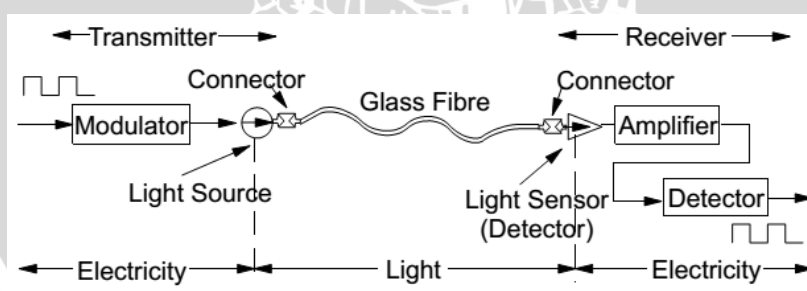


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

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 konsep dasar komunikasi serat optik, karakteristik POF, proses penjalaran cahaya pada serat optik, sumber pengirim dan detektor penerima dalam sistem komunikasi serat optik, rugi-rugi material serat optik pengaruh suhu rendah, dan parameter kinerja serat optik yang terdiri atas BER dan *eye pattern*.

### 2.1 Konsep Dasar Komunikasi Serat Optik

Suatu 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. Pada sistem komunikasi serat optik digunakan serat optik sebagai media transmisi. Blok diagram sistem komunikasi serat optik ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Sistem Komunikasi Serat Optik  
(Sumber: Dutton, 1998)

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 berikut.

### 2.1.1 Sumber Optik

Sumber optik berfungsi sebagai pemancar sinyal optik yang mengandung data. Gelombang cahaya dibangkitkan untuk membawa informasi yang akan ditransmisikan. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan sumber pengirim optik adalah proses penguatan sinyal dari sinyal elektrik ke sinyal optik agar daya yang dikeluarkan optimal dan cukup untuk mengatasi rugi-rugi yang ada selama transmisi, kestabilan kinerja dan lamanya siklus hidup sumber pengirim, rugi-rugi kopling, yaitu rugi-rugi daya saat pertama kali sinyal optik ditransmisikan ke dalam serat optik (Hoss, Robert J., 1990). 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 2.2.



Gambar 2.2 *Laser Diode* dan *Light Emitting Diode*  
(Sumber: *Excelitas Technologies*, 2014)

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. Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan beberapa karakteristik LED dan LD sebagai sumber optik.

Tabel 2.1 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)



Gambar 2.3 LED SFH756V

(Sumber: Avago, 2007)

Pada eksperimen ini digunakan LED tipe SFH756V dengan panjang gelombang 660nm. LED jenis ini didisain untuk digunakan sebagai sumber optik pada POF dengan ukuran 980/1000 dan diameter *coating* 2,2 mm. Gambar LED SFH756V ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi LED SFH756V

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		Min.	Max.	
Operating Temperature Range	$T_{OP}$	-40	+85	$^{\circ}C$
Reverse Voltage	VR		3	V
Forward Current	$I_F$		50	mA
Power Dissipation	$P_{TOT}$		120	mW
Thermal Resistance	$R_{thJA}$		450	K/W

(Sumber: Avago, 2007)

### 2.1.2 Detektor Optik

Detektor optik adalah alat yang dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik kembali. Dalam sistem serat optik, pemilihan perangkat penerima sangat menentukan dalam suatu analisis sensitivitas dari besarnya daya optik minimum yang didapat dideteksi oleh detektor. Detektor optik harus memiliki sensitivitas yang tinggi dan memiliki respon yang cepat terhadap data yang diterima. Pemilihan panjang

gelombang optik yang beroperasi juga penting karena sifat redaman serat optik sebagai fungsi dari panjang gelombang dan jarak, akan menentukan berapa daya yang diterima detektor (Hoss, Robert J., 1990).

Terdapat dua tipe detektor optik, yaitu *Positive-Intrinsic Negative* (PIN) dan *Avalanched Photo Diode* (APD). Tabel 2.3 menampilkan perbandingan parameter dan karakteristik dua jenis detektor optik.

Tabel 2.3 Perbandingan Paramater 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)



Gambar 2.4 *Photo Diode* SFH551/1V  
(Sumber: Avago, 2007)

Pada penelitian ini digunakan detektor optik jenis *photo diode* SFH551/1V yang memiliki kemampuan menerima cahaya dengan *photosensitivity spectral range* 600nm-780nm. Dektektor jenis ini digunakan sebagai penerima pada POF dengan ukuran 980/1000 dan diameter coating 2,2mm. Gambar *photo diode* SFH551/1V ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi *Photo Diode* SFH551/1V

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Operating Temperature Range	$T_c$	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{\text{stg}}$	-40	+100	$^{\circ}\text{C}$
Supply Voltage without Damage	$V_{\text{cc}}$	-0.5	15	V
Minimum Supply Voltage for Function	$V_{\text{cc min}}$	4		V
Minimum Pullup Resistance	$R_{\text{outman}}$	330		$\Omega$
Output Voltage	$V_o$	-0,5	15	V
Output Current	$I_c$		50	mA
Power Dissipation	$P_o$		100	mW

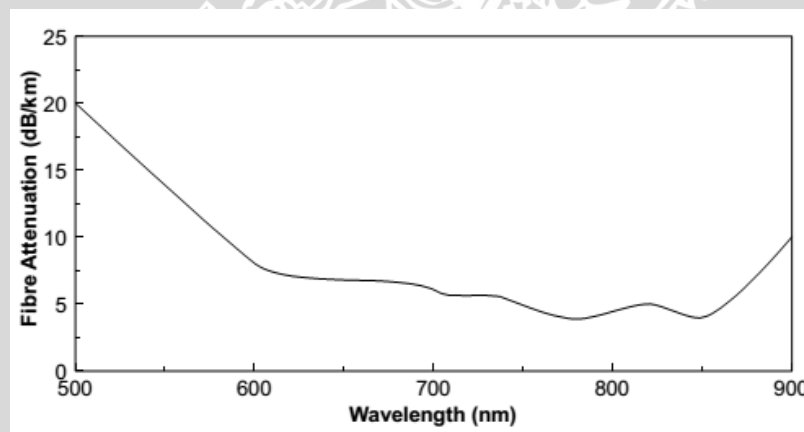
(Sumber: Avago, 2007)



## 2.2 *Plastic Optical Fiber*

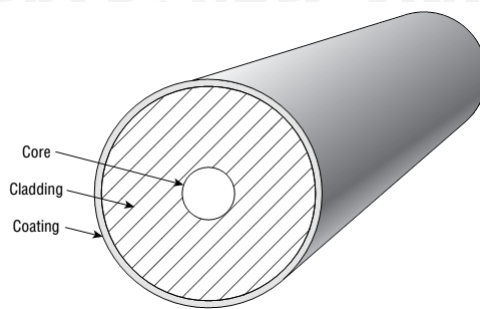
*Plastic optical fiber* merupakan salah satu jenis serat optik yang terbuat dari plastik. Umumnya bahan *PolyMethylMethAcrylate* (PMMA) atau disebut juga *plexiglass* dengan indeks bias 1,49 digunakan sebagai *core*. POF yang terbuat dari bahan PMMA umumnya bekerja dengan gelombang tampak (merah, hijau, atau biru). POF dapat bekerja pada suhu lingkungan yang cukup tinggi, yaitu 70° C hingga 85° C. (Silvio Abrete, 2013).

POF digunakan sebagai pengganti *Glass Fiber Optic* (GOF) pada komunikasi jarak pendek dan umumnya tidak lebih dari 1 km. POF biasanya digunakan sebagai saluran transmisi yang berada di dalam rumah atau gedung. Proses instalasi POF lebih mudah dilakukan dan harga POF lebih murah. POF menawarkan banyak kemudahan namun tetap memiliki performansi yang baik karena *bandwidth* yang lebar (Joseph Bufia, 2000). Jika dibandingkan dengan GOF, *plastic optical fiber* memiliki ukuran diameter yang 100 kali lebih besar dan pelemahan yang jauh lebih besar juga. Gambar 2.5 menunjukkan grafik pelemahan POF dengan bahan dasar PMMA terhadap panjang gelombang.



Gambar 2.5. Grafik Pelemahan POF terhadap Panjang Gelombang (Sumber: Dutton, 1998)

Struktur penyusun POF sama dengan serat optik yang terbuat dari bahan silika. Sinyal optik dikirimkan melalui inti serat optik yang dikelilingi oleh *cladding*. *Cladding* diselubungi oleh pelindung *coating* untuk mencegah serat optik dari kelembapan dan kerusakan mekanis. Bagian-bagian serat optik diilustrasikan pada Gambar 2.6. Inti serat optik dan *cladding* memiliki indeks bias yang berbeda agar cahaya dapat ditransmisikan dengan menggunakan prinsip *total internal reflection*.



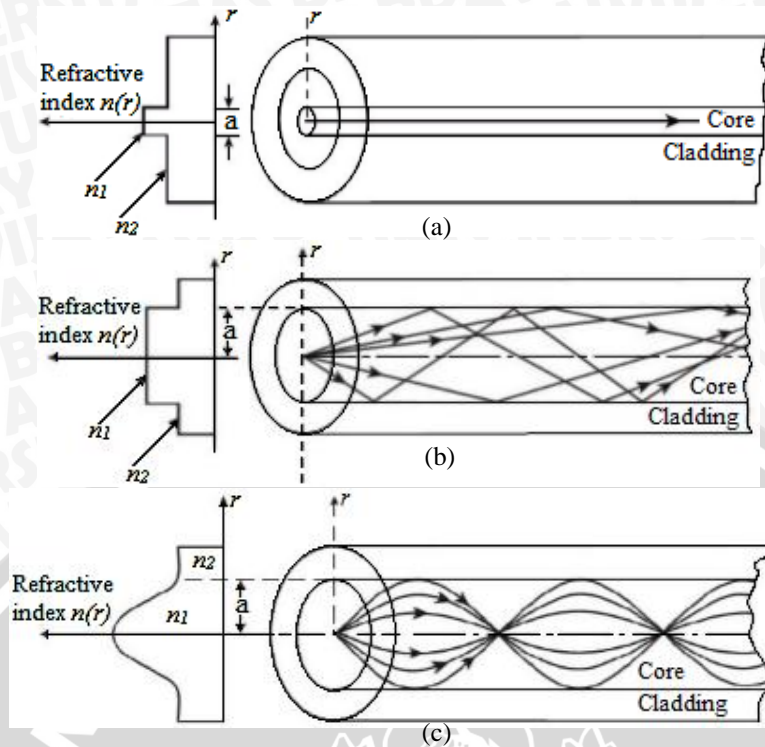
Gambar 2.6 Struktur Serat Optik  
(Sumber: Bill Woodward, 2005)

Berdasarkan jumlah mode yang dapat dikirimkan, serat optik dibagi menjadi dua jenis, yaitu serat optik *single mode* dan *multimode*. Pada serat optik *single mode*, hanya ada satu modus yang dikirimkan melalui serat optik dan tidak ada dispersi antar modus yang terjadi. Sehingga serat optik *single mode* cocok digunakan untuk jarak jauh.

Sedangkan pada serat optik *multimode*, ada lebih dari satu modus yang dapat dilewatkan secara bersamaan pada satu serat optik. Jumlah modus yang dapat dilewatkan oleh suatu serat optik bergantung pada sudut penerimaan serat optik tersebut dan secara tidak langsung bergantung pada perbandingan indeks bias *cladding* dan indeks bias inti serat optik. Serat optik jenis *multimode* ini cocok digunakan untuk jarak pendek karena adanya rugi-rugi yang muncul dari dispersi antar modus.

Serat optik *multimode* dibagi menjadi dua macam yaitu serat optik *step index multimode* dan *graded index multimode*. Serat optik *step index* memiliki indeks bias inti yang sama di seluruh bagian inti. Disebut dengan *step index* karena serat optik jenis ini memiliki karakteristik indeks bias antara inti dan *cladding* yang berupa *step* (satu perbedaan). Sedangkan serat optik *graded index* memiliki indeks bias inti yang berbeda di setiap jarak radial. Indeks bias *graded index* berkurang seiring dengan jarak radial dari nilai maksimal yang berada pada pusat inti ke nilai minimum pada *cladding*. Perbedaan struktur ketiga jenis serat optik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7.





Gambar 2.7 Macam-macam Serat Optik (a) Serat Optik *Singlemode* (b) Serat Optik *Multimode Step Index* (c) Serat Optik *Multimode Graded Index* (Sumber: John M. Senior, 2009)

### 2.2.1 Standar *Plastic Optical Fiber*

Tim peneliti teknologi *Plastic Optical Fiber* memberikan solusi untuk standar internasional dengan tujuan mencapai kualitas tinggi pada POF. Berdasarkan standar internasional dari *International Electrotechnical Commission IEC 60793-2-40* tentang spesifikasi produk serat optik, *plastic optical fiber* jenis *multimode* masuk dalam kelas A4. Standar yang ditetapkan dibagi menjadi 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 2.5.

Tabel 2.5 Standar Spesifikasi SI-POF Standar A4a-A4c

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, 2000)

### 2.3 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. Hukum Snellius dinyatakan pada Persamaan (2-1) (Berry Elliot et al, 2002).

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

dengan:

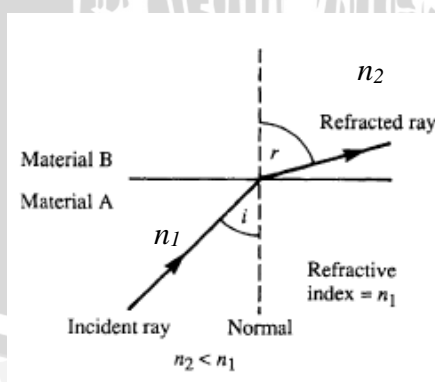
$i$  = sudut datang

$r$  = sudut bias

$n_2$  = indeks modulasi medium 2

$n_1$  = indeks modulasi medium 1

Dari persamaan 2.1 didapatkan bahwa jika cahaya merambat dari medium yang rapat ( $n_1$ ) ke medium yang kurang rapat ( $n_2$ ), maka cahaya akan dibiaskan menjauhi garis normal. Sudut datang dan sudut bias diukur dari garis normal yang berupa garis vertikal putus-putus pada gambar, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.

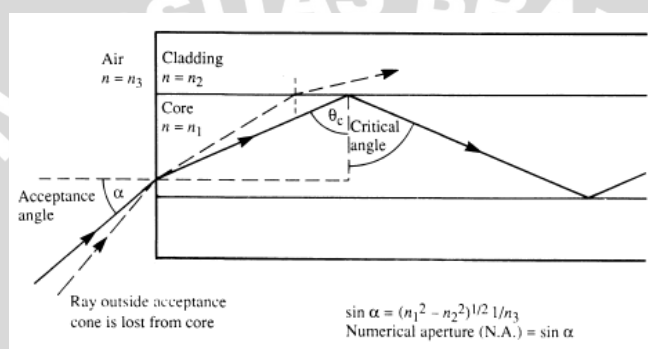


Gambar 2.8 Pembiasan Cahaya  
(Sumber: Barry Elliot *et al*, 2002)

Jika sudut datang diperbesar secara terus-menerus terhadap garis normal maka cahaya akan dibiaskan pada sudut 90 derajat terhadap garis normal, sudut datang



tersebut disebut dengan sudut kritis (*critical angle*). Jika sudut datang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya akan dipantulkan kembali oleh medium yang kurang rapat ( $n_2$ ) ke medium yang rapat ( $n_1$ ). Dengan menggunakan sudut tertentu dan lebih besar dibanding sudut kritis sebagai sudut masukan bagi sinyal optik, maka *total internal reflection* didapatkan. *Total internal reflection* inilah yang membuat sinyal optik dapat merambat di dalam inti serat optik. Namun jika sudut masukan sinyal optik lebih besar dibanding *acceptance angle* (sudut penerimaan) maka sinyal optik tidak dapat dipantulkan oleh *cladding* melainkan akan menembus selubung dan akan keluar dari serat (digambarkan dengan garis putus-putus). Ilustrasi perambatan sinyal optik dalam inti serat ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Penjalaran Cahaya dalam Serat Optik  
(Sumber: Barry Elliot, 2002)

Parameter sudut penerimaan dari serat optik berkembang menjadi sebuah parameter baru, yaitu *Numerical Aperture* (NA). NA merupakan parameter untuk mengukur kemampuan serat optik dalam mengumpulkan atau memerangkap sinar cahaya. Nilai NA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-2). Selisih antara indeks bias kulit dan inti disebut indeks bias relatif disimbolkan dengan  $\Delta$  yang dihitung menggunakan Persamaan (2-3) (Ziemann et al, 2007).

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

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-3)$$

dengan:

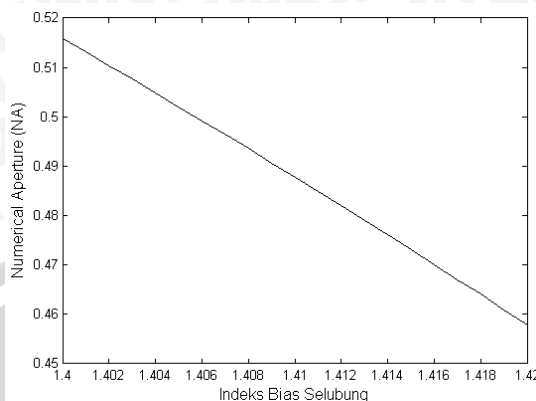
$\theta_{maks}$  = sudut penerimaan

$n_1$  = indeks bias inti

$n_2$  = indeks bias selubung

Berdasarkan Persamaan 2-2, hubungan antara besar indeks bias selubung terhadap NA untuk indeks bias inti POF sebesar 1.492 ditunjukkan pada Gambar 2.10.

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 2.10 Karakteristik NA terhadap Indeks Bias Selubung

#### 2.4 Rugi-rugi Material Serat Optik

Rugi-rugi material serat optik dipengaruhi oleh dua faktor yaitu, faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal ini berhubungan dengan kualitas jenis dan bahan serat optik. Produksi serat optik dari perusahaan tidak menjamin bahwa kualitas produknya 100% sempurna. Sehingga mempengaruhi sinyal cahaya yang merambat pada serat optik.

Faktor eksternal merupakan pengaruh luar serat optik. Serat optik dikemas sedemikian rupa sehingga tahan terhadap gangguan eksternal. Penempatan serat optik terbagi menjadi beberapa cara, yaitu di udara, bawah tanah, dalam pipa, dalam air, dan lainnya. Kondisi lingkungan ini masing-masing memiliki pengaruh yang berbeda terhadap serat optik. Berbagai kondisi lingkungan harus dipertimbangkan dengan hati-hati untuk menentukan instalasi kabel dengan mempertahankan karakteristik yang diinginkan.

Faktor eksternal yang berkaitan dengan berbagai kondisi lingkungan dapat dibagi menjadi dua, yaitu faktor eksternal alami dan faktor eksternal buatan manusia. Faktor eksternal alami, meliputi suhu, angin, air, iklim. Faktor eksternal buatan manusia dipengaruhi gas hidrogen, radiasi nuklir, tekanan, instalasi perangkat dijelaskan pada Tabel 2.6.



Tabel 2.6 Pengaruh Faktor Eksternal Alami Terhadap Serat Optik

Natural external factors		External cables					Internal cables	
		Trunk, junction and distribution					customer premises	Central office
		Aerial	Buried	Duct	Tunnel	Underwater	Building	
Temperature change	B	Cable sheath contraction with core thrusting out					-	-
	A	Increase of optical loss due to high and low temperature						
Very low temperature	B	Embrittlement of cable sheath under low temperature			-	-	-	-
	A	Crushing due to ice formation					-	-
Wind	A	Excess strain due to wind pressure	-	-	-	-	-	-
	B	Periodical excess strain due to cable dancing	-	-	-	-	-	-
Salt water	B	Corrosion of metal catenary	Corrosion of armour	-	-	Corrosion of armour	-	-
Rain and hot spring	B	Corrosion of metal catenary	Corrosion due to hot springs		-	-	-	-
Snow and ice	A	Sheath degradation, crushing and excess strain due to snow and ice	-	-	-	Sheath degradation and crushing due to ice	-	-
Water and moisture	A	Increase in optical loss due to water penetration. Decrease of strength of fibre					-	-
Sunshine	B	Degradation of sheath by UV rays	-	-	-	-	-	-
Lightning	B	Crushing damage due to lightning and hazards to personnel			-	-	-	-
Earthquakes and slip, ground subsidence and falling stones	B	Sheath degradation and impulsive excess strain due to falling stones	Cutting of cables due to ground movements		-	-	-	-
Condition of soil	B	-	Corrosion of armour	-	-	-	-	-
Rodents, birds and insects	B	Sheath damage due to birds, rodents and insects		-	-	-	-	-
Hydrogen	A	Increase in optical loss due to hydrogen					-	-
Water flow	B	-	-	-	-	Cable damage	-	-
Mould growth	B	-	-	Sheath damage	-	-	Sheath damage	-

(Sumber: ITU-T Manual, 2009)

Pertimbangan konstruksi struktur kabel diperlukan untuk melindungi serat optik sehingga mengurangi kerugian yang timbul. Komponen kabel seperti *cladding* dan *jacket* berperan penting untuk mengurangi *microbending* disebabkan oleh kekuatan mekanik eksternal pada kabel juga melindungi pengaruh perubahan suhu. Selain itu perlu adanya lapisan khusus untuk menjaga serat optik dari perubahan suhu.

Faktor eksternal buatan manusia dapat diprediksi karena sesuai dengan perilaku manusia. Sedangkan perubahan faktor alami tidak dapat diprediksi secara akurat karena perubahan tersebut dapat terjadi sewaktu-waktu. Solusinya adalah dengan pengendalian sistem sesuai standar rekomendasi yang telah ditetapkan.

Dalam pengendalian serat optik, dapat dikelompokkan sesuai penempatan serat optik yaitu *indoor* dan *outdoor*. Sehingga disain serat optik yang digunakan pada *indoor* dan *outdoor* dibedakan sesuai pengaruh yang dihadapi. Serat optik *outdoor* seperti dalam tanah, kabel laut, dan kabel udara lebih rentan terhadap gangguan, perlunya disain khusus agar serat optik ini memiliki ketahanan dan tidak mempengaruhi performansi kerja.

## 2.5 Pengaruh Suhu

Sistem komunikasi serat optik dengan daya tahan terhadap perubahan suhu lingkungan tentu dibutuhkan. Transmisi dengan suhu tinggi dan rendah mengakibatkan berkurangnya daya keluaran dari sumber optik. Sumber optik, LED dan LD dapat berhenti beroperasi secara tiba-tiba dan menunjukkan bahwa efisiensi perangkat menurun. Pengujian menunjukkan bahwa LED lebih handal dibanding LD pada kondisi operasi yang sama. Kelebihan lain LED adalah lebih tahan terhadap perubahan suhu dibanding LD. Namun LD lebih baik saat digunakan untuk sistem komunikasi serat optik bawah laut, karena dirancang untuk beroperasi pada jangka waktu 25 tahun. Sebagian pemancar menggunakan pendingin *thermoelectric* untuk menjaga suhu tidak lebih dari 80 °C.

Suatu sistem serat optik dalam suhu yang sangat rendah dapat meningkatkan redaman serat optik. Pengaruh suhu pada serat optik mempengaruhi perilaku pancaran cahaya sumber optik disebabkan perubahan indeks bias pada *core* dan *cladding*. Perubahan indeks bias pada *core* dan *cladding* yang disebabkan perubahan suhu yang mengenainya dapat diukur dengan menggunakan alat ukur *refractometer*. Cara lain untuk mengukur nilai indeks bias adalah dengan persamaan Sellmeier yang ditunjukkan pada Persamaan (2-4), dengan  $A_1$  sampai  $A_6$  adalah koefisien persamaan Sellmeier dengan *core* berbahan PMMA dan *cladding* berbahan *Fluorinated Polymer* ditunjukkan dalam Tabel 2.7 (Tapetado, 2015).

$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - A_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - A_4^2} + \frac{A_5 \lambda^2}{\lambda^2 - A_6^2} \quad (2-4)$$

dengan:

$\lambda$  = panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ )

T = temperatur (°C)

$T_0$  = temperatur ruangan (27°C)

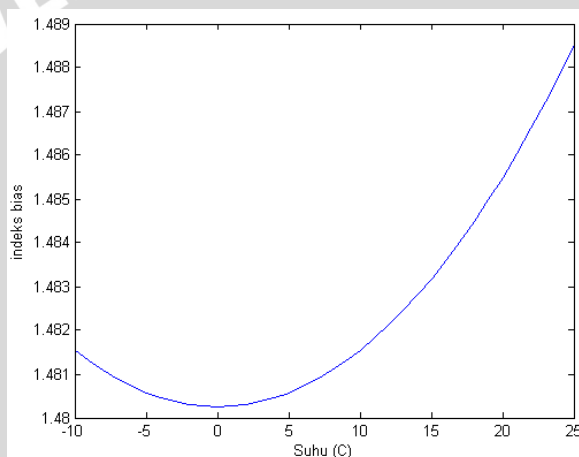


Tabel 2.7 Koefisien Persamaan Sellmeier Material *Polymer*

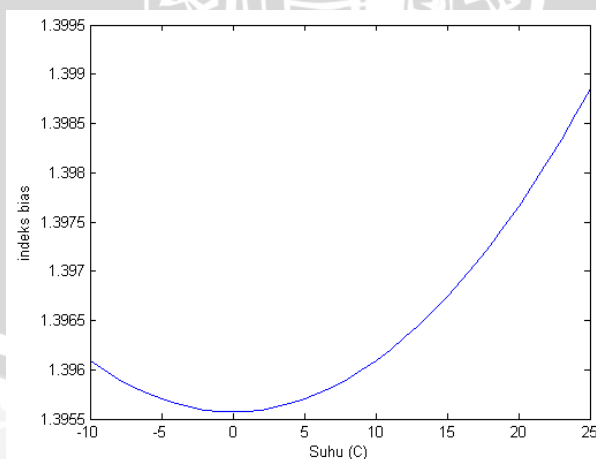
Coefficient	PMMA	Fluorinated Polymer
A1	0,4963	0,34
A2	0,0718(T/T <sub>0</sub> )	0,0791(T/T <sub>0</sub> )
A3	0,6965	0,351
A4	0,1174(T/T <sub>0</sub> )	0,08381(T/T <sub>0</sub> )
A5	0,3223	0,25
A6	9,237	0,106

(Sumber: Tapetado, 2015)

Ilustrasi secara grafik perubahan indeks bias *core* dan *cladding* yang disebabkan oleh perubahan suhu pada POF ditunjukkan pada Gambar 2.11.



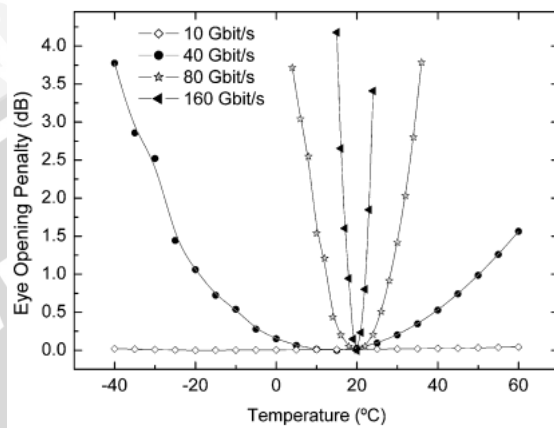
(a)



(b)

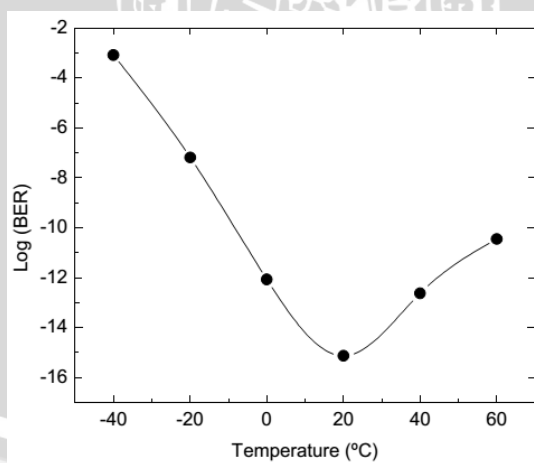
Gambar 2.11 Hubungan Indeks Bias Terhadap Suhu  
(a) indeks bias *core* (b) indeks bias *cladding*

Pada *high-speed optical communication systems* terjadi penurunan daya optik pada saluran transmisi serat optik disebabkan perubahan suhu. Level daya yang semakin turun menyebabkan penurunan *bit rate* pada jarak yang sama (Paulo S, Andre, 2005). Gambar 2.12 menunjukkan hubungan *eye opening penalty* terhadap perubahan suhu yang ada pada saluran transmisi serat optik. Pada transmisi data pada *bit rate* tinggi, suhu sangat mempengaruhi besar *eye pinalty*.



Gambar 2.12 Grafik Hubungan *Eye Pinalty* Terhadap Perubahan Suhu dengan Variasi *Bit Rate*  
(Sumber: Paulo S, Andre, 2005)

Perubahan suhu juga berpengaruh terhadap *bit error ratio* yang terjadi. Gambar 2.13 menunjukkan hubungan BER terhadap perubahan suhu yang ada pada saluran transmisi serat optik.



Gambar 2.13 Grafik Hubungan BER Terhadap Perubahan Suhu  
(Sumber: Paulo S, Andre, 2004)

## 2.6 Dispersi

Dispersi pulsa adalah pelebaran pulsa pada kawasan waktu yang akan menimbulkan perubahan bentuk pulsa atau penyatuan beberapa pulsa pada kecepatan



transmisi yang tinggi. Salah satu efek dispersi yaitu terjadi penurunan *signal to noise ratio* (SNR). Perbaikan sinyal yang terdispersi dianggap sulit dan mustahil. Pada sistem komunikasi digital, bit informasi yang dikirim sebagai pulsa cahaya yaitu bit 1 dan 0. Dispersi akan membatasi *bit rate* maksimum yang dapat ditransmisikan oleh system. Ada tiga macam dispersi pulsa pada serat optik, yaitu:

### 1) Dispersi *Intermodal*

Dispersi *intermodal* adalah pelebaran pulsa yang terjadi pada serat *multimode*. Cahaya yang dipancarkan serat *multimode* dapat mengambil banyak jalur berbeda. Jarak yang ditempuh cahaya dalam setiap jalur (*mode*) berbeda, oleh karena itu terjadi perbedaan delay propagasi antara satu *mode* dengan *mode* penjalaran lainnya (Senior, 1985). Dispersi *intermodal* dapat ditentukan dengan Persamaan (2-5).

$$\Delta\tau_{ims} = \frac{Dn_1\Delta_n}{c} \quad (2-5)$$

Dengan:

D = Panjang serat optik (km)

$n_1$  = Indeks bias *core*

c = Kecepatan cahaya ( $3.10^8$ m/s)

$\Delta_n$  = Perbedaan indeks bias relatif

### 2) Dispersi Material

Dispersi material diakibatkan adanya variasi indeks bias sebagai fungsi yang tidak linier dari panjang gelombang dan dispersi pandu gelombang yang diakibatkan adanya variasi kecepatan moda terhadap panjang gelombang suatu modus (Hoss,1990). Dispersi material dapat ditentukan dengan Persamaan (2-6).

Laser Dioda dan LED merupakan sumber optik yang menghasilkan berbagai panjang gelombang optik. Serat optik memiliki karakteristik indeks bias yang berbeda pada panjang gelombang yang berbeda dan oleh karena itu setiap panjang gelombang akan melakukan penjalaran pada kecepatan yang berbeda pula. Dengan demikian, beberapa panjang gelombang tiba sebelum sinyal lain dan pulsa sinyal menyebar.

$$\tau_{dm} = t_{dm} \cdot \Delta_{\lambda 0} \cdot D \quad (2-6)$$

Dengan:

$t_{dm}$  = koefisien dispersi bahan (ps/nm.km)

$\Delta_{\lambda 0}$  = lebar spektrum sumber optik (nm)

D = Panjang serat optik (km)

### 3) Dispersi *Waveguide*

Dispersi ini disebabkan oleh bentuk dan profil indeks dari inti serat. Namun bisa dikendalikan dengan desain yang cermat. Pada aplikasinya dispersi *waveguide* dapat digunakan untuk melawan penyebaran materi (Lee,1986). Dispersi *waveguide* dapat ditentukan dengan Persamaan (2-7).

$$|\Delta\tau_{wg}| = \frac{D}{c\lambda_0} (\Delta_n) d\Delta_{\lambda_0} \quad (2-7)$$

Dengan:

D = Panjang serat optik (km)

$\Delta_n$  = perbedaan indeks bias relatif

$\Delta_{\lambda_0}$  = lebar spektrum sumber optik (nm)

c = kecepatan cahaya ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

$\lambda_0$  = panjang gelombang (nm)

Efek dispersi keseluruhan dalam serat optik adalah nilai efektif untuk keseluruhan dispersi yang terjadi, dan secara matematik ditentukan oleh persamaan (2-8) (Hoss, 1990).

$$\tau_{total} = \sqrt{(\tau_{dm,tot})^2 + (\Delta\tau_{wg})^2 + (\tau_{im})^2} \quad (2-8)$$

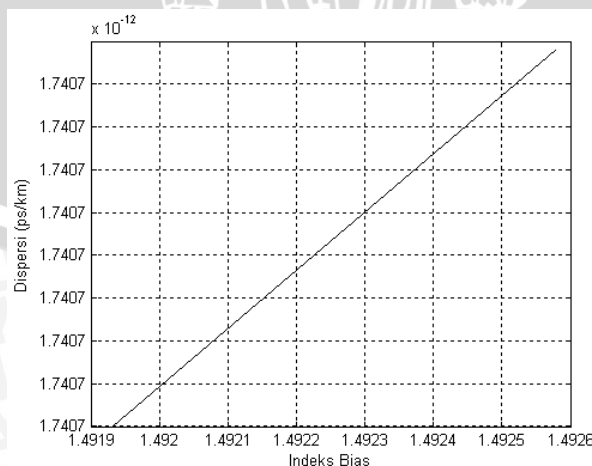
Dengan:

$\tau_{dm,tot}$  = Dispersi Material

$\Delta\tau_{wg}$  = Dispersi *Waveguide*

$\tau_{im}$  = Dispersi Intermodal

Ilustrasi secara grafik perubahan dispersi yang disebabkan oleh kenaikan indeks bias pada POF ditunjukkan pada Gambar 2.14.

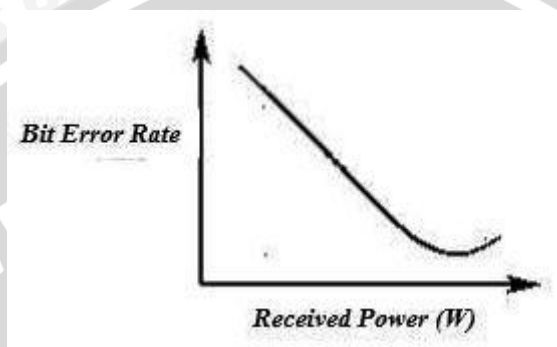


Gambar 2.14 Hubungan Dispersi Terhadap Indeks Bias



## 2.7 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 2.15. 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 2.15 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 (2-9) menunjukkan cara perhitungan rugi-rugi (Bhargava, 1984).

$$L = 10 \log \frac{P_i}{P_o} = 10 \log \left( \frac{V_i^2}{V_o^2} \right) = 20 \log \frac{V_i}{V_o} \quad (2-9)$$

dengan:

$L$  = rugi-rugi (dB)

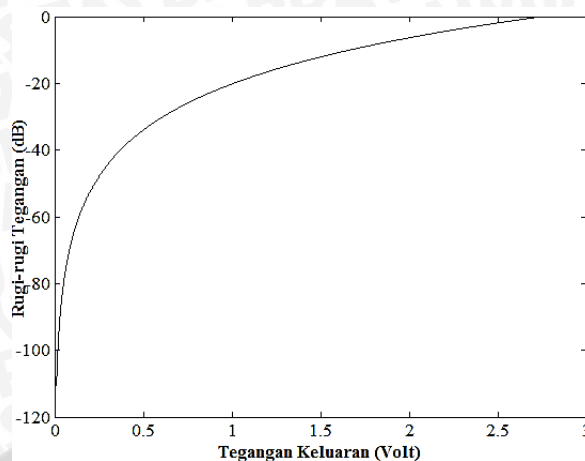
$P_i$  = daya masukan (Watt)

$P_o$  = daya keluaran (Watt)

$V_i$  = tegangan masukan (Volt)

$V_o$  = tegangan keluaran (Volt)

Pada Persamaan (2-9) dijabarkan persamaan untuk menghitung rugi-rugi dari nilai tegangan masukan dan keluaran. Persamaan ini digunakan untuk memudahkan dalam perhitungan dari hasil penelitian dalam pengukuran kinerja sistem, baik menggunakan acuan daya maupun tegangan. Jika menggunakan acuan tegangan, hubungan antara tegangan keluaran dengan rugi-rugi ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nilai rugi-rugi tegangan naik secara logaritmik terhadap besar tegangan keluaran.



Gambar 2.16 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.

### 2.7.1. *Bit Error Rate (BER)*

Dalam teknologi komunikasi digital, Perhitungan kinerja yang paling dasar adalah dengan menganalisis probabilitas kesalahan bit. *Bit Error Rate* atau *Bit Error Ratio* biasa disingkat dengan BER, merupakan perbandingan bit salah terhadap total bit yang ditransmisikan dalam suatu periode waktu  $t$  detik.

Terjadinya *bit error* dalam penelitian ini disebabkan oleh distorsi gelombang acak. Saat noise yang mengganggu sinyal transmisi dalam  $t$  detik stabil terhadap waktu maka perhitungan relatif lebih mudah, namun jika *bust error* terjadi maka perhitungan *bit error* akan membutuhkan waktu yang lebih lama. Oleh karena itu, BER dikatakan sebagai fungsi waktu yang secara matematis dituliskan pada Persamaan (2-10) (Hui, Rongqing, 2009).

$$BER = \frac{1}{\Delta t \times BR} \quad (2-10)$$

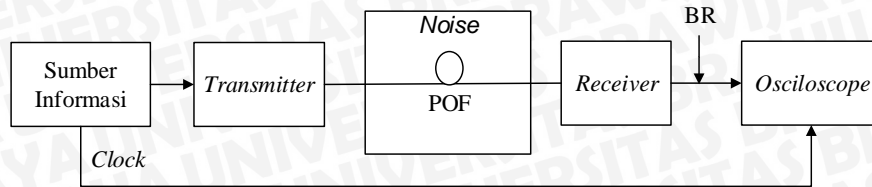
dengan:

$\Delta t$  = interval waktu perhitungan, *getting time* (detik)

BR = *bit rate* (bit/sec)

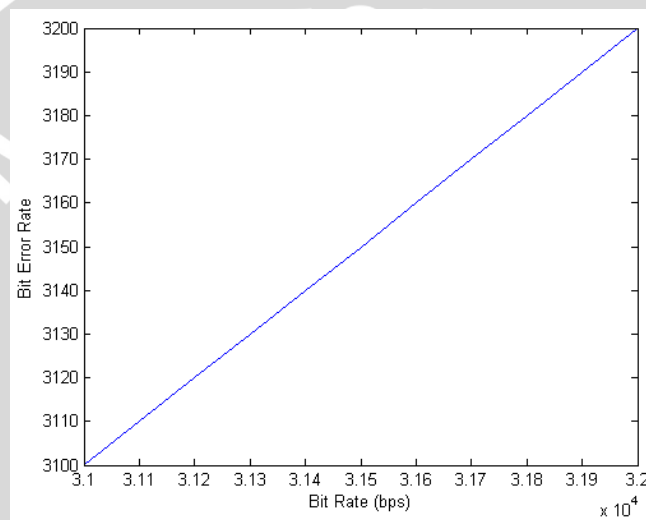
Nilai BR didapat dari analisis *eye pattern* yang di *di-sampling* setiap 10 detik ( $\Delta T$ ) yang didapat dari titik yang ditunjukkan pada Gambar 2.17.





Gambar 2.17 Blok Diagram Konfigurasi Pengambilan Nilai BR

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-10) ditunjukkan pada Gambar 2.18, Nilai *getting time* adalah 10 detik. Nilai ini disesuaikan dengan waktu untuk mengambil data *eye pattern*. Besar BER akan naik secara linier dengan pertambahan *bit rate* dalam transmisi.



Gambar 2.18 Karakteristik BER Terhadap *Bit Rate*

Nilai *error* dalam satu interval waktu pada transmisi data dapat dihitung melalui pendekatan yang disebut *probability of error*. Secara matematis nilai *error probability* ditunjukkan pada persamaan (2-11):

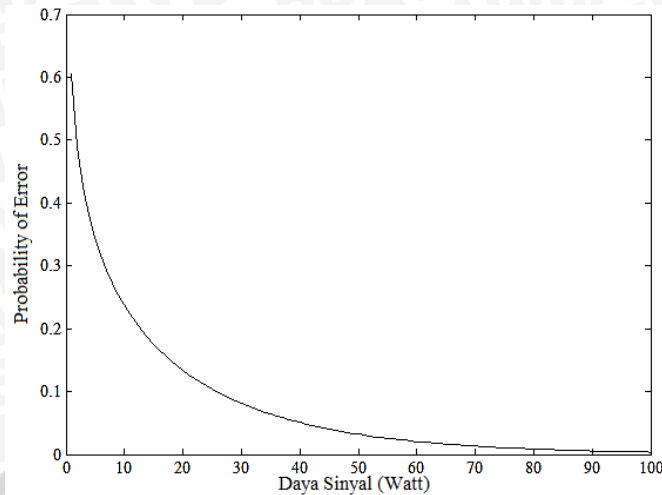
$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E}{N_0}} \right) \quad (2-11)$$

dengan:

$E$  = Daya (watt)

$N_0$  = *Noise* (watt)

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-11) ditunjukkan pada Gambar 2.19, dapat dilihat bahwa nilai  $P_e$  turun secara eksponensial sesuai dengan kenaikan daya dan penurunan *noise*.



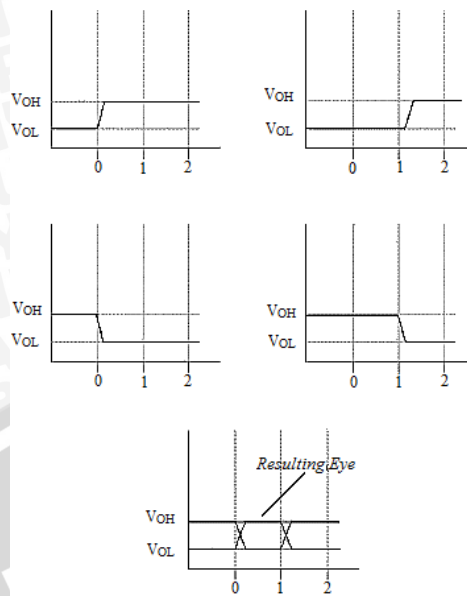
Gambar 2.19 Hubungan *Probability of Error* Terhadap Daya Sinyal

*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, dan ITU-T G.693 disebutkan bahwa sistem optik harus didesain dengan nilai BER kurang dari  $10^{-12}$ .

### 2.7.2. *Eye Pattern*

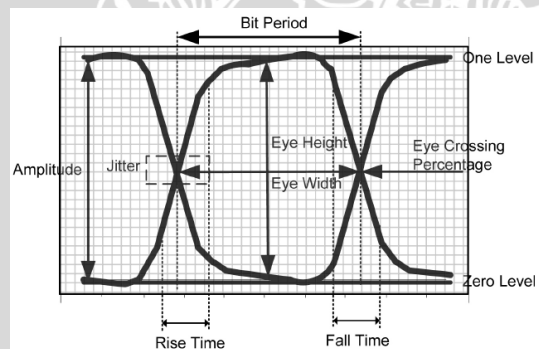
*Eye pattern* atau *eye diagram* adalah tampilan osiloskop dari sinyal digital yang mengalami proses sampling beberapa kali untuk mendapatkan tampilan dari karakteristik sinyal tersebut. *Eye pattern* terbentuk dengan melakukan *superimpose* dari beberapa baris bit. Sebagai contoh jika bit 011, 001, 100, dan 110 mengalami *superimpose* satu sama lain, maka akan didapatkan bentuk *eye diagram* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20.





Gambar 2.20 Pembentukan *Eye Diagram*  
(Sumber: Behera *et al*, 2011)

*Eye pattern* menunjukkan kualitas sinyal pada transmisi data kecepatan tinggi. Karena ketidaksempurnaan komunikasi, transisi tidak berupa garis vertikal yang lurus sehingga akan menghasilkan pola seperti mata, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.21.



Gambar 2.21 *Eye Pattern* Sinyal Data pada Kondisi Nyata  
(Sumber: [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com))

Berikut adalah penjelasan dari masing-masing parameter yang didapatkan dari *eye pattern*:

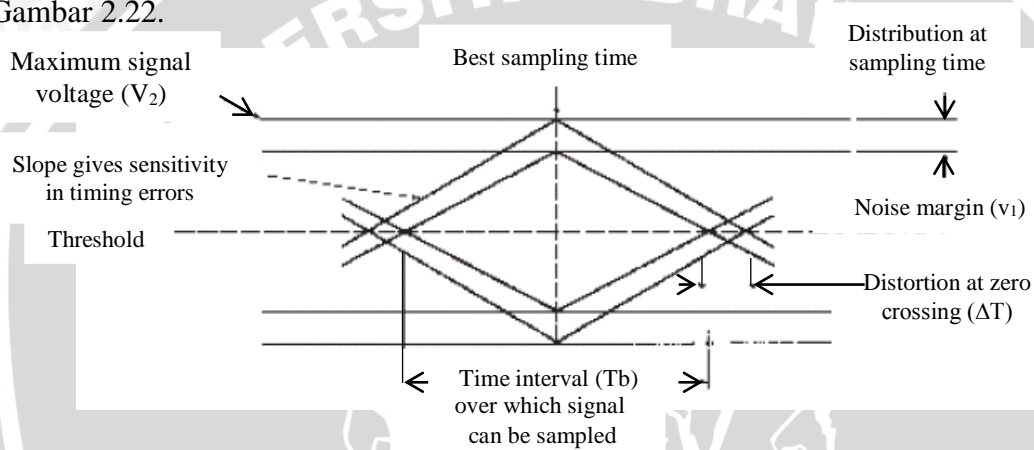
- Level 1 dari *eye pattern* menunjukkan nilai dari logika 1.
- Level 0 dari *eye pattern* menunjukkan nilai dari logika 0.
- *Eye amplitude* menunjukkan perbedaan dari logika 1 dan 0. Semakin besar perbedaannya maka semakin mudah untuk membedakan logika 1 dan 0. Sehingga *eye amplitude* menunjukkan seberapa besar pengaruh *noise* pada sistem.

- *Bit period* mengukur sejauh mana eye pattern terbuka secara horizontal yang diukur dari *crossing point* tiap bit. Dari *bit period*, bisa diketahui *data rate* ( $1/\text{bit period}$ ). *Bit period* juga disebut dengan *Unit Interval* (UI) pada *eye diagram*.
- *Jitter* adalah deviasi waktu dari waktu ideal dari sebuah data bit. Agar dapat menghitung *jitter*, deviasi waktu transisi dari sudut naik dan turun *crossing point* *eye pattern* harus diukur. Fluktuasi dari *jitter* dapat berupa random atau deterministik.

Pada penelitian ini performansi serat optik yang dihitung berdasarkan analisis *eye diagram* meliputi *noise margin*, *timing jitter*, *bit rate* dan *signal to noise ratio*.

Parameter *noise margin* dan *timing jitter* dapat diukur dengan menggunakan

Gambar 2.22.



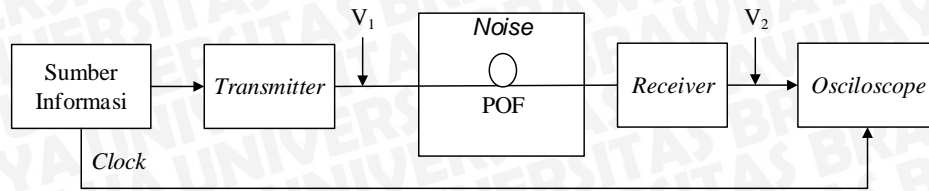
Gambar 2.22 *Eye Diagram* Dalam Menentukan *Noise Margin* dan *Timing Jitter* (Sumber: Keiser, 2004)

### 1. *Noise Margin*

*Noise margin* atau ketahanan sistem terhadap *noise* yang ditunjukkan dengan panjang *eye height* pada waktu sampling. *Noise margin* adalah rasio presentase dari puncak sinyal  $V_1$  yang dilihat dari lebar *eye opening* terhadap tegangan maksimum sinyal  $V_2$ . Secara matematis persamaan untuk menghitung *noise margin* ditunjukkan pada Persamaan (2-12) (Keiser, 2004).

Nilai  $V_1$  juga merupakan tegangan sinyal tanpa *noise* dan  $V_2$  merupakan tegangan sinyal yang mengandung *noise*. Nilai  $V_1$  dan  $V_2$  didapat dari titik yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.





Gambar 2.23 Blok Diagram Konfigurasi Pengambilan Nilai  $V_1$  dan  $V_2$

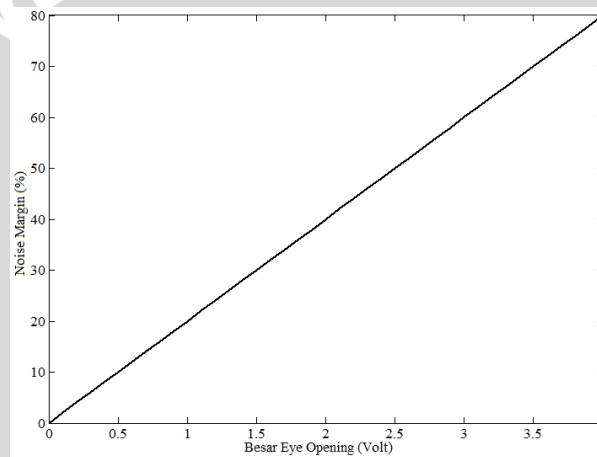
$$Noise\ margin\ (\%) = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% \quad (2-12)$$

dengan:

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

$V_2$  = tegangan maksimum sinyal (Volt)

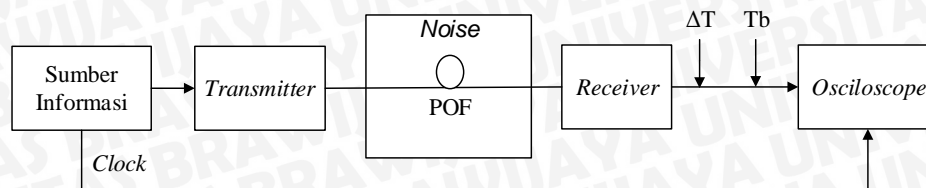
Nilai *noise margin* naik secara linier terhadap besarnya *eye opening*, hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.24.



Gambar 2.24 Grafik Hubungan *Eye Opening* Terhadap *Noise Margin*

## 2. *Timing Jitter*

*Timing jitter* adalah penyimpangan waktu dari waktu ideal sebuah *event* data bit dan salah satu karakteristik yang paling penting dari sinyal data digital berkecepatan tinggi. Untuk menghitung *timing jitter*, penyimpangan waktu transisi dari naik dan turunnya tepi sebuah *eye diagram* pada titik persimpangan diukur. *Timing jitter* dihitung dari jumlah distorsi ( $\Delta T$ ) dan *bit interval* ( $T_b$ ) yang ditunjukkan pada Persamaan (2-13) (Keiser, 2004). Nilai  $\Delta T$  dan  $T_b$  didapat dari titik yang ditunjukkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Blok Diagram Konfigurasi Pengambilan Nilai  $\Delta T$  dan  $T_b$

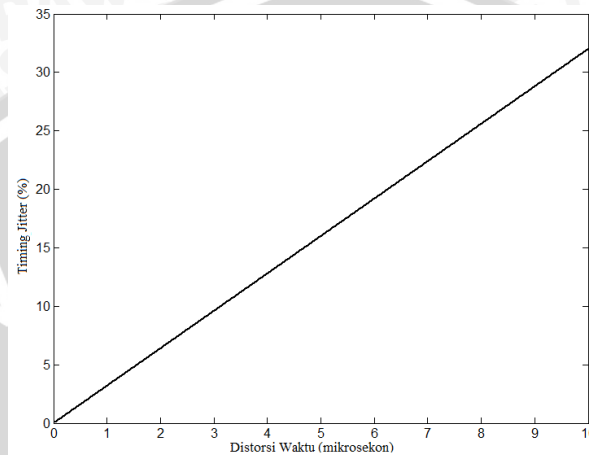
$$\text{Timing jitter (\%)} = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100\% \quad (2-13)$$

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 2.26.

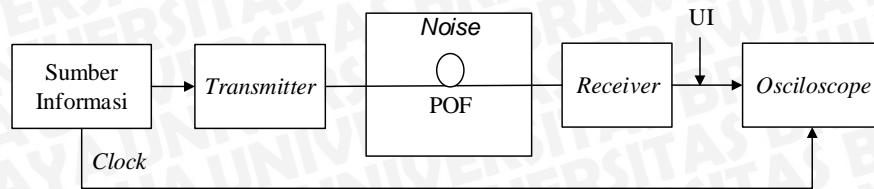


Gambar 2.26 Hubungan Distorsi Waktu terhadap *Timing Jitter*

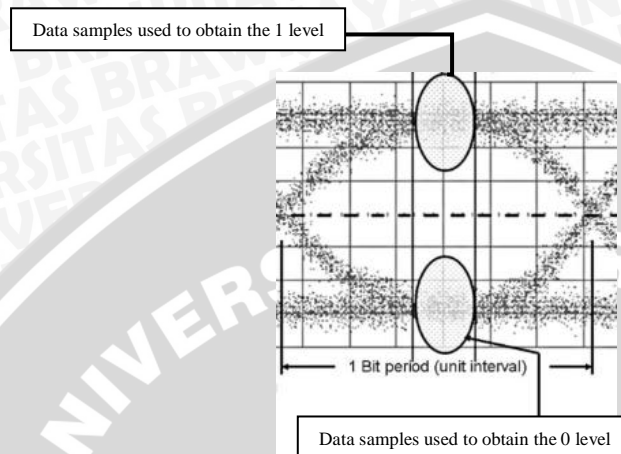
*Timing jitter* akan mengurangi lebar *eye opening* atau *eye width* pada *eye pattern*. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan level daya optik. Pada level daya optik yang rendah, sinyal yang diterima akan mengalami peningkatan *noise* yang ditunjukkan dalam variasi amplitudo. Rangkaian penerima 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*.

### 3. *Bit Rate*

*Bit rate* adalah salah satu parameter yang berhubungan dengan kecepatan transmisi data. Penurunan *bit rate* pada sebuah sistem menunjukkan penurunan rugi-rugi transmisi, hal ini disebabkan oleh dispersi atau ISI. Nilai *bit rate* berbanding terbalik dengan *Unit Interval* (UI) sebuah *eye mask* (Decusatis, 2008). Nilai UI didapat dari titik yang ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Blok Diagram Konfigurasi Pengambilan Nilai UI

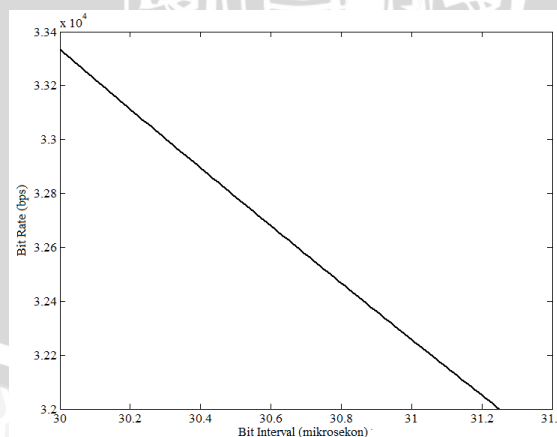


Gambar 2.28 Eye Diagram Dalam Menentukan Unit Interval (Sumber: Decusatis, 2008)

Unit interval dapat dilihat pada Gambar 2.28 dan Persamaan (2-14) digunakan untuk menghitung bit rate.

$$\text{Bit Rate (Kbps)} = \frac{1}{\text{UI}} \quad (2-14)$$

Hubungan antara besar bit interval terhadap bit rate ditunjukkan pada Gambar 2.29. Semakin kecil bit interval maka nilai bit rate akan semakin besar.



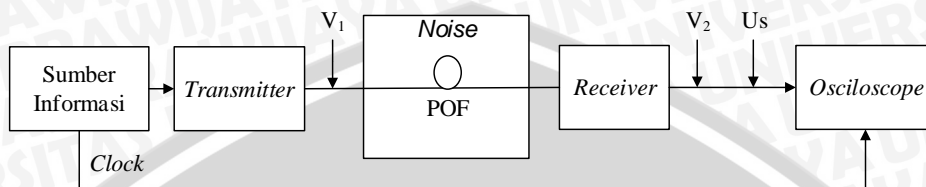
Gambar 2.29 Karakteristik Bit Rate Terhadap Besar Bit Interval

#### 4. Signal to Noise Ratio (SNR)

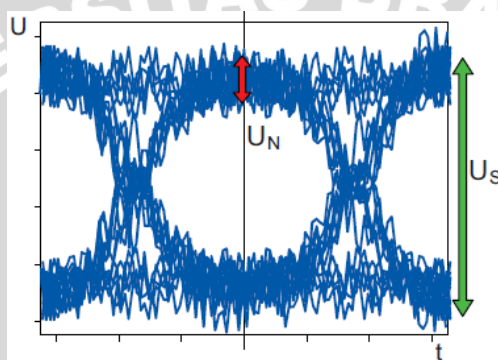
Signal to noise ratio (SNR) merupakan parameter yang diukur dengan membandingkan daya sinyal terhadap daya noise. Semakin besar nilai SNR maka



semakin baik kualitas dari sinyal tersebut. SNR pada *eye pattern* dihitung dengan cara menentukan nilai  $U_s$  dan  $U_n$ . Nilai  $U_n$  merupakan tegangan *noise* yang merupakan selisih  $V_1$  dan  $V_2$ , sedangkan nilai  $U_s$  merupakan besarnya *eye amplitude*. Penentuan SNR dapat dilihat pada Gambar 2.31. Perhitungan SNR menggunakan Persamaan (2-15). Nilai  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $U_s$  didapat dari titik yang ditunjukkan pada Gambar 2.30.



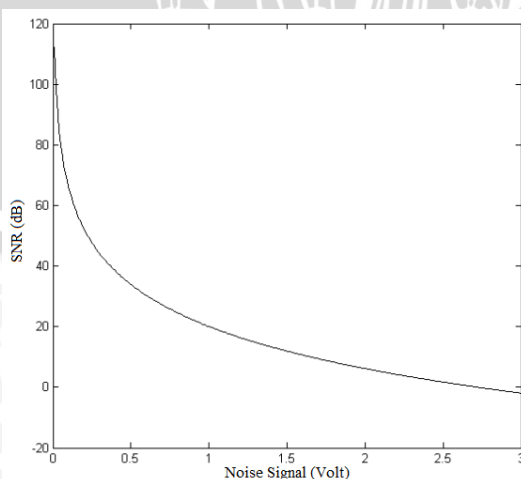
Gambar 2.30 Blok Diagram Konfigurasi Pengambilan Nilai  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $U_s$



Gambar 2.31 *Eye Pattern* untuk Menentukan SNR  
(Sumber: Ziemann, 2008)

$$\text{SNR (dB)} = 20 \log \frac{U_s}{U_n} \quad (2-15)$$

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-15) ditunjukkan pada Gambar 2.32, dapat dilihat bahwa grafik turun secara eksponensial. Hal ini menjelaskan bahwa semakin kecil *noise signal*, maka semakin besar SNR.



Gambar 2.32 Grafik Hubungan *Noise Signal* Terhadap SNR.