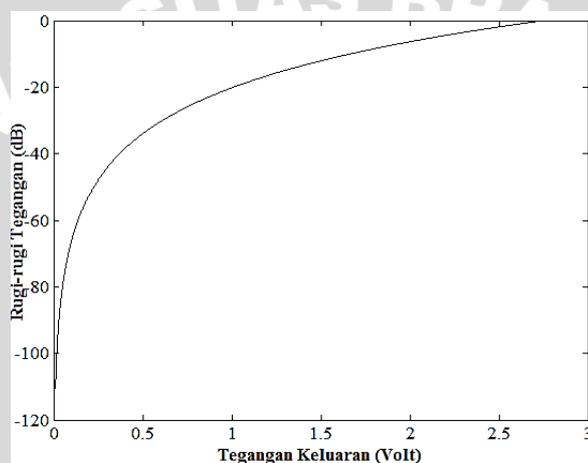
P_i = daya masukan (Watt)

P_o = daya keluaran (Watt)

V_i = tegangan masukan (Volt)

V_o = tegangan keluaran (Volt)

Pada Persamaan (2-7) dijabarkan persamaan untuk menghitung rugi-rugi dari nilai tegangan masukan dan keluaran. Persamaan ini digunakan untuk memudahkan dalam perhitungan dari hasil penelitian. Hal ini dikarenakan dalam pengukuran kinerja sistem, yang menjadi acuan adalah tegangan. Hubungan antara tegangan keluaran dengan rugi-rugi ditunjukkan pada Gambar 2.25. Nilai rugi-rugi tegangan naik secara logaritmik terhadap besar tegangan keluaran.



Gambar 2.25. Karakteristik Redaman Tegangan terhadap Tegangan Keluaran

Beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mengukur kualitas sistem komunikasi digital, termasuk sistem komunikasi serat optik, diantaranya adalah BER dan *eye pattern*. Penjelasan untuk masing-masing parameter tersebut diuraikan pada sub bab selanjutnya.

2.5.1 Bit Error Rate (BER)

Perhitungan kinerja yang paling dasar dalam sistem digital adalah dengan menganalisis probabilitas kesalahan bit. BER merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER menyatakan berapa jumlah bit salah yang terjadi dalam dalam satuan detik. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit salah terhadap total bit yang diterima dengan rentang nilai BER 0-1. Secara matematis BER dituliskan pada Persamaan (2-8) (Hui, 2009).

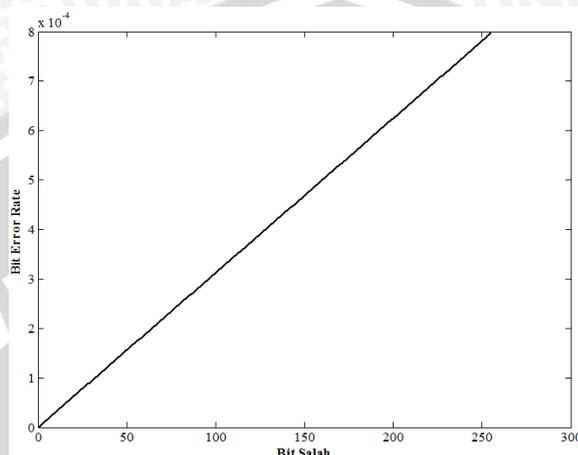
$$BER = \frac{E_b}{T_b} \quad (2-8)$$

dengan:

E_b = bit salah

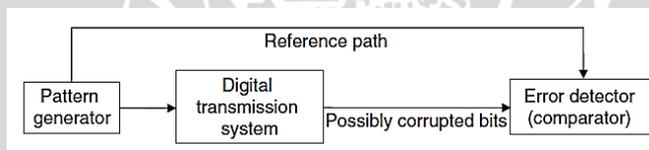
T_b = total bit yang ditransmisikan

Hubungan matematis pada Persamaan (2-8) ditampilkan secara grafis dalam Gambar 2.26. Total bit yang ditransmisikan adalah sebesar $3,2 \times 10^5$. Nilai ini disesuaikan dengan besar bit yang ditransmisikan pada eksperimen. Besar BER akan naik secara linier dengan pertambahan jumlah bit yang salah dalam transmisi.



Gambar 2.26. Karakteristik BER terhadap Kesalahan Bit

Nilai BER dapat diperoleh dengan melakukan pengukuran menggunakan BER *test set*. Pada Gambar 2.27 ditunjukkan blok diagram pengukuran BER.



Gambar 2.27 Konfigurasi Pengukuran BER *Test Set*
(Sumber: Hui, 2009)

Komponen utama dari konfigurasi pada Gambar 2.23 adalah *pattern generator* yang membangkitkan sinyal yang ditransmisikan dan *error detector* untuk membandingkan bit yang diterima sistem dengan bit referensi. Jika dua sinyal memiliki perbedaan, maka akan diperlihatkan jumlah kesalahan yang terjadi.

Nilai BER yang diharapkan secara teoritis disebut dengan nilai *Probability of Error* (P_e). Estimasi nilai P_e akan akurat apabila pengujian BER dilakukan dalam periode yang lama dan jumlah kesalahan bit yang besar. Persamaan untuk menghitung P_e ditunjukkan pada Persamaan (2-9) (Miller, 1989).

$$P_e = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E}{N_0}} \right) \quad (2-9)$$

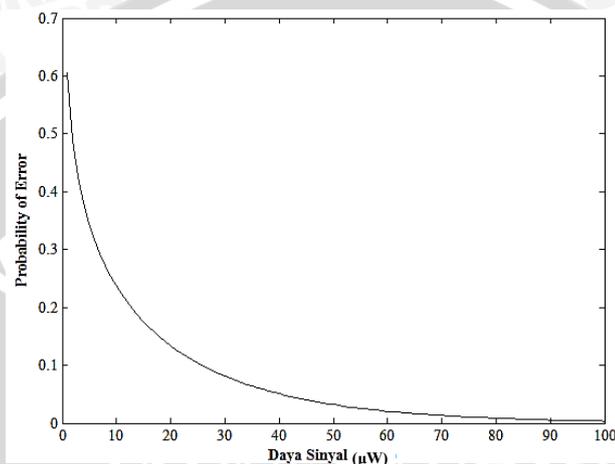
dengan:

E = daya sinyal yang diterima (Watt)

N_0 = daya noise dari sinyal yang diterima (Watt)

$erfc$ = complementary error function

Gambar 2.24 menggambarkan kurva karakteristik *Probability of Error* untuk nilai N_0 konstan sebesar $25\mu\text{W}$ dari Persamaan (2-9). *Noise* yang terjadi merupakan *modal noise* yang disebabkan karena *mode selective loss* yang muncul ketika terjadi *bending*.



Gambar 2.28. Karakteristik *Probability of Error* terhadap Daya Sinyal

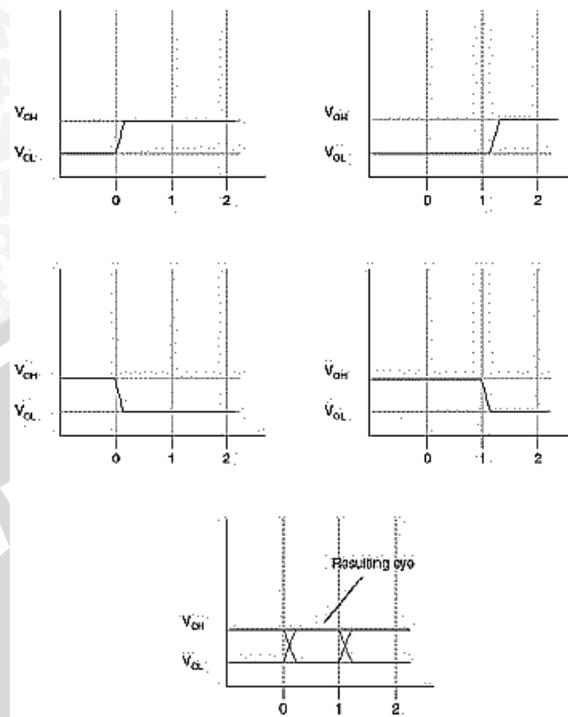
Gambar 2.28 menunjukkan bahwa semakin besar daya sinyal, probabilitas kesalahan akan semakin turun. Nilai daya sinyal yang diterima dipengaruhi oleh besar amplitudo tegangan sinyal. Distorsi pada amplitudo sinyal akan mengurangi besar daya sinyal dan menambah besar *noise* pada sinyal yang diterima. Sehingga adanya distorsi pada sinyal akan meningkatkan probabilitas kesalahan bit pada sistem.

European FP7 Integrated Project menyatakan kebutuhan BER untuk layanan internet saat ini adalah kurang dari 10^{-8} . Pada seluruh aplikasi *Recommendation ITU-T G.691*, *ITU-T G.692*, *ITU-T G.693*, *ITU-T G.695*, *ITU-T G.698.1*, *ITU-T G.698.2* and *ITU-T G.959.1*, telah disebutkan bahwa sistem optik harus didesain dengan nilai BER tidak kurang 10^{-12} . *Recommendation ITU-T G.957* menyatakan syarat BER adalah 10^{-10} .

2.5.2 Eye Pattern

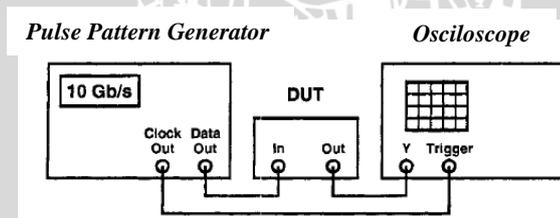
Eye pattern atau *eye diagram* adalah tampilan osiloskop dari sinyal digital yang mengalami proses *sampling* beberapa kali untuk mendapatkan tampilan dari karakteristik sinyal tersebut. *Eye pattern* terbentuk dengan melakukan *superimpose* dari beberapa baris bit. Sebagai contoh jika bit 011, 001, 100, dan 110 mengalami

superimpose satu sama lain, maka akan didapatkan bentuk *eye diagram* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29.



Gambar 2.29. Pembentukan *Eye Diagram*
(Sumber: Behera *et al*, 2011)

Pengukuran *eye diagram* dilakukan dalam domain waktu dan ditampilkan dalam osiloskop. Pada Gambar 2.30 diperlihatkan susunan perangkat untuk mengukur *eye diagram*:



Gambar 2.30. Susunan Perangkat Pengukuran *Eye Diagram*
(Sumber: Sackinger, 2009)

Pulse pattern generator membangkitkan sinyal data dan sinyal *clock*. Data tersebut dialirkan ke *Device Under Test* (DUT) lalu sinyal ditampilkan di osiloskop. Osiloskop mendapatkan *trigger* dari sinyal *clock* bukan dari sinyal data.

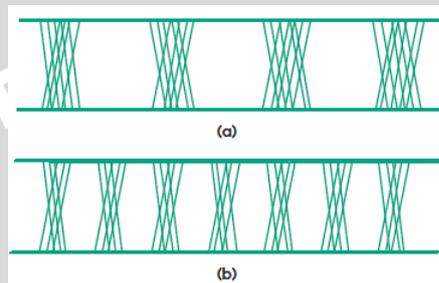
Parameter terbaik untuk menentukan baik tidaknya sinyal adalah pada ukuran *eye opening* sinyal tersebut. Semakin besar ukurannya maka akan semakin mudah untuk mendeteksi sinyal dan semakin kecil *error rate*-nya. Ketika kondisi *eye* menutup maka akan sangat sulit bahkan hampir tidak mungkin untuk mengetahui data dari sinyal tersebut. Hal ini berkaitan dengan BER dan SNR dari sinyal. Semakin besar *eye*

opening, semakin kecil BER dan SNR semakin besar. Gambar 2.31 menunjukkan gambar *eye diagram* dengan *eye opening* yang besar dan lebar, sehingga dapat dikatakan sebagai kondisi ideal.



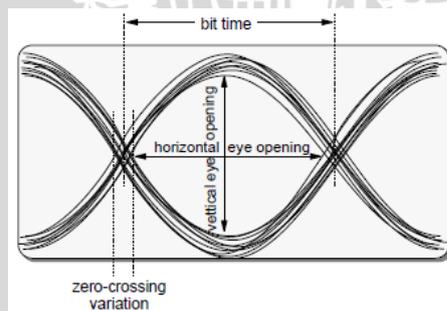
Gambar 2.31. *Eye Diagram* Ideal dengan *Finite Rise* dan *Fall Time*
(Sumber: Breed, 2005)

Timing error banyak terjadi ketika sinyal ditransmisikan dengan kecepatan tinggi. Bentuk *eye diagram* sinyal dengan *timing error* diperlihatkan pada Gambar 2.32.



Gambar 2.32. *Timing Error* Pada *Eye Diagram*
(Sumber: Breed, 2005)

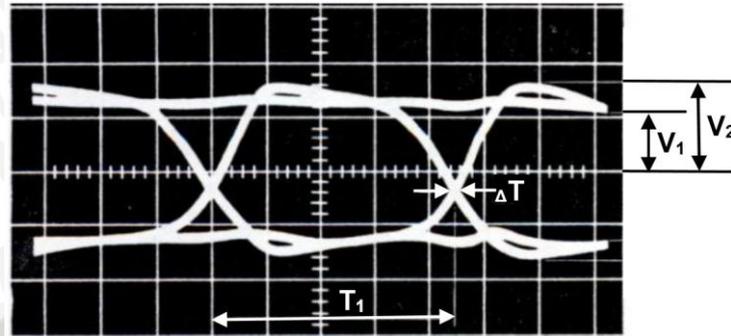
Jenis *timing error* pada Gambar 2.32 disebut dengan *jitter*. *Jitter margin* pada Gambar 2.32b lebih kecil daripada Gambar 2.32a tetapi *eye opening* lebih kecil karena *bit rate* yang lebih tinggi. Semakin tinggi *bit rate*, semakin kecil ukuran *eye opening* sehingga potensi *data error* semakin besar (Behera *et al*, 2011). Hal-hal yang harus diperhatikan dalam menganalisis skema *eye diagram* ditunjukkan pada Gambar 2.33.



Gambar 2.33. 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.



Gambar 2.34. Parameter Pada *Eye Diagram*
(Sumber: Derrickson, 2004)

Berdasarkan Gambar 2.34 dapat dihitung parameter-parameter berikut:

- *Noise margin* adalah ketebalan 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 . *Noise margin* secara matematis ditulis sebagai Persamaan (2-10) (Keiser, 2004):

$$\text{Noise margin (\%)} = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (2-10)$$

dengan:

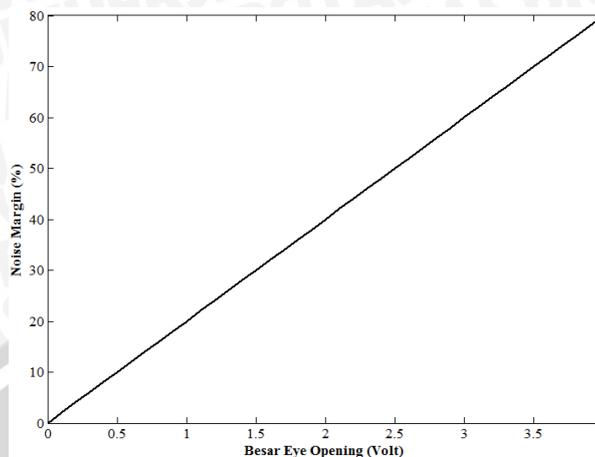
V_1 = puncak sinyal dilihat dari besar *eye opening* (Volt)

V_2 = tegangan maksimum sinyal (Volt)

Nilai V_1 dan V_2 dipengaruhi oleh besar *noise* yang ada pada sistem. Salah satu penyebab terjadinya *noise* adalah adanya penurunan level daya optik. Pada level daya optik yang rendah, sinyal yang diterima akan mengalami peningkatan *noise* yang ditunjukkan dalam variasi amplitudo. Variasi amplitudo ini akan berpengaruh pada besar *eye opening* dan nilai tegangan maksimum sinyal yang erat kaitannya dengan *noise margin*.

Hubungan antara besar *eye opening* (V_1) dengan *noise margin* untuk nilai V_2 sebesar 5 Volt ditunjukkan pada Gambar 2.35. Nilai V_2 disesuaikan dengan nilai maksimal dari perangkat eksperimen. Semakin besar *eye opening* maka nilai *noise margin* akan semakin besar. *Eye opening* yang besar menunjukkan hanya sedikit *noise*

yang terjadi pada sistem. Sehingga dapat dikatakan kekebalan sistem terhadap *noise* atau *noise margin* adalah tinggi.



Gambar 2.35. Karakteristik *Noise Margin* Terhadap Besar *Eye Opening*

- *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*. *Timing jitter* dapat dihitung dari jumlah distorsi waktu (ΔT) dan waktu *bit interval* (T_b) dengan Persamaan (2-11) (Keiser, 2004):

$$\text{Timing jitter (\%)} = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100\% \quad (2-11)$$

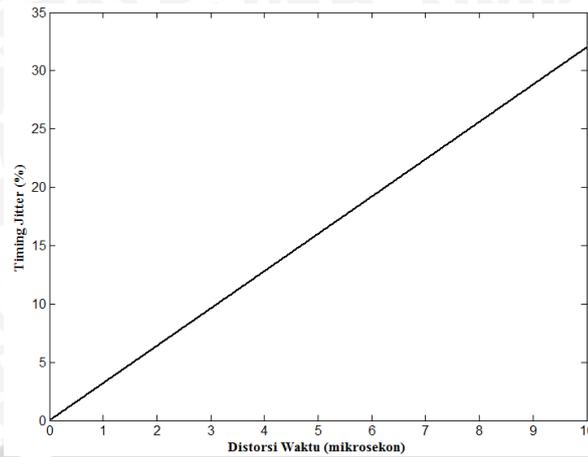
dengan:

ΔT = jumlah distorsi (s)

T_b = waktu *bit interval* (s)

Timing jitter akan mengurangi lebar *eye opening* atau *eye width* pada *eye pattern*. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan level daya optik. Pada level daya optik yang rendah, sinyal yang diterima akan mengalami peningkatan *noise* yang ditunjukkan dalam variasi amplitudo. Rangkaian penerima menerjemahkan variasi amplitudo tersebut dalam domain waktu yang menyebabkan *eye width* semakin berkurang. Variasi amplitudo dalam domain waktu merupakan distorsi waktu yang akan berpengaruh pada besar *timing jitter*.

Hubungan antara besar distorsi waktu (ΔT) dengan *timing jitter* untuk waktu *bit interval* sebesar 31,25 μs ditunjukkan pada Gambar 2.36. Nilai *bit interval* diambil dari nilai perangkat eksperimen, yaitu PRBS Generator. Semakin besar distorsi waktu maka nilai *timing jitter* akan semakin meningkat.



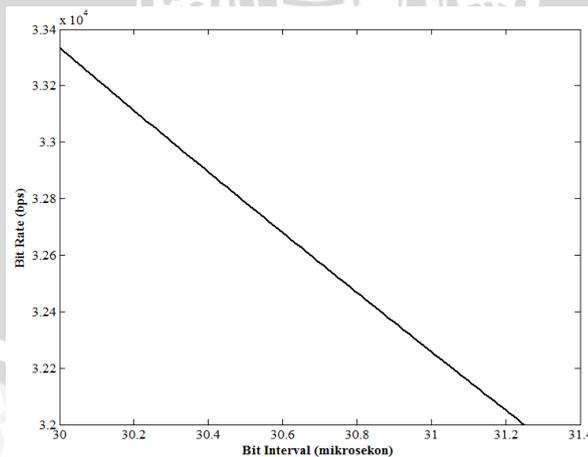
Gambar 2.36. Karakteristik *Timing Jitter* Terhadap Besar Distorsi Waktu

- *Bit Rate* adalah kecepatan pengiriman data pada transmisi. *Bit rate* dapat dihitung dari *bit interval* dengan menggunakan Persamaan (2-10) (Agilent, 2012):

$$Bit\ Rate = \frac{1}{T_b} \tag{2-12}$$

Nilai *bit interval* dihitung dari titik *zero crossing point* pada *eye pattern*. Nilai *zero crossing point* akan berpengaruh pada besar *eye width*. Semakin lebar *eye width*, maka waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan satu bit data akan semakin lama. Waktu untuk mentransmisikan satu bit data disebut dengan *bit interval*. Besar waktu ini akan berpengaruh pada kecepatan bit data yang ditransmisikan atau *bit rate*.

Hubungan antara besar *bit interval* terhadap *bit rate* ditunjukkan pada Gambar 2.37. Semakin kecil *bit interval* maka nilai *bit rate* akan semakin besar.



Gambar 2.37. Karakteristik *Bit Rate* Terhadap Besar *Bit Interval*