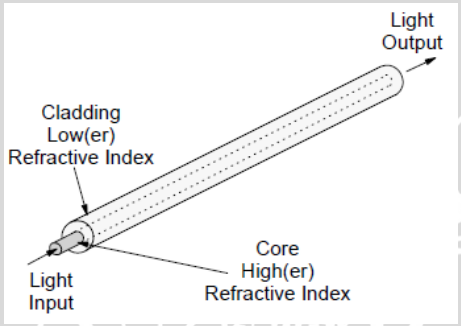
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Serat optik

Serat optik merupakan 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 lebih kecil dari sehelai rambut. 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, 2002:23). Struktur dasar serat optik dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur dasar serat optik
(**Sumber:** Dutton, 1998:25)

Pada prinsipnya, selubung tidak diperlukan dalam perambatan cahaya di sepanjang inti dari serat optik, tetapi memiliki beberapa manfaat. Selubung mengurangi rugi hamburan yang dihasilkan dari diskontinuitas dielektrik pada permukaan inti, menambah kekuatan mekanis pada serat optik, dan melindungi inti dari penyerapan kontaminasi yang ada pada permukaan (Keiser, 1991:27).

Indeks bias merupakan perbandingan kecepatan cahaya pada ruang hampa udara dengan kecepatan cahaya pada bahan. Kecepatan cahaya pada ruang hampa udara adalah $3x10^8$ meter per detik. Makin tinggi nilai indeks bias, makin lambat cahaya melewati bahan. Nilai indeks bias dapat ditentukan menggunakan persamaan (1) (Keiser, 1991:23) :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

dengan:

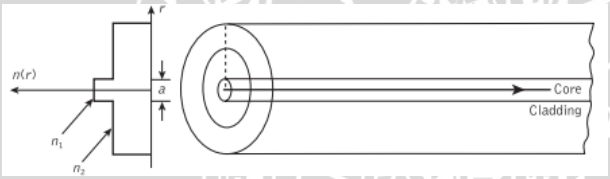
n = indeks bias material

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

v = kecepatan cahaya pada suatu material (m/s)

Kebanyakan sistem gelombang cahaya menggunakan serat optik sebagai saluran komunikasinya karena serat *silica* dapat mentransmisikan cahaya dengan *losses* hanya 0.2 dB/km. Bahkan daya optik berkurang hanya 1% setelah 100 km (Agrawal, 2002:17).

Serat optik *single mode* dikenal sebagai mode dasar dari serat optik. Serat *single mode* merupakan jenis khusus serat *step-index* yang memiliki ukuran inti (*core*) antara 7-10 mikron dan perbedaan indeks bias reaktif antara inti dengan selubung. Propagasi *single mode* adalah propagasi yang inti seratnya sangat kecil dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya sehingga cahaya tersebut hanya merambat ke satu arah, yaitu merambat lurus di tengah inti (Dutton, 1998:57). Gambar 2.2 menunjukkan perambatan cahaya pada serat optik *single mode*.



Gambar 2.2 Perambatan cahaya pada serat optik *single mode*

(**Sumber:** Senior, John, 2009:44)

Berdasarkan Hukum Snell, sudut kritis untuk *step-index* dinyatakan dalam (Keiser, 1991:31) :

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

dimana θ_c adalah sudut kritis, n_2 adalah indeks bias selubung, dan n_1 adalah indeks bias inti. Sudut pantul θ harus lebih besar atau sama dengan sudut kritis.

Pada *step-index*, hubungan antara indeks bias inti dan indeks bias selubung ditunjukkan dalam persamaan berikut (Keiser, 1991:30):

$$\Delta_s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3)$$

dengan:

Δ_s = selisih indeks bias pada *step-index*

n_1 = indeks bias inti serat

n_2 = indeks bias selubung

Keuntungan dari propagasi menggunakan *single mode* pada serat optik ialah dispersi sinyal yang disebabkan oleh perbedaan *delay* antara mode yang berbeda pada serat optik *multimode* dapat dihindari (Senior, John, 2009:54).

Permasalahan penting pada sistem komunikasi serat optik adalah dispersi yang menyebabkan pelebaran pada masing-masing pulsa optik di sepanjang perambatan. Apabila pulsa optik menyebar secara signifikan di luar *slot* bit yang dialokasikan, sinyal transmisi akan sangat rusak sehingga tidak mungkin dikembalikan menjadi sinyal aslinya dengan akurasi yang tinggi.

Masalah ini sangat parah pada kasus serat optik *multimode*, dimana pulsa menyebar dengan cepat (biasanya pada *rate* ~10 ns/km) dikarenakan perbedaan kecepatan berkaitaan dengan perbedaan mode serat. Oleh karena itu kebanyakan sistem komunikasi serat optik menggunakan serat optik *single mode* (Agrawal, 2002:17).

Berdasarkan Tabel 2.1, diameter inti pada *single mode* jauh lebih kecil dibandingkan dengan diameter inti pada *multimode*. Hal ini mengakibatkan koefisien dispersi pada *single mode* bernilai lebih kecil dibandingkan pada *multimode*.

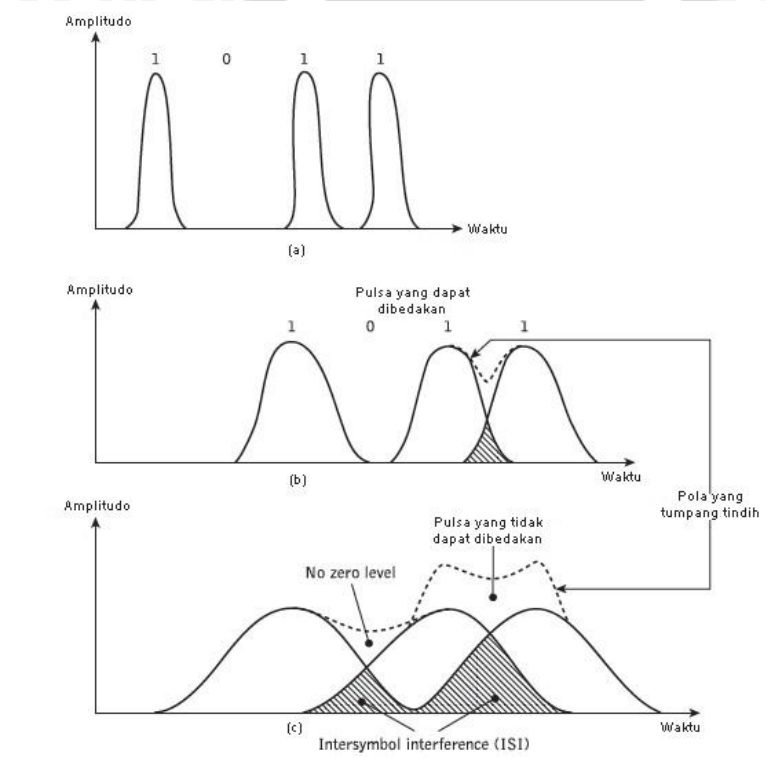
Tabel 2.1 Perbandingan Karakteristik Serat Optik

No.	Karakteristik	Jenis serat optik		
		Single mode	*Multimode*	
			Step-index	*Graded-index*
1.	Diameter inti (μm)	7 – 10	50 – 980	50 – 100
2.	Diameter selubung (μm)	125	125 – 1000	125 – 140
3.	Koefisien dispersi bahan ($ps.nm^{-1}.km^{-1}$)	0,9 – 20	100 – 120	0,9 – 120
4.	Lebar pita (MHz.km)	10^5	0,5 – 60	20 – 1500
5.	Rugi-rugi (dB/km)	0,1 – 0,7	3,0 – 160	0,7 – 7,0
6.	*Numerical Aperture*	-	0,15 – 0,47	0,19 – 0,31
7.	Banyaknya mode	1	>1	>1
8.	Penyambungan	Sulit	Mudah	Mudah

Sumber: Ming-Kang Liu, 1996; Muflihatin, 2002

2.2 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 menyebabkan pelebaran pulsa cahaya yang ditransmisikan di sepanjang saluran (Senior, John, 2009:105). Ilustrasi mengenai dispersi dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi pelebara pulsa cahaya saat menjalar di sepanjang serat optik: (a) sinyal masukan; (b) pelebaran pulsa; (c) Intersymbol Interference (ISI)
(**Sumber:** Senior, John, 2009:105)

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. Secara matematik dinyatakan dengan (Ming-Kang Liu, 2002:23) :

$$\tau_{fiber} = \sqrt{\tau^2_{material} + \tau^2_{waveguide} + \tau^2_{intermodal}} \qquad (4)$$

dengan:

τ_{fiber} = dispersi total serat (ps)

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

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

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

2.2.1 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 dispersif dari material pandu gelombang (*material dispersion*) dan juga efek panduan di dalam struktur serat (*waveguide dispersion*) (Senior, John, 2009:109).

Dispersi intramodal merupakan jumlah dari dispersi material dan dispersi pandu gelombang (Muflihatin, 2002:21):

$$\tau_{intramodal} = \tau_{material} + \tau_{waveguide} \quad (5)$$

dengan:

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

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

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

2.2.2 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, 2009:210). Persamaan untuk dispersi material ditunjukkan pada (DeCusatis, 2002:20) :

$$\tau_{material} = t_{dm} x\ \Delta_{\lambda}\ x\ D \quad (6)$$

dimana:

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

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

Δ_{λ} = lebar spektral sumber cahaya (nm)

D = panjang serat optik (km)

2.2.3 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, 2009:113). Persamaan untuk dispersi pandu gelombang yaitu (DeCusatis, 2002:21) :

$$\tau_{waveguide} = \frac{D}{c\lambda}(n_1 - n_2)t_{wg}\Delta_\lambda \quad (7)$$

dimana:

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

D = panjang serat optik (km)

n_1 = indeks bias inti

n_2 = indeks bias selubung

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

$$t_{wg} = \frac{4(1 - \ln v)}{v^2} \quad (8)$$

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

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (9)$$

a = jari-jari inti serat optik (μm)

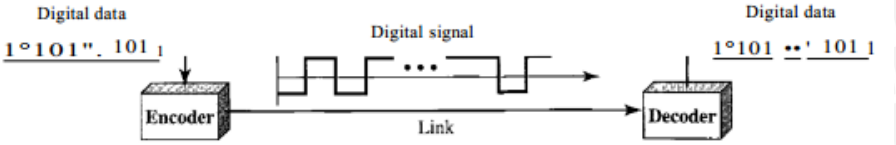
λ = panjang gelombang pusat pancaran (μm)

Δ_λ = lebar spektrum sumber cahaya (nm)

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

2.3 Line coding

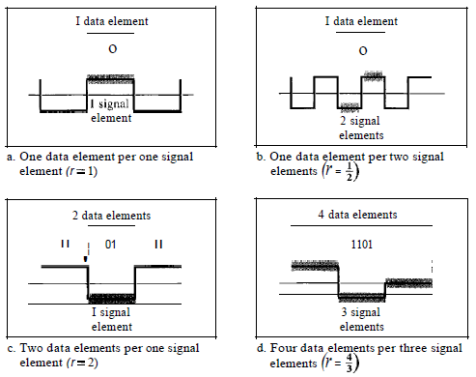
Line coding adalah proses konversi data digital menjadi sinyal digital. *Line coding* mengkonversi urutan bit menjadi sinyal digital. Gambar 2.4 menunjukkan proses *line coding*. Pada sisi pengirim, data digital dikodekan menjadi sinyal digital. Sedangkan pada sisi penerima, data digital dibuat ulang dengan mengembalikan ulang kode dari sinyal digital (Forouzan, B.A., 2007:101).



Gambar 2.4 *Line coding*

(**Sumber:** Forouzan, 2007:101)

Elemen data dan elemen sinyal berbeda. Dalam komunikasi data, tujuannya adalah untuk mengirimkan elemen data. Elemen data merupakan entitas terkecil yang dapat mewakili sepotong informasi (berupa bit). Dalam komunikasi data digital, elemen sinyal membawa elemen data. Elemen sinyal adalah unit terpendek dari sinyal digital. Dengan kata lain, elemen data merupakan sesuatu yang dibutuhkan untuk dikirim, sedangkan elemen sinyal adalah sesuatu yang dapat dikirimkan. Elemen data adalah sesuatu yang dibawa, sedangkan elemen sinyal adalah pembawa. Gambar 2.5 berikut menjelaskan secara singkat perbedaan antara elemen data dan elemen sinyal.



Gambar 2.5 Elemen sinyal *versus* elemen data

(**Sumber:** Forouzan, 2007:102)

Data rate menunjukkan jumlah elemen data (dalam satuan bit) yang dikirim dalam 1 detik. Satuannya adalah *bits per second* (bps). *Signal rate* adalah jumlah elemen sinyal yang dikirim dalam 1 detik. Satuannya adalah baud. Ada beberapa istilah yang umum digunakan dalam literatur. *Data rate* biasa disebut *bit rate*, sedangkan *signal rate* biasa disebut *pulse rate, modulation rate*, atau *baud rate*.

Salah satu tujuan dalam komunikasi data adalah meningkatkan *data rate* dan mengurangi *signal rate*. Meningkatkan *data rate* akan meningkatkan kecepatan transmisi dan mengurangi *signal rate* akan mengurangi penggunaan *bandwidth*.

Hubungan antara *data rate* dan *signal rate* (*bit rate* dan *baud rate*) tergantung pada nilai r dan pola data. Apabila pola data seluruhnya terdiri dari 1 atau 0, *signal rate* mungkin akan berbeda dengan pola data bolak-balik 0 dan 1. Untuk memperoleh rumus dari hubungan tersebut, perlu ditentukan tiga hal: yang terburuk, yang terbaik, dan rata-rata. Hal terburuk adalah saat maksimum *signal rate* dibutuhkan. Hal terbaik adalah saat minimum *signal rate* dibutuhkan. Dalam komunikasi data biasanya yang digunakan adalah

nilai rata-rata. Hubungan antara *data rate* dan *signal rate* dapat dirumuskan sebagai (Forouzan, 1991:103) :

$$S = c\ x\ N\ x\ \frac{1}{r}\ \text{(baud)} \qquad (10)$$

dimana:

S = jumlah elemen sinyal

c = *case factor* (nilainya bervariasi dalam tiap permasalahan)

N = *data rate* (bps)

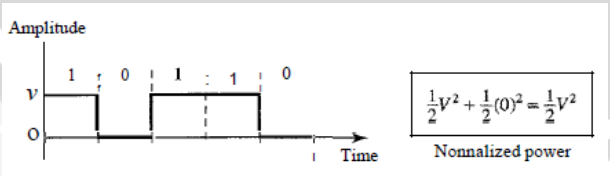
r = faktor yang ditentukan sebelumnya

Tiga tipe dasar *binary line code* yang umum digunakan pada komunikasi serat optik adalah *Return to Zero* (RZ) , *Non Return to Zero* (NRZ) dan *Phase Encoded* (PE) atau lebih dikenal dengan *Manchester*. Pada format pengkodean NRZ setiap data yang dikirim menempati periode bit secara penuh sedangkan pada RZ lebar pulsa dua kali lebih kecil daripada NRZ. Untuk format pengkodean *Phase Encoded* kedua hal itu digabungkan (Keiser, 1991:329).

2.3.1 Non Return to Zero (NRZ)

Pada umumnya, untuk mengirimkan sinyal digital adalah dengan menggunakan dua level tegangan untuk dua digit biner. Dengan kata lain tegangan negatif mewakili satu nilai biner dan level tegangan positif mewakili biner yang lainnya.

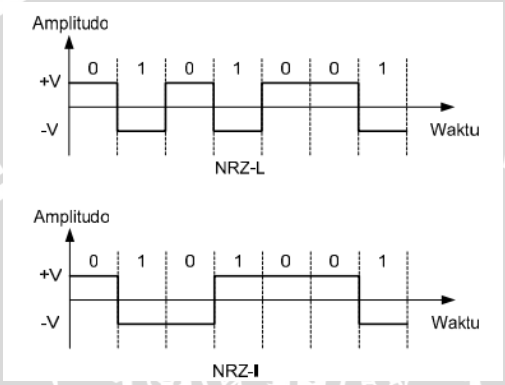
Gambar 2.6 menunjukkan skema unipolar pada NRZ. Pada skema unipolar, semua level sinyal berada pada satu sisi sumbu waktu, baik di atas maupun di bawah. Secara tradisional, skema unipolar didesain sebagaimana skema NRZ dimana tegangan positif menunjukkan bit 1 dan tegangan nol menunjukkan bit 0. Format ini disebut NRZ karena sinyal tidak kembali ke nol pada pertengahan bit.



Gambar 2.6 Skema NRZ unipolar
(**Sumber:** Forouzan, 2007:107)

Dibandingkan dengan pasangan polarnya, skema ini sangat mahal. Seperti yang terlihat, daya yang ternormalisasi lebih besar dua kali lipat daripada polar NRZ.

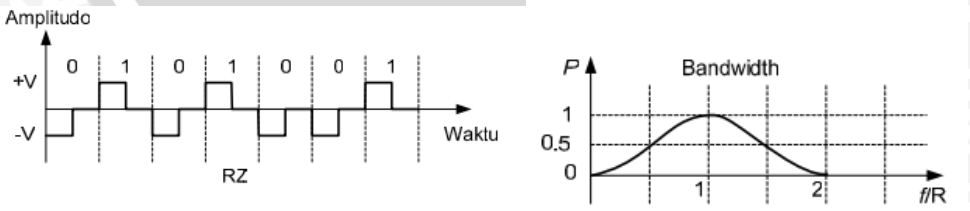
Pada skema polar, tegangan berada pada dua sisi sumbu waktu. Sebagai contoh, level tegangan untuk 0 adalah positif dan level tegangan untuk 1 adalah negatif. Pada encoding NRZ polar digunakan dua level amplitudo tegangan. Ada dua versi NRZ polar yaitu NRZ-L dan NRZ-I seperti yang terlihat pada Gambar 2.7. Pada variasi pertama, NRZ-L (NRZ-Level), level tegangan menentukan nilai dari bit. Pada variasi kedua, NRZ-I (NRZ-Invert), perubahan level tegangan menentukan nilai dari bit. Apabila tidak ada perubahan, bit-nya 0, sedangkan apabila ada perubahan maka bit-nya 1.



Gambar 2.7 Skema NRZ polar
(**Sumber:** Forouzan, 2007:107)

2.3.2 Return to Zero (RZ)

Masalah utama encoding NRZ terjadi saat *clock* pada sisi pengirim dan sisi penerima tidak sinkron. Sisi penerima tidak mengetahui kapan sebuah bit berakhir dan bit selanjutnya muncul. Kekurangan dari NRZ-L dan NRZ-I ini diperbaiki oleh pengkodean digital *return-to-zero* (RZ). RZ menggunakan tiga level tegangan yaitu tegangan positif, nol dan negatif seperti pada Gambar 2.8. Dengan demikian permasalahan munculnya komponen DC pada NRZ dapat dieliminasi oleh RZ.



Gambar 2.8 Pengkodean digital RZ dan karakteristik bandwidth RZ
(**Sumber:** Forouzan, 2007:109)

Pengkodean RZ selalu mengembalikan sinyal ke tegangan nol pada saat sinyal telah mencapai setengah durasi sinyal. Tapi karena RZ menggunakan dua buah elemen sinyal untuk merepresentasikan sebuah elemen data, hal ini berakibat pada kenaikan bandwidth sebanyak dua kali lipat dibandingkan dengan NRZ.

2.4 *Fiber Bragg Grating* (FBG)

Kaca pada serat optik dapat diubah menggunakan cahaya laser secara intens. Kenyataan ini mengarah pada suatu manufaktur yang disebut *Fiber Bragg Grating* (FBG). Gambar 2.9 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, konversi *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 interfensi 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 dari kisi-kisi ini diberikan pada persamaan (11) (DeCusatis, 2002:33) :

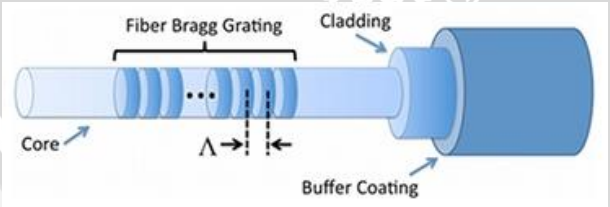
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n_{eff}} \qquad (11)$$

dimana:

Λ = periode kisi

λ = panjang gelombang yang dipantulkan (nm)

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

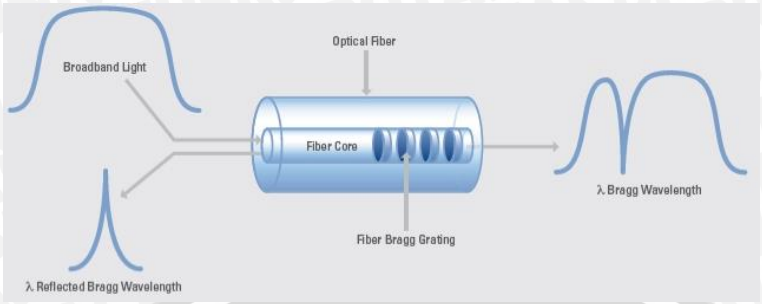


Gambar 2.9 Penerapan *Fiber Bragg Grating* pada serat optik

(**Sumber:** National Instrumen, 2011)

Gambar 2.10 merupakan prinsip kerja FBG. Suatu kisi serat optik memantulkan panjang gelombang mendekati panjang gelombang Bragg ($\lambda_B = 2n_{eff} . \Lambda$). 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, 2002:36).

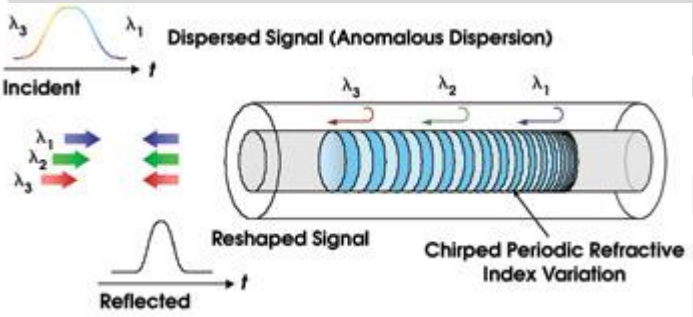


Gambar 2.10 Prinsip kerja FBG

(**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 penjalaran 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, 1999:311).



Gambar 2.11 Prinsip kerja *chirped* FBG sebagai kompensator dispersi

(**Sumber:** www.photonics.com)

Gambar 2.11 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).

Untuk medapatkan panjang kisi, L disesuaikan dengan *delay* refleksi dan *bandwidth* output kisi yang diinginkan (Muflihatin, 2002:40).

$$L = \frac{c.\Delta_{\lambda-g}.t_g}{2n_{eff}} \quad (12)$$

dimana:

L = panjang kisi (m)

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

$\Delta_{\lambda\text{-}g}$ = *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.

$$\Delta_{\lambda-g} = \Delta_{\lambda} \quad (13)$$

$\Delta_{\lambda\text{-}g}$ = bandwidth kisi (nm)

Δ_{λ} = 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.

$$t_g = \frac{\tau_{material}.D_{(FBG)}}{\Delta_{\lambda-g}} \quad (14)$$

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

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

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

$\Delta_{\lambda\text{-}g}$ = bandwidth kisi (nm)

Dispersi total serat optik setelah peletakan *chirped* FBG dapat dihitung dengan persamaan (15):

$$\tau_{fiber} = \sqrt{(t_g.\Delta_{\lambda-g})^2 + D^2(\tau^2_{waveguide} - \tau^2_{intermodal})} \quad (15)$$

τ_{fiber} = dispersi total serat (ps)

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

$\Delta_{\lambda\text{-}g}$ = bandwidth kisi (nm)

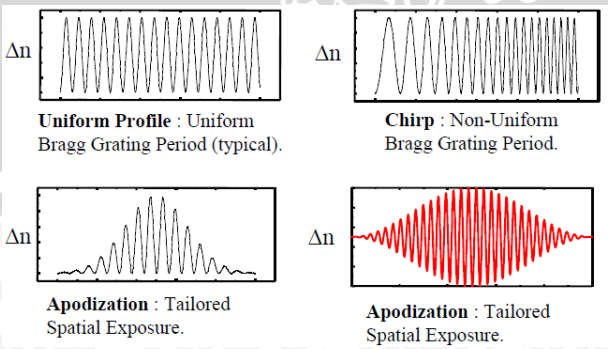
D = panjang serat optik (km)

$\tau_{waveguide}$ = 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, 2013:15). Jenis-jenis FBG berdasarkan perubahan indeks biasnya dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 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 kontinyu akan menjadikan perubahan secara kontinyu pula terhadap panjang gelombang yang dipantulkan dan akan didapatkan bentuk gelombang yang lebar.

Teknik kisi "*apodization*", yaitu amplitudo perubahan indeks bias kisi (Δn) berubah sepanjang kisinya agar dapat menekan panjang gelombang pada *sidelobe* yang tidak diinginkan, selain itu dipergunakan untuk mengatur bentuk spektrum *envelope* refleksinya (Edita Rosana, 2013:15).

2.5 Komponen komunikasi optik

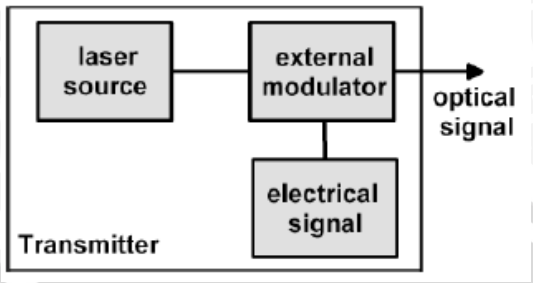
Pada umumnya, sistem komunikasi serat optik terdiri dari pengirim atau pemancar optik, media transmisi berupa serat optik, dan penerima optik. Berikut merupakan penjabarannya:

2.5.1 Pemancar optik

Peran pemancar optik menjadi penting dengan peningkatan *data rate* pada sistem. Pada saat pemancar optik berada pada kanal yang lebih rendah, *data rate* menjadi lebih sederhana dan lebih mudah untuk direalisasikan menggunakan modulasi langsung dari laser dioda. Realisasi menjadi lebih kompleks dengan menaikkan kanal *data rate*. Dengan demikian, persyaratan komponen elektrik dan optik pada pemancar optik ditingkatkan. Pemancar optik konvensional menggunakan modulasi amplitudo/intensitas dari cahaya laser, biasa dikenal dengan *on-off keying* (OOK), karena level sinyal yang berbeda untuk menandai dan memberikan jarak ditandai dengan adanya daya optik.

Modulasi amplitudo dapat direalisasikan secara langsung atau menggunakan modulator eksternal dari laser dioda. Untuk merealisasikan sistem transmisi dengan kanal *data rate* lebih besar dari 10 Gbps, modulasi eksternal mewakili solusi yang lebih baik karena dampak dari *laser internal chirp* dari sinyal optik dapat dikurangi secara efisien. Tetapi di sisi lain, kompleksitas dari pemancar optik meningkat. Modulasi eksternal direalisasikan dengan modulasi dari cahaya laser dalam modulator eksternal seperti pada Gambar 2.13. Modulator eksternal dapat berupa *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) atau *Electroabsorption Modulator* (EAM). Modulator eksternal dikendalikan oleh sinyal elektrik yang sesuai dengan *data rate*. Berdasarkan sinyal elektrik yang mengendalikan

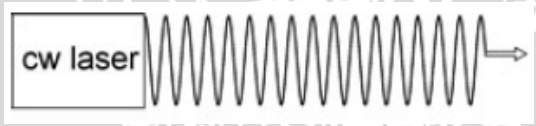
dan aturan operasional dari modulator eksternal, AM berbeda yang berbasis format modulasi dapat direalisasikan.



Gambar 2.13 Konfigurasi pemancar dengan modulasi eksternal
(**Sumber:** Hodžić, 2004:9)

2.5.1.1 *Continuous Wave* (CW) Laser

CW laser memancarkan gelombang elektromagnetik yang terus menerus seperti yang ditunjukkan paa Gambar 2.14. LASER merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.* Dalam pecobaan 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 2.14 CW laser
(**Sumber:** www.springer.com)

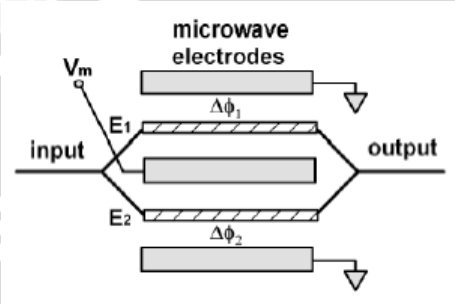
2.5.1.2 Mach-Zehnder Modulation (MZM)

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 LiNbO3 (*lithium niobate*) dan Mach-Zehnder (MZ) interferometer untuk modulasi intensitas. Dua titanium didifusikan ke pandu gelombang LiNbO3 dari dua lengan interferometer MZ. Indeks bias bahan elektro-optik seperti LiNbO3 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 π, 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 2.15.



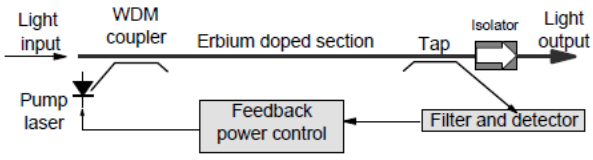
Gambar 2.15 Struktur Mach-Zehnder Modulation
(**Sumber:** Hodžić, 2004:11)

2.5.1.3 Panjang gelombang

Panjang gelombang elektromagnetik yang digunakan pada serat optik adalah pada panjang gelombang dimana atenuasi per kilometernya paling kecil. Pada umumnya dipilih panjang gelombang pada kisaran spectrum ultraviolet dan inframerah (biasanya sekitar 850 nm, 1300 nm, dan 1550 nm). Perlu diperhatikan bahwa semakin panjang gelombang yang digunakan, atenuasi per kilometer akan semakin kecil (Yorashaki Martha, 2011:8). Single mode tersedia untuk panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm. Pada penelitian ini digunakan adalah 1550 nm untuk mendapatkan atenuasi yang sangat kecil.

2.5.1.4 *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 (Er^{3+}). Gambar 2.16 merupakan ilustrasi dari EDFA.



Gambar 2.16 *Erbium Doped Optical Fiber Amplifier*
(**Sumber:** Dutton, 1998:159)

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

Agar prinsip ini dapat bekerja, dibutuhkan cara untuk membuat atom erbium berada pada kondisi paling tinggi energinya. Laser dioda pada diagram menghasilkan cahaya sorot dengan daya yang tinggi (antara 10 dan 200 mW) pada panjang gelombang sehingga ion erbium akan menyerapnya dan melompat ke kondisi paling tinggi (cahaya pada panjang gelombang 980 atau 1480 nm akan melakukan hal ini dengan cukup baik) (Dutton, 1998:160).

2.5.2 Penerima optik

Peran dari penerima optik adalah mendeteksi sinyal yang ditransmisikan transformasi *opto-electrical* dari sinyal yang diterima di *photodiode* (contohnya PIN dan APD). Selain itu, pemerataaan elektrik tambahan dilakukan bersama dengan penguatan sinyal elektrik memungkinkan pemrosesan sinyal lebih lanjut (contohnya *clock-recovery*) dan evaluasi kinerja (misalnya pegukuran kualitas).

Ada tiga karakteristik yang penting untuk diperhatikan pada suatu detektor optik, yaitu:

- Minimum Detection Power (P_d) yaitu daya optik minimum yang dapat dideteksi oleh detektor agar dapat membangkitkan arus listrik.
- Arus Cahaya (Ip) merupakan arus yang dibangkitkan pada tingkat daya optik minimum yang dapat dideteksi oleh detektor.
- Responsivity (ρ) merupakan perbandingan arus keluaran dengan daya optik masukan, dengan persamaan:

$$\rho = \frac{i}{P} \tag{16}$$

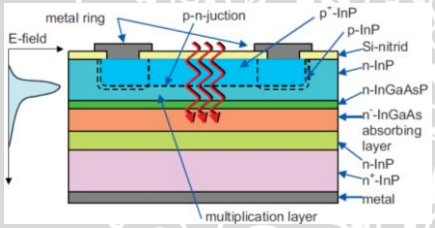
Detektor optik yang sering digunakan dalam komunikasi optik, yaitu *photodiode Positive Instrinsic Negative* (PIN) dan *Avalanche Photodiode* (APD). Secara umum perbandingan karakteristik antara keduanya dalam Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Perbandingan Karakteristik Detektor Optik

No.	Karakteristik	Jenis detektor optik	
		PIN	APD
1.	Responsivitas	0,35 – 0,55	50 – 120
2.	Noise	Kecil	Lebih besar
3.	Penguatan	1	150 – 250
4.	Arus cahaya	Kecil	Lebih besar
5.	Waktu jangkit (ns)	0,06 – 1	0,1 – 2

Sumber: Muflihatin, 2002:16

Pemilihan detektor optik diutamakan dibandingkan komponen-komponen lainnya karena dengan mengetahui detektor optik yang digunakan terlebih dahulu, kita dapat memastikan bahwa sinyal yang sampai ke bagian penerima masih dapat dideteksi dengan baik oleh detektor optik (Yorashaki Martha, 2011:39).



Gambar 2.17 Struktur APD secara umum
(**Sumber:** Ziemann, 2008: 342)

Avalanche Photodiode (APD) memiliki lapisan doped yang sangat tinggi dimana elektron yang dihasilkan berlipat ganda dan dipacu oleh medan elektrik lokal yang kuat. Penguatan internal dari suatu APD dapat mencapai nilai 400. Karena faktor pengali untuk tiap elektron dihasilkan tidak sama, APD menghasilkan noise tambahan. Pada penguat yang sebenarnya, noise dari penguat yang mengkuti pada umumnya melebihi jumlah noise pada *photodiode*. Karena APD telah menghasilkan penguatan yang tinggi sebelum tahap pertama, noise elektronik memiliki peran yang sangat kecil. Rata-rata penerima APD memiliki sensitivitas 10 dB lebih besar daripada penerima PIN (Ziemann, 2008: 341).

2.6 Parameter performansi

Parameter performansi merupakan parameter yang diamati untuk mengetahui kinerja yang dihasilkan oleh sistem. Pada penelitian ini parameter yang akan diamati adalah *bit error rate*, *Q-factor*, dan *loss*.

2.6.1 *Bit Error Rate* (BER)

BER adalah perbandingan banyaknya bit yang salah dengan banyaknya bit yang ditransmisikan. BER dalam sistem transmisi serat optik berkisar antara 10^{-6} – 10^{-10} (Keiser, 1991:275). Untuk menghitung BER pada sebuah sistem komunikasi terdapat beberapa cara. Secara teori dapat menggunakan perbandingan *error* bit (Eb) terhadap total bit yang ditransmisikan (Tb) dalam periode t detik.

$$BER = \frac{Eb}{Tb} \tag{17}$$

dimana:

Eb = *Error* bit

Tb = Total bit

Performansi sistem gelombang cahaya digital ditandai dengan *bit error rate* (BER). BER dapat ditentukan sebagai jumlah *error* dalam satu detik. BER biasanya digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan rata-rata bit yang salah. Oleh karena itu, BER senilai 10^{-6} setara dengan rata-rata satu *error* per jutaan bit. Kebanyakan gelombang cahaya menentukan BER 10^{-9} sebagai persyaratan operasi. Beberapa bahkan menggunakan persyaratan BER hingga 10^{-14}.

2.6.2 Q-factor

Kriteria *Q-factor* untuk evaluasi kinerja pada sistem transmisi optik sering digunakan dalam kombinasi dengan pengukuran BER memungkinkan representasi terkait statistik noise secara efisien.

Hubungan antara BER dan Q-factor:

$$BER = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{18}$$

Di sisi lain, *Q-factor* dapat ditandai sebagai fungsi dari *optimum decision threshold* (I_D).

$$Q = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} \tag{19}$$

dengan :

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (20)$$

Q-factor = 6 sesuai dengan BER = 10^{-9}. Untuk perhitungan *Q-factor* yang benar, jumlah minimum dari bit yang disimulasikan harus ditentukan melalui beberapa perhitungan Q dengan menaikkan panjang urutan bit.

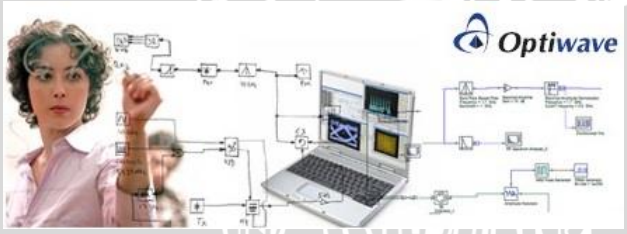
2.6.3 Loss

Losses pada serat optik melambangkan faktor yang membatasi kinerja sistem komunikasi karena menyebabkan daya sinyal yang diterima oleh penerima berkurang (Agrawal, 2002:55). *Optical loss* diukur dalam "dB" sedangkan daya optik diukur dalam "dBm".

Pengukuran loss pada umumnya diukur dalam dB karena dB adalah perbandingan dari dua level daya, dimana salah satunya dijadikan sebagai nilai referensi. Satuan dB merupakan skala logaritmik dimana tiap 10 dB melambangkan perbandingan 10 kali. Persamaan sebenarnya yang digunakan untuk menghitung loss dalam dB adalah (www.cisco.com) :

$$Loss\ (dB) = P_{in} - P_{out} \quad (21)$$

2.7 *Software* OptiSystem



Gambar 2.18 *Software* simulasi OptiSystem
(**Sumber:** www.optiwave.com)

OptiSystem merupakan piranti lunak desain yang memungkinkan pengguna untuk merencanakan, menguji, dan mensimulasikan jaringan optik modern (www.optiwave.com, diakses Oktober 2015). *Optisystem* menyediakan virtual komponen optik yang lengkap dan komprehensif sehingga pengguna dapat mendesain dan menganalisa sistem jaringan sesuai dengan kondisi nyata. Hal ini juga dimaksudkan untuk penghematan biaya, karena tidak perlu mengadakan komponen-komponen jaringan optik nyata yang *notabene* memiliki harga yang sangat mahal (Setiyadi, 2012).