

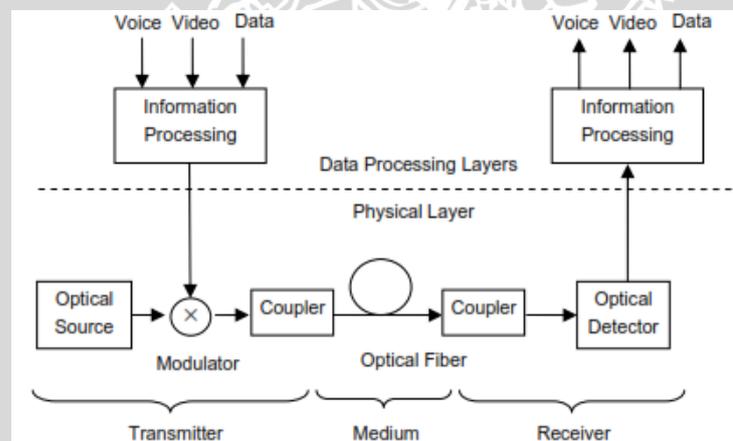
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka yang dimaksudkan pada bab ini adalah penjabaran secara teori yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pengaruh temperatur terhadap performansi serat optik sebagai media transmisi sistem komunikasi serat optik. Sajian tinjauan pustaka terdiri atas sistem komunikasi serat optik, sumber optik, *Plastic Optical Fiber* (POF), detektor optik, rugi-rugi material serat optik, pengaruh temperatur, dan parameter kinerja serat optik yang terdiri atas BER dan *eye pattern*.

2.1 Sistem Komunikasi Serat Optik

Sistem komunikasi serat optik secara konseptual terdiri dari sumber optik, serat optik dan detektor optik seperti pada Gambar 2.1. Sumber optik berfungsi untuk mengirimkan sinyal informasi berupa pulsa cahaya dan selanjutnya ditransmisikan melalui serat optik, terakhir diterima detektor optik. Sinyal keluaran detektor optik berupa sinyal elektrik dalam bentuk pulsa digital.



Gambar 2.1. Sistem Komunikasi Serat Optik
(Sumber: Azadeh, 2009)

Sistem komunikasi serat optik ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu (Azadeh, 2009):

- 1) Mempunyai *bandwidth* yang lebar dengan frekuensi pembawa optik bekerja pada daerah frekuensi tinggi yaitu sekitar 10^{13} Hz sampai 10^{16} Hz, sehingga kapasitas transmisi data lebih besar.
- 2) Redaman yang sangat rendah dibandingkan dengan kabel yang terbuat dari tembaga, terutama pada frekuensi dengan panjang gelombang 1310nm yaitu 0,2 dB/Km.

- 3) Kebal terhadap gangguan gelombang elektromagnet karena terbuat dari kaca atau plastik yang merupakan isolator sehingga bebas dari interferensi medan magnet, frekuensi radio dan gangguan listrik.
- 4) Dapat menyalurkan informasi digital dengan kecepatan tinggi yaitu hingga 160Gbps.
- 5) Memiliki ukuran dan berat yang kecil dan ringan, pada serat optik silika (SiO₂) memiliki ukuran diameter 2 μ m-10 μ m. Pada serat optik plastik memiliki ukuran diameter lebih kecil dari 1mm.

2.2 Sumber Optik

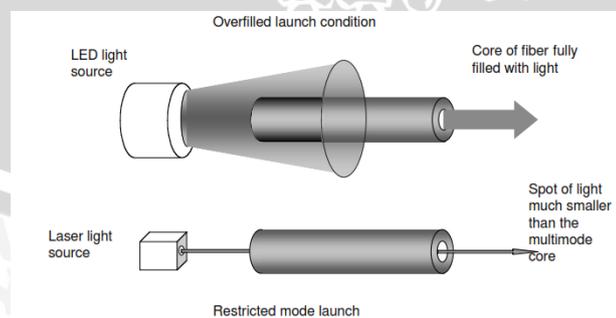
Pada sistem transmisi serat optik, sumber optik yang sering digunakan adalah *Light Emitting Diode* (LED) dan *Laser Diode* (LD). Masing-masing sumber optik ini digunakan sesuai dengan kebutuhan sistem jaringan transmisi serat optik karena memiliki parameter dan karakteristik yang berbeda. Karakteristik LD dan LED dijelaskan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. 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)

Sampai sekitar tahun 1996 serat *multimode* biasanya digunakan dengan sumber optik LED sebagai perangkat transmisi. Selain biaya yang lebih rendah dari LD, kemampuan LED dalam transmisi data hingga 200 Mbps dengan jarak jangkauan lebih dari 2 km pada serat optik *multimode*.



Gambar 2.2. Sumber LED dan LD pada Serat Optik *Multimode*
(Sumber: Elliott, 2002)

Bandwidth serat *multimode* diukur dengan melihat kondisi *output* dari LED yang memancarkan mode cahaya menerangi inti serat yang disebut *overfilled launch* (OFL)

seperti pada Gambar 2.2. Sumber optik LED merata menerangi seluruh inti serat sedangkan laser mengirimkan titik cahaya jauh lebih kecil daripada diameter inti. Sumber optik LD memberikan *bandwidth* yang lebih tinggi daripada OFL, hal ini disebabkan LD memiliki karakteristik dengan penjararan cahaya mode yang sedikit sehingga mengurangi dispersi. Jika profil indeks dari serat optik multimode dinilai mendekati sempurna, maka *bandwidth* yang dihasilkan akan lebih tinggi (Elliott, 2002).



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* 2,2mm. Gambar LED SFH756V ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.2.

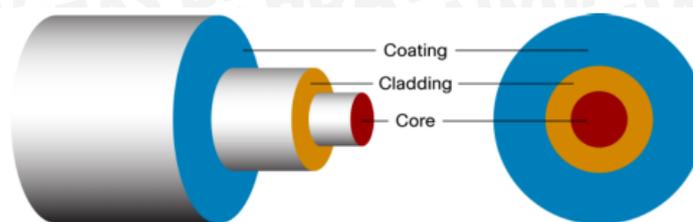
Tabel 2.2. Spesifikasi LED SFH756V

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)

2.3 Plastic Optical Fiber

Proses transmisi sinyal cahaya pada serat optik menggunakan prinsip pemantulan sempurna. Bahan dan struktur penyusun serat optik mempengaruhi sifat-sifat transmisi pandu gelombang optik dan berpengaruh dalam perambatan sinyal optik sepanjang serat optik. Seperti pada Gambar 2.4, secara umum serat optik terdiri dari dua bagian utama, yaitu *cladding* dan *core* (Massa, 2000).



Gambar 2.4. Struktur Serat Optik
(Sumber: Goure, 2002)

1) Inti (*Core*)

Core merupakan inti yang berfungsi untuk menentukan cahaya merambat dari satu ujung ke ujung lainnya. *Core* terbuat dari bahan kuarsa, silika, atau plastik yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda dalam penjalaran cahaya.

2) Selubung (*Cladding*)

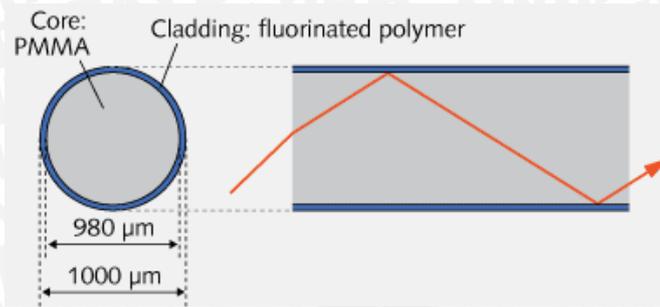
Cladding merupakan lapisan luar yang mengelilingi inti. *Cladding* berfungsi sebagai cermin yaitu memantulkan cahaya agar dapat merambat dalam *core* serat optik. Hubungan indeks bias antara *core* dan *cladding* akan mempengaruhi perambatan cahaya pada *core*.

3) Jaket (*Coating*)

Coating merupakan lapisan luar dari *cladding* yang berfungsi sebagai pelindung mekanis yang melindungi serat optik dari kotoran, goresan dan kerusakan lainnya.

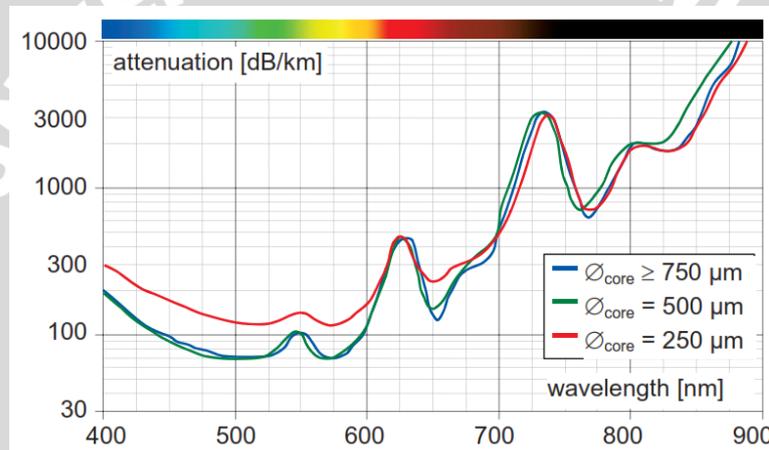
Penelitian pertama pada transmisi serat optik yaitu tahun 1955 dilakukan pada serat plastik. Tetapi serat plastik tidak dikembangkan lebih lanjut setelah penelitian serat kaca yang terbuat dari silika menunjukkan kinerja yang lebih baik dibanding serat optik plastik. Walaupun begitu, serat plastik tetap digunakan untuk aplikasi peralatan medis, otomotif dan beberapa instrumentasi industri (IEEE Magazine, 2008).

Serat plastik yang tersedia saat ini yaitu *step index multimode* dengan *bandwidth* yang terbatas. Material *core* didasarkan pada bahan *poli metil metakrilat* (PMMA) dan lapisan tipis *cladding* dengan bahan *terfluorinasi* PMMA. *Step Index Plastic Optical Fiber* (SIPOF) kini mulai digunakan pada jaringan perumahan, dan kantor kecil. Biaya sistem dan instalasi yang lebih rendah dibandingkan serat optik kaca menjadi salah satu faktor pertimbangan penggunaan serat plastik. *Plastic optical fiber step index* memiliki diameter 1mm terdiri atas diameter *core* 980 μm dan *cladding* 1000 μm seperti pada Gambar 2.5 (Ziemann, 2008).



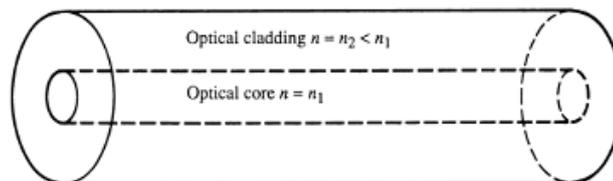
Gambar 2.5. Plastic Optical Fiber
(Sumber: <http://www.laserfocusworld.com>)

POF mempunyai beberapa kelebihan, salah satunya *bandwidth* yang lebar yaitu 12,5 MHz/km. Kelemahan POF adalah nilai redaman yang tinggi mencapai 180 dBm. Seperti pada Gambar 2.6 redaman terendah yang dicapai POF yaitu pada panjang gelombang 520nm, 570nm, dan 650 nm.



Gambar 2.6. Attenuasi Plastic Optical Fiber Terhadap Panjang Gelombang
(Sumber: Ziemann, 2008)

Cara kerja POF sama dengan serat optik pada umumnya yaitu didasarkan pada hukum *Snellius* untuk perambatan cahaya pada media berbahan dasar kaca atau plastik. Perambatan cahaya sesuai dengan pemantulan dalam sempurna (*total internal reflection*), yaitu ketika dua material mempunyai dua indeks bias yang berbeda dimana n_2 lebih besar dari n_1 (Elliot, 2002). Gambar 2.7 menjelaskan struktur *cladding* dan *core*. *Cladding* mempunyai indeks bias lebih rendah dari *core*. *Cladding* akan memantulkan kembali cahaya yang mengarah keluar dari *core* kembali ke dalam *core*.



Gambar 2.7. Struktur Serat Optik
(Sumber: Elliot, 2002)

Menurut hukum *Snellius* jika seberkas sinar yang masuk pada suatu ujung serat optik dari medium yang mempunyai indeks bias yang lebih kecil dari udara menuju *core* serat optik yang mempunyai indeks bias yang lebih besar maka seluruh sinar akan merambat sepanjang inti serat optik. Perbedaan indeks bias antara *core* dengan *cladding* menyebabkan terjadinya pembiasan pada batas serat-udara, berkas membelok mendekati normal (Senior, 1985). Hubungan indeks bias, sudut datang, dan sudut pantul dinyatakan pada Persamaan (2-1).

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (2-1)$$

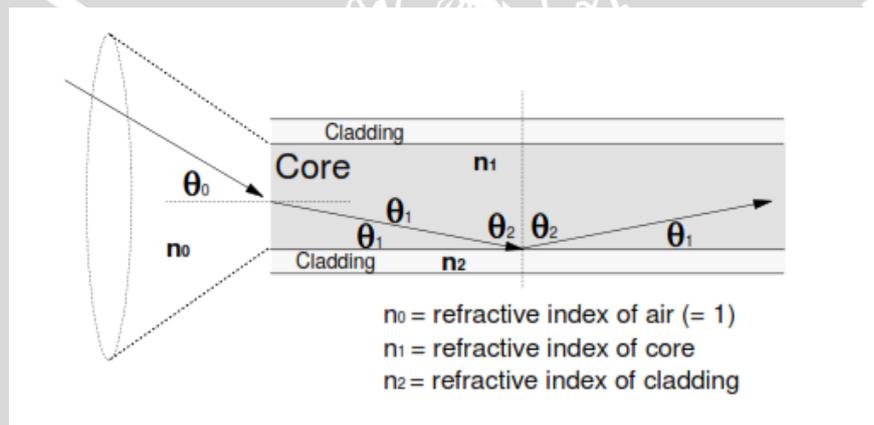
Keterangan :

n_1 = indeks bias bahan 1

n_2 = indeks bias bahan 2

θ_1 = sudut datang

θ_2 = sudut bias



Gambar 2.8. Penjalaran Cahaya Serat Optik
(Sumber: Dutton, 1998)

Pada Gambar 2.8 merupakan ilustrasi penjalaran seberkas sinar yang memasuki serat optik dengan indeks bias inti n_1 dan indeks bias selubung n_2 yang terletak pada medium dengan indeks bias n_0 dan sudut datang θ_0 terhadap sumbu serat. Pada medium n_1 , sinar ini dibiaskan dengan sudut bias θ_1 dan menjaral menuju bidang batas inti selubung.

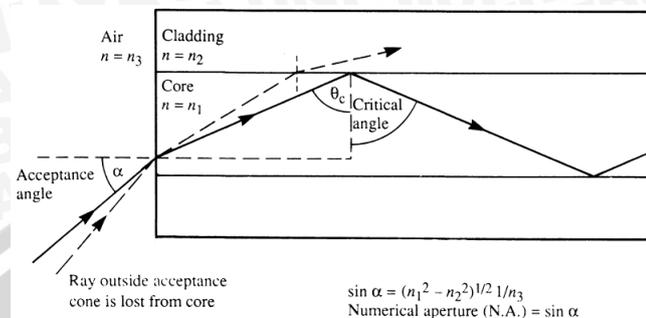
Total internal reflection akan terjadi apabila sudut datang (θ_0) pada material dengan indeks n_1 lebih besar dibanding sudut kritis (θ_c). Terjadinya gejala ini berkaitan dengan indeks bias bahan, sudut datang, dan sudut pantul (Senior, 1985). Sudut datang minimum yang mengakibatkan sudut bias 90° berdasarkan hukum Snellius menghasilkan Persamaan (2-2).

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2-2)$$

Keterangan :

n_1 = indeks bias inti serat optik

n_2 = indeks bias selubung serat optik



Gambar 2.9. Sudut Kritis Pada Serat Optik
(Sumber: Elliot, 2002)

Dalam sistem transmisi serat optik dikenal sudut penerimaan (θ_a) yaitu sudut maksimum agar berkas cahaya dapat disalurkan sepanjang serat optik. Pada Gambar 2.9 diilustrasikan penjalaran cahaya dengan sudut penerima sebesar α . Harga sinus sudut penerimaan disebut *Numerical Aperture* (NA) atau angka permukaan yang menunjukkan daya tangkap cahaya oleh suatu serat optik. Semakin besar angka ini makin banyak energi cahaya yang disalurkan serat optik (Miller, 1988).

Numerical Aperture (NA) adalah ukuran kemampuan sebuah serat untuk menangkap cahaya. Dengan menggunakan hukum Snellius NA dari serat dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-3).

$$NA = n_0 \times \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

Keterangan:

NA = *Numerical Aperture*

θ_a = sudut penerimaan

n_1 = indeks bias *core*

n_2 = indeks bias *cladding*

n_0 = indeks bias udara

Karena medium dimana tempat cahaya memasuki serat umumnya adalah udara maka $n_0 = 1$ sehingga $NA = \sin \theta_a$. NA digunakan untuk mengukur sudut penerimaan maksimum dimana berkas cahaya masih bisa diterima dan merambat didalam inti serat. Nilai NA biasanya sekitar 0,20 sampai 0,29 untuk serat gelas, serat plastik memiliki NA yang lebih tinggi dapat melebihi 0,5.

Jika nilai NA besar maka semakin besar pula jumlah cahaya yang diterima oleh serat, sehingga menyebabkan *bandwidth* berkurang dan rugi penyebaran serta penyerapan akan bertambah. Oleh karena itu, nilai NA yang besar hanya baik untuk aplikasi jarak pendek dengan kecepatan rendah. Selisih antara indeks bias kulit dan inti disimbolkan dengan Δ yang dihitung menggunakan Persamaan (2-4).

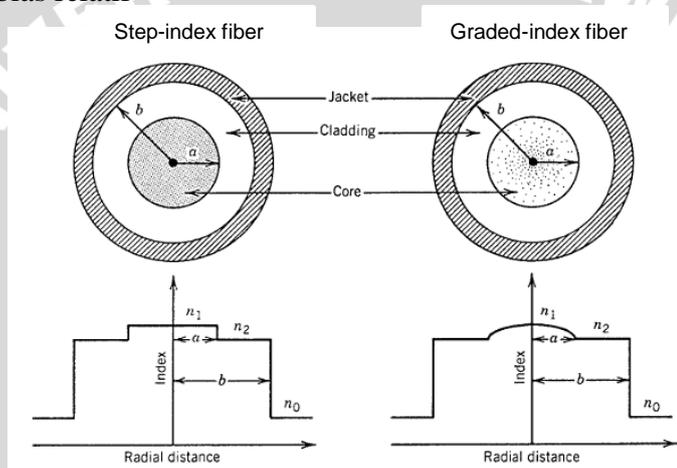
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-4)$$

Keterangan:

n_1 = indeks bias *core*

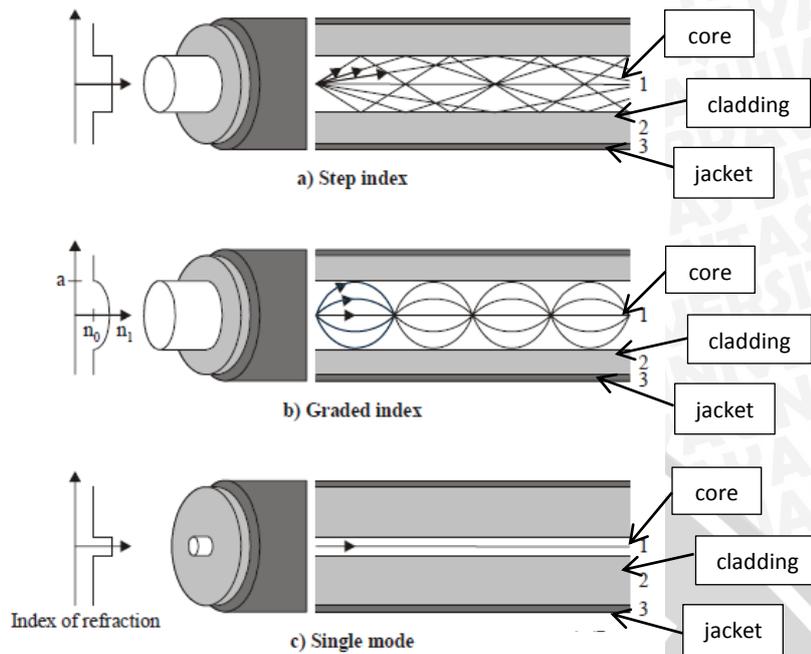
n_2 = indeks bias *cladding*

Δ = beda indeks bias relatif



Gambar 2.10. Indeks Bias Serat Optik *Step Index* dan *Graded Index*
(Sumber: Wiley, 2002)

Seperti pada Gambar 2.10, jika perbedaan indeks bias *core* dan *cladding* signifikan disebut serat optik *Step Index* (SI), sedangkan jika perbedaan indeks bias *core* dan *cladding* secara perlahan-lahan disebut *Graded Index* (GI). Kedua mode perambatan cahaya ini hanya terdapat pada serat optik *multimode*. Sedangkan serat optik jenis *singlemode* hanya dilewatkan oleh satu *mode* cahaya karena dimensinya yang sangat kecil antara $8\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$. Ilustrasi penjalaran cahaya serat optik *singlemode*, *multimode graded index* dan *multimode step index* ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Perbandingan Karakteristik Jenis Serat Optik (Sumber: ITU-T, 2009)

2.3.1 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 pada kelas A4a sampai kelas A4c menjelaskan mengenai SI-POF jenis PMMA. SI-POF bahan PMMA dengan diameter 1mm memiliki frekuensi kerja cocok pada jaringan perumahan (IEEE 1394, *fast Ethernet*), dan jaringan mobil (MOST, D2B, *Byteflight*, IDB 1394). Standar spesifikasi SI-POF bahan PMMA ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Standar Spesifikasi SI-POF Standar A4a-A4c

Parameter	Unit	Value
refractive index	-	1.492
glass transition temperature T_g	°C	115
density	g/cm ³	1.18
absorption of water up to saturation	%	0.5
thermal conductivity:	W/m-K	0.17
thermal heat expansion coefficient:	mm/m-K	0.07
Rockwell hardness (M), Shore hardness (D)	-	95 70
tensile strength	N/mm ²	76
resistivity	Ohm-cm	10 ¹⁵
breakdown strength	kV/mm	20 - 25
spontaneous combustion temperature	°C	approx. 430

(Sumber: Ziemann, 2007)



POF dengan diameter 0,5 mm secara umum digunakan pada aplikasi sensor, dan beberapa mesin. POF dengan diameter 0,75 mm digunakan pada beberapa aplikasi kebutuhan industri. Kelas A4d menjelaskan tahap SI-POF dengan penurunan *numerical aperture* ($0,3 \pm 0,05$ atau $0,35 \pm 0,07$). Serat yang memiliki nilai NA yang rendah hanya bisa menerima *bending* 50-70 mm. Perbedaan utama kelas A4d dengan kelas A4a yaitu pada kondisi rugi-rugi di *Equilibrium Mode Distribution* (EMD).

Standar yang di tetapkan tidak hanya untuk aplikasi komunikasi data, kelas A4a.1 juga membahas POF untuk aplikasi rekayasa elektronika seperti sensor. Kelas A4a.1 menjelaskan serat dengan redaman pada 650 nm sebesar 30-40 dB untuk 100 m, *bandwidth* minimum 10MHz untuk 100 m, dan rugi-rugi *macro-bending* maksimal untuk 10 lilitan sebesar 0.5 dB. Sedangkan A4a.2 mengkover POF untuk aplikasi komunikasi data.

2.4 Jenis Detektor Optik

Detektor optik bekerja berdasar prinsip emisi fotolistrik yaitu terjadinya pembebasan elektron dari permukaan laser sebagai hasil penyerapan energi foton. Parameter utama yang berkenaan dengan *receiver* adalah sensitivitas dan *dynamic range*. Sensitivitas yang tinggi mengindikasikan kehandalan dalam menerima sinyal. *Range* yang lebih lebar akan membuat fleksibilitas yang tinggi dalam penerapan di lapangan. Detektor optik yang sering diaplikasikan pada sistem transmisi jaringan serat optik antara lain *Diode Positive Intrinsic Negative* (PIN) dan *Avalanche Photo Diode* (APD).



Gambar 2.12. 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. Detektor jenis ini digunakan sebagai penerima pada POF dengan ukuran

980/1000 dan diameter coating 2,2mm. Gambar *photo diode* SFH551/1V ditunjukkan pada Gambar 2.12 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	$^{\circ}\text{C}$
Supply Voltage without Damage	T_{stg}	-40	+100	$^{\circ}\text{C}$
Minimum Supply Voltage for Function	V_{cc}	-0.5	15	V
Minimum Pullup Resistance	R_{outman}	330		Ω
Output Voltage	V_o	-0,5	15	V
Output Current	I_c		50	mA
Power Dissipation	P_o		100	mW

(Sumber: Avago, 2007)

2.5 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 2.5.

Tabel 2.5. 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.

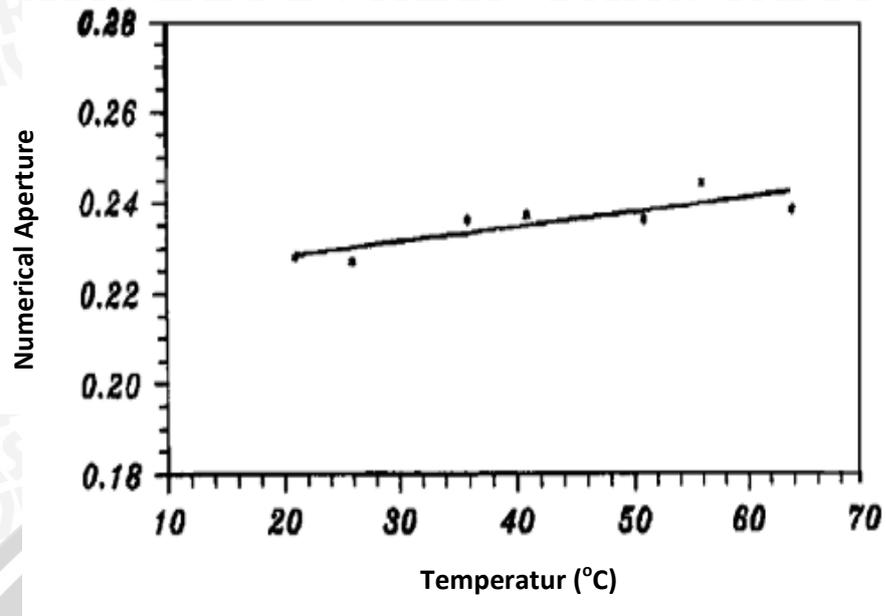
2.6 Pengaruh Temperatur

Suatu sistem serat optik dengan daya tahan terhadap temperatur tinggi tentu dibutuhkan. Transmisi dengan suhu rendah dan tinggi mengakibatkan daya keluaran optik berkurang dari sumber optik. Pada sumber optik, LED dan LD dapat berhenti beroperasi tiba-tiba dan menunjukkan perilaku dimana efisiensi perangkat menurun. Pengujian telah menunjukkan bahwa LED biasanya lebih dapat diandalkan dibandingkan LD di bawah kondisi operasi yang sama. Namun, keandalan LD cukup besar untuk memungkinkan penggunaan dalam sistem optik bawah laut, karena dirancang untuk beroperasi andal pada jangka waktu 25 tahun. Sebagian pemancar menggunakan pendingin *thermoelectric* untuk mempertahankan suhu yang dapat terjadi sampai setinggi 80°C.

Sedangkan pada serat optik temperatur yang tinggi dikombinasikan dengan kelembaban yang tinggi dapat meningkatkan redaman serat optik secara signifikan. Pengaruh temperatur pada serat optik mempengaruhi perilaku pancaran cahaya sumber optik disebabkan perubahan indeks bias pada *core* dan *cladding*. Temperatur yang sangat tinggi memberikan pengaruh tekanan hingga terjadi *Microbending* di *Core Cladding Interface* (CCI). Hal ini dapat meningkatkan redaman dan memperpendek jarak transmisi.

Pada POF bahan PMMA yang ditempatkan pada ruangan dengan kelembaban relatif 50%, material dapat menyerap air hingga 1,5% sehingga mempengaruhi karakteristik redaman. Temperatur maksimum pada proses transmisi data yaitu pada suhu 85°C, ketika suhu sudah melebihi 85°C maka kinerja serat akan turun secara signifikan. Perubahan material akan terjadi pada suhu 115°C, hal ini menunjukkan bahwa serat plastik sudah tidak dapat lagi melakukan transmisi data (Zienmann, 2007).

Perubahan indeks bias pada serat optik dapat diukur dengan menggunakan alat ukur *interferometry*. Gambar 2.13 merupakan hasil pengukuran hubungan NA terhadap temperatur. Nilai NA naik secara linier sesuai dengan kenaikan temperatur.



Gambar 2.13. Hubungan NA Terhadap Temperatur
(Sumber: Hamza, 2002)

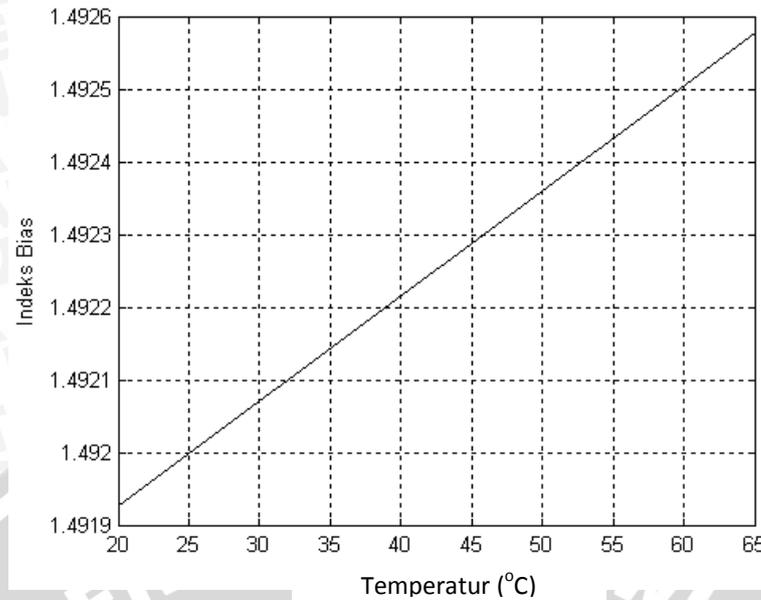
Cara lain untuk mengetahui perubahan nilai indeks bias adalah dengan persamaan Sellmeier yang ditunjukkan pada persamaan (2-5), dengan A_1 sampai A_6 adalah koefisien persamaan Sellmeier (Naser, 2009).

$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - A_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - A_4^2} + \frac{A_5 \lambda^2}{\lambda^2 - A_6^2} \quad (2-5)$$

Keterangan:

- A_1 = 0,4963
- A_2 = 0,0718(T/T₀)
- A_3 = 0,6965
- A_4 = 0,1174(T/T₀)
- A_5 = 0,3223
- A_6 = 9,237
- Λ = Panjang Gelombang (μm)
- T = Temperatur (K)
- T₀ = Temperatur Ruang (300 K)

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



Gambar 2.14. Hubungan Indeks Bias Terhadap Temperatur

2.7 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* perjalanan lainnya (Senior, 1985). Dispersi *intermodal* dapat ditentukan dengan Persamaan (2-6).

$$\Delta\tau_{ims} = \frac{Dn_1\Delta_n}{c} \tag{2-6}$$

Dengan:

D = Panjang serat optik (km)

n_1 = Indeks bias *core*

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

Δ_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 modulus (Hoss,1990). Dispersi material dapat ditentukan dengan Persamaan (2-7).

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 penjarangan pada kecepatan yang berbeda pula. Dengan demikian, beberapa panjang gelombang tiba sebelum sinyal lain dan pulsa sinyal menyebar.

$$\tau_{dm} = t_{dm} \cdot \Delta_{\lambda_0} \cdot D \quad (2-7)$$

Dengan:

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

Δ_{λ_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 (2-8).

$$|\Delta\tau_{wg}| = \frac{D}{c\lambda_0} (\Delta_n) d\Delta_{\lambda_0} \quad (2-8)$$

Dengan:

D = Panjang serat optik (km)

Δ_n = perbedaan indeks bias relatif

Δ_{λ_0} = lebar spektrum sumber optik (nm)

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

λ_0 = panjang gelombang (nm)

Efek dispersi keseluruhan dalam serat optik adalah nilai efektif untuk keseluruhan dispersi yang terjadi, dan secara matematik ditentukan oleh persamaan (2-9) (Hoss, 1990).

$$\tau_{total} = \sqrt{(\tau_{dm,tot})^2 + (\Delta\tau_{wg})^2 + (\tau_{im})^2} \quad (2-9)$$

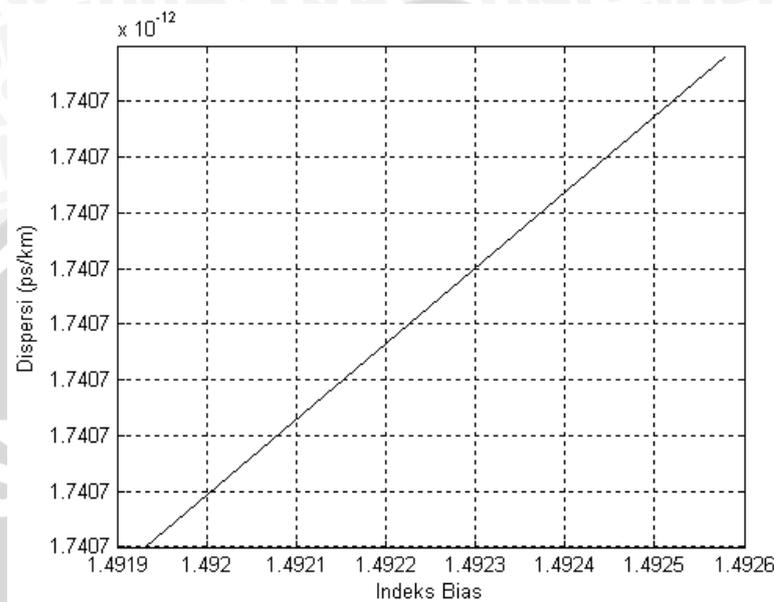
Dengan:

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

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

τ_{im} = Dispersi Intermodal

Ilustrasi secara grafik perubahan dispersi yang disebabkan oleh kenaikan indeks bias pada POF ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Hubungan Dispersi Terhadap Indeks Bias

2.8 Pengukuran Kinerja Serat Optik

Terdapat beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mengukur kualitas sistem komunikasi digital, termasuk sistem komunikasi serat optik, diantaranya *Bit Error Rate* (BER), *noise margin*, *signal to noise ratio*, *timing jitter*, dan *bit rate*. Tampilan *eye pattern* dapat membantu dalam pengukuran *noise margin*, *signal to noise ratio*, *timing jitter*, dan *bit rate*. Berikut adalah penjelasan untuk masing-masing parameter tersebut:

2.8.1 Bit Error Rate

BER adalah perbandingan banyaknya bit yang tidak tertransmisi dengan banyaknya bit yang ditransmisikan. Untuk menghitung BER pada sebuah sistem komunikasi terdapat bermacam cara. Secara aplikasi langsung bisa menggunakan BER *tester* atau BERT, yaitu suatu alat parameter *monitoring* kualitas dan status kesalahan bit pada suatu sinyal.

Setiap sinyal yang dikirimkan dari *transmitter* harus sampai di *receiver*, dan tingkat kesalahan bit kecil. Menentukan nilai BER secara teori dapat diketahui

berdasarkan perbandingan *error bit* (E_b) terhadap total bit yang ditransmisikan (T_b) dalam periode t detik, ditunjukkan dalam Persamaan (2-10).

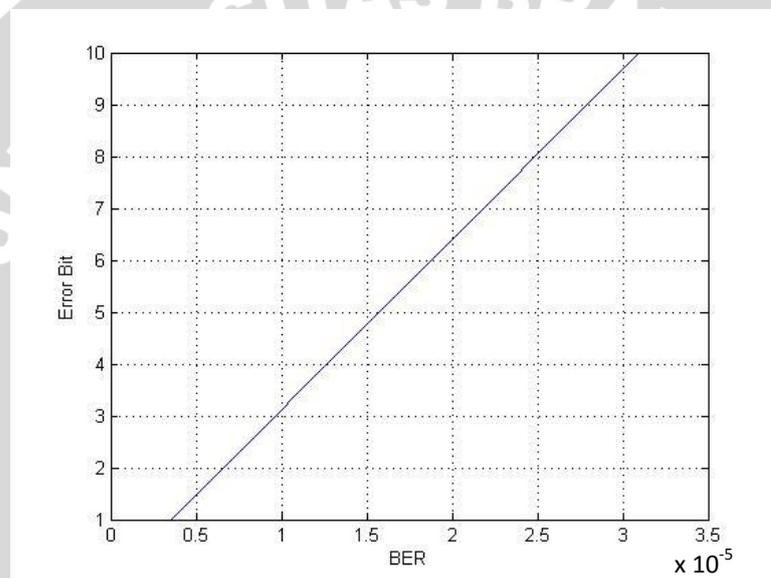
$$\text{BER} = \frac{E_b}{T_b} \quad (2-10)$$

Keterangan:

E_b = Jumlah Bit yang Salah (*Error bit*)

T_b = Jumlah Bit yang ditransmisikan

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-10) ditunjukkan pada Gambar 2.16, dengan nilai T_b yang digunakan adalah 320×10^3 . Gambar 2.16 menunjukkan bahwa nilai BER naik secara linier sesuai dengan kenaikan *error bit*.



Gambar 2.16. Grafik Hubungan *Error Bit* Terhadap BER

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):

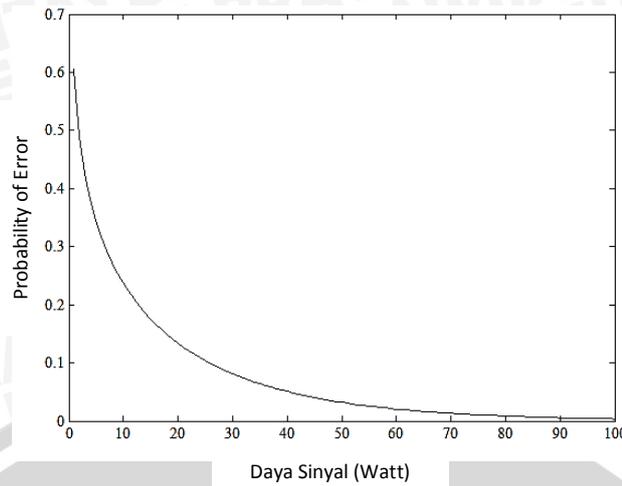
$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E}{N_0}} \right) \quad (2-11)$$

Dengan:

E = Daya (watt)

N_0 = *Noise* (watt)

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-11) ditunjukkan pada Gambar 2.17, dapat dilihat bahwa nilai P_e turun secara linier sesuai dengan kenaikan daya dan penurunan *noise*.

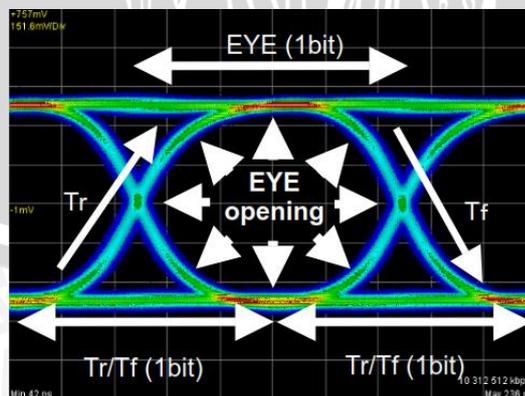


Gambar 2.17. Hubungan *Probability of Error* Terhadap Daya Sinyal

BER dalam sistem transmisi serat optik berkisar antara 10^{-9} sampai 10^{-15} (Keiser, 1983). Karakteristik komponen yang berkaitan dengan BER yaitu kecepatan transmisi dan tingkat daya minimum detektor optik.

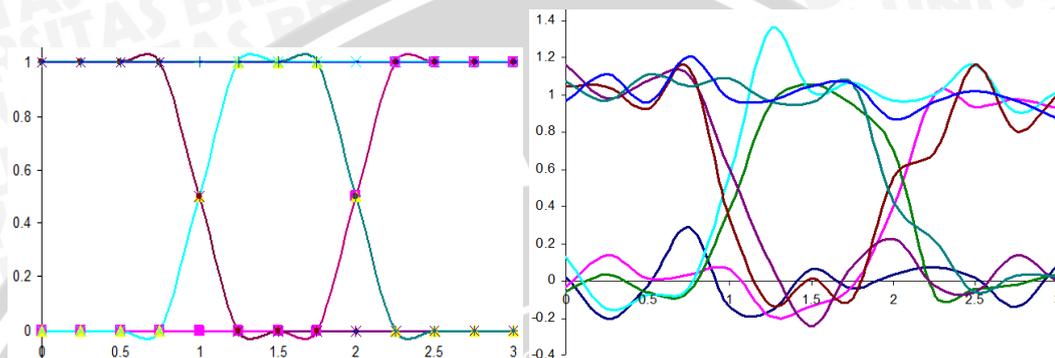
2.8.2 Eye Pattern

Eye pattern atau *eye diagram* adalah tampilan osiloskop untuk mengetahui karakteristik performansi sinyal digital. Untuk menentukan kinerja keseluruhan sistem dapat dilakukan dengan mengambil beberapa sampel *eye diagram*. Parameter yang diperhatikan dari tampilan *eye diagram* adalah *eye opening*. Pengukuran *eye diagram* didasarkan pada domain waktu. Satu *eye opening* menyatakan satu bit slot sinyal. Dalam pengukuran, kendala yang dihadapi adalah hanya beberapa bit yang dapat diperiksa pada waktu tertentu. Gambar 2.18 menunjukkan *eye opening* pada sebuah sinyal digital.



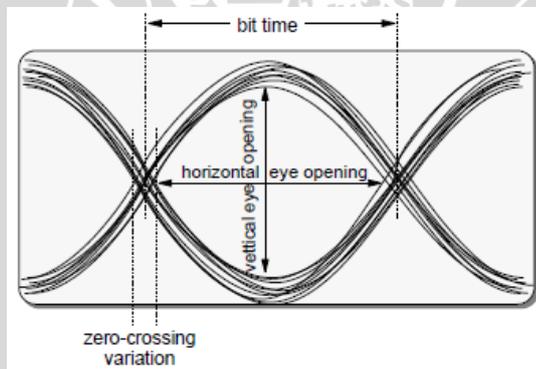
Gambar 2.18. *Eye Opening*
(Sumber: Anritsu, 2008)

Tampilan *eye diagram* sesuai dengan sinyal yang ditransmisikan. Gambar 2.19 bagian kiri menunjukkan gambar *eye diagram* dengan *eye opening* yang besar dan lebar, sehingga dapat dikatakan sebagai kondisi ideal. Sedangkan pada Gambar 2.19 bagian kanan terdapat *noise* pada sistem sehingga tampilan *eye diagram* tidak ideal. Pada kondisi ideal dapat diketahui dengan mudah nilai performansi kerja sistem. Besar *eye opening* menunjukkan *Signal to Noise Ratio* (SNR) ketika proses *sampling* terjadi dan besar amplitudo serta *timing error*.



Gambar 2.19. *Eye Diagram* Ideal dan Tidak Ideal
(Sumber: Decusatis, 2008)

Berikut adalah hal-hal yang harus diperhatikan dalam menganalisis skema *eye diagram* pada Gambar 2.20.

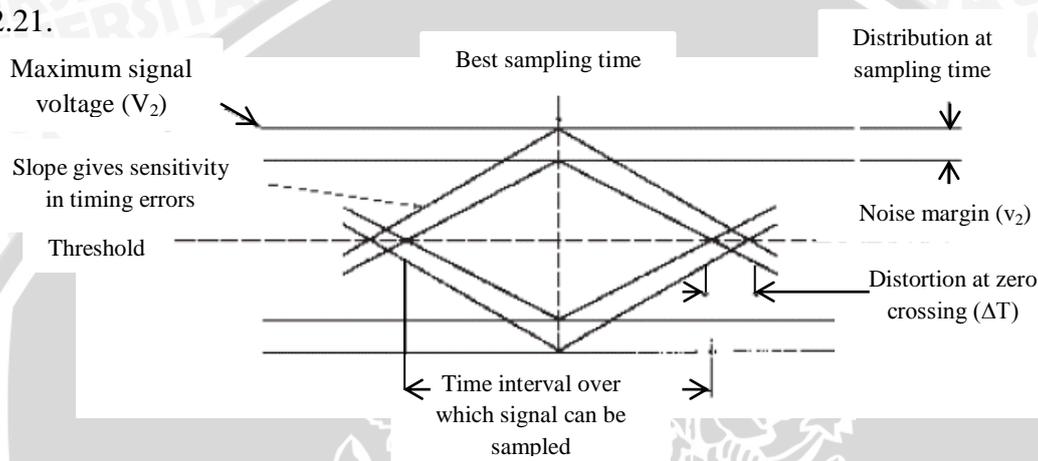


Gambar 2.20. Skema *Eye Diagram*
(Sumber: Dutton, 1998)

Satu *bit time* atau biasa disebut *unit interval* merupakan parameter untuk menghitung *bitrate*. *Vertical eye opening* menunjukkan perbedaan level sinyal pada bit satu dan bit nol, maka semakin besar perbedaannya maka akan semakin mudah untuk membedakan nol dan satu. Dapat diketahui pengaruh *noise* pada sistem dengan menganalisis *vertical eye opening*. *Noise margin* dan *signal to noise ratio* dapat diketahui dengan menganalisis *vertical eye opening*. *Horizontal eye opening* berkaitan dengan nilai *jitter* pada sinyal. Semakin lebar *eye opening* pada sumbu ini, maka

semakin sedikit *jitter* yang terjadi. *Zero-crossing point* juga dapat dianalisis untuk pengukuran besar *timing jitter* pada sinyal.

Parameter terbaik untuk menentukan kualitas sinyal adalah pada ukuran *eye opening* sinyal tersebut. Semakin besar ukurannya maka akan semakin mudah untuk mendeteksi sinyal dan semakin kecil nilai *error rate*. Ketika kondisi *eye* menutup maka semakin besar nilai *jitter*, akan sangat sulit untuk menganalisis *horizontal eye opening* dan *vertical eye opening*. Maka semakin sulit menentukan parameter kerja sistem. Parameter *noise margin* dan *timing jitter* dapat diukur dengan menggunakan Gambar 2.21.



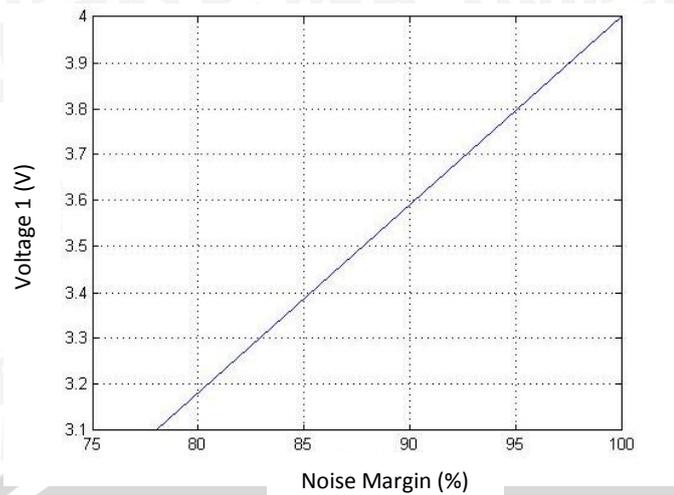
Gambar 2.21. *Eye Diagram* Dalam Menentukan *Noise Margin* dan *Timing Jitter* (Sumber: Keiser, 2004)

1) *Noise Margin*

Noise margin merupakan parameter untuk mengukur kekebalan sistem terhadap *noise*. Besar amplitudo merupakan ukuran besarnya distorsi yang disebabkan *Inter Symbol Interference* (ISI). Dalam pengukuran menggunakan *eye diagram*, *Noise margin* adalah ratio persentase dari puncak sinyal V_1 yang dilihat dari besar *eye opening* terhadap tegangan maksimum sinyal V_2 . Secara matematis ditulis dalam Persamaan (2-12) (Keiser, 2004).

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

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-12) ditunjukkan pada Gambar 2.22, dapat dilihat bahwa nilai *noise margin* naik secara linier sesuai dengan kenaikan V_1 .



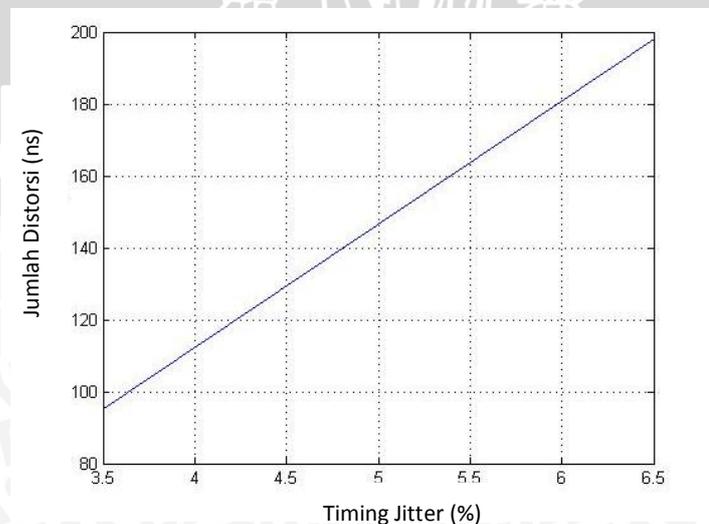
Gambar 2.22. Grafik Hubungan V_1 Terhadap *Noise Margin*

2) *Timing Jitter*

Timing jitter adalah pergeseran waktu dari transmisi ideal pada data bit yang diterima oleh *receiver*. *Timing jitter* dapat dilihat dari tampilan *eye pattern* bagian *zero crossing point*, semakin besar perbedaan *zero crossing point* mengindikasikan semakin besar keterlambatan sinyal dan ditampilkan *eye opening* yang semakin kecil. Besarnya *timing jitter* disebabkan oleh *noise* dan dispersi pulsa pada serat optik. *Timing jitter* dapat dihitung dengan perbandingan jumlah distorsi (ΔT) dan *bit interval* (T_b) sesuai Persamaan (2-13) (Keiser, 2004).

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

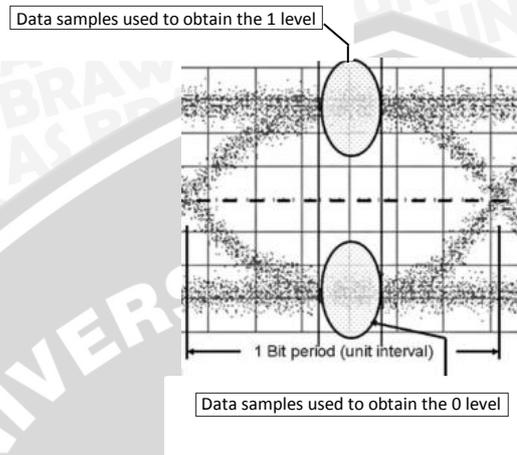
Ilustrasi secara grafik persamaan (2-13) ditunjukkan pada Gambar 2.23, dapat dilihat bahwa nilai *Timing Jitter* naik secara linier sesuai dengan kenaikan jumlah distorsi.



Gambar 2.23. Grafik Hubungan Jumlah Distorsi Terhadap *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).

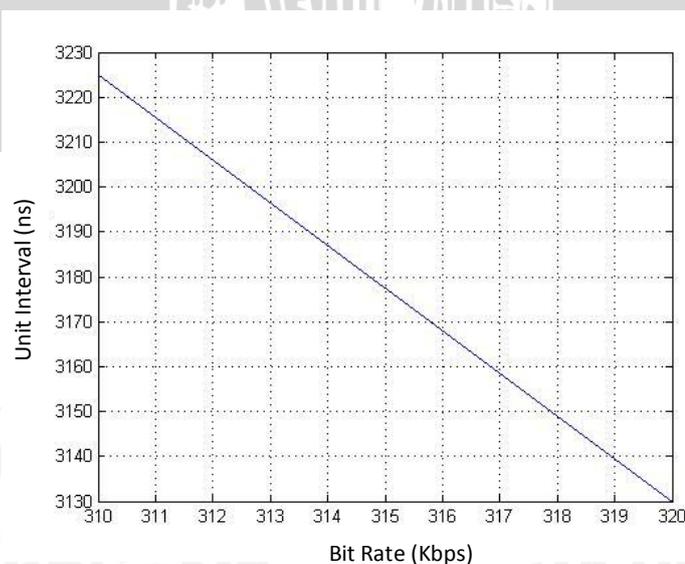


Gambar 2.24. *Eye Diagram* Dalam Menentukan *Unit Interval*
(Sumber: Decusatis, 2008)

Unit interval dapat dilihat pada Gambar 2.24 dan Persamaan (2-14) digunakan untuk menghitung *bit rate*.

$$\text{Bitrate} = \frac{1}{UI} \quad (2-14)$$

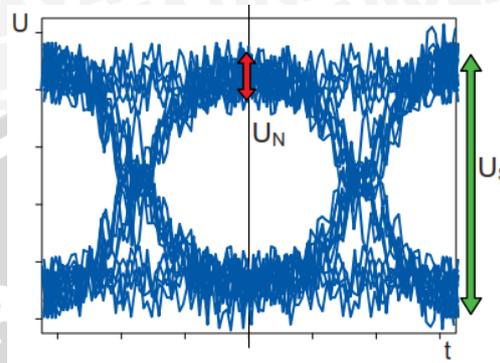
Ilustrasi secara grafik persamaan (2-14) ditunjukkan pada Gambar 2.25, dapat dilihat bahwa grafik turun secara linier. Hal ini menjelaskan bahwa semakin kecil *unit interval*, maka semakin besar *bit rate*.



Gambar 2.25. Grafik Hubungan *Unit Interval* Terhadap *Bit Rate*

4) *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to noise ratio (SNR) adalah parameter dalam menentukan kualitas sinyal pada sistem digital dengan menghitung perbandingan daya sinyal dengan daya *noise*. Semakin besar nilai SNR, maka semakin baik kualitas sinyal. Pada level daya rendah, SNR akan turun sehingga menunjukkan besar *noise* yang meningkat.

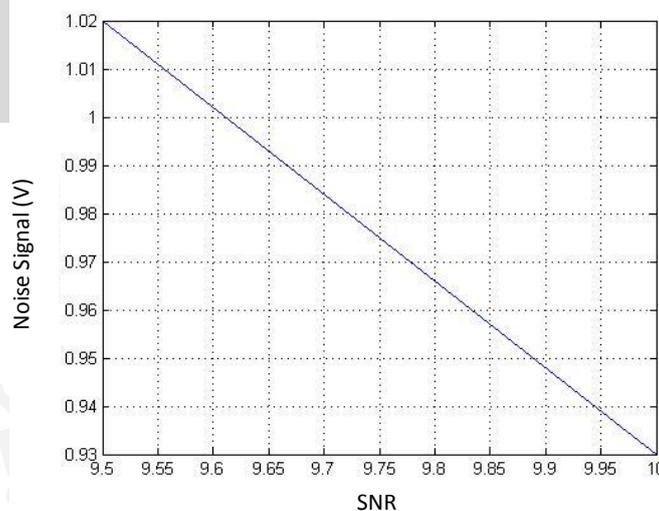


Gambar 2.26. *Eye Diagram* Dalam Menentukan SNR
(Sumber: Ziemann, 2007)

Menentukan nilai SNR dari *eye diagram* yaitu dengan menentukan nilai U_s dan U_n . Nilai U_s ditentukan dari selisih V_1 dan V_2 , sedangkan nilai U_n ditentukan dari nilai *eye amplitude*, lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.26. Persamaan (2-15) digunakan untuk menghitung nilai SNR.

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{U_s}{U_n} \quad (2-15)$$

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-15) ditunjukkan pada Gambar 2.27, dapat dilihat bahwa grafik turun secara linier. Hal ini menjelaskan bahwa semakin kecil *noise signal*, maka semakin besar SNR.



Gambar 2.27. Grafik Hubungan *Signal Noise* Terhadap SNR

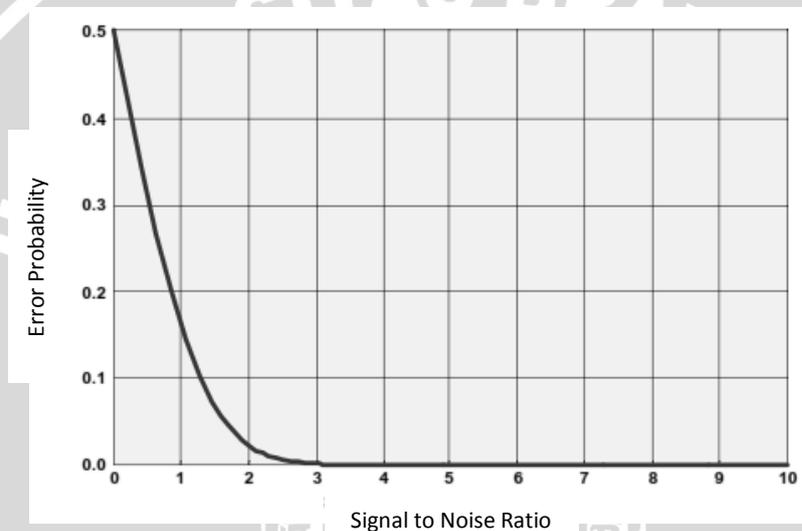
SNR memiliki keterkaitan dengan *error*. Hubungan SNR dengan *error* ditunjukkan secara matematis melalui Persamaan 2-16.

$$P(SNR) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{SNR}{\sqrt{2}}\right) \quad (2-16)$$

Dengan:

SNR = *signal to noise ratio*

Ilustrasi secara grafik persamaan (2-16) ditunjukkan pada Gambar 2.28, dapat dilihat bahwa grafik turun secara polinomial. Hal ini menjelaskan bahwa semakin besar nilai SNR, maka semakin kecil *error* yang terjadi.



Gambar 2.28. Hubungan *Error Probability* Terhadap SNR