

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka yang dimaksudkan pada bab ini adalah penjabaran secara teori yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pengaruh pH dan tekanan terhadap performansi serat optik sebagai media transmisi sistem komunikasi serat optik. Teori yang dibahas adalah rugi-rugi material serat optik, pengaruh tekanan, pengaruh pH, sistem komunikasi serat optik, POF, sumber optik, detektor optik, air, dan parameter kinerja komunikasi serat optik yang terdiri dari BER dan *eye diagram*.

2.1. Rugi-Rugi Material Serat Optik

Serat optik yang dipasang di berbagai lingkungan (udara, bawah tanah, dalam pipa, dalam air, dan lain-lainnya). Berbagai kondisi lingkungan harus dipertimbangkan dengan hati-hati untuk menentukan instalasi serat optik dengan mempertahankan karakteristik yang diinginkan. (ITU-T Manual, 2009).

Faktor eksternal yang berkaitan dengan berbagai kondisi lingkungan dapat dibagi menjadi dua kategori: (ITU-T Manual, 2009)

1. Faktor eksternal alami (suhu, angin, air, gempa bumi, dan lain-lain)
2. Faktor eksternal buatan manusia (asap, polusi udara, api, dan lain-lain)

Rugi-rugi cahaya terjadi karena perjalanan cahaya melalui inti serat optik. Rugi-rugi daya yang ditransmisikan, biasa disebut redaman atau kerugian sisipan, terjadi karena alasan berikut: (Elliott *et al*, 2002)

1. Redaman internal inti serat optik terdiri dari absorpsi material dan hamburan material.
2. Redaman eksternal serat optik terdiri dari *microbending* dan *macro bending*.

Secara umum, sinyal optik dilemahkan dalam air dengan dua proses, yaitu absorpsi dan hamburan (Liu *et al*, 2007). Absorpsi adalah proses termal secara searah dimana energi foton yang hilang akibat interaksi cahaya dengan molekul air dan partikel lainnya (Cochenour *et al*, 2008). Absorpsi terjadi sebagai foton energi yang hilang akibat proses termal (Liu *et al*, 2007). Pada dasarnya cahaya diserap oleh struktur atom tertentu. Berbagai struktur atom hanya menyerap radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu dan sebagai hasilnya redaman karena absorpsi tergantung panjang gelombang (Elliott *et al*, 2002).

2.2. Pengaruh Tekanan

Fluida adalah zat yang dapat mengalir atau berpindah akibat pengaruh tekanan yang sangat kecil atau sedikit saja (Kuswanto, 2013). Secara matematis tekanan ditulis dalam persamaan (2-1) (Ali *et al*, 2003).

$$P = 9,91 x D - 0,23744 x 10^{-1} x D^2 + 0,19232 x 10^{-3} x D^3 \quad (2-1)$$

dengan :

P = tekanan (MN/m²)

D = kedalaman (km), $D \leq 10$ km

Tekanan sebesar $1,013 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ disebut satu atmosfer (1 atm). (Sears *et al*, 1962). Pada Tabel 2.1. dijelaskan konversi 1 N/m² ke berbagai satuan tekanan

Tabel 2.1. Konversi 1 N/m² Ke Berbagai Satuan Tekanan

Tekanan	Nilai konversi
kilonewtons/m ²	0,001
meganewtons/m ²	0,000 001
kilopascals[kPa]	0,001
megapascals[MPa]	0,000 001

(Sumber: <http://www.convert-me.com/en/convert/pressure/nmsq.html>, 2015)

Perhitungan nilai tekanan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1). Proses perhitungan tekanan pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu D sebesar 3 cm.

$$D = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-5} \text{ km} = 0,00003 \text{ km}$$

$$P = 9,91 x D - 0,23744 x 10^{-1} x D^2 + 0,19232 x 10^{-3} x D^3$$

$$P = 9,91 x 0,00003 - 0,23744 x 10^{-1} x (0,00003)^2 + 0,19232 x 10^{-3} x (0,00003)^3$$

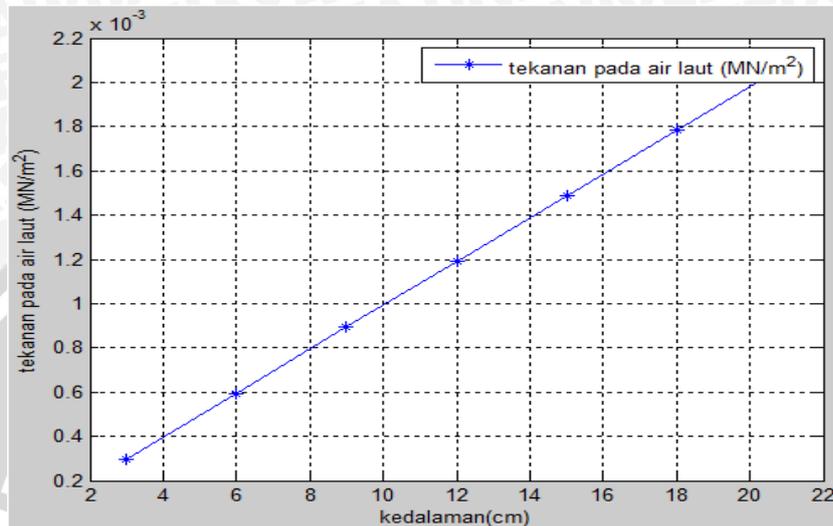
$$P = 9,91 x 0,00003 - 0,23744 x 10^{-1} x 0,0000000009$$

$$+ 0,19232 x 10^{-3} x 0,0000000000000003$$

$$P = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Jadi, tekanan pada kedalaman 3 cm sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti D pada rumus P . Berdasarkan persamaan (2-1) dapat ditampilkan secara grafis hubungan tekanan terhadap kedalaman pada Gambar 2.1. Nilai tekanan (MN/m^2) pada air laut akan naik secara linier dengan penambahan kedalaman air laut.



Gambar 2.1. Karakteristik Tekanan Pada Air Laut Terhadap Kedalaman

Perubahan nilai tekanan mempengaruhi nilai indeks bias serat optik. Perubahan nilai indeks bias disebabkan karena perubahan nilai tekanan dapat dihitung dengan persamaan (2-2) (Ali *et al*, 2003).

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E} \quad (2-2)$$

dengan:

n = indeks bias

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} P + 0,544763 \times 10^{-8} P^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} P - 1,71823 \times 10^{-8} P^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} P + 0,894313 \times 10^{-10} P^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} P - 1,13552 \times 10^{-8} P^2$$

$$E = 100$$

λ = panjang gelombang (μm)

P = tekanan (MN/m^2)

Perhitungan nilai indeks bias dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1) dan (2-2). Proses perhitungan tekanan pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu D sebesar 3 cm.

$$D = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-5} \text{ km} = 0,00003 \text{ km}$$

$$P = 9,91 \times D - 0,23744 \times 10^{-1} \times D^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times D^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times (0,00003)^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times (0,00003)^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times 0,0000000009$$

$$+ 0,19232 \times 10^{-3} \times 0,000000000000003$$

$$P = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Jadi, tekanan pada kedalaman 3 cm sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti D pada rumus P . Proses perhitungan indeks bias pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu P sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$ dan panjang gelombang sebesar $0,66 \mu\text{m}$ dapat digunakan untuk menghitung indeks bias pada kedalaman 3 cm.

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} P + 0,544763 \times 10^{-8} P^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$A = 1,295520003$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} P - 1,71823 \times 10^{-8} P^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$B = 0,809872013$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} P + 0,894313 \times 10^{-10} P^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times (0,000297300)^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times 0,0000000883873$$

$$C = 0,010794500$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} P - 1,13552 \times 10^{-8} P^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$D = 0,917151012$$

$$E = 100$$

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 100}$$

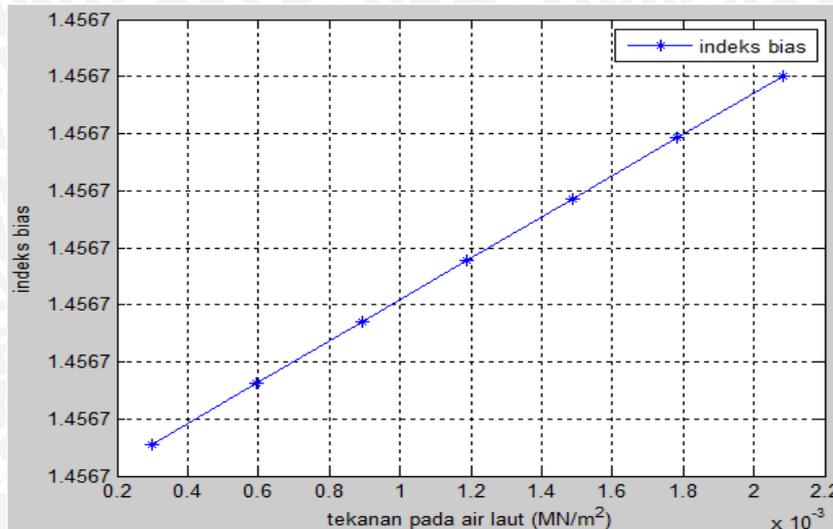
$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times 0,4356}{0,4356 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times 0,4356}{0,4356 - 100}$$

$$n^2(\lambda, P) = 2,121958641$$

$$n(\lambda, P) = 1,4566944227065$$

Jadi, indeks bias pada kedalaman 3 cm sebesar 1,4566944227065.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, indeks bias pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti P sesuai dengan tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm pada rumus P . Berdasarkan persamaan (2-1) dan persamaan (2-2) dapat ditunjukkan hubungan tekanan terhadap indeks bias ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Karakteristik Indeks Bias Terhadap Tekanan Pada Air Laut

Gambar 2.2. menunjukkan bahwa terjadinya tekanan pada air laut mengakibatkan indeks bias akan berubah. Semakin besar tekanan pada air laut maka indeks bias akan semakin naik. Perubahan indeks bias akan mengakibatkan perubahan pada penjalaran cahaya pada serat optik. Sudut kritis, sudut penerimaan, dan *Numerical Aperture* (NA) pada serat optik akan berubah.

Perubahan nilai tekanan mempengaruhi nilai pH. Perubahan nilai pH disebabkan karena perubahan nilai tekanan dapat dihitung dengan persamaan (2-3) (Culberson *et al*, 1968).

$$pH_1 - pH_p = \frac{(E_1 - E_p - \Delta E_{asym})}{S} \quad (2-3)$$

dengan:

pH_p = pH yang dipengaruhi tekanan

pH_1 = pH pada pengukuran menggunakan alat

E_1 = tekanan pada 1 atm

E_p = tekanan pada P atm. P atm dipengaruhi oleh perubahan kedalaman.

ΔE_{asym} = 0,5 mV pada 1000 atm

S = slope

Secara matematis slope ditulis dalam persamaan Nerst (2-4) (Nerst,1889).

$$S = \frac{2,3 x R x T}{F} \quad (2-4)$$

dengan:

S = slope

R = konstanta gas (8,3144 J/K)

T = temperatur (K)

F = kontanta faraday (96485 C)

Perhitungan nilai tekanan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1). Proses perhitungan tekanan pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu D sebesar 3 cm.

$$D = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-5} \text{ km} = 0,00003 \text{ km}$$

$$P = 9,91 \times D - 0,23744 \times 10^{-1} \times D^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times D^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times (0,00003)^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times (0,00003)^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times 0,0000000009 \\ + 0,19232 \times 10^{-3} \times 0,0000000000000003$$

$$P = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

$$P \left(\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right) \text{ dikonversi ke } P \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \times 10^6$$

$$P = 297,299978630 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$P \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \text{ dikonversi ke } P \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right) = 297,299978630 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 10$$

$$P = 2972,999786304 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$P \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right) \text{ dikonversi ke } P \text{ (atm)} = 2972,999786304 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \times \frac{1}{1013000}$$

$$P \text{ (atm)} = 0,002934847 \text{ atm}$$

Jadi, tekanan pada kedalaman 3 cm sebesar 0,002934847 atm.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti D pada rumus P . P (atm) sebesar 0,002934847 atm dapat digunakan untuk menghitung pH pada kedalaman 3 cm.

Perhitungan nilai pH disebabkan karena perubahan nilai tekanan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1), persamaan (2-3), dan persamaan (2-4). Proses perhitungan pH pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu pH_1 sebesar 7,01, E_1 sebesar 1 atm, ΔE_{asym} sebesar 0,05 mV pada 1000 atm, $R = 8,3144 \text{ J/K}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $F = 96485 \text{ C}$, $E_p = 1,002972796 \text{ atm}$.

$$pH_1 - pH_p = \frac{(E_1 - E_p - \Delta E_{asym})}{S}$$

$$S = \frac{2,3 \times R \times T}{F}$$

Menghitung slope pada suhu 25°C :

Variabel yang diketahui yaitu R sebesar $8,3144 \text{ J/K}$, T sebesar 25°C sebesar 298 K , F sebesar 96485 C sebesar 96758 K .

$$S = \frac{2,3 \times R \times T}{F}$$

$$S = \frac{2,3 \times 8,3144 \frac{\text{J}}{\text{K}} \times 298 \text{ K}}{96758 \text{ K}}$$

$$S = 0,058896316$$

Slope sebesar 56,8 pada suhu 22°C , slope sebesar 56,6 pada suhu $13,5^\circ\text{C}$, slope sebesar 56,2 pada suhu $11,6^\circ\text{C}$, slope sebesar 54,1 pada suhu 2°C (Culberson *et al*, 1968). Dari data yang telah ditunjukkan oleh Culberson *et al* pada tahun 1968, maka slope harus berkisar 54 sampai 57 untuk suhu 2°C sampai suhu 22°C . Karena slope dari hasil perhitungan sebesar 0,058896316, maka slope dikalikan 1000 agar sesuai dengan slope yang ditunjukkan Culberson *et al* pada tahun 1968. Jadi, setelah dikalikan 1000, maka slope sebesar 58,89631617 pada suhu 25°C .

Sebelum menghitung pH_p pada kedalaman 3 cm, harus menghitung ΔE_{asym} pada kedalaman 3 cm. Variabel yang diketahui adalah ΔE_{asym} sebesar 0,05 mV pada 1000 atm (Culberson *et al*, 1968) dan E_p pada kedalaman 3 cm sebesar 0,002934847 atm.

$$\Delta E_{asym} = \frac{E_p}{1000 \text{ atm}} \times 0,5 \text{ mV}$$

$$\Delta E_{asym} = \frac{0,002934847 \text{ atm}}{1000 \text{ atm}} \times 0,5 \text{ mV}$$

$$\Delta E_{asym} = 0,000001467 \text{ mV}$$

Jadi, ΔE_{asym} pada kedalaman 3 cm sebesar 0,000001467 mV.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, nilai ΔE_{asym} pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti E_p sesuai dengan tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm pada rumus P .

Menghitung pH_p pada kedalaman 3 cm:

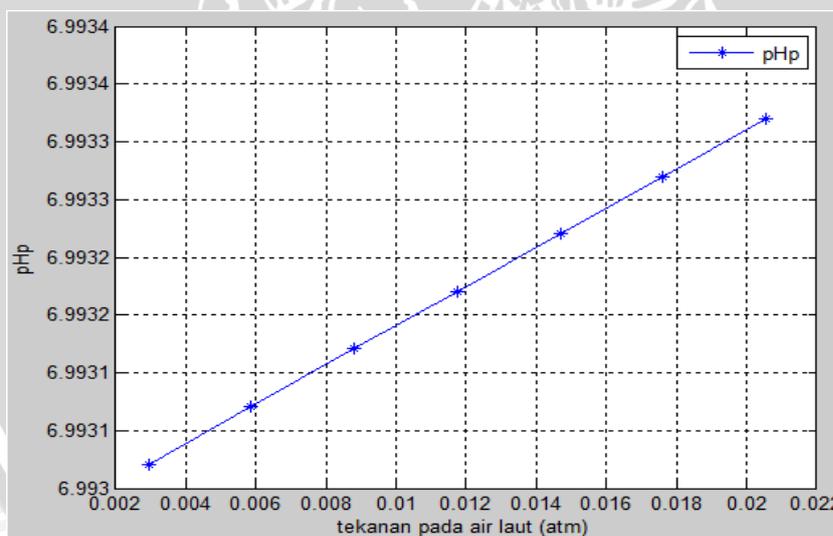
$$pH_1 - pH_p = \frac{(E_1 - E_p - \Delta E_{asym})}{S}$$

$$pH_p = 7,01 - \frac{(1 \text{ atm} - 0,002934847 \text{ atm} - 0,000001467 \text{ mV})}{58,89631617}$$

$$pH_p = 6,99307$$

Jadi, pH_p pada kedalaman 3 cm sebesar 6,99307.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, nilai pH disebabkan karena perubahan nilai tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti E_p sesuai dengan tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm pada rumus P . Berdasarkan persamaan (2-3) dan persamaan (2-4) dapat ditunjukkan hubungan tekanan terhadap pH_p ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Karakteristik pH Pada Tekanan Air Laut Terhadap Tekanan Pada Air Laut

Gambar 2.3. menunjukkan bahwa terjadinya tekanan pada air laut mengakibatkan besar pH akan berubah. Semakin besar tekanan pada air laut maka pH akan semakin naik. Semakin besar pH, maka absorpsi akan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan dasar teori tentang pengaruh pH. Jadi, terdapat hubungan antara pH dengan tekanan.

2.3. Pengaruh pH

Larutan dikelompokkan dalam tiga golongan, yaitu bersifat asam, bersifat basa, dan bersifat netral. Asam dan basa memiliki sifat-sifat yang berbeda, sehingga dapat kita bisa menentukan sifat suatu larutan (Kholilah, 2011). Menurut Kholilah (2011), untuk menentukan sifat suatu larutan, terdapat beberapa cara, seperti :

1. Menggunakan indikator warna (lakmus). Lakmus akan menunjukkan sifat suatu larutan dengan perubahan warna yang terjadi. Lakmus akan berwarna merah dalam larutan yang bersifat asam dan akan berwarna biru dalam larutan yang bersifat basa.
2. Mengukur pH. pH merupakan suatu parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman larutan. Larutan asam memiliki pH kurang dari 7, larutan basa memiliki pH lebih dari 7, sedangkan larutan netral memiliki $\text{pH} = 7$. pH suatu larutan dapat ditentukan dengan indikator pH atau dengan pH meter.

Perhitungan air laut menggunakan metode pHmetri untuk parameter pH. Menurut Kholilah (2014), pH meter adalah pengukuran pH secara potensiometri. Sistem pengukuran dalam pH meter berisi elektroda kerja untuk pH dan elektroda referensi. Perbedaan dua elektroda tersebut sebagai fungsi dari pH dalam larutan yang diukur. Oleh karenanya larutan yang diukur harus bersifat elektrolit.

Menurut Kholilah (2014), secara garis besar kerja pH meter dapat digambarkan sebagai berikut : Pada elektroda pH, potensial yang dihasilkan (biasanya dalam mV) adalah berbanding lurus dengan konsentrasi ion hydrogen (H^+) dalam larutan. Sedangkan, elektroda/sel referensi berguna untuk mempertahankan potensial secara konstan terlepas dari adanya perubahan pH atau aktivitas ionik lainnya dalam larutan. Sedangkan jembatan garam pada sel referensi berguna untuk mempertahankan kontak listrik antara 2 elektroda selama proses pengukuran dalam pH berlangsung.

Jadi, bisa disimpulkan bahwa metode pHmetri dapat digunakan dalam menganalisis perhitungan pH air laut.

Menurut Kholilah (2014), atom-atom dengan valensi ion positif (pada kasus Na) lebih banyak memiliki elektron-elektron bebas dan berikatan dengan ion-ion negatif OH. Elektron bebas ini meskipun telah berikatan dengan ion negatif OH, namun pada proses pengikatan pasangan akan berlaku secara acak. Artinya, perilaku acak elektron bebas ini seperti benar-benar elektron bebas yang masih belum memiliki pasangan (apalagi setelah sampel kita ganggu seperti pengambilan memakai pipet dan lain sebagainya) tentunya

ikatan ion yang kuat sekalipun bisa lepas. Sifat elektron bebas tersebut dapat menyerap energi foton yang dihasilkan oleh cahaya yang seharusnya energi foton tersebut diserap oleh fotodiode.

Kholilah (2014) menyatakan bahwa semakin tinggi nilai pH, berarti larutan semakin bersifat basa. Artinya, semakin banyak konsentrasi elektron bebasnya yang akan berakibat pada semakin banyak cahaya yang terabsorpsi. Larutan basa memiliki absorpsi lebih besar dari pada larutan asam.

Secara matematis koefisien absorpsi (α) ditulis dalam persamaan (2-5) (Weber, 2003).

$$\alpha (cm^{-1}) = \left(\frac{4\pi n \times 10^4}{\lambda} \right) k \quad (2-5)$$

dengan:

n = indeks bias

$\pi = 3,14$

λ = panjang gelombang (μm)

k = indeks bias kompleks

Secara matematis indeks bias kompleks ditulis dalam persamaan (2-6) (Foll, 2014).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-6)$$

dengan:

$\pi = 3,14$

λ = panjang gelombang (μm)

Perhitungan nilai koefisien absorpsi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-5) dan persamaan (2-6). Proses perhitungan koefisien absorpsi pada air ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu pH sebesar 6,8 merupakan pH air PAM memiliki indeks bias sebesar 1,3334, pH sebesar 7,01 merupakan pH air laut memiliki indeks bias sebesar 1,34. π sebesar 3,14, dan panjang gelombang sebesar 0,66 μm .

Menghitung koefisien absorpsi pada air PAM:

$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = \left(\frac{4\pi n x 10^4}{\lambda} \right) k$$

$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = \left(\frac{4x3,14x1,3334 x 10^4}{0,66} \right) x \frac{2x3,14}{0,66}$$

$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = 241,4470$$

Jadi, koefisien absorpsi pada air PAM sebesar 241,4470 (10^{-4}cm^{-1}).

Menghitung koefisien absorpsi pada air laut:

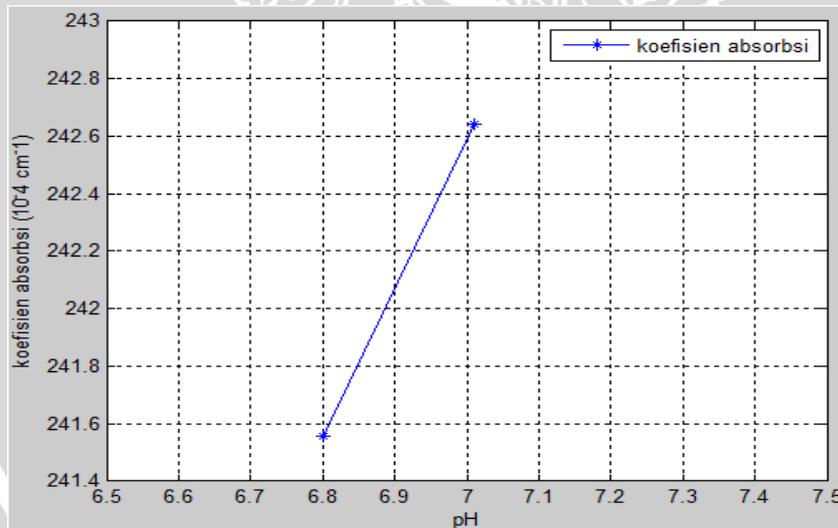
$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = \left(\frac{4\pi n x 10^4}{\lambda} \right) k$$

$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = \left(\frac{4x3,14x1,34 x 10^4}{0,66} \right) x \frac{2x3,14}{0,66}$$

$$\alpha (10^{-4} \text{cm}^{-1}) = 242,6421$$

Jadi, koefisien absorpsi pada air laut sebesar 242,6421 (10^{-4}cm^{-1}).

Berdasarkan persamaan (2-5) dan (2-6) dapat ditunjukkan hubungan koefisien absorpsi terhadap pH yang ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.4.

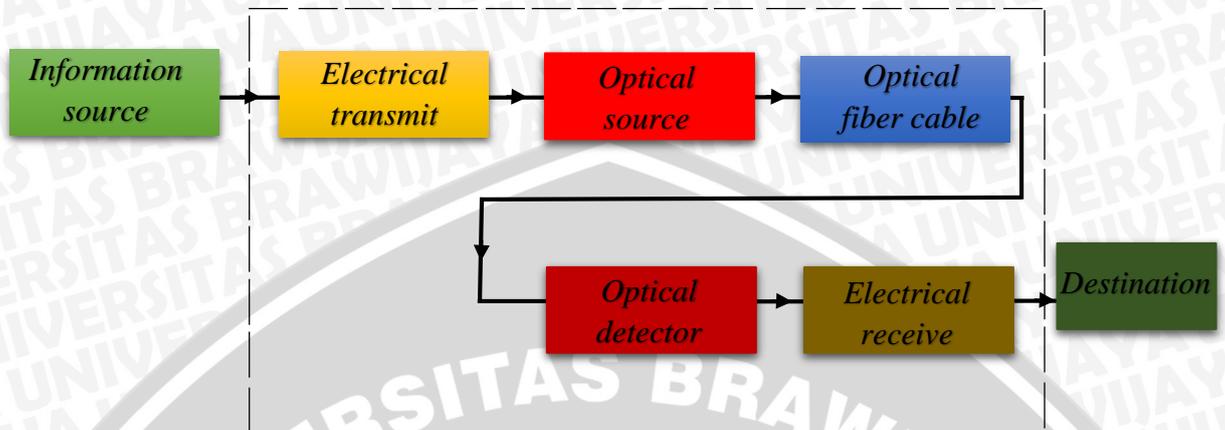


Gambar 2.4. Karakteristik Koefisien Absorpsi Terhadap pH

Gambar 2.4. menunjukkan bahwa terjadinya perubahan indeks bias dengan pH yang semakin bersifat basa mengakibatkan koefisien absorpsi akan berubah. Semakin besar indeks bias dengan pH yang semakin bersifat basa maka koefisien absorpsi akan semakin naik. Perubahan koefisien absorpsi mengakibatkan perubahan sifat elektron bebas. Semakin banyak elektron bebas maka akan semakin banyak energi foton yang hilang. Hal ini disebabkan karena sifat elektron bebas dapat menyerap energi foton yang dihasilkan oleh cahaya yang seharusnya energi foton tersebut diserap oleh detektor optik.

2.4. Sistem Komunikasi Serat Optik

Secara luas, sistem komunikasi serat optik ditampilkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Sistem Komunikasi Serat Optik
(Sumber: Senior, 2008)

Pada Gambar 2.5. *Information source* memberikan sinyal listrik ke *electrical transmit*. Setelah dari *electrical transmit*, sinyal listrik tersebut menuju ke *optical source*. *Optical source* mengonversi sinyal listrik ke sinyal optik yang dapat berupa laser semikonduktor atau *Light Emitting Diode* (LED). Media transmisi terdiri dari kabel serat optik dan penerima yang terdiri dari *optical detector*. Dioda *Positive Intrinsic Negative* (PIN) atau *Avalanche Photo Diode* (APD) dimanfaatkan untuk mendeteksi sinyal optik dan mengonversi sinyal optik ke sinyal listrik (Senior, 2008).

Menurut Sofana (2013), dibandingkan dengan sistem konvensional menggunakan kabel logam (tembaga) biasa, serat optik memiliki keunggulan antara lain:

1. *Less expensive*

Beberapa mil kabel serat optik dapat dibuat lebih murah dari kabel tembaga dengan panjang yang sama.

2. *Thinner*

Serat optik dapat dibuat dengan diameter lebih kecil (ukuran diameter kulit dari serat optik sekitar 100 μm dan total diameter ditambah dengan jaket pelindung sekitar 1 – 2 mm) daripada kabel tembaga, dan juga karena serat optik membawa cahaya maka tentunya memiliki berat yang ringan sehingga kabel serat optik memerlukan tempat yang lebih kecil di dalam tanah.

3. *Higher carrying capacity*

Karena serat optik lebih tipis dari kabel tembaga, maka kebanyakan serat optik dapat dibundel ke dalam sebuah kabel dengan diameter tertentu. Beberapa jalur telepon dapat berada pada kabel yang sama atau lebih banyak saluran televisive pada TV *cable* dapat melalui kabel. Serat optik juga memiliki *bandwidth* yang besar (1 dan 100 GHz, untuk *multimode* dan *singlemode* sepanjang 1 km).

4. *Less signal degradation*

Sinyal yang *loss* pada serat optic lebih kecil (kurang dari 1 dB/km pada rentang panjang gelombang yang lebar) dibandingkan dengan kabel tembaga.

5. *Light signals*

Tidak seperti sinyal listrik pada kabel tembaga, sinyal cahaya dari satu serat optik tidak berinterferensi dengan sinyal cahaya pada serat optik yang lainnya di dalam kabel yang sama. Juga tidak ada interferensi elektromagnetik. Ini berarti meningkatkan kualitas percakapan telepon dan penerimaan TV.

6. *Low Power*

Karena sinyal pada serat optik mengalami *loss* yang rendah, *transmitter* dengan daya yang rendah dapat digunakan dibandingkan dengan sistem kabel tembaga yang membutuhkan tegangan listrik yang tinggi, hal ini jelas dapat mengurangi biaya yang dibutuhkan.

7. *Digital signals*

Serat optik secara ideal cocok untuk membawa informasi digital yang sangat berguna bagi jaringan komputer.

8. *Non-flammable*

Karena tidak ada arus listrik yang melalui serat optik, maka tidak ada risiko bahaya api.

9. *Flexible*

Karena serat optik sangat fleksibel dan dapat mengirim dan menerima cahaya, maka digunakan pada kebanyakan kamera digital, untuk tujuan:

1. *Medical Imaging* – pada *bronchoscopes*, *endoscopes*, *laparoscopes*, *colonofiberscopes* (dapat dimasukkan ke dalam tubuh manusia (misal usus) sehingga citranya dapat dilihat langsung dari luar tubuh).
2. *Mechanical imaging* – memeriksa pengelasan di dalam pipa dan mesin.
3. *Plumbing* – memeriksa *sewer lines*.

Menurut Sofana (2013), kekurangan serat optik dibandingkan kabel tembaga, yaitu :

1. Konstruksi serat optik lemah sehingga dalam pemakaiannya diperlukan lapisan penguat sebagai proteksi.
2. Karakteristik transmisi dapat berubah bila terjadi tekanan dari luar yang berlebihan.
3. Tidak dapat dialiri arus listrik, sehingga tidak dapat memberikan daya pada pemasangan *repeater*.

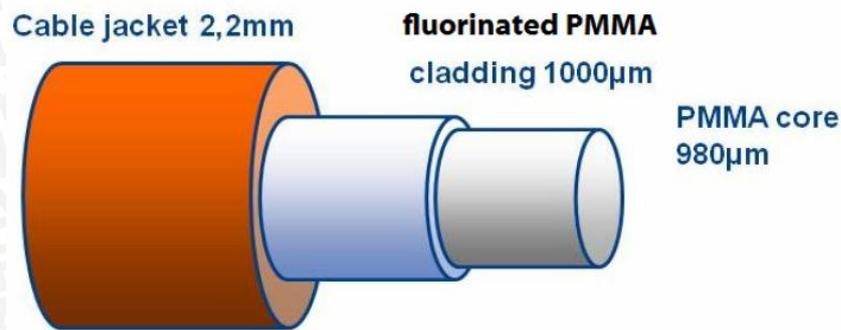
2.5. POF

POF yang tersedia saat ini adalah *step indeks*. Desain terkini didasarkan pada bahan yang disebut PMMA, atau biasa disebut *Poly Methyl Metha Arcylate*. *Step index plastic optical fiber*, atau biasa disebut SIPOF, memiliki bandwidth sekitar 12,5 MHz.km dengan redaman mencapai 180 dB/km. Jika dibandingkan dengan serat optik kaca, maka kualitas POF masih sangat tertinggal. Hal ini disebabkan karena serat optik kaca memiliki bandwidth sekitar 500 MHz.km dengan redaman hanya 1 dB/km (Elliott *et al*, 2002).

Stabilitas termal dari PMMA juga diragukan. Temperatur yang tinggi dikombinasikan dengan kelembaban yang tinggi dapat meningkatkan redaman serat optik secara signifikan. POF yang memiliki diameter *core* sebesar 980 mikron dan diameter *cladding* sebesar 20 mikron. Bahan dasar dari POF terdiri dari plastik polimer. Lapisan *core* didasarkan pada bahan PMMA dan lapisan *cladding* didasarkan pada bahan PMMA yang *terfluorinasi* (Elliott *et al*, 2002).

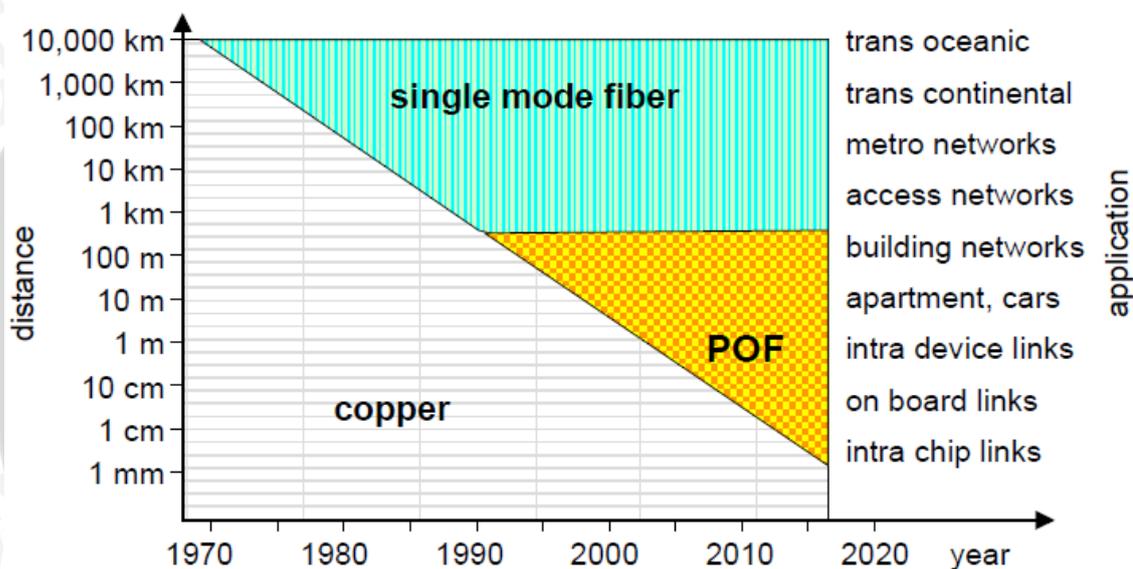
Secara teroris, PMMA memiliki redaman terendah yang terjadi pada panjang gelombang 570 nm dengan redaman sebesar 35 dB/km dan panjang gelombang 650 nm dengan redaman sebesar 106 dB/km (Elliott *et al*, 2002). Pada skripsi ini digunakan POF yang berjenis *step indkes, multimode*.

Pada Gambar 2.6. digambarkan tentang struktur POF.



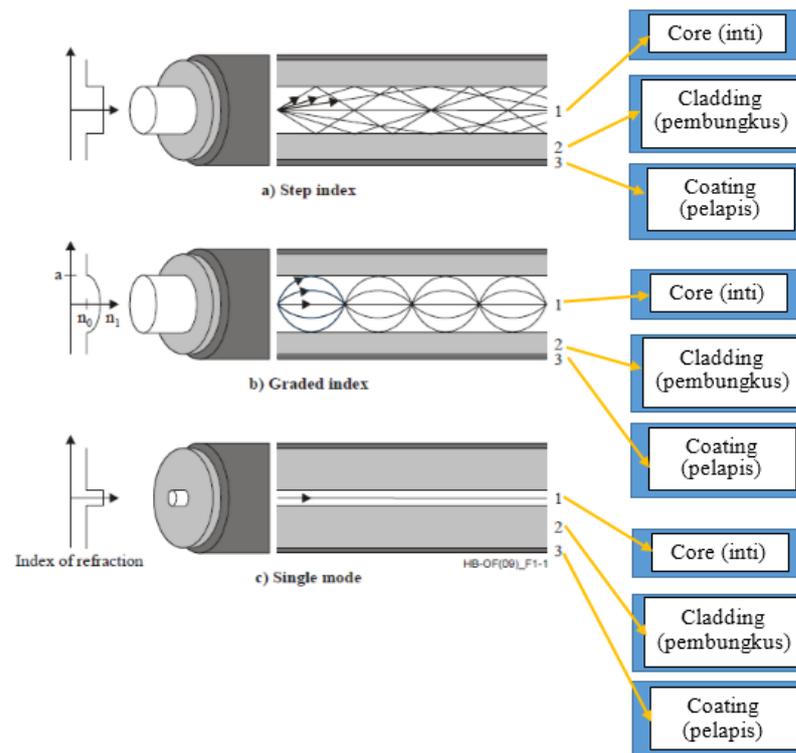
Gambar 2.6. Struktur POF
(Sumber: Lisi, 2011)

Pada Gambar 2.7. ditunjukkan skenario evolusi untuk jaringan optik.



Gambar 2.7. Skenario Evolusi Untuk Jaringan Optik
(Sumber: Ziemann *et al*, 2008)

Serat optik *multimode* memiliki banyak mode propagasi. Cahaya pada mode ini mengikuti jalur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. *Cladding glass* memiliki indeks bias, parameter terkait dengan konstanta dielektrik, yang sedikit lebih rendah dibandingkan indeks bias yang dimiliki *core glass* (ITU-T Manual, 2009). Pada Gambar 2.8. digambarkan tentang tiga jenis serat optik.



Gambar 2.8. Tiga Jenis Serat Optik
(Sumber: ITU-T Manual, 2009)

Gambar 2.8.a. disebut “*step index*” karena indeks bias berubah tiba-tiba dari *cladding* ke *core*. Akibatnya, semua sinar dalam sudut tertentu akan terpantul pada batas antara *core* dan *cladding*. Jika sudut sinar pada batas lebih besar dari sudut kritis, maka sebagian terpantul dan sebagian ditransmisikan melalui batas *cladding* dan *coating*. Setelah terjadi banyak pantulan, maka energi dalam sinar pada akhirnya akan hilang dari serat optik. *Coating* adalah plastik yang melindungi kaca dari abrasi (ITU-T Manual, 2009).

Perjalanan sinar serat optik pada *step index* berbeda tergantung pada sudut relatif terhadap sumbu. Akibatnya, akan terjadi mode yang berbeda dalam *pulse* yang sampai pada ujung serat optik pada waktu yang berbeda, mengakibatkan *pulse* menyebar, sehingga membatasi *bit rate* sinyal digital yang dapat ditransmisikan (ITU-T Manual, 2009).

Kecepatan mode yang berbeda dengan kedudukan yang hampir sama dinamakan “*graded index*” seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.b. Indeks bias berubah dari pusat, kemudian keluar dengan cara perjalanan sinar *end-to-end* yang berbeda dengan kedudukan yang hampir sama, walaupun sinar melintasi jalan yang berbeda. Dengan mengurangi perbedaan diameter *core* dan indeks bias antara *core* dan *cladding* hanya

satu mode yang akan merambat dinamakan “*single mode*” (Gambar 2.8.c.). Dalam mode ini tidak ada penyebaran pulsa karena perbedaan perambatan. (ITU-T Manual, 2009)

Diameter *cladding* adalah 125 μm untuk semua jenis serat optik. Diameter *core* dari serat optik *multimode* adalah 50 μm , sedangkan diameter *core* dari serat optik *single mode* adalah 8 μm sampai 10 μm (ITU-T Manual, 2009).

Menurut Sofana (2013), walaupun cahaya merambat sepanjang inti serat optik tanpa lapisan material kulit, namun kulit memiliki beberapa fungsi, yaitu :

1. Mengurangi cahaya yang *loss* dari inti ke udara sekitar.
2. Mengurangi *loss* hamburan pada permukaan inti.
3. Melindungi serat optik dari kontaminasi penyerapan permukaan.
4. Menambah kekuatan mekanis.

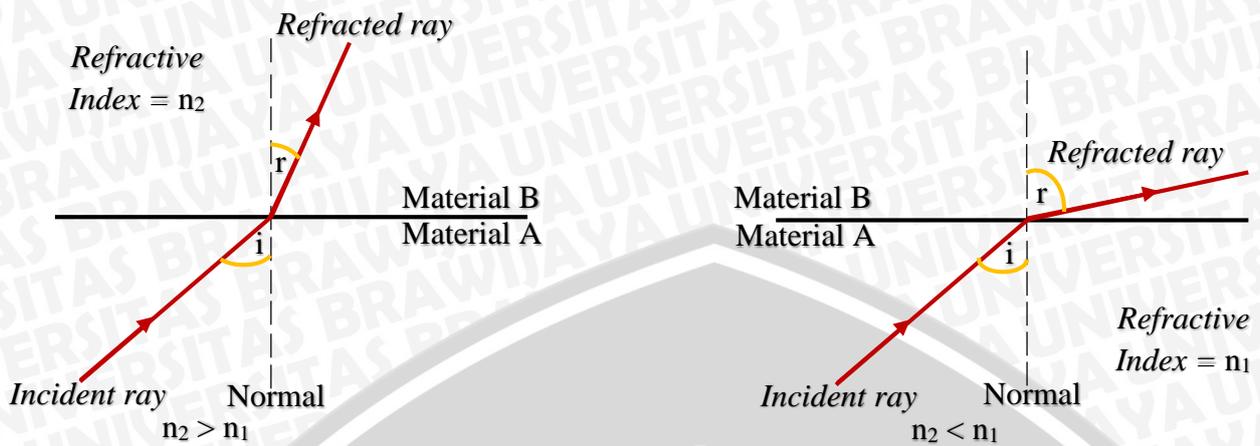
Prinsip kerja serat optik terletak pada perilaku cahaya. Cahaya melewati garis lurus melalui bahan serat optik, tapi itu tidak selalu terjadi *interface* dari dua bahan indeks bias yang berbeda (Falcon, 2011).

Contoh kasusnya seperti udara dan air yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Perjalanan cahaya melalui udara mengalami pembiasan karena memasuki air. Besarnya pembiasan tergantung pada indeks bias dari dua bahan yang terlibat dan juga pada sudut datang pada cahaya. Sudut datang pada cahaya diukur dari garis yang ditarik tegak lurus ke permukaan. Hal yang sama berlaku untuk sudut keluar (ditransmisikan) pada cahaya setelah pembiasan (Falcon, 2011).

Menurut Adam (2014), arah pembiasan cahaya dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

1. Mendekati garis normal. Cahaya dibiaskan mendekati garis normal jika cahaya merambat dari medium optik kurang rapat ke medium optik lebih rapat, contohnya cahaya merambat dari udara ke dalam air.
2. Menjauhi garis normal. Cahaya dibiaskan menjauhi garis normal jika cahaya merambat dari medium optik lebih rapat ke medium optik kurang rapat, contohnya cahaya merambat dari dalam air ke udara.

Arah pembiasan cahaya ditampilkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Arah Pembiasan Cahaya
(Sumber: Elliott *et al*, 2002)

Secara matematis hubungan antara sinar datang dan sinar bias yang dijelaskan oleh Hukum Snellius ditulis dalam persamaan (2-7) (Senior, 2008).

$$n_1 \cdot \sin\theta_i = n_2 \cdot \sin\theta_r \quad (2-7)$$

dengan

n_1 = indeks bias Material A

n_2 = indeks bias Material B

θ_i = sudut datang

θ_r = sudut bias

Pada Tabel 2.2. dijelaskan tentang nilai indeks bias secara umum.

Tabel 2.2. Nilai Indeks Bias Secara Umum

	Material	Indeks Bias (n)
Gas	Udara	1.00027
Cair	Air	1.333
	Alkohol	1.361
Padat	Silika murni	1.458
	Garam (NaCl)	1.500
	Batu Amber	1.500
	Berlian	2.419

(Sumber: Elliott *et al*, 2002)

Pada Tabel 2.3. dijelaskan tentang nilai indeks bias pada penelitian.

Tabel 2.3. Nilai Indeks Bias Pada Penelitian

	Material	Indeks Bias (n)
Cair	Air PAM	1,3334
	Air Laut	1,3400

Tabel 2.2. menunjukkan nilai indeks bias secara umum. Hukum Snellius menyatakan bahwa pembiasan pada cahaya tidak dapat terjadi ketika sudut datang terlalu besar (seperti ketika perjalanan cahaya dari bahan dengan indeks bias yang tinggi ke bahan dengan indeks bias yang rendah). Jika sudut datang melebihi sudut kritis, maka cahaya tidak bisa keluar. Jika cahaya tidak bisa keluar dari bahan, maka cahaya akan dipantulkan. Sudut yang tercermin sama dengan sudut datang. Fenomena tersebut disebut *Total Internal Reflection* (TIR) dan membuat cahaya tetap di dalam serat optik (Falcon, 2011). Secara matematis sudut kritis ditulis dalam persamaan (2-8) (Elliott *et al*, 2002).

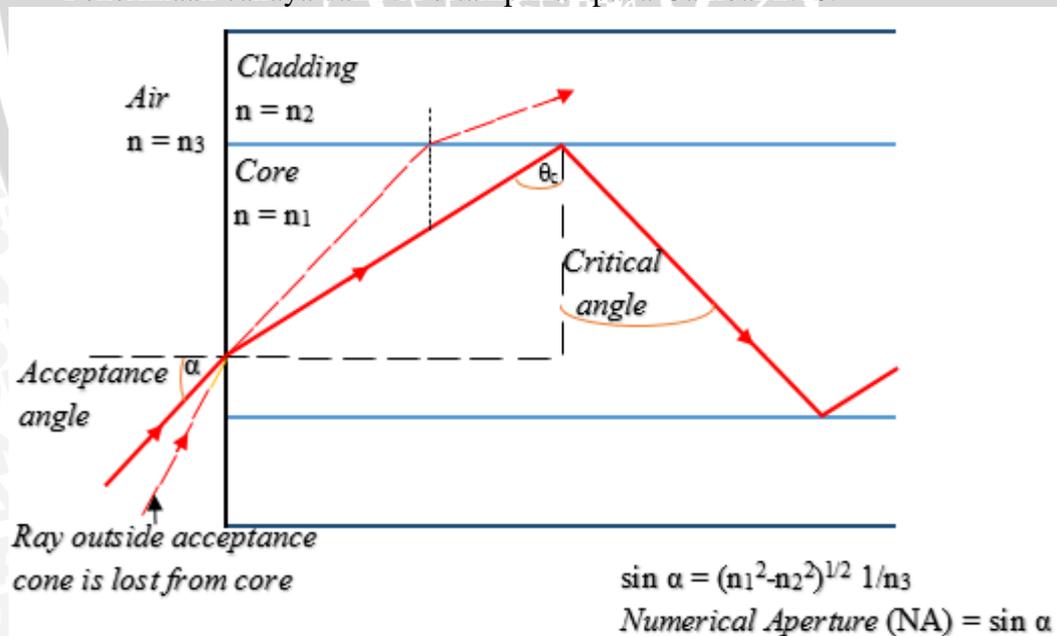
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-8)$$

dengan :

n_1 = indeks bias *core* serat optik

n_2 = indeks bias *cladding* serat optik

Penerimaan cahaya dan NA ditampilkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Penerimaan Cahaya dan NA
(Sumber: Elliott *et al*, 2002)

Tidak kalah pentingnya adalah dampak dari NA. Pada Gambar 2.10. dapat dilihat bahwa sinar memenuhi *Core Cladding Interface* (CCI) di sudut kritis pasti dibiaskan pada titik masuk ke dalam *core* serat optik. Sinar akan bertemu dengan *core* serat optik pada *acceptance angle* (α), yang didefinisikan sebagai sudut penerimaan serat. Nilai sudut sinus pada sudut penerimaan serat dinamakan NA (Elliott *et al*, 2002).

Karena NA sering digunakan pada serat optik di udara di mana $n_0 = 1$, maka NA pada serat optik di udara = $\sin \theta_\alpha$. Pada POF mempunyai NA sebesar 0,5 (Elliott *et al*, 2002).

Secara matematis rumus NA ditulis dalam persamaan (2-9) (Senior, 2008).

$$NA = n_0 \sin \theta_\alpha = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

dengan :

NA = *Numerical Aperture*

θ_α = sudut penerimaan serat

n_0 = indeks bias udara

n_1 = indeks bias *core*

n_2 = indeks bias *cladding*

Perhitungan nilai indeks bias dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1) dan (2-2). Proses perhitungan tekanan pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu D sebesar 3 cm.

$$D = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-5} \text{ km} = 0,00003 \text{ km}$$

$$P = 9,91 \times D - 0,23744 \times 10^{-1} \times D^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times D^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times (0,00003)^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times (0,00003)^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times 0,0000000009$$

$$+ 0,19232 \times 10^{-3} \times 0,000000000000003$$

$$P = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Jadi, tekanan pada kedalaman 3 cm sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti D pada rumus P . Proses perhitungan indeks bias pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu P sebesar $0,000297300 \frac{MN}{m^2}$ dan panjang gelombang sebesar $0,66 \mu m$ dapat digunakan untuk menghitung indeks bias pada kedalaman 3 cm .

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} P + 0,544763 \times 10^{-8} P^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$A = 1,295520003$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} P - 1,71823 \times 10^{-8} P^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$B = 0,809872013$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} P + 0,894313 \times 10^{-10} P^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times (0,000297300)^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times 0,0000000883873$$

$$C = 0,010794500$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} P - 1,13552 \times 10^{-8} P^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$D = 0,917151012$$

$$E = 100$$

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 100}$$

$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times 0,4356}{0,4356 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times 0,4356}{0,4356 - 100}$$

$$n^2(\lambda, P) = 2,121958641$$

$$n(\lambda, P) = 1,4566944227065$$

Jadi, indeks bias pada kedalaman 3 cm sebesar $1,4566944227065$.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, indeks bias pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti P sesuai dengan tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm pada rumus P . Proses perhitungan NA pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Menghitung NA pada kedalaman 3 cm:

Variabel yang diketahui n_1 sebesar 1,4566944227065 dan n_2 sebesar 1,406.

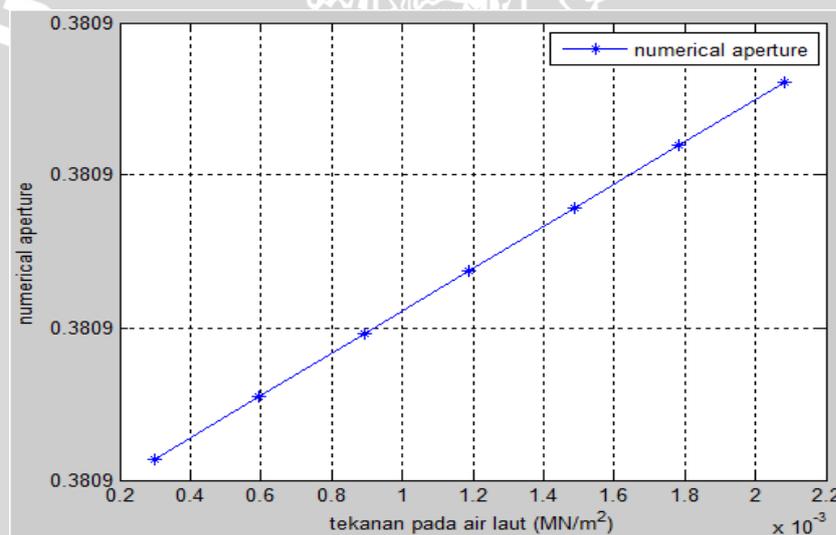
$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = ((1,4566944227065)^2 - (1,406)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$NA = (2,121958641 - 1,976836)^{\frac{1}{2}}$$

$$NA = (0,145122641)^{\frac{1}{2}}$$

$$NA = 0,380949657$$

Berdasarkan persamaan (2-1), persamaan (2-2) dan persamaan (2-9) dapat ditunjukkan hubungan NA terhadap tekanan yang ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Karakteristik NA Terhadap Tekanan Pada Air Laut

Semakin besar NA maka semakin banyak jumlah cahaya yang diterima serat optik. Semakin besar NA menyebabkan lebar pita berkurang dan rugi absorpsi dan hamburan akan bertambah. Oleh karena itu, nilai NA yang besar hanya baik untuk aplikasi jarak pendek dengan kecepatan data yang rendah.

NA juga dapat diberikan dalam bentuk perbedaan indeks bias relatif (Δ) antara *core* dan *cladding*. Secara matematis NA juga dapat diberikan dalam bentuk perbedaan indeks bias relatif (Δ) antara *core* dan *cladding* ditulis dalam persamaan (2-10) (Senior, 2008).

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-10)$$

dengan :

Δ = perbedaan indeks bias relatif, dimana $\Delta \ll 1$

n_1 = indeks bias *core*

n_2 = indeks bias *cladding*

Perhitungan nilai indeks bias dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-1) dan (2-2). Proses perhitungan tekanan pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu D sebesar 3 cm.

$$D = 3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-5} \text{ km} = 0,00003 \text{ km}$$

$$P = 9,91 \times D - 0,23744 \times 10^{-1} \times D^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times D^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times (0,00003)^2 + 0,19232 \times 10^{-3} \times (0,00003)^3$$

$$P = 9,91 \times 0,00003 - 0,23744 \times 10^{-1} \times 0,0000000009$$

$$+ 0,19232 \times 10^{-3} \times 0,00000000000000000003$$

$$P = 0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Jadi, tekanan pada kedalaman 3 cm sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti D pada rumus P . Proses perhitungan indeks bias pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu P sebesar $0,000297300 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$ dan panjang gelombang sebesar $0,66 \mu\text{m}$ dapat digunakan untuk menghitung indeks bias pada kedalaman 3 cm.

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} P + 0,544763 \times 10^{-8} P^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$A = 1,29552 + 9,86385 \times 10^{-6} \times 0,000297300 + 0,544763 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$A = 1,295520003$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} P - 1,71823 \times 10^{-8} P^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$B = 0,809872 + 42,0899 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,71823 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$B = 0,809872013$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} P + 0,894313 \times 10^{-10} P^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times (0,000297300)^2$$

$$C = 1,07945 \times 10^{-2} - 0,56693 \times 10^{-8} \times 0,000297300 + 0,894313 \times 10^{-10} \times 0,0000000883873$$

$$C = 0,010794500$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} P - 1,13552 \times 10^{-8} P^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times (0,000297300)^2$$

$$D = 0,917151 + 38,7911 \times 10^{-6} \times 0,000297300 - 1,13552 \times 10^{-8} \times 0,0000000883873$$

$$D = 0,917151012$$

$$E = 100$$

$$n^2(\lambda, P) = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times (0,66)^2}{(0,66)^2 - 100}$$

$$n^2(\lambda, P) = 1,295520003 + \frac{0,809872013 \times 0,4356}{0,4356 - 0,010794500} + \frac{0,917151012 \times 0,4356}{0,4356 - 100}$$

$$n^2(\lambda, P) = 2,121958641$$

$$n(\lambda, P) = 1,4566944227065$$

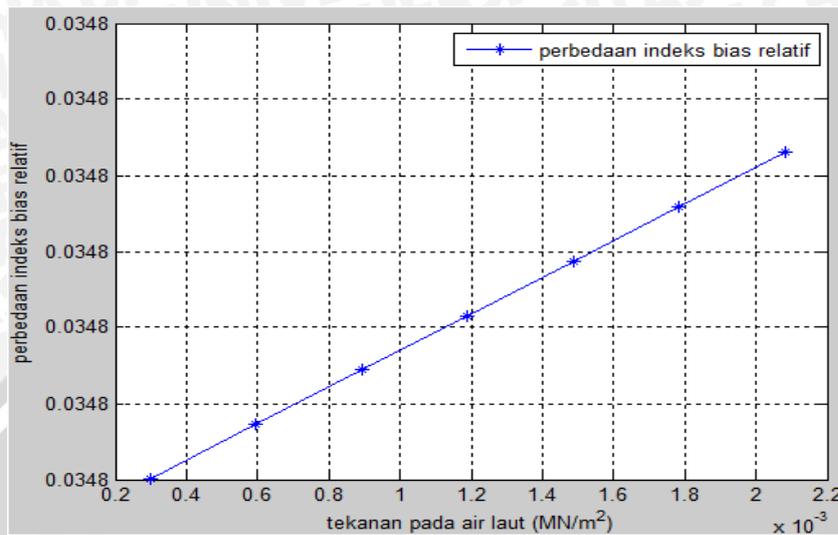
Jadi, indeks bias pada kedalaman 3 cm sebesar 1,4566944227065.

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, indeks bias pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm dapat diketahui dengan mengganti P sesuai dengan tekanan pada kedalaman 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm, dan 21 cm pada rumus P . Proses perhitungan indeks bias relatif pada kedalaman 3 cm ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui n_1 sebesar 1,4566944227065 dan n_2 sebesar 1,406.

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1,4566944227065 - 1,406}{1,4566944227065} = 0,034801000$$

Berdasarkan persamaan (2-1), persamaan (2-2), dan persamaan (2-10) dapat ditunjukkan hubungan perbedaan indeks bias relatif terhadap tekanan yang ditampilkan secara grafis pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Karakteristik Perbedaan Indeks Bias Relatif Terhadap Tekanan Pada Air Laut

Berdasarkan Gambar 2.12, nilai perbedaan indeks bias relatif akan semakin bertambah seiring dengan pertambahan tekanan.

2.6. Sumber Optik

Sumber optik berfungsi sebagai pengubah besaran sinyal listrik/elektrik menjadi sinyal cahaya (*E/O Converter*) (Syauki, 2012). Menurut Syauki (2012), beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh sumber optik, yaitu :

1. Ukuran dan konfigurasi yang kompatibel dengan cahaya yang dimasukkan ke dalam serat optik.
2. Mempunyai akurasi yang tinggi dalam mengkonversi sinyal listrik menjadi sinyal optik untuk mengurangi distorsi dan derau.
3. Cahaya yang dihasilkan harus dapat *dicouple* ke dalam serat optik dengan efisien agar menghasilkan daya optik yang cukup.
4. Menghasilkan cahaya dengan bandwidth frekuensi yang cukup sempit untuk meminimumkan dispersi.
5. Cukup stabil dengan pengaruh luar.

Ada dua macam sumber optik yang sering diaplikasikan. Pemakaian kedua macam sumber optik ini tergantung pada *bit rate* data yang akan ditransmisikan (Syauki, 2012). Menurut Syauki (2012), berikut ini dua macam sumber optik yang sering diaplikasikan, yaitu :

1. *Light Emmiting Diode* (LED)
2. *Light Amplification by Stimulated Emmission of Radiation* (LASER)

Pada Tabel 2.4. dijelaskan tentang perbandingan LED dan LASER

Tabel 2.4. Perbandingan LED dan LASER

NO	Karakteristik	LED	LASER
1.	Spektrum keluaran	Tidak koheren	Koheren
2.	Daya optik keluaran	Lebih rendah (0,4-4,0 mW)	
3.	Kestabilan operasi terhadap temperature	Stabil	Kurang stabil
4.	Penguatan cahaya	Tidak ada	Ada
5.	Arah pancaran cahaya	Kurang terarah	Sangat terarah
6.	Arus pacu	Kecil	Besar
7.	Rongga Resonansi optik	Tidak ada	Ada
8.	Disipasi panas	Kecil	Besar
9.	Harga	Lebih murah	Mahal
10.	Kecepatan (<i>rise time</i>)	Lebih lambat (2-10 ns)	Lebih cepat (0,3-0,7 ns)
11.	Kompatibilitas dengan <i>single mode</i>	Tidak	ya

(Sumber: Syauki, 2012)

Pada skripsi ini digunakan sumber optik jenis *Plastic Fiber Optic Trasmitted Diode Plastic Fiber Plastic Connector Housing SFH756 V* yang memiliki panjang gelombang sebesar 660 nm.

2.7. Detektor Optik

Detektor optik berfungsi untuk mendeteksi cahaya yang datang dari serat optik dan mengubah sinyal optik ke sinyal listrik. Karena sinyal optik telah mengalami pelemahan dan dispersi selama penjalarnya dalam serat optik, maka suatu detektor

cahaya harus memiliki beberapa syarat (Syauki, 2012). Menurut Syauki (2012), syarat yang harus dimiliki oleh sebuah detektor optik, yaitu:

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

Dari bahan semikonduktor, ada dua tipe detektor optik. Menurut Syauki (2012), berikut ini dua tipe detektor optik, yaitu :

1. *Positive Intrinsic Negative* (PIN)
2. *Avalance Photo Diode* (APD)

Pada Tabel 2.5. dijelaskan tentang perbandingan karakteristik PIN dan APD.

Tabel 2.5. Perbandingan Karakteristik PIN dan APD

NO	Karakteristik	PIN	APD
1.	Responsivitas	Kecil	Lebih besar
2.	Noise	Kecil	Lebih besar
3.	Penguatan	1 kali	10-250 kali
4.	Photo current	Kecil	Lebih Besar
5.	Waktu Jangkit (<i>rise Time</i>)	0,06-0,3	0,1-0,3

(Sumber: Syauki, 2012)

Pada skripsi ini digunakan detektor optik jenis *Integrated Photo Detector Receiver for Plastic Fiber Plastic Connector Housing SFH551/1-1 V* yang memiliki minimal panjang gelombang sebesar 600 nm dan maksimal panjang gelombang sebesar 780 nm.

2.8. Air

Menurut Braun *et al.* (1993), air adalah zat kimia dengan rumus kimia H_2O . Satu molekul air memiliki dua atom hidrogen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom oksigen tunggal. Air adalah cairan pada suhu dan tekanan standar. Air tidak berasa dan tidak berbau.

Menurut Liu *et al.* (2007), air laut terdiri dari H₂O yang menyerap banyak spektrum merah dan garam terlarut juga menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu.

Menurut Foster (2011), persyaratan air bersih, yaitu:

1. Tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau.
2. Jernih (tidak keruh).
3. pH mendekati 7.

2.9. Parameter Kinerja Komunikasi Serat optik

Pada skripsi ini, untuk menganalisa kinerja dari komunikasi serat optik akan diukur beberapa parameter. Parameter yang akan diukur yaitu BER dan *eye diagram*.

2.9.1. BER

BER dihitung dengan membandingkan bit yang dihasilkan pada pemancar dengan bit yang diterjemahkan pada penerima. Jumlah bit yang berbeda dihitung, memberikan jumlah bit kesalahan, dan kemudian dibagi dengan jumlah bit yang ditransmisikan. Secara matematis BER ditulis dalam persamaan (2-11) (Minev *et al.*, 2011).

$$BER = \frac{\text{No. of total bit errors}}{\text{No. of transmitted bits}} \quad (2-11)$$

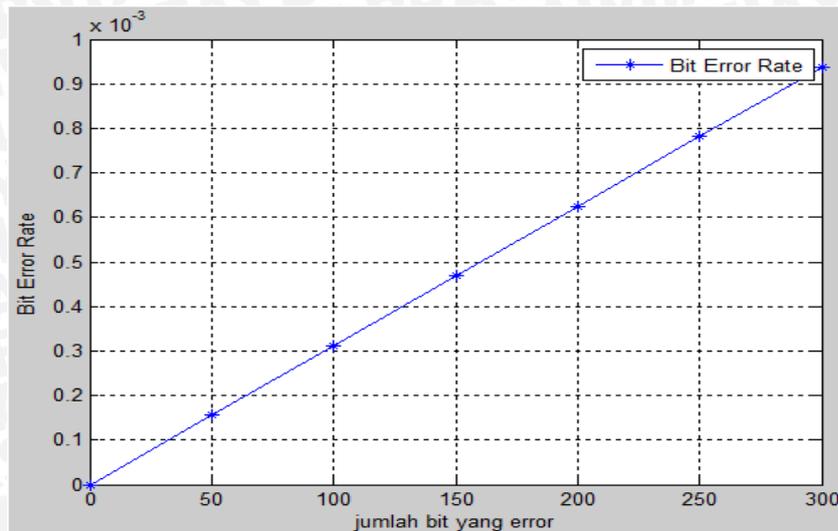
Perhitungan nilai BER dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-11). Proses perhitungan BER ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu *No. of total bit errors* sebesar 0 bit dan *No. of transmitted bits* sebesar 320000 bit.

$$BER = \frac{\text{No. of total bit errors}}{\text{No. of transmitted bits}} = \frac{0 \text{ bit}}{320000 \text{ bit}} = 0$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, BER dapat diketahui dengan mengganti *No. of total bit errors* dengan 50 bit, 100 bit, 150 bit, 200 bit, 250 bit, dan 300 bit.

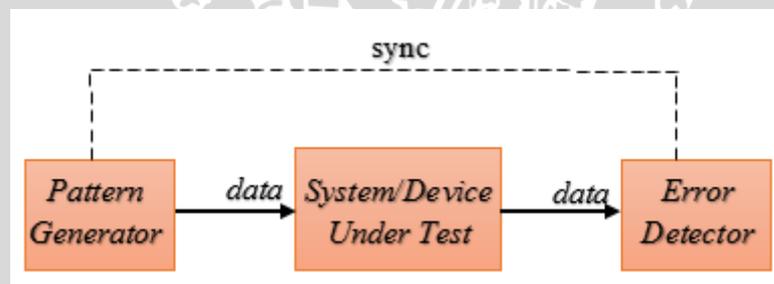
Hubungan matematis pada Persamaan (2-11) ditampilkan secara grafis *Bit Error Rate* (BER) terhadap jumlah total bit yang error pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Karakteristik BER Terhadap Jumlah Total Bit yang Error

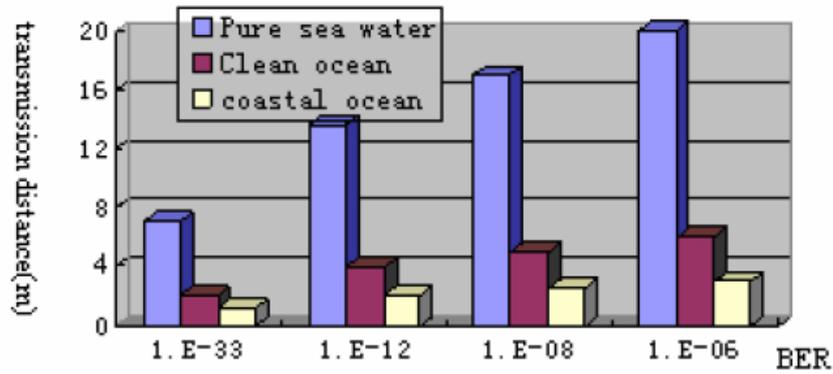
Berdasarkan Gambar 2.13. Total bit yang ditransmisikan sebesar $3,2 \times 10^5$. Nilai jumlah bit yang ditransmisikan disesuaikan pada eksperimen. Nilai BER akan naik secara linier dengan pertambahan jumlah bit yang error dalam transmisi.

Nilai BER dapat diperoleh dengan melakukan pengukuran menggunakan *Bit Error Ratio Tester* (BERT). Pada Gambar 2.14. ditunjukkan blok diagram pengukuran BER.



Gambar 2.14. Konfigurasi BER Test Set-Up Secara Umum
(Sumber: *Infocomm Development Authority*, 2011)

Komponen utama dari konfigurasi BER test set-up secara umum pada Gambar 2.14. adalah *pattern generator* dan *error detector*. *Pattern generator* yang membangkitkan sinyal yang ditransmisikan sedangkan *error detector* untuk membandingkan bit yang diterima sistem dengan bit sinkronisasi. Jika dua sinyal memiliki perbedaan, maka akan diperlihatkan jumlah kesalahan yang terjadi. Pada Gambar 2.15. ditunjukkan BER pada jarak transmisi dan kondisi air yang berbeda.



Gambar 2.15. BER Pada Jarak Transmisi dan Kondisi Air yang Berbeda (Sumber : Liu *et al*, 2007)

Gambar 2.15. menunjukkan perbandingan BER pada jarak transmisi dan kondisi air yang berbeda. Hal ini ditunjukkan maksimum jarak dengan BER yang diterima adalah sekitar 20 meter untuk *pure sea water*. Untuk *coastal ocean*, jarak transmisi kurang dari 3,5 meter. (Liu *et al*, 2007).

Performansi komunikasi optik nirkabel bawah laut dapat dievaluasi dalam BER. BER pada optik akan bervariasi secara proporsional dengan lingkungan tertentu. BER yang dapat diterima pada komunikasi optik adalah 10^{-6} (Liu *et al*, 2007).

Nilai BER yang diharapkan secara teoritis disebut *probability of error* (P_e). Persamaan untuk menghitung P_e ditunjukkan pada Persamaan (2-12)(Miller, 1995).

$$P_e = 0,5 \times \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) \quad (2-12)$$

dengan:

P_e = probability of error

E_b = daya sinyal yang diterima (watt)

N_o = daya noise dari sinyal yang diterima (watt)

erfc = complementary error function

Tabel 2.6. *Complementary Error Function*

erfc	Hasil erfc
erfc(0)	1
erfc(0,5)	0,48
erfc(1)	0,14
erfc(1,5)	0,034
erfc(2)	0,005

(Sumber: Miller, 1995)

Dari tabel 2.6., dengan menggunakan polynomial order 6 pada microsoft excel didapatkan persamaan persamaan kuadrat untuk menghitung erfc pada persamaan *probability of error*. Persamaan untuk menghitung erfc pada persamaan *probability of error* ditunjukkan pada persamaan (2-13).

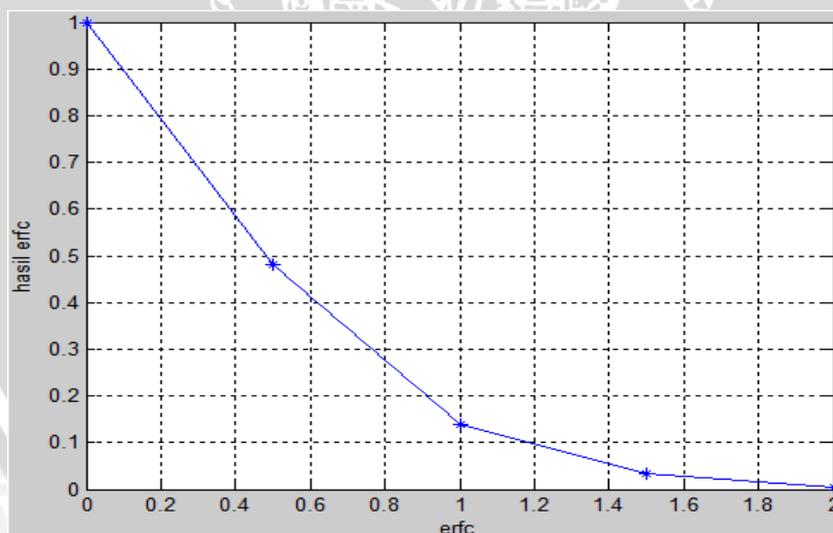
$$y = -0,1407x^4 + 0,494x^3 - 0,1348x^2 - 1,0785x + 1 \quad (2-13)$$

dengan:

x = nilai erfc

y = fungsi kuadrat = hasil erfc

Pada Gambar 2.16. ditunjukkan karakteristik hasil erfc terhadap erfc.



Gambar 2.16. Karakteristik Hasil Erfc Terhadap Erfc

Gambar 2.16. menunjukkan bahwa semakin besar erfc, maka hasil erfc akan semakin berkurang.

Perhitungan nilai P_e dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-12) dan persamaan (2-13). Proses perhitungan P_e ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu E_b sebesar 0 watt dan N_o sebesar 1 watt.

$$y = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$$

$$y = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{0}{1}} \right)$$

$$y = \operatorname{erfc}(0)$$

$$y = \operatorname{erfc}(0) = -0,1407x^4 + 0,494x^3 - 0,1348x^2 - 1,0785x + 1$$

$$y = \operatorname{erfc}(0) = -0,1407 \times (0)^4 + 0,494 \times (0)^3 - 0,1348 \times (0)^2 - 1,0785 \times 0 + 1$$

$$y = \operatorname{erfc}(0) = 1$$

$$P_e = 0,5 \times \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$$

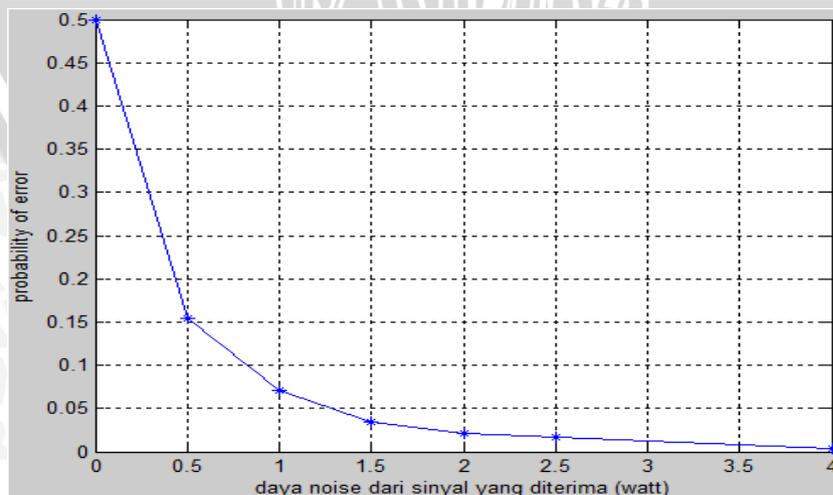
$$P_e = 0,5 \times \operatorname{erfc}(0)$$

$$P_e = 0,5 \times 1$$

$$P_e = 0,5$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, P_e dapat diketahui dengan mengganti nilai E_b dengan 0,5 watt, 1 watt, 1,5 watt, 2 watt, 2,5 watt, dan 4 watt. Nilai N_o konstan sebesar 1 watt.

Hubungan matematis pada Persamaan (2-12) dan Persamaan (2-13) ditampilkan secara grafis dalam Gambar 2.17.

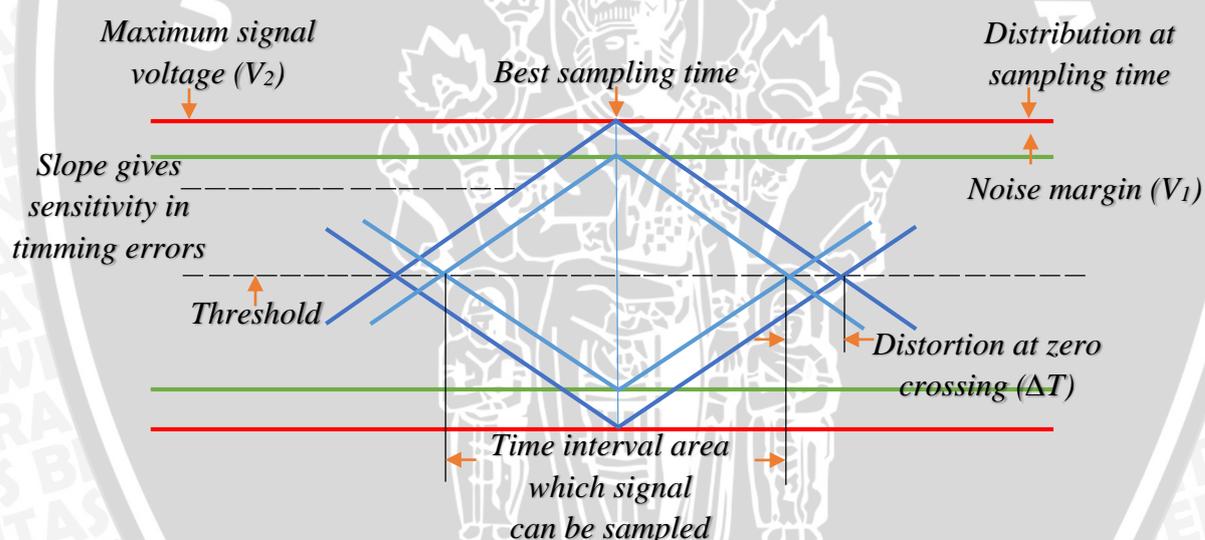


Gambar 2.17. Karakteristik *Probability of Error* Terhadap Daya Sinyal

Gambar 2.17. menunjukkan bahwa semakin besar daya sinyal, maka P_e akan semakin berkurang. Nilai daya sinyal yang diterima dipengaruhi besar amplitudo tegangan sinyal. Distorsi pada amplitudo sinyal akan mengurangi besar daya sinyal dan menambah besar noise pada sinyal yang diterima. Maka dari itu, distorsi pada amplitudo sinyal akan meningkatkan P_e .

2.9.2. Eye diagram

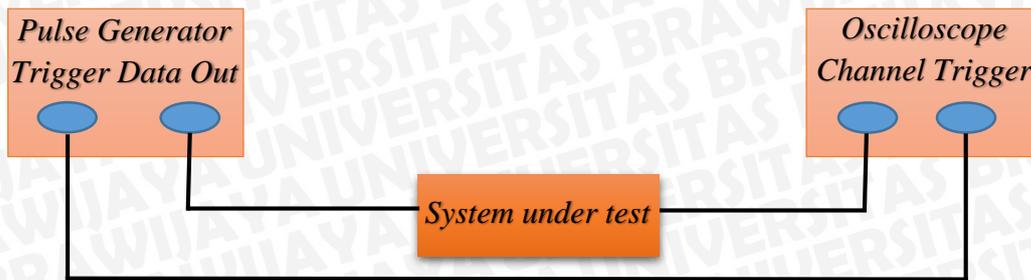
Eye diagram adalah metode pengukuran yang sederhana namun akurat untuk menilai kemampuan penanganan data pada sistem transmisi digital. Metode ini telah digunakan secara luas untuk mengevaluasi kinerja sistem kabel. Pengukuran *eye pattern* yang dibuat dalam domain waktu akan ditampilkan langsung pada layar display alat uji standar. Pada Gambar 2.18. digambarkan tentang *eye diagram* yang menunjukkan parameter kinerja utama (Keiser, 2004).



Gambar 2.18. Eye Diagram yang Menunjukkan Parameter Kinerja Utama (Sumber: Keiser, 2004)

Eye diagram adalah metodologi untuk merepresentasikan dan menganalisis sinyal digital berkecepatan tinggi. *Eye diagram* memungkinkan sinyal divisualisasikan dan ditentukan. *Eye diagram* dibangun dari gelombang digital untuk setiap bit ke dalam satu grafik dengan amplitudo sinyal pada sumbu vertikal dan waktu pada sumbu horisontal. *Eye opening* berkaitan dengan satu periode bit dan biasanya disebut lebar *Unit Interval* (UI) pada *eye diagram* (On semiconductor, 2014).

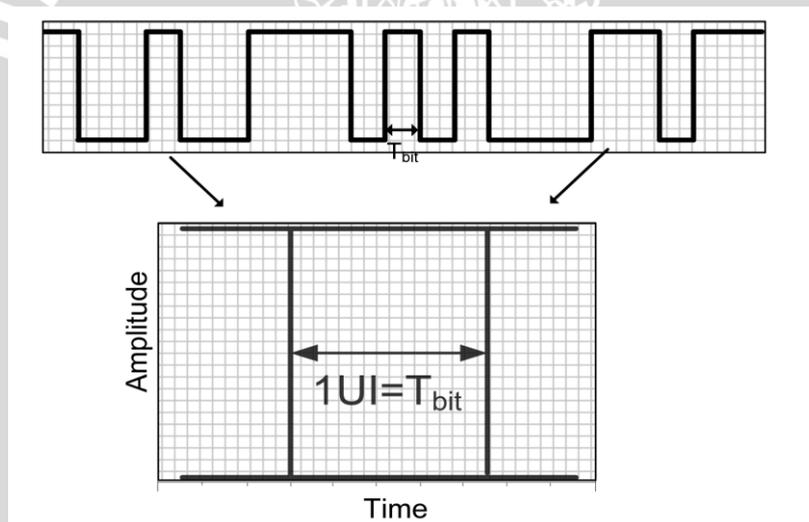
Pengukuran *eye diagram* dilakukan dalam domain waktu dan ditampilkan dalam osiloskop. Pada Gambar 2.19. ditunjukkan blok diagram pengukuran *eye diagram* set-up.



Gambar 2.19. Konfigurasi Pengukuran Eye Diagram Set-Up
(Sumber: Infocomm Development Authority, 2011)

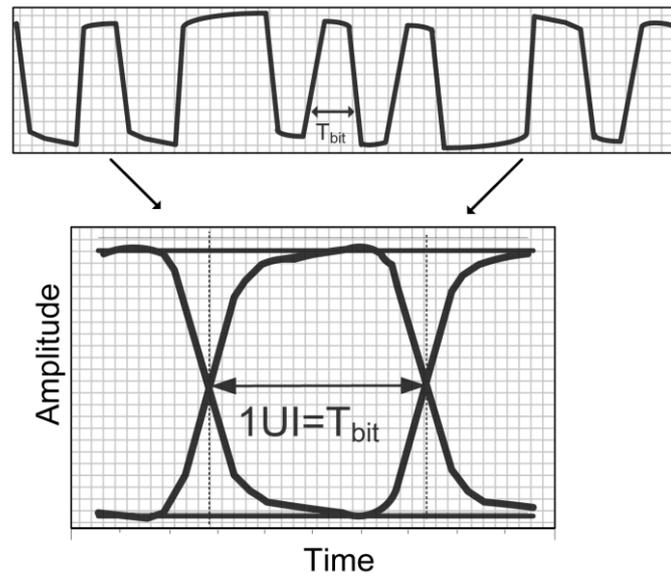
Komponen utama dari konfigurasi pengukuran *eye diagram* set-up pada Gambar 2.19. adalah *pulse generator* dan *osiloskop*. *Pulse generator* membangkitkan sinyal data dan sinyal clock. Data tersebut dialirkan ke *system under test* lalu sinyal ditampilkan di osiloskop. Osiloskop mendapatkan *trigger* dari sinyal *clock* bukan sinyal data.

Sebuah gelombang digital yang ideal dengan *rise time* dan *fall time* dan amplitudo konstan akan memiliki *eye diagram* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20. (On semiconductor, 2014).

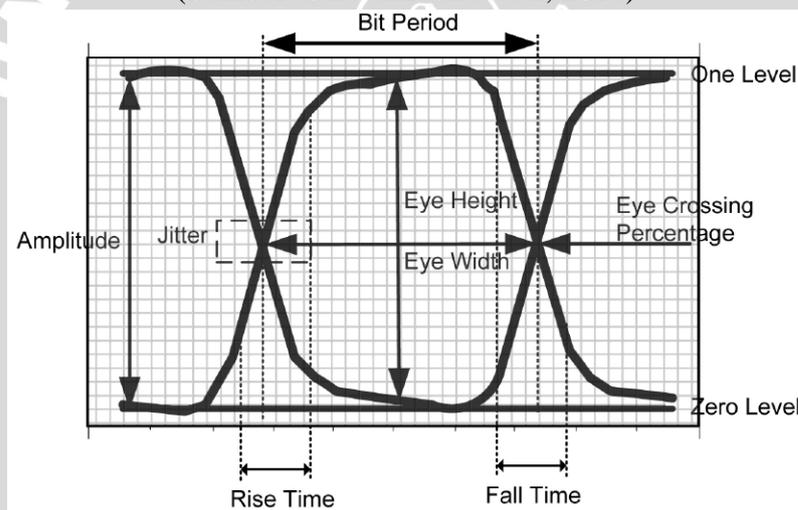


Gambar 2.20. Kecepatan Ideal Pada Sinyal Digital yang Berkecepatan Tinggi Dengan Eye Diagram
(Sumber: On Semiconductor, 2014)

Sinyal digital yang berkecepatan tinggi mengalami gangguan yang signifikan termasuk redaman, noise, crosstalk, dan lain-lain. *Eye diagram* untuk kecepatan umum pada sinyal digital yang berkecepatan tinggi ditunjukkan pada Gambar 2.21. (On semiconductor, 2014).



Gambar 2.21. Kecepatan Umum Pada Sinyal Digital yang Berkecepatan Tinggi Dengan *Eye Diagram*
(Sumber: On Semiconductor, 2014)



Gambar 2.22. Pengukuran *Eye Diagram*
(Sumber : On Semiconductor, 2014)

Pada Gambar 2.22. digambarkan tentang pengukuran *eye diagram*. Semua hasil pengukuran adalah statistik rata-rata dari sampel gelombang pada titik yang ditunjukkan. Berikut ini penjelasan mengenai pengukuran *eye diagram*, yaitu:

1. *One level*

One level dalam *eye pattern* adalah nilai rata-rata dari logika satu. *One level* berasal dari nilai rata-rata dari semua data sampel yang diambil dari daerah sebesar 20% dari luas garis atas selama *eye period* (On semiconductor, 2014).

2. Zero level

Zero level dalam *eye pattern* adalah nilai rata-rata dari logika nol. *Zero level* dihitung dari daerah yang sama sebesar 40 % sampai 60% dari luas garis dasar selama *eye period* seperti *one level* (On semiconductor, 2014).

3. Eye Amplitude

Eye Amplitude adalah perbedaan antara *one level* dan *zero level* (On semiconductor, 2014). Pengukuran *eye opening* yang ideal akan sama dengan pengukuran *eye amplitude* (On semiconductor, 2014). Dengan demikian, jumlah *eye opening* merupakan indikasi kualitas sinyal, sehingga semakin besar *eye opening*, semakin mudah sinyal yang akan dideteksi tanpa kesalahan. Ketika *eye* hampir tertutup, sangat sulit atau tidak mungkin untuk mendapatkan data yang benar dari sinyal (*Infocomm Development Authority*, 2011).

4. Eye height

Eye height adalah ukuran *vertical opening* pada *eye diagram amplitude* (On semiconductor, 2014). Waktu terbaik untuk sampel pada gelombang yang diterima adalah ketika *eye height* terbesar dan ketinggian *eye height* dapat berkurang sebagai akibat dari distorsi amplitudo dalam sinyal data (Keiser, 2004).

Vertical eye opening menunjukkan jumlah perbedaan tingkat sinyal antara satu bit dan nol bit. Semakin besar perbedaannya, semakin mudah untuk membedakan antara satu dan nol. Bagian dari *eye* dimana *vertical opening* yang terbesar merupakan waktu terbaik untuk sampel sinyal (*Infocomm Development Authority*, 2011).

5. Eye Crossing Percentage

Crossing level adalah nilai rata-rata vertikal yang tipis yang berpusat pada titik persimpangan dari *eye diagram*. Secara matematis *eye crossing percentage* ditulis dalam persamaan (2-14) (On semiconductor, 2014).

$$\text{Eye Crossing \%} = 100 * \left[\frac{(\text{crossing level} - \text{zero level})}{(\text{one level} - \text{zero level})} \right] \quad (2-14)$$

Eye crossing percentage memberikan indikasi siklus distorsi atau masalah simetri pulsa pada sinyal data yang berkecepatan tinggi. Ketika nilai simetri *eye crossing* menyimpang dari 50%, maka terjadi *eye close* dan dengan demikian kualitas sinyal listrik terdegradasi (On semiconductor, 2014).

6. Eye Width

Eye Width adalah ukuran *horizontal opening* pada *eye diagram* (On semiconductor, 2014). *Horizontal eye opening* menunjukkan jumlah jitter yang ada dalam sinyal. Semakin lebar *eye opening*, semakin berkurang kemungkinan adanya jitter (Infocomm Development Authority, 2011).

7. Rise Time

Rise Time adalah ukuran waktu transisi data rata-rata pada *slope* yang meningkat dari *eye diagram*. Pengukuran biasanya dilakukan pada 20 % dan 80 % pada tingkat *slope* atau 10 % dan 90% pada tingkat *slope* (On semiconductor, 2014).

8. Fall Time

Fall Time adalah ukuran waktu transisi data rata-rata pada *slope* yang menurun dari *eye diagram*. Pengukuran biasanya dilakukan pada 20 % dan 80 % pada tingkat *slope* atau 10 % dan 90% pada tingkat *slope* (On semiconductor, 2014).

Berikut ini beberapa parameter dari *eye diagram* yang dibahas dalam skripsi ini, yaitu:

1. Noise Margin

Eye height saat pengambilan sampel yang ditentukan menunjukkan *noise margin* atau kekebalan terhadap *noise*. *Noise margin* adalah rasio persentase tegangan sinyal puncak (V_1) terhadap tegangan sinyal maksimum (V_2). Secara matematis *noise margin* ditulis dalam persamaan (2-15) (Keiser, 2004).

$$\text{Noise margin (percent)} = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \% \quad (2-15)$$

dengan:

V_1 = tegangan sinyal puncak (volt)

V_2 = tegangan sinyal maksimum (volt)

Nilai V_1 dan V_2 disesuaikan dengan hasil eksperimen. Semakin besar nilai *eye height* maka semakin besar nilai *noise margin*. *Eye height* yang besar menunjukkan hanya sedikit *noise* yang terjadi pada sistem. Sehingga dapat dikatakan bahwa kekebalan terhadap *noise* adalah tinggi.

Perhitungan nilai *noise margin* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-15). Proses perhitungan *noise margin* ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu V_1 sebesar 5,3 volt dan V_2 sebesar 6,625 volt.

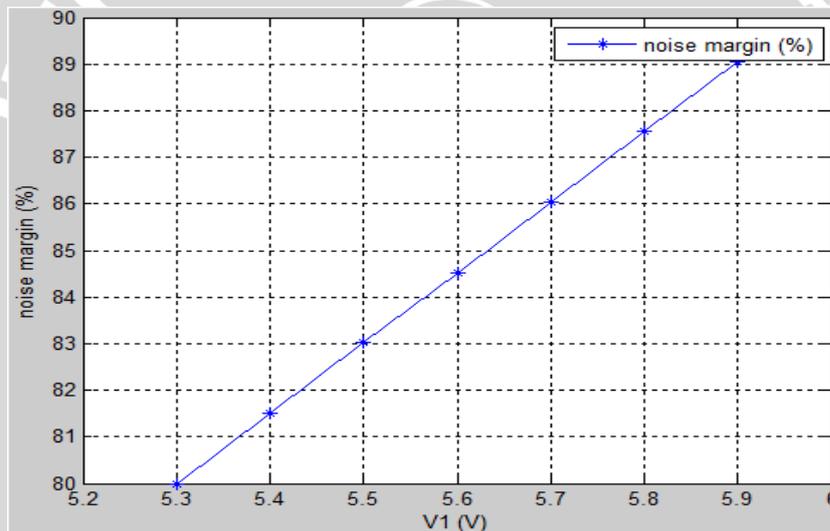
$$\text{Noise margin (percent)} = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \%$$

$$\text{Noise margin (percent)} = \frac{5,3 \text{ volt}}{6,625 \text{ volt}} \times 100 \%$$

$$\text{Noise margin (percent)} = 80 \%$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, nilai *noise margin* dapat diketahui dengan mengganti nilai V_1 dengan 5,3 volt, 5,4 volt, 5,5 volt, 5,6 volt, 5,7 volt, 5,8 volt, dan 5,9 volt.

Hubungan antara nilai tegangan sinyal puncak (V_1) dengan *noise margin* untuk nilai V_2 sebesar 6,625 ditampilkan secara grafis dalam Gambar 2.23.



Gambar 2.23. Karakteristik *Noise Margin* Terhadap Tegangan Sinyal Puncak (V_1)

2. Timing Jitter

Timing jitter dalam sistem komunikasi serat optik muncul disebabkan oleh *noise* di penerima dan distorsi pulsa dalam serat optik. Jika sinyal disampel di tengah-tengah interval waktu, maka jumlah distorsi (ΔT) pada *threshold* menunjukkan jumlah jitter.

Timing jitter adalah rasio persentase jumlah distorsi (ΔT) terhadap interval bit (T_b).

Secara matematis *timing jitter* ditulis dalam persamaan (2-16) (Keiser, 2004).

$$\text{Timing jitter (percent)} = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100 \% \quad (2-16)$$

dengan:

ΔT = jumlah distorsi (μs)

T_b = interval bit (μs)

Nilai ΔT dan T_b disesuaikan dengan hasil eksperimen. *Timing jitter* dapat dilihat dari tampilan *eye pattern* bagian *zero crossing*. Semakin besar *zero crossing* maka nilai *timing jitter* semakin meningkat dan mengindikasikan semakin besar keterlambatan sinyal.

Perhitungan nilai *timing jitter* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-16). Proses perhitungan *timing jitter* ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu ΔT sebesar $0 \mu\text{s}$ dan T_b sebesar $15,21 \mu\text{s}$.

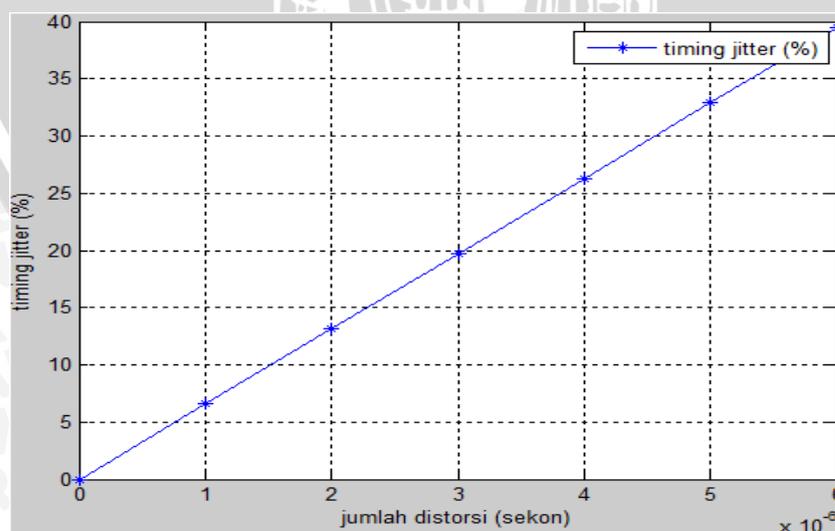
$$\text{Timing jitter (percent)} = \frac{\Delta T}{T_b} \times 100 \%$$

$$\text{Timing jitter (percent)} = \frac{0 \mu\text{s}}{15,21 \mu\text{s}} \times 100 \%$$

$$\text{Timing jitter (percent)} = 0 \%$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, nilai *timing jitter* dapat diketahui dengan mengganti nilai ΔT dengan $1 \mu\text{s}$, $2 \mu\text{s}$, $3 \mu\text{s}$, $4 \mu\text{s}$, $5 \mu\text{s}$, dan $6 \mu\text{s}$. Nilai T_b konstan sebesar $15,21 \mu\text{s}$.

Hubungan antara nilai jumlah distorsi dengan *timing jitter* untuk interval bit sebesar $15,21 \mu\text{s}$ ditunjukkan pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24. Karakteristik *Timing Jitter* Terhadap Jumlah Distorsi

3. Data rate

Data rate adalah kebalikan dari *bit period* (1/*bit period*). *Bit Period* adalah ukuran *horizontal opening* pada *eye diagram* di *crossing point* dan biasanya diukur dalam *pico second* untuk sinyal digital yang berkecepatan tinggi. *Bit period* biasanya disebut *Unit Interval* (UI) ketika menggambarkan *eye diagram*. Keuntungan menggunakan UI adalah kecepatan data yang berbeda dapat dengan mudah dibandingkan.

Secara matematis *data rate* ditulis dalam persamaan (2-17) (On semiconductor, 2014).

$$\text{Data rate} = \frac{1}{\text{bit period}} = \frac{1}{\text{Unit Interval (UI)}} \quad (2-17)$$

dengan:

UI = unit interval (μs)

Nilai UI disesuaikan dengan hasil eksperimen. *Unit Interval* dapat dilihat dari tampilan *zero crossing* pada *eye pattern*. Semakin besar *eye width*, maka waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan satu bit data akan semakin lama. Waktu untuk mentransmisikan satu bit data disebut UI. Semakin kecil UI maka nilai *data rate* semakin besar.

Perhitungan nilai *data rate* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2-17). Proses perhitungan *data rate* ditunjukkan seperti berikut.

Variabel yang diketahui yaitu UI sebesar 15,21 μs .

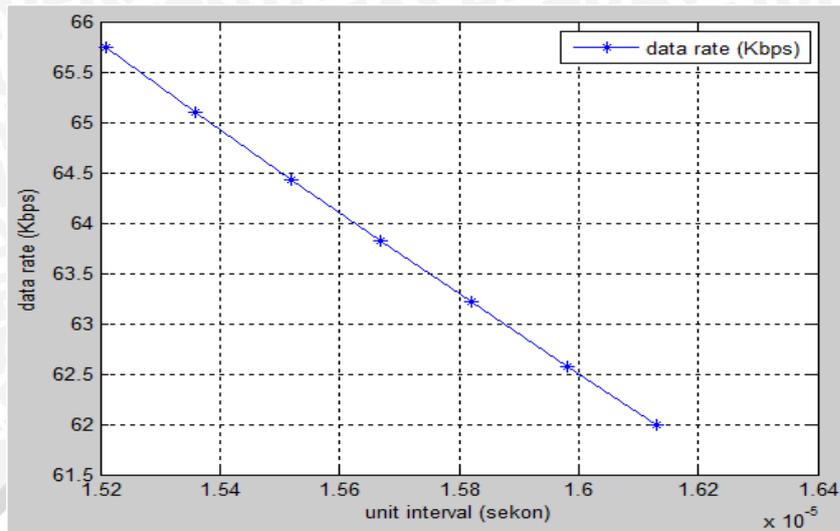
$$\text{Data rate} = \frac{1}{\text{bit period}} = \frac{1}{\text{UI}}$$

$$\text{Data rate} = \frac{1}{15,21 \mu\text{s}}$$

$$\text{Data rate} = 65,74 \text{ Kbps}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, nilai *timing jitter* dapat diketahui dengan mengganti nilai UI dengan 15,36 μs , 15,52 μs , 15,67 μs , 15,82 μs , 15,98 μs dan 16,13 μs .

Hubungan antara nilai UI terhadap *data rate* ditunjukkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Karakteristik *Data Rate* Terhadap Unit Interval

