

## BAB II

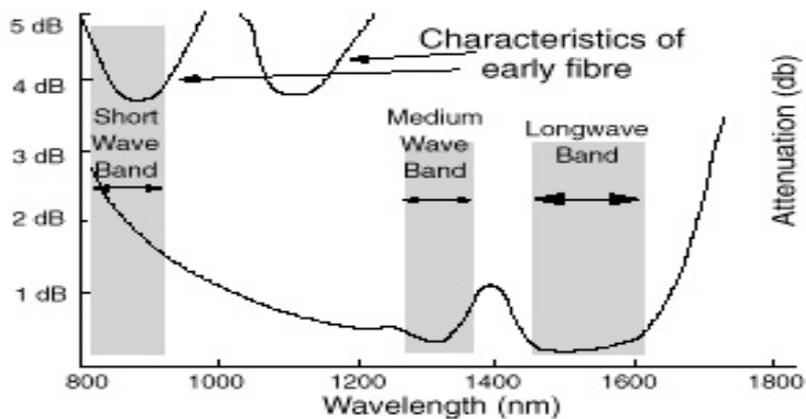
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Radio over Fiber*

Sistem *Radio over Fiber* merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio melalui kabel serat optik. Prinsip dasar dari transmisi RoF adalah mentransmisikan sinyal radio analog melalui sambungan serat optik. Dengan menggunakan kabel serat optik sebagai medium perantaranya, mempunyai kelebihan yaitu Atenuasi rendah, *bandwidth* yang besar, kecepatan transmisi yang tinggi dan ketahanan yang tinggi terhadap noise yang dihasilkan oleh gelombang radio. (Al raweshidy, 2002).

- *Bandwidth* yang lebar dan Atenuasi yang rendah

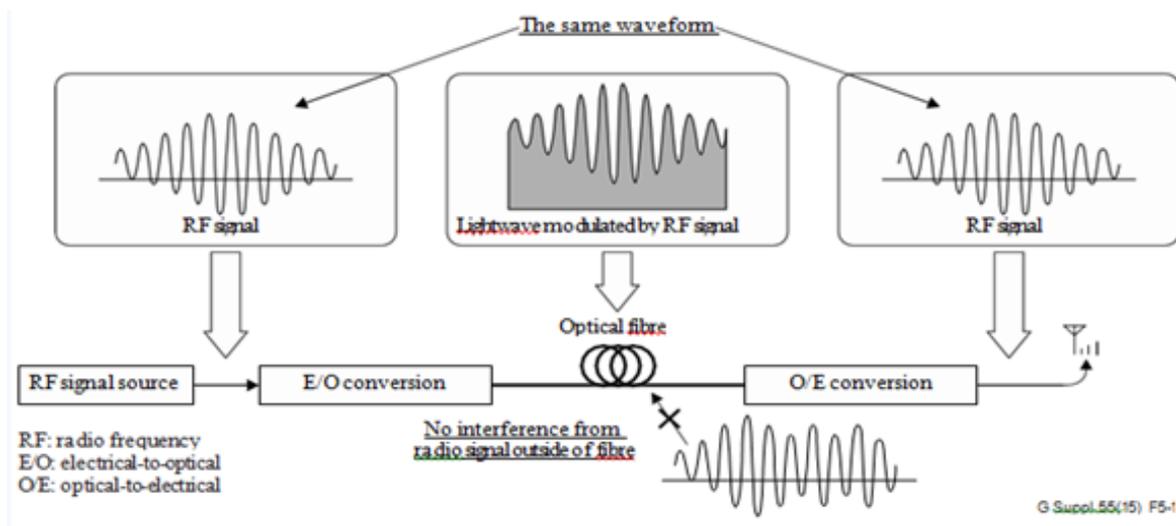
Serat optik memberikan *bandwidth* yang sangat lebar Secara komersial tipe fiber yang tersedia adalah Single Mode Fiber (SMF) yang terbuat dari kaca (silika) memiliki rugi-rugi atenuasi yang rendah dibawah 0,2 dB/km dan 0,5 dB/km pada panjang gelombang 1550 nm dan 1300 nm, POF memiliki atenuasi yang lebih tinggi bernilai 10 - 40 dB/km pada rentang panjang gelombang 500 – 1300 nm. Rugi-rugi ini lebih rendah dari pada yang biasa ditemui, seperti kabel koaksial, dimana kabel ini memiliki rugi-rugi 3 kali lipat lebih tinggi pada frekuensi yang tinggi. Sebagai contoh, atenuasi pada kabel koaksial sepanjang 0,5 inci (RG-214) bernilai >500 dB/km pada frekuensi diatas 5 GHz. Maka dari itu, mentransmisikan microwave pada fiber optik, jarak transmisi dapat meningkat berlipat-lipat dan daya transmisi yang dibutuhkan dapat diminimalisir secara signifikan. Pada serat optik ada tiga windows transmisi utama yang memberikan atenuasi rendah yaitu panjang gelombang 850 nm, 1310 nm dan 1550 nm, dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.1 Spektrum panjang gelombang terhadap Atenuasi  
(Sumber: imedeia.uib-csic.es)

- *Ketahanan terhadap Radio Frequency Interference*

Electromagnetic Interference (EMI) merupakan sifat yang penting pada sistem komunikasi. pada sistem komunikasi yang berbasis serat optik, hal ini tidak terlalu berpengaruh secara signifikan pada performa sistem, karena serat optik dan gelombang elektromagnetik terwujud dalam bentuk fisik yang berbeda. Kabel serat optik bersifat dielektrik, sehingga tidak mengalami gangguan ketika diganggu dengan sinyal elektromagnetik.

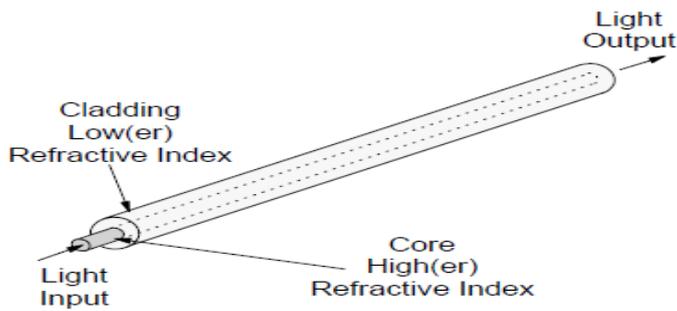


*Gambar 2.2 Konsep Dasar Sistem RoF*  
(Sumber: ITU-T Series G, 2015)

Gambar 2.2 menunjukkan konsep dasar sistem RoF. RoF didefinisikan sebagai transmisi dari *base station* (BS) menuju *base transceiver station* (BTS) menggunakan medium transmisi serat optik. Gelombang yang dikirim mencakup informasi untuk layanan komunikasi radio seperti format gelombang radio. Sistem RoF terdiri dari komponen untuk *electrical to optical* (E/O), *optical to electrical* (O/E), dan medium transmisi serat optik.

## 2.2 Serat optik

Serat optik adalah salah satu media transmisi yang dapat menyalurkan informasi dengan kapasitas besar dengan keandalan yang tinggi. Serat optik terbuat dari kaca atau plastik yang sangat halus dan sangat tipis. Bentuk paling sederhana yang menyusun serat optik yaitu inti (core) silinder dari kaca silica yang dikelilingi selubung dengan indeks bias yang lebih rendah dibandingkan inti (Agrawal, 2002). Berikut struktur dasar serat optik dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur dasar serat optik  
(Sumber: Dutton, 1998)

Inti (*core*) merupakan bagian inti dari serat optik, tempat cahaya dilewatkan. Pada bagian ini mengalir informasi yang akan disampaikan dari pengirim ke penerima, bisa berupa data maupun suara dengan berbagai aplikasi dan konten di dalamnya. Terbuat dari bahan *silica* ( $\text{SiO}_2$ ) atau plastik dan merupakan tempat merambatnya cahaya. Diameternya berkisar antara 8 sampai 62.5 *micron*.

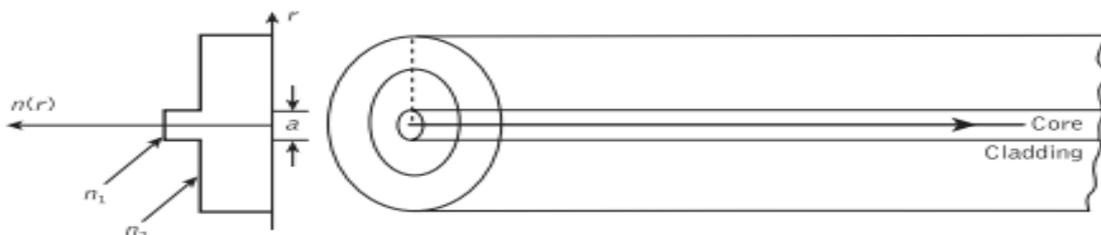
Selubung (*cladding*) mengelilingi inti yang berfungsi memantulkan cahaya kembali ke dalam inti (*core*). Terbuat dari bahan yang sama dengan inti tapi memiliki indeks bias yang lebih kecil agar cahaya tetap berada pada inti serat optik.

Kebanyakan sistem gelombang cahaya menggunakan serat optik sebagai saluran komunikasinya karena *silica* dapat mentransmisikan cahaya dengan losses hanya 0.2 dB/km. bahkan daya optik berkurang hanya 1% setelah 100 km (Agrawal, 2002).

## 2.3 Jenis Serat Optik

### 2.3.1. Singlemode

Serat optik jenis *singlemode* mempunyai diameter *core* (inti) yang kecil antara 8-10 mikron. Gambar 2.4 menunjukkan perambatan cahaya pada serat optik *singlemode*. Karena diameter *core* kecil, *singlemode* hanya mempunyai satu mode cahaya yang lewat di dalamnya. Biasanya digunakan untuk transmisi jarak jauh dengan kecepatan tinggi dan memiliki *loss* yang lebih kecil dari serat optik *multimode*.



Gambar 2.4 Perambatan Cahaya Serat Optik Singlemode  
(Sumber: John M. Senior, 2009)

### 2.3.2. Multimode

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

#### a. Step index multimode

Serat optik *step index multimode* memiliki nilai indeks bias inti yang seragam di seluruh bagian inti. Hal ini mengakibatkan adanya selisih antara indeks bias inti dengan indeks bias selubung. Perambatan cahaya *step index multimode* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Perbedaan indeks bias antara *core* dan *cladding* ( $\Delta$ ) secara sistematis dihitung menggunakan Persamaan (2.1) (Keiser, 1991):

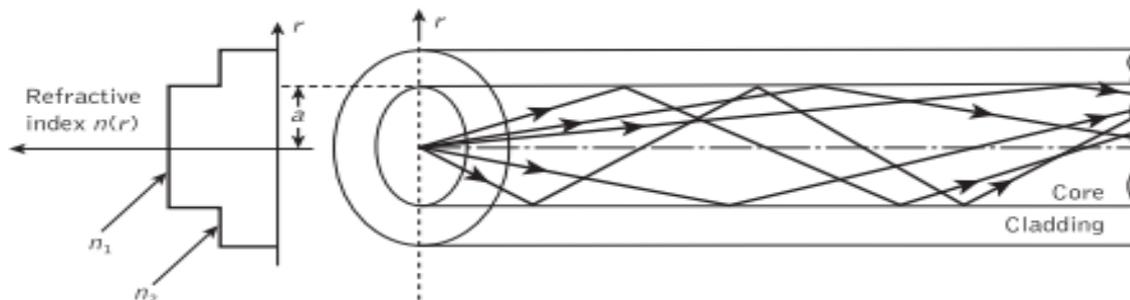
$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

dimana:

$n_1$  = indeks bias *core*

$n_2$  = indeks bias *cladding*

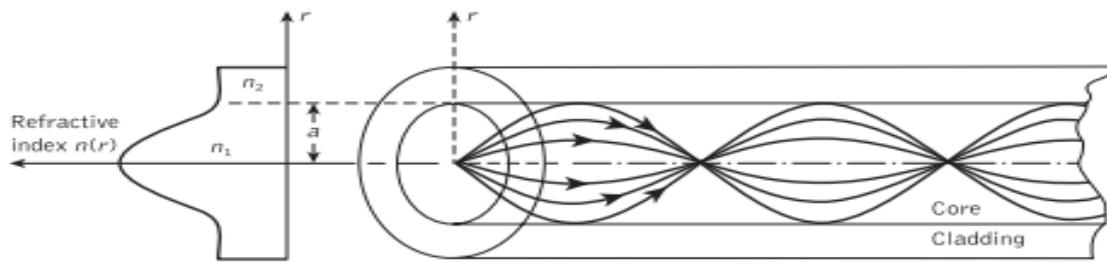
$\Delta$  = perbedaan relatif indeks bias



Gambar 2.5 Perambatan Cahaya Step Index Multimode  
(Sumber: John M. Senior, 2009)

#### b. Graded index multimode

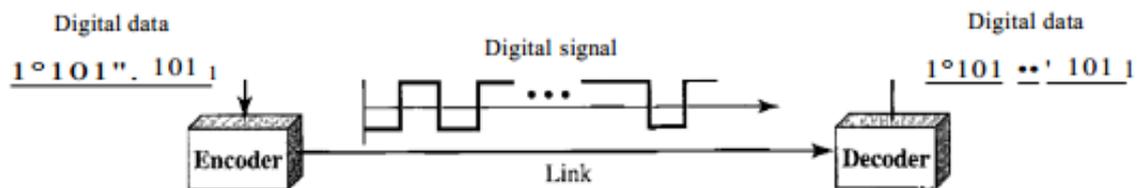
Serat optik jenis *Graded index multimode* memiliki inti dengan penurunan bertahap pada indeks bias ketika jaraknya semakin jauh dengan sumbu inti dan akan membentuk mode parabola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



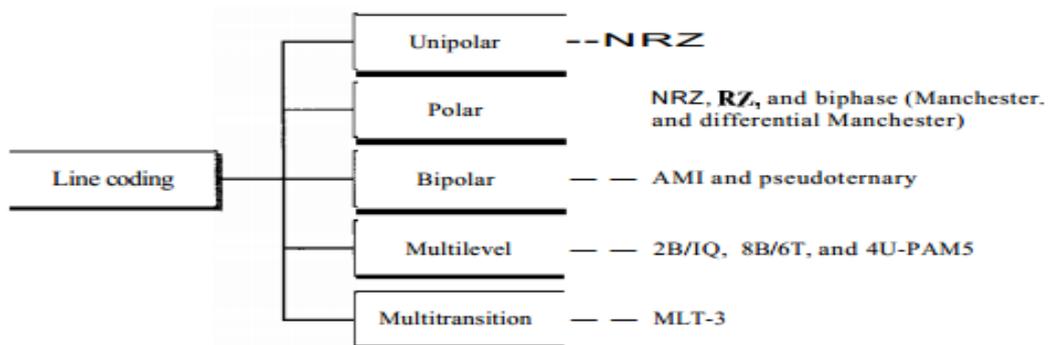
Gambar 2.6 Perambatan Cahaya Graded Index Multimode  
(Sumber: John M. Senior, 2009)

## 2.4 Line Coding

*Line coding* adalah proses konversi data digital ke sinyal digital. Data dalam bentuk teks, angka, gambar grafis, audio, atau video disimpan sebagai urutan bit. *Line coding* mengkonversi urutan bit ke sinyal digital. Pada pengirim, data digital dikodekan menjadi sinyal digital, sedangkan pada penerima, data digital dikonversi kembali menjadi sinyal digital oleh *decoding*. Gambar 2.7 menunjukkan proses *line coding* dan Gambar 2.8 menunjukkan skema pembagian *line coding* dalam lima kategori besar.



Gambar 2.7 Line Coding  
(Sumber: Forouzan, 2007)

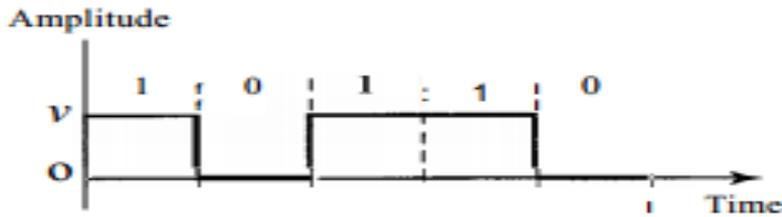


Gambar 2.8 Skema Line Coding  
(Sumber: Forouzan, 2007)

### 2.4.1 Unipolar

Dalam skema *unipolar*, semua level sinyal pada satu sisi sumbu waktu, baik di atas atau di bawah. Pada umumnya skema *unipolar* dirancang sebagai skema *Non-Return-to-Zero* (NRZ) di mana tegangan positif mendefinisikan bit 1 dan tegangan nol

mendefinisikan bit 0. Oleh karena itu disebut NRZ karena sinyal tidak kembali ke nol pada bit tengah. Gambar 2.9 menunjukkan skema *unipolar NRZ*.



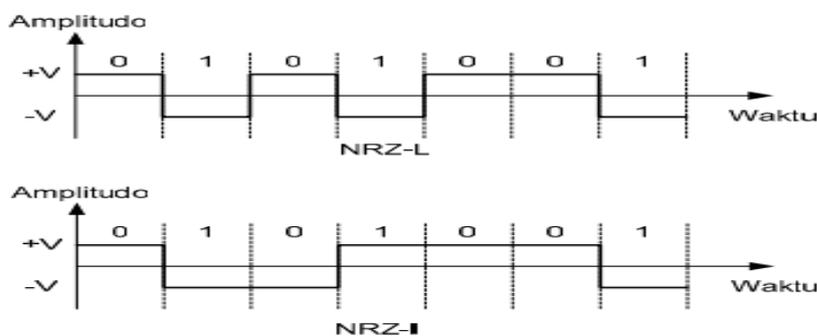
Gambar 2.9 Skema Unipolar NRZ  
(Sumber: Forouzan, 2007)

### 2.4.2 Polar

Dalam skema *polar*, tegangan berada di kedua sisi dari sumbu waktu. Dalam sinyal *polar*, satu logika diwakili oleh level tegangan positif, dan yang lainnya dengan level tegangan negatif.

### 2.4.3 Nonreturn-to-Zero

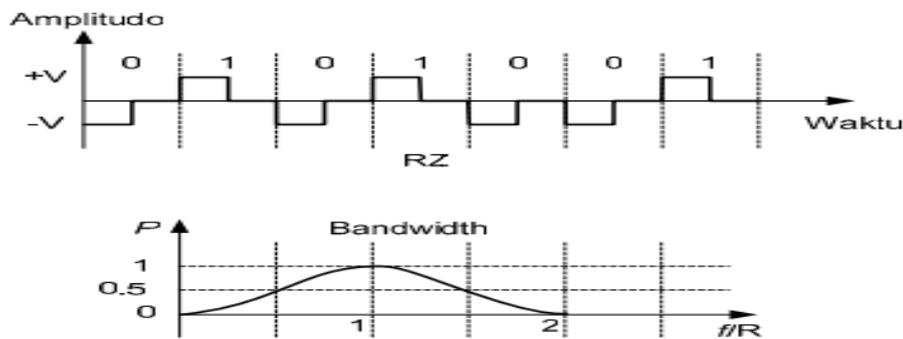
Pengkodean digital *nonreturn-to-zero* (NRZ) dibagi menjadi dua yaitu NRZ-Level (NRZ-L) dan NRZ-Invert (NRZ-I). Pada NRZ-L level tegangan menentukan nilai bit, bit 1 dan bit 0 direpresentasikan dengan level tegangan dari sinyal, sedangkan pada NRZ-I bit 1 dan bit 0 dibedakan oleh ada atau tidaknya perubahan level tegangan dari sinyal, jika tidak ada perubahan bit adalah 0, tapi jika ada perubahan adalah 1. Konversi data digital menjadi sinyal digital dengan menggunakan NRZ-L dan NRZ-I ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Dengan mengamati bentuk sinyal NRZ-L dan NRZ-I kita dapat melihat bahwa kedua modulasi polar ini masih akan mengalami apa yang disebut dengan *baseline wandering*. Pada NRZ-L *baseline wandering* akan terjadi apabila terdapat deretan panjang bit 1 atau bit 0, sedangkan pada NRZ-I *baseline wandering* hanya terjadi pada deretan panjang bit 0 saja. Dalam hal ini NRZ-I lebih baik daripada NRZ-L.



Gambar 2.10 Pengkodean Digital dengan NRZ-L dan NRZ-I  
(Sumber: Forouzan, 2007)

#### 2.4.4 Return-to-Zero

Kekurangan dari NRZ-L dan NRZ-I diperbaiki oleh pengkodean digital *return-to-zero* (RZ). RZ menggunakan tiga level tegangan (tegangan positif, nol dan negatif) seperti pada Gambar 2.11. Dengan demikian persoalan munculnya komponen DC pada NRZ dapat dieliminasi oleh RZ.

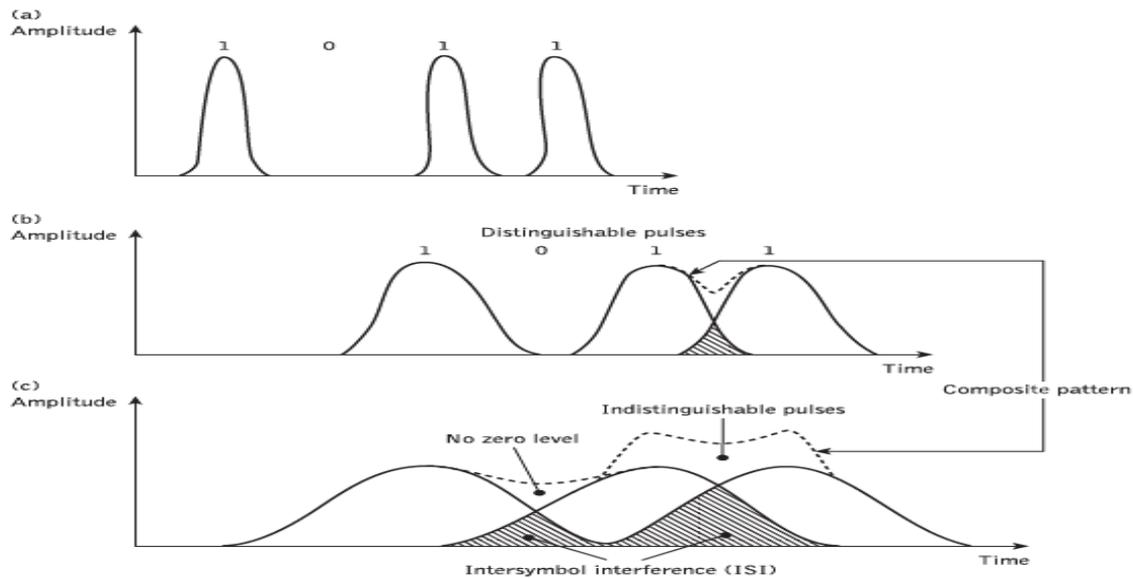


Gambar 2.11 Pengkodean Digital RZ dan Karakteristik Bandwidth RZ  
(Sumber: Forouzan, 2007)

Pengkodean RZ selalu mengembalikan sinyal ke tegangan nol pada saat sinyal telah mencapai setengah durasi sinyal. Tapi karena RZ menggunakan 2 sinyal elemen untuk merepresentasikan sebuah elemen data, hal ini berakibat pada kenaikan bandwidth sebanyak dua kali lipat dibandingkan dengan NRZ. Selain itu, karena RZ membutuhkan tiga level tegangan maka perangkat dengan kompleksitas tinggi dibutuhkan untuk membangkitkan sinyal RZ, oleh karena itu skema ini tidak digunakan.

#### 2.5 Dispersi

Dispersi pada sinyal optik yang ditransmisikan menyebabkan distorsi untuk transmisi digital maupun transmisi analog di sepanjang serat optik. Saat mempertimbangkan implementasi utama dari serat optik yang melibatkan beberapa bentuk modulasi digital, maka mekanisme dispersi dalam serat optik yang menyebabkan pelebaran pulsa cahaya yang ditransmisikan di sepanjang saluran (Senior, John, 2009). Ilustrasi mengenai dispersi dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Ilustrasi pelebaran pulsa cahaya saat menjalar di sepanjang serat optik: (a) sinyal masukan; (b) pelebaran pulsa; (c) Intersymbol Interference (Sumber: Senior, John, 2009)

Karena dispersi modal tidak dapat terjadi pada serat optik *single mode*, sumber utama dari dispersi pada *single mode* adalah dispersi kromatik, dispersi material, dan dispersi pandu gelombang.

Dispersi serat total merupakan akar dari penjumlahan semua dispersi dalam serat optik. Secara matematik dinyatakan dengan (Ming-Kang Liu, 2002):

$$\tau_{fiber} = \sqrt{\tau_{material}^2 + \tau_{waveguide}^2 + \tau_{intermodal}^2} \quad (2-2)$$

dengan:

- $\tau_{fiber}$  = dispersi total serat (ps)
- $\tau_{material}^2$  = dispersi pandu gelombang (ps)
- $\tau_{intermodal}^2$  = dispersi intermodal (ps)
- $\tau_{waveguide}^2$  = dispersi pandu gelombang (ps)

### 2.5.1 Dispersi kromatik

Dispersi kromatik atau dispersi intramodal dapat terjadi pada semua tipe serat optik dan dihasilkan dari *linewidth* spektral tampak dari sumber optik. Karena sumber optik tidak hanya memancarkan frekuensi tunggal, maka kemungkinan akan terjadi perbedaan *delay* propagasi antar komponen *spectral* yang berbeda dari sinyal yang ditransmisikan. Hal ini menyebabkan pelebaran pada setiap mode yang ditransmisikan, perbedaan *delay*

disebabkan oleh sifat dispersi dari material pandu gelombang (material dispersion) dan juga efek panduan di dalam struktur serat (waveguide dispersion) (senior, John, 2009).

Dispersi intramodal merupakan jumlah dari dispersi material dan dispersi pandu gelombang (Muflihatin, 2002):

$$\tau_{intramodal} = \tau_{material} + \tau_{waveguide} \quad (2-3)$$

dengan:

$$\tau_{intramodal} = \text{dispersi intramodal (ps)}$$

$$\tau_{material} = \text{dispersi bahan (ps)}$$

$$\tau_{waveguide} = \text{dispersi pandu gelombang (ps)}$$

### 2.5.2 Dispersi material

Pelebaran pulsa disebabkan oleh hasil dispersi material dari kelompok kecepatan yang berbeda pada berbagai komponen spektral yang diluncurkan ke serat optik dari sumber optik (Senior, John, 2009). Persamaan untuk dispersi material ditunjukkan pada (DeCusatis, 2002):

$$\tau_{material} = \tau_{dm} \times \Delta_{\lambda} \times D \quad (2-4)$$

dimana:

$$\tau_{material} = \text{dispersi bahan (ps)}$$

$$\tau_{dm} = \text{koefisien dispersi material (ps/(nm.km))}$$

$$\Delta_{\lambda} = \text{lebar spektral sumber cahaya (nm)}$$

$$D = \text{panjang serat optik (km)}$$

### 2.5.3 Dispersi pandu gelombang

Pandu gelombang dari serat optik juga bisa mengakibatkan dispersi kromatik. Hal ini disebabkan dari variasi kecepatan dengan panjang gelombang pada mode tertentu (Senior, John, 2009).

Persamaan untuk dispersi pandu gelombang yaitu (DeCusatis,2002):

$$\tau_{waveguide} = \frac{D}{c_{\lambda}} (n_1 - n_2) t_{wg} \Delta_{\lambda} \quad (2-5)$$

dimana:

$$\tau_{waveguide} = \text{dispersi pandu gelombang (s)}$$

$$D = \text{panjang serat optik (km)}$$

$$n_1 = \text{indeks bias inti}$$

$n_2$  = indeks bias selubung

$t_{wg}$  = koefisien dispersi tanpa dimensi yang didapat dari persamaan:

$$t_{wg} = \frac{4(1-\ln v)}{v^2} \quad (2-6)$$

$v$  = frekuensi ternormalisasi, menyatakan batas mode-mode sinyal optik yang dapat berpropagasi di dalam inti serat optik, dengan persamaan:

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-7)$$

dimana:

$a$  = jari – jari inti serat optik ( $\mu\text{m}$ )

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

$\Delta\lambda$  = lebar spectrum sumber cahaya (nm)

$C$  = kecepatan cahaya di ruang hampa (m/s)

## 2.6 Fiber Bragg Grating

kaca pada serat optik dapat diubah menggunakan cahaya laser secara intens. Kenyataan ini mengarah pada suatu manufaktur yang disebut *Fiber Bragg Grating* (FBG). Gambar 2.17 menunjukkan aplikasi FBG. Kisi-kisi yang terdapat di dalam inti serat ini telah merevolusi sistem komunikasi serat optik. FBG dapat digunakan sebagai kompensator dispersi, aplikasi filter, koversi *mode*, pemerataan *gain*, dan multipleksing panjang gelombang. FBG pertama kali ditemukan pada tahun 1978 oleh Hill et al. Awalnya kisi-kisi dibuat oleh interferensi antara gelombang yang menjalar ke depan dan ke belakang. Gelombang yang menjalar ke belakang dihasilkan dari pemantulan Fresnel pada sisi keluaran. Pada puncak dari pola interfrensi ini, dimana cahaya adalah yang paling kuat, interaksi antara cahaya dan Ge rusak di dalam kaca sehingga mengubah indeks bias  $\Delta n \approx 10^{-3} - 10^{-5}$ . Periode kisi kisi ini diberikan pada persamaan (2.8) (DeCusatis, 2002):

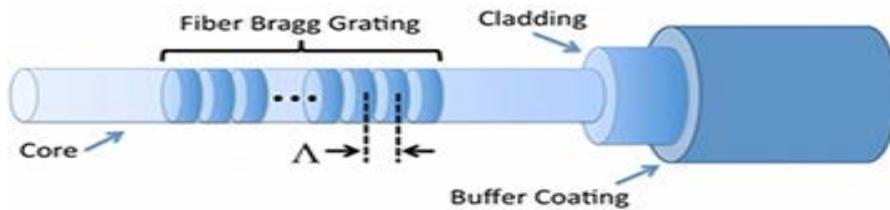
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n_{eff}} \quad (2-8)$$

dimana:

$\Lambda$  = periode kisi

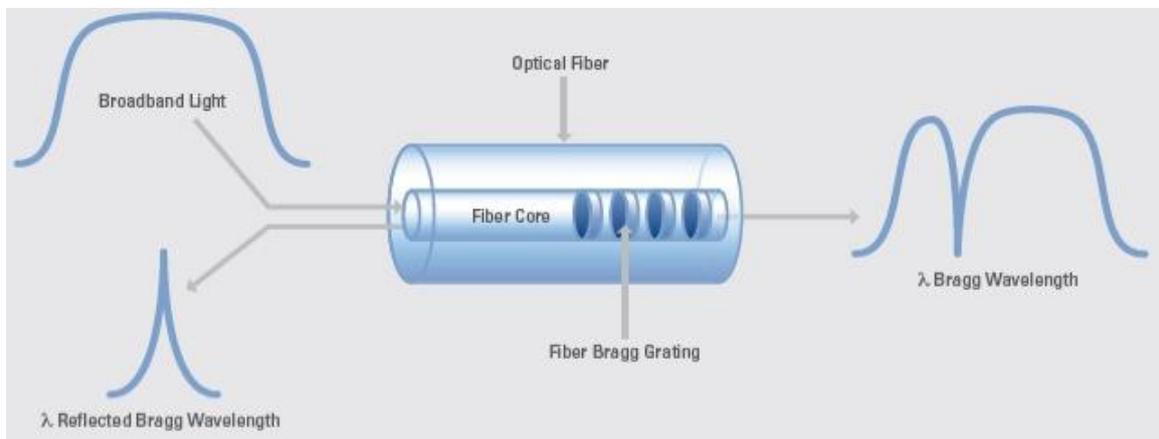
$\lambda$  = panjang gelombang yang dipantulkan (nm)

$n_{eff}$  = indeks bias efektif dari kisi pada inti serat



Gambar 2.13 Penerapan Fiber Bragg Grating pada serat optik  
(Sumber: National Instrumen, 2011)

Gambar 2.14 merupakan prinsip kerja FBG. Suatu kisi serat optik memantulkan panjang gelombang mendekati panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda$ ). Pemantulan terjadi karena cahaya sebagian dipantulkan pada tiap puncak indeks bias dan pemantulan maksimum terjadi saat sebagian pemantulan berada satu fasa dengan yang berada di sebelahnya (DeCusatis, 2002).

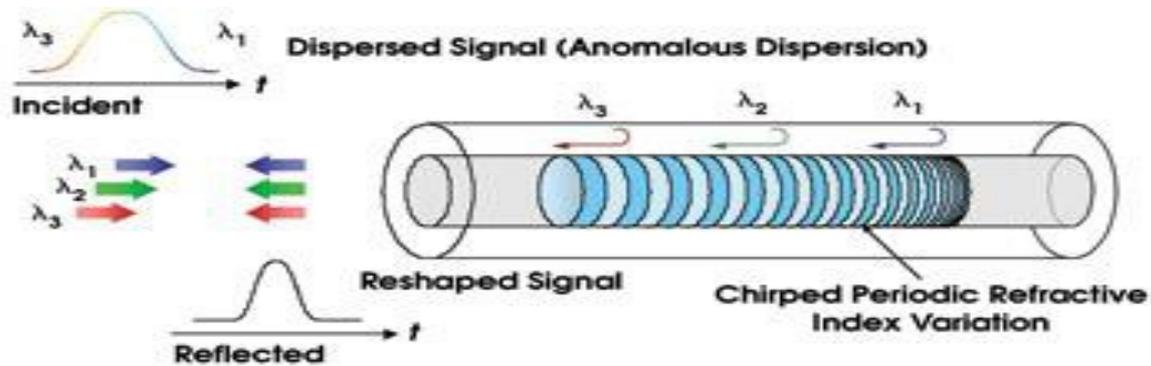


Gambar 2.14 Prinsip kerja fiber bragg grating  
(Sumber: National Instrumen, 2011)

Salah satu aplikasi dari FBG ini adalah sebagai kompensator dispersi. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, indeks bias merupakan fungsi dari panjang gelombang pada kaca. Pulsa cahaya akan selalu mengalami pelebaran dalam fungsi waktu selama melakukan perjalanan di sepanjang serat. Pelebaran ini menjadi suatu masalah besar pada sistem dengan *bandwidth* yang tinggi karena menyebabkan pulsa saling bergabung sehingga tidak dapat dideteksi. Dengan menggunakan FBG dimana periode kisi berubah secara linear di sepanjang serat (disebut juga *chirped* FBG) dapat memperlambat panjang gelombang berbeda sehingga mempertajam pulsa pada waktunya. Kompensator dispersi FBG di atas 1500 ps/nm pada daerah panjang gelombang sekitar 1550 nm telah tersedia secara komersial.

*Chirp* pada kisi-kisi memiliki banyak bentuk. Periodenya dapat bervariasi secara simetris, mengalami peningkatan atau penurunan periode di tengah kisi. *Chirp* dapat

bersifat linear, kuadratik, atau bahkan memiliki periode yang melompat. Suatu kisi juga dapat memiliki periode yang berubah secara acak seiring dengan panjangnya. *Chirp* yang paling sering digunakan adalah *uniform* dan *linear chirp* (Kashap, 1999).



Gambar 2.15 Prinsip kerja *chirped* FBG sebagai kompensator dispersi  
(Sumber: [www.photonics.com](http://www.photonics.com))

Gambar 2.15 menjelaskan prinsip kerja *chirped* FBG sebagai kompensator dispersi. Pada *chirped* FBG, periode dari indeks modulasi yang diinduksi bervariasi di sepanjang kisi. Dengan perubahan periode kisi di sepanjang sumbu, panjang gelombang yang berbeda dipantulkan dengan porsi berbeda dari kisi dan oleh karena itu tertunda oleh perbedaan waktu. Efeknya adalah kompresi dari pulsa input yang disesuaikan untuk mengkompensasi dispersi kromatik yang terjadi di sepanjang serat. Meskipun masuk ke dalam kisi pada waktu yang berbeda, komponen panjang gelombang dari pulsa yang mengalami pelebaran semua akan kembali ke jalur masukan pada waktu yang sama ([www.photonics.com](http://www.photonics.com)).

Untuk mendapatkan panjang kisi,  $L$  disesuaikan dengan *delay* refleksi dan *bandwidth* output kisi yang diinginkan (Muflihatin, 2002).

$$L = \frac{c \cdot \Delta\lambda_g \cdot t_g}{2n_{eff}} \quad (2-9)$$

dimana:

$L$  = panjang kisi (m)

$c$  = kecepatan cahaya di ruang hampa (m/s)

$\Delta\lambda_g$  = *bandwidth* kisi (nm)

$t_g$  = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

$n_{eff}$  = indeks bias efektif dari kisi pada inti serat

*Bandwidth* kisi adalah lebar rentang panjang gelombang yang dapat direfleksikan agar diperoleh lebar spektrum pulsa keluaran FBG dengan karakteristik yang sama.

$$\Delta\lambda_{-g} = \Delta\lambda \quad (2-10)$$

dimana:

$\Delta\lambda_{-g}$  = bandwidth kisi (nm)

$\Delta\lambda$  = lebar spektrum sumber optik (nm)

Bila *bandwidth* kisi tidak sama dengan lebar spektrum sumber optik, maka akan mempengaruhi besarnya dispersi yang muncul di sepanjang serat setelah peletakan FBG juga terhadap kisinya. *Delay* refleksi FBG yang dihasilkan harus sama dengan besar dispersi yang muncul untuk mendapatkan keseluruhan panjang gelombang dalam lebar spektral pulsa optik tiba pada waktu yang sama setelah melewati FBG.

$$t_g = \frac{\tau_{material} \cdot D_{(FBG)}}{\Delta\lambda_{-g}} \quad (2-11)$$

dimana:

$t_g$  = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

$\tau_{material}$  = dispersi bahan (ps)

$D_{(FBG)}$  = jarak peletakan FBG (km)

$\Delta\lambda_{-g}$  = bandwidth kisi (nm)

Dispersi total serat optik setelah peletakan *chirped* FBG dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\tau_{fiber} = \sqrt{(t_g \cdot \Delta\lambda_{-g})^2 + D^2(\tau_{waveguide}^2 - \tau_{intermodal}^2)} \quad (2-12)$$

dimana:

$\tau_{fiber}$  = dispersi total serat (ps)

$t_g$  = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

$\Delta\lambda_{-g}$  = bandwidth kisi (nm)

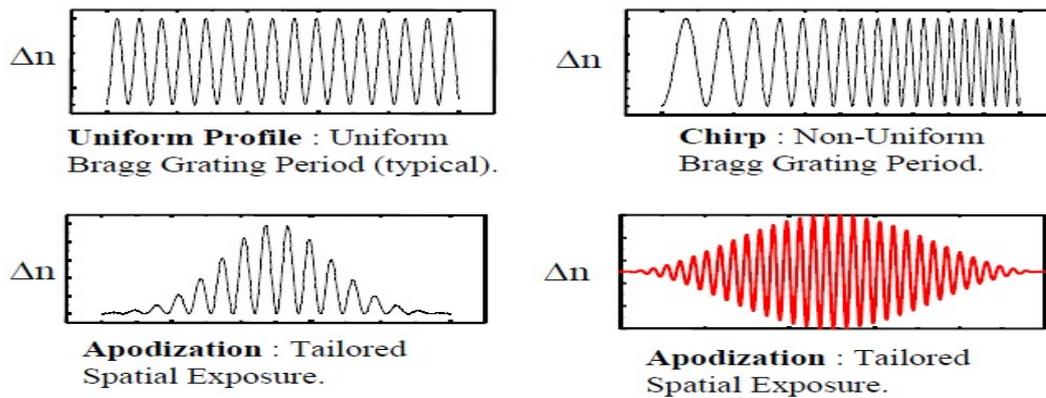
D = panjang serat optik (km)

$\tau_{waveguide}$  = dispersi pandu gelombang (ps)

$\tau_{intermodal}$  = dispersi intermodal (ps)

Keuntungan utama dari penggunaan FBG sebagai teknik kompensasi dispersi adalah biaya yang dikeluarkan efektif dan memiliki *insertion loss* rendah dan terdapat komponen pasif yang cocok dengan *single mode fiber*. Pengaplikasian FBG dapat ditemukan pada medan yang berbeda seperti *filter add and drop* WDM, pompa laser, dan penstabil panjang gelombang (Singh, 2015).

Pembentukan kisi dalam serat optik dapat dilakukan dengan penyinaran serat menggunakan sumber optik untuk mendapatkan indeks bias inti yang berubah-ubah dengan periode tertentu yang sejajar (Edita Rosana, 2013). Jenis-jenis FBG berdasarkan perubahan indeks biasnya dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perubahan indeks bias untuk berbagai tipe kisi (Sumber: Chiareli, 1999)

Tipe kisi *uniform* mempunyai periode tetap dalam arah membujur dengan refleksi panjang gelombang yang curam dan puncak yang tajam. Dimungkinkan bandwidth 0,1 bahkan lebih kecil tergantung pada kisi.

Tipe kisi *chirped* mempunyai periode berubah-ubah dalam arah membujurnya. Perubahan periode yang kontinu akan menjadikan perubahan secara kontinu pula terhadap panjang gelombang yang dipantulkan dan akan didapatkan bentuk gelombang yang lebar.

Teknik kisi “*apodization*”, yaitu amplitudo perubahan indeks bias kisi ( $\Delta n$ ) berubah sepanjang kisinya agar dapat menekan panjang gelombang pada *sidelobe* yang tidak diinginkan, selain itu dipergunakan untuk mengatur bentuk spektrum *envelope* refleksinya (Edita Rosana, 2013).

## 2.7 Continuous wave (CW) laser

CW laser memancarkan gelombang elektromagnetik yang terus menerus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. LASER merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Dalam percobaan ini CW laser ditetapkan sebagai sumber cahaya. CW laser merupakan laser dengan keluaran kontinyu lebih dari atau sama dengan 0.25 watt yang bersifat konstan dalam pengiriman daya laser.



Gambar 2.17 CW laser

(Sumber: [www.springer.com](http://www.springer.com))

Tabel 2.1 Perbandingan Karakteristik LED dan LD

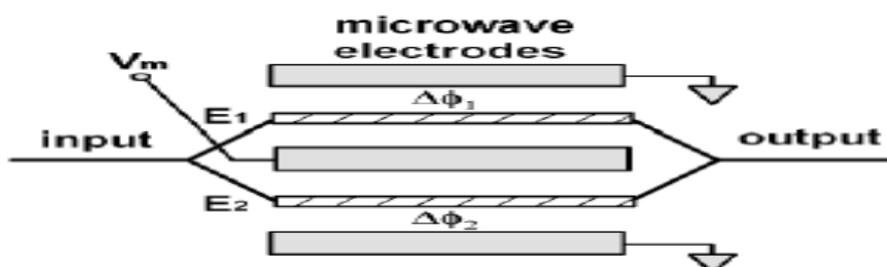
(Sumber: Syauki, 2008)

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

### 2.8 Mach-Zehnder Modulator

Untuk pemancar dengan kecepatan yang tinggi, laser dibiaskan pada arus yang konstan untuk memberikan output CW, dan modulator optik ditempatkan setelah laser yang berfungsi mengubah cahaya CW menjadi deretan data pulsa yang dikodekan dengan format modulasi yang tepat. Modulator optik *Mach Zehnder* memanfaatkan bahan LiNbO<sub>3</sub> (*lithium niobate*) dan Mach-Zehnder (MZ) interferometer untuk modulasi intensitas. Dua titanium didifusikan ke pandu gelombang LiNbO<sub>3</sub> dari dua lengan interferometer MZ. Indeks bias bahan elektro- optik seperti LiNbO<sub>3</sub> dapat diubah dengan menerapkan tegangan eksternal. Dengan tidak adanya tegangan eksternal, bidang optik di dua lengan MZ akan berinterferensi secara konstruktif. Pergeseran fasa tambahan terjadi di salah satu lengan melalui perubahan indeks tegangan induksi yang menghilangkan sifat konstruktif dan mengurangi intensitas yang ditransmisikan. Secara spesifik, tidak ada cahaya ditransmisikan ketika perbedaan fasa antara kedua lengan sama dengan  $\pi$ , karena interferensi destruktif terjadi (Agrawal, 2002).

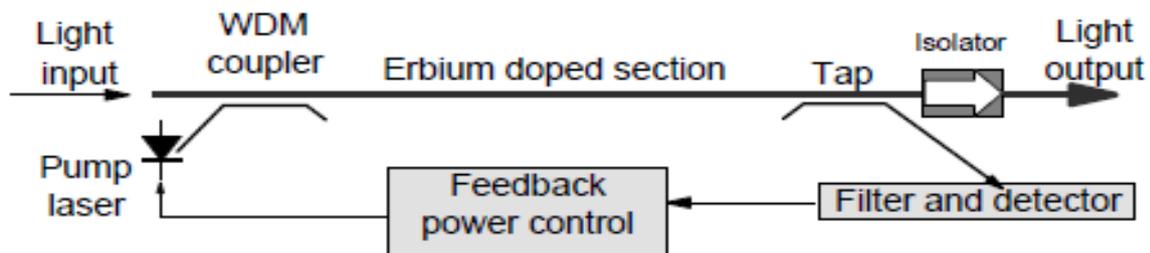
Dalam sebuah modulator EO berkas cahaya terbelah dua dan kemudian dikirim melalui dua jalur yang terpisah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



*Gambar 2.18 Struktur Mach-Zehnder Modulation*  
(Sumber: Hodžić, 2004)

### 2.9 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

EDFA terdiri dari serat serat pendek (biasanya 10 meter atau lebih) yang memiliki sejumlah kecil elemen erbium (unsur bumi yang cukup langka) yang ditambahkan pada kaca dalam bentuk sebuah ion ( $\text{Er}^{3+}$ ). **Gambar 2.19** merupakan ilustrasi dari EDFA.



*Gambar 2.19 Erbium Doped Fiber Amplifier*  
(Sumber: Dutton, 1998:159)

Prinsip yang terlibat di sini adalah prinsip laser dan sangat sederhana. Ion erbium dapat ditemukan dalam beberapa kondisi energy. Saat ion erbium dalam kondisi energy tinggi, cahaya foton akan menstimulasi ion untuk mengalirkan sebagian energinya (dalam bentuk cahaya) dan kembali pada keadaan yang energinya lebih rendah (lebih stabil).

Agar prinsip ini dapat bekerja, dibutuhkan cara untuk membuat atom erbium berada pada kondisi paling tinggi energinya. Laser diode pada diagram menghasilkan cahaya sorot dengan daya yang tinggi (antara 10 dan 100 mW) pada panjang gelombang sehingga ion erbium akan menyerapnya dan melompat ke kondisi paling tinggi (cahaya pada panjang gelombang 980 nm atau 1480 nm akan melakukan hal ini cukup baik). (Dutton, 1998:160).

### 2.10 Detektor Optik

Detektor optik merupakan alat yang dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik kembali. Detektor optik bekerja berdasarkan prinsip emisi fotolistrik yaitu terjadinya pembebasan elektron dari permukaan laser sebagai hasil penyerapan energy foton. Tabel 2.2 menunjukkan perbandingan karakteristik antara PIN dan APD.

*Tabel 2.2 Perbandingan Parameter dan Karakteristik PIN dan APD*  
(Sumber: Syauki, 2008)

| No. | Karakteristik      | PIN         | APD         |
|-----|--------------------|-------------|-------------|
| 1.  | Daya optik minimum | Lebih besar | Lebih kecil |
| 2.  | Responsivitas      | 0,35 – 0,8  | 2,5 – 120   |
| 3.  | Penguatan          | 1           | 10 – 250    |
| 4.  | Derau detektor     | Lebih kecil | Lebih besar |

|    |               |      |           |
|----|---------------|------|-----------|
| 5. | Waktu jangkit | 0,06 | 0,1 – 0,3 |
|----|---------------|------|-----------|

## 2.11 Kinerja Serat Optik

Kinerja serat optik dipengaruhi oleh besar rugi-rugi (*losses*). Nilai *losses* dalam serat optik dituliskan dalam satuan *decibel* (dB) atau dalam dBm. Untuk menghitung *losses* nilai daya atau tegangan masukan dan keluaran harus diketahui. Cara perhitungan *losses* ditunjukkan pada persamaan (2.13) (Bhargava, 1984).

$$L = 10 \log \frac{P_i}{P_o} = 10 \log \left( \frac{V_i^2}{V_o^2} \right) = 20 \log \frac{V_i}{V_o} \quad (2-13)$$

dimana:

L = losses (dB)

P<sub>i</sub> = daya masukan (Watt)

P<sub>o</sub> = daya keluaran (Watt)

V<sub>i</sub> = tegangan masukan (Volt)

V<sub>o</sub> = tegangan keluaran (Volt)

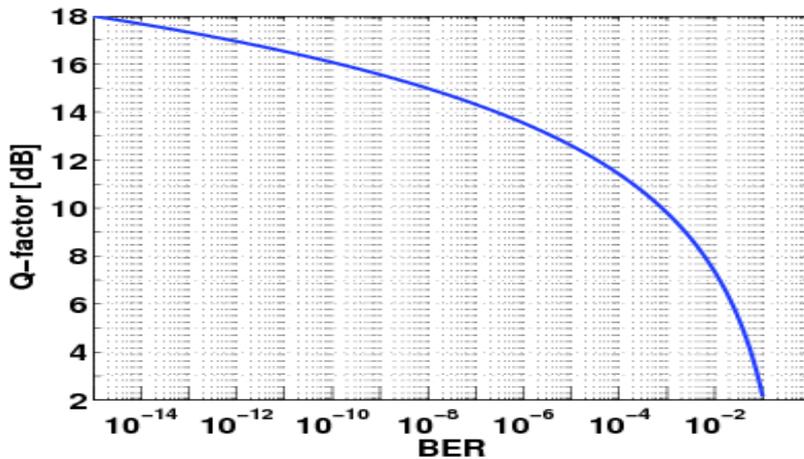
Tegangan merupakan parameter yang penting dalam pengukuran kinerja suatu sistem untuk mengetahui *losses*. Parameter lain yang digunakan untuk mengukur kualitas sistem termasuk kinerja serat optik yaitu BER dan *eye pattern*.

## 2.12 Q-factor

*Q-Factor* adalah faktor kualitas yang akan menentukan bagus atau tidaknya suatu link pada suatu jaringan. Kriteria Q-Factor untuk mengevaluasi performa sistem transmisi seringkali dikombinasikan dengan pengukuran BER. Q-Factor didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk memperhitungkan berdasarkan ketidaktelitian distribusi Gaussian (Vorgelegt, 2004:78). Hubungan antara BER dan Q-Factor ditunjukkan pada persamaan (Wan Rizal, 2011):

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (2-14)$$

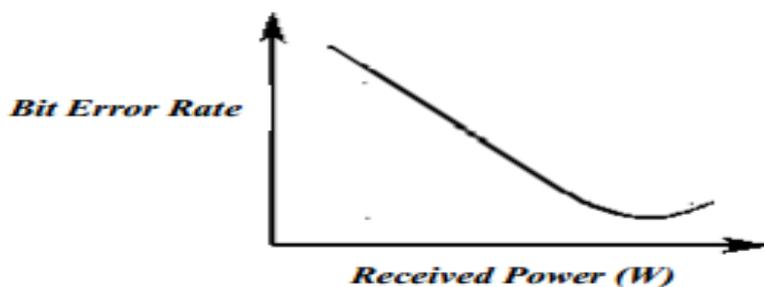
Metode perhitungan Q-Factor memungkinkan estimasi BER yang bagus. Dari Gambar 2.20 menunjukkan hubungan Q-Factor terhadap BER, seperti yang kita lihat, semakin tinggi nilai Q-Factor, BER yang terjadi semakin baik.



Gambar 2.20 Grafik Hubungan BER dan Q-factor  
(Sumber: [www.photonics.com](http://www.photonics.com))

### 2.13 Bit Error Rate

Rugi-rugi pada serat optik mengurangi besar daya yang diterima pada penerima. Hal ini akan mempengaruhi kinerja sistem yang diindikasikan dalam parameter Bit Error Rate seperti yang ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.18. Ketika daya yang diterima semakin kecil, nilai Bit Error Rate akan tinggi. Hal ini menunjukkan banyak kesalahan data pada data yang ditransmisikan dalam sistem.



Gambar 2.21 Kurva Bit Error Rate terhadap Daya yang Diterima  
(Sumber: The Fiber Optic Association, 2009)

BER disebut juga probabilitas bit error ( $P_e$ ) merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER menyatakan berapa jumlah bit salah yang terjadi dalam dalam satuan detik. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit salah terhadap total bit yang ditransmisika. Aplikasi pada ITU-T G.691, ITU-T G.692, dan ITU-T G.959.1 menyatakan bahwa sistem optik harus didesain dengan nilai BER tidak kurang dari  $10^{-12}$ .

Kesalahan *bit* pada pentransmisian data dapat terjadi karena adanya distorsi gelombang acak. Dengan kata lain, saat noise mengganggu sinyal transmisi yang stabil terhadap waktu dalam  $t$  detik maka perhitungan menjadi lebih mudah dilakukan, tapi jika *bust error* terjadi maka perhitungan *bit error* akan menjadi lebih lama. BER dinyatakan sebagai fungsi waktu yang secara matematis ditunjukkan pada persamaan (2.15) (Hui, Rongqing, 2009).

$$BER = \frac{1}{\Delta t \times BR} \quad (2-15)$$

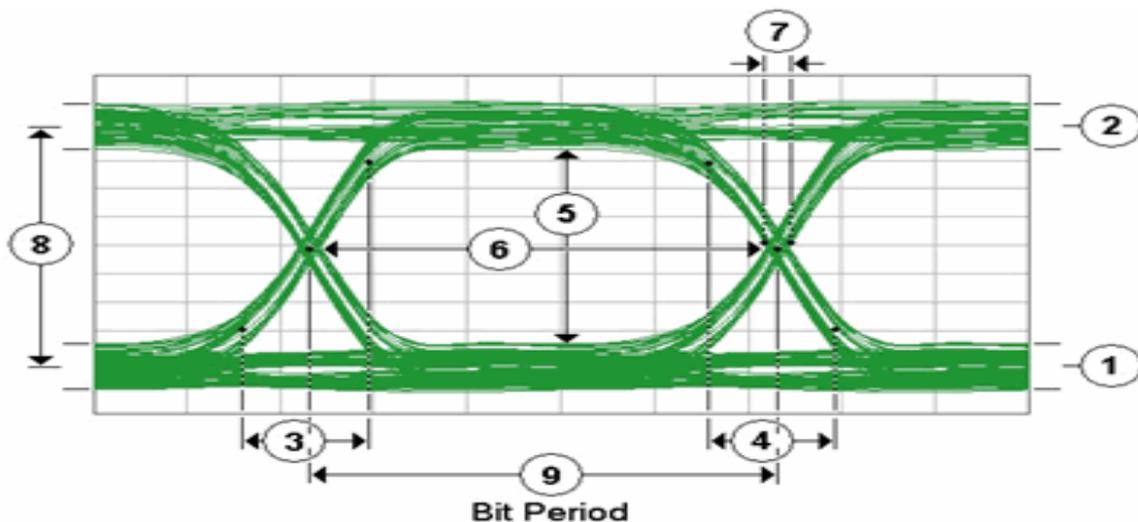
dimana:

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

BR = *bit rate* (bit/sec)

## 2.14 Eye Pattern

*Eye pattern* disebut juga dengan *eye diagram* yang merupakan tampilan osiloskop data digital dari *receiver* yang mengalami beberapa kali proses *sampling* untuk mengetahui karakteristik dari sinyal tersebut. *Eye pattern* menunjukkan kualitas sinyal pada transmisi data kecepatan tinggi. *Eye pattern* akan berbentuk seperti persegi pada kondisi ideal, tapi karena dalam sistem transmisi data terdapat redaman, transisi tidak berupa garis vertikal yang lurus dan menghasilkan pola seperti mata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.22 Eye Diagram  
(Sumber: <http://na.support.keysight.com>)

### 1. Level 0

Level 0 adalah ukuran dari nilai rata-rata dari logika 0

### 2. Level 1

Level 1 adalah ukuran dari nilai rata-rata dari logika 1

### **3. Rise Time**

*Rise time* adalah ukuran waktu transisi data dari level 10% ke level 90% di lereng atas dari diagram mata.

### **4. Fall Time**

*Fall Time* adalah ukuran dari waktu transisi data dari tingkat 90% ke level 10% pada kemiringan ke bawah dari diagram mata.

### **5. Eye Height**

*Eye Height* adalah ukuran vertikal diagram *eye opening*. *Eye opening* yang ideal akan diukur dari level 1 ke level 0. Namun, *noise* pada *eye pattern* akan menyebabkan pola yang menutup.

### **6. Eye Width**

*Eye Width* adalah ukuran horizontal diagram *eye opening*. Idealnya, *eye width* akan diukur antara titik persimpangan pada *eye pattern*. Namun, *jitter* dapat muncul pada gelombang dan mempengaruhi *eye opening*.

### **7. Deterministic Jitter**

*Deterministic Jitter* adalah penyimpangan transisi dari waktu ideal yang disebabkan oleh refleksi relatif terhadap transisi lainnya.

### **8. Eye Amplitude**

*Eye Amplitude* adalah perbedaan antara level logika 1 dan logika 0 tingkat histogram nilai rata-rata dari diagram mata.

### **9. Bit Rate**

*Bit rate* mengukur sejauh mana *eye pattern* terbuka secara horizontal yang diukur dari *crossing point*. Dari *bit rate*, bias diketahui data rate (1/bit period). *Bit rate* juga disebut dengan *Unit Interval* (UI) pada *eye diagram*.

## **2.15 Power Link Budget**

*Power link budget* adalah perhitungan daya yang dilakukan pada suatu sistem transmisi yang didasarkan pada karakteristik saluran (redaman), sumber optik, dan sensitivitas *photodetector*. Perhitungan daya sinyal memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\alpha_{total} = (L_1 \times \alpha_{serat}) + (L_2 \times \alpha_{serat}) \quad (2-16)$$

Keterangan:

- L<sub>1</sub> = Panjang serat optik Pertama (Km)
- L<sub>2</sub> = Panjang serat optik Kedua (Km)

$\alpha$  total = Redaman total sistem (dB)

$\alpha$  serat = Redaman serat (dB/Km)

Sedangkan untuk nilai daya yang diterima di *photodetector* atau blok penerima dapat dihitung dengan persamaan:

$$PR_x = PT_x - \alpha_{tot} \quad (2-17)$$

Keterangan:

$\alpha_{tot}$  = Redaman total sistem (dB)

$PR_x$  = Daya terima, sensitivitas penerima (dBm)

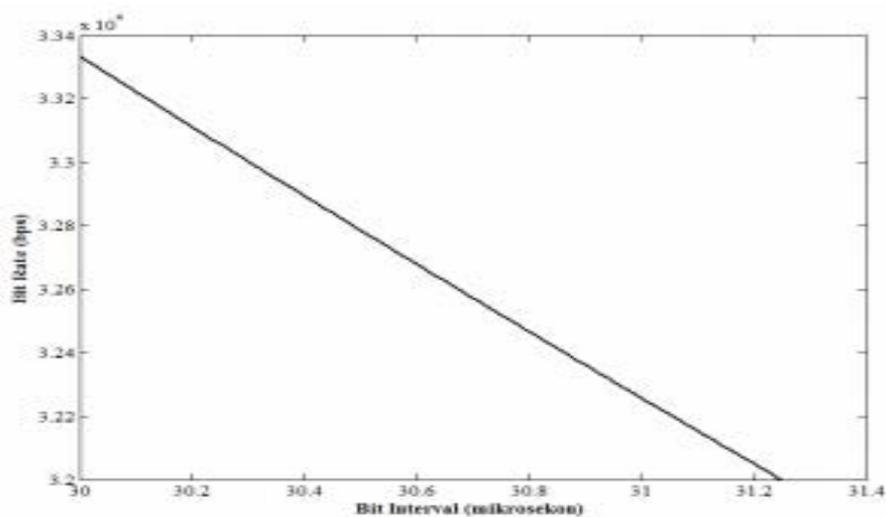
$PT_x$  = Daya kirim (dBm)

## 2.16 Bit Rate

Periode bit adalah ukuran dari pembukaan horizontal *eye diagram* atau *eye opening* pada titik-titik persimpangan mata dan biasanya diukur dalam *picoseconds* untuk sinyal digital berkecepatan tinggi. *Bit rate* dapat dihitung dari *bit interval* dengan menggunakan. Untuk menghitung bit rate ditunjukkan pada persamaan (2.18) (Agilent, 2012).

$$Bit\ Rate = \frac{1}{T_b} \quad (2-18)$$

*Bit interval* dihitung dari titik *zero crossing point* yang berpengaruh pada besar *eye width*. Semakin lebar *eye width*, waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan satu bit data semakin lama. Waktu untuk mentransmisikan satu bit data disebut dengan bit interval. Besar waktu ini akan berpengaruh pada kecepatan bit data yang ditransmisikan atau *bit rate*. Semakin kecil *bit interval* maka nilai *bit rate* akan semakin besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Karakteristik Bit Rate terhadap Besar Bit Interval

## 2.17 Frekuensi Radio

Ditinjau dari segi pemakaian frekuensi dan besar frekuensi untuk masing-masing jenis frekuensi radio disebut spektrum frekuensi radio. Karna besarnya frekuensi berbeda, tentu masing-masing frekuensi itu memiliki ciri-ciri spesifik dalam pemakaiannya. Maka media transmisi radio yang banyak digunakan dapat dibedakan menjadi:

- *Middle Frequency* – MF (300 – 3000 KHz)
- *High Frequency* – HF (3 – 30 MHz)
- *Very High Frequency* – VHF (30 – 300 MHz)
- *Ultra High Frequency* – UHF (300 – 3000 MHz)
- *Super High Frequency* – SHF (3 – 30 GHz)
- *Ekstra High Frequency* – EHF (30 – 300 GHz)

Ciri-ciri spesifik penggunaan masing-masing frekuensi radio tersebut adalah:

- a. MF (*Middle Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang sedang. Banyak digunakan dalam radio siaran swasta niaga, amatir radio, orari, dan sebagainya.
- b. HF (*High Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang yang pendek. Banyak dipakai untuk hubungan ke tempat-tempat yang jauh atau terpencil. Sebelum digunakan satelit dan peralatan untuk frekuensi lainnya, jenis frekuensi ini banyak dipakai oleh instansi pemerintahan, badan-badan swasta termasuk PTT (kini Telkom) untuk kepentingan hubungan telekomunikasinya. Pengguna frekuensi HF sering disebut dengan SSB (*single side band*), atau radio SSB.
- c. VHF (*Very High Frequency*) atau UHF (*Ultra High Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang yang pendek, banyak digunakan untuk keperluan hubungan jarak dekat, misalnya untuk radio kendaraan bermotor (STKB), STJJ, dan sebagainya.
- d. Sedangkan SHF (*Super High Frequency*) dan EHF (*Ekstra High Frequency*) disebut dengan sistem radio yang memiliki panjang gelombang mikro. Banyak digunakan untuk sistem gelombang mikro (Telkom) dan sistem satelit termasuk untuk penyiaran televisi.