

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian [1] meneliti tentang pemodelan sistem DWDM terhadap pengaruh yang ditimbulkan oleh efek *nonlinier* FWM. Terdapat tiga skenario dalam melakukan penelitian ini Skenario pertama, dengan mengubah variabel nilai *bitrate* dan jarak *link*. Pada skenario kedua, mengubah variabel spasi kanal. Pada skenario ketiga, mengubah variabel daya *transmitter*. Hasil dari penelitian ini adalah *efek nonlinier* FWM dapat menyebabkan dampak buruk bagi sistem DWDM dikarenakan hampir semua nilai dari *Q-Factor* yang dihasilkan pada penelitian ini dibawah standar yang telah ditetapkan tidak lebih dari 6.

Penelitian [2] meneliti tentang pengaruh efek *nonlinier* pada sistem CWDM yang menggunakan panjang gelombang berkisar dari 1460 nm sampai dengan 1625 nm dengan spasi panjang gelombang 20 nm, penambahan penguat optik dilakukan apabila terjadi pelemahan sinyal pada kilometer tertentu. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan meneliti jaringan CWDM dengan panjang tertentu kemudian melakukan penambahan penguat optik EDFA pada jarak terjadinya pelemahan sinyal serta mengamati nilai *Q-Factor* dan BER pada jaringan CWDM dengan efek *nonlinier* dan tidak ada efek *nonlinier*. Hasil yang diamati dari penelitian ini adalah pada jaringan CWDM dengan penambahan penguat EDFA baik tanpa efek *nonlinier* dan dengan efek *nonlinier* menghasilkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan jaringan CWDM tanpa penguat dengan efek *nonlinier* atau tanpa efek *nonlinier*.

Penelitian [3] meneliti tentang analisis efek *non linier* SPM pada komunikasi serat optik menggunakan *OptiSystem*. Pada penelitian ini menggunakan model rancangan yang digunakan adalah model sistem komunikasi serat optik yang di dalamnya terdapat suatu efek *nonlinear*. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti performansi pada sistem komunikasi serat optik yang terdapat efek *nonlinear*, dan untuk parameter yang akan diuji dan dianalisis adalah perubahan spektrum sebelum dan setelah efek *nonlinear self-phase modulation*, BER dan *Q-factor*. pada penelitian ini menggunakan *light source* atau sumber cahaya yaitu CW laser dengan variasi daya *input*-nya, sedangkan bagian penerima pada sistem ini *detektor* optik yang digunakan

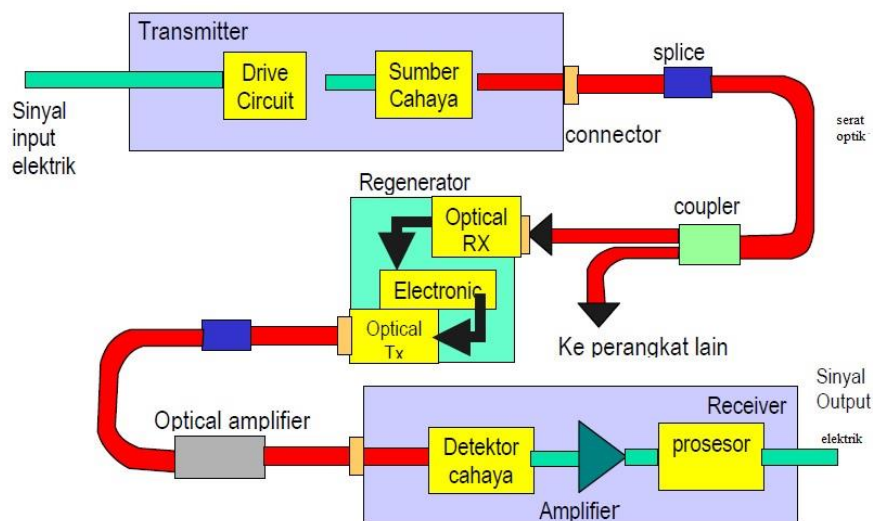
adalah *photodetector* PIN. Untuk panjang fiber optik yang digunakan sepanjang ada beberapa macam, dan pada *bitrate* menggunakan dua nilai yaitu 10 dan 40 Gbps. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, dapat diketahui baik atau tidaknya performansi sistem komunikasi serat optik tersebut jika di dalamnya terdapat suatu efek *nonlinear*.

Penelitian [4] meneliti tentang analisis efek *non linier* FWM pada komunikasi serat optik menggunakan *OptiSystem*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah simulasi. Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan 2 skenario. Skenario pertama dengan mengubah variabel atau parameter *bitrate* dan jarak *link*, sehingga dapat diketahui sinyal mana yang bagus untuk digunakan pada *link Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), Setelah simulasi skenario selesai, sama seperti skenario sebelumnya hasil *Q-factor* dari setiap kanal yang bisa dilihat di BER analyzer, nilai-nilai *Q-factor* yang didapat dijumlahkan dan diambil rata-rata hasilnya. *link* yang mempunyai nilai rata-rata *Q-factor* terbesar yang diambil untuk dianalisis karena sudah melalui proses pengoptimalan sehingga nilai *Q-factor* yang buruk bisa diperbaiki dengan skenario yang sudah dilakukan. Hasil dari penelitian ini adalah efek *non linear Four Wave Mixing* membawa dampak yang sangat buruk bagi performansi sistem komunikasi serat optik di *link Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), terlihat dari hampir semua nilai *Q-factor* masih belum memenuhi standar nilai kelayakan sistem.

## **2.2 DASAR TEORI**

### **2.2.1 Sistem Transmisi Optik**

Sistem Komunikasi Serat Optik (SKSO) adalah sistem komunikasi untuk menyalurkan sinyal dari sumber informasi ke objek tujuan dengan menggunakan media transmisi serat optik. Serat optik telah menjadi pengganti media transmisi lain yaitu kabel koaksial karena kemampuannya untuk menyalurkan informasi dengan kapasitas yang jauh lebih besar dan memiliki tingkat kehandalan yang tinggi. Sekarang seluruh komunikasi data menjadi hal yang penting, dan semakin majunya teknologi semakin dibutuhkan alat transmisi yang mendukung laju data yang cepat dan dapat menghadapi banyak layanan. Maka, serat optik merupakan pilihan yang tepat untuk melayani kebutuhan tersebut karena memiliki lebar pita yang cukup besar.



**Gambar 2.1 Link Sistem Komunikasi Serat Optik[7].**

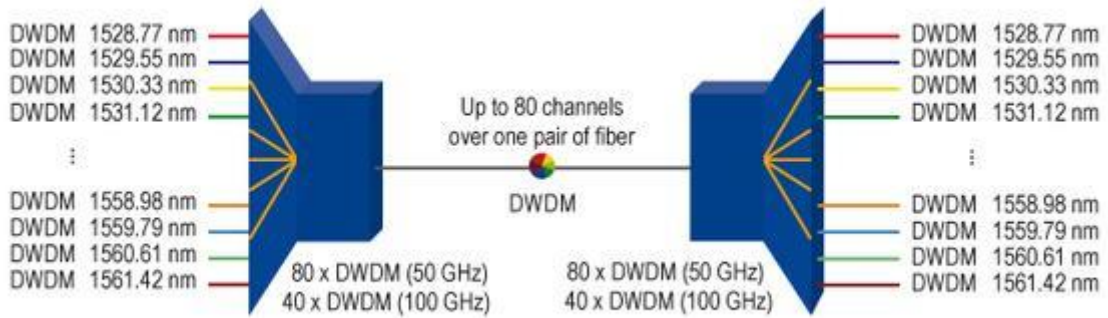
Seperti yang bisa dilihat pada Gambar 2.1, sistem komunikasi serat optik memiliki sejumlah komponen. Pada suatu komponen dasarnya yaitu adalah untuk mengkonversi sinyal elektrik menjadi sinyal laser di *transmitter* lalu dikonversi lagi menjadi sinyal elektrik di *receiver*. Pada komunikasi serat optik sangat penting untuk mengukur jarak yang ditempuh, karena sistem komunikasi optik jarak yang ditempuh oleh suatu sinyal bergantung juga pada jenis multiplexer yang digunakan[1].

### **2.3 Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)**

Jenis WDM yang digunakan dalam penelitian ini adalah DWDM. *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) merupakan suatu teknik transmisi yang memanfaatkan cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda-beda sebagai kanal-kanal informasi, sehingga setelah dilakukan proses *multiplexing* seluruh panjang gelombang tersebut dapat ditransmisikan melalui sebuah serat optik. Menurut definisi, teknologi DWDM dinyatakan sebagai suatu jaringan transport yang memiliki kemampuan untuk membawa sejumlah panjang gelombang (4, 8, 16, 32, dan seterusnya) dalam satu fiber tunggal. Teknologi DWDM beroperasi dalam sinyal dan domain optik memberikan fleksibilitas yang cukup tinggi untuk memenuhi kebutuhan akan kapasitas transmisi yang besar dalam jaringan. Kemampuan dalam hal ini akan terus berkembang yang ditandai dengan semakin banyaknya jumlah panjang gelombang yang mampu untuk ditransmisikan dalam satu fiber[1].

Pada dasarnya teknologi WDM memiliki prinsip kerja yang sama dengan media transmisi yang lain yaitu mengirimkan informasi dari suatu tempat ke tempat lain. Namun, dalam teknologi ini pada suatu kabel atau serat optik dapat dilakukan

pengiriman secara bersamaan banyak informasi melalui kanal yang berbeda. Setiap kanal ini dibedakan dengan menggunakan prinsip perbedaan panjang gelombang yang dikirimkan oleh sumber informasi. Sinyal informasi yang dikirimkan awalnya dirubah menjadi panjang gelombang yang sesuai dengan panjang gelombang yang tersedia pada kabel serat optik kemudian 9 ditransmisikan pada satu fiber. Spasi kanal yang digunakan menurut ITU adalah 0.2 nm, 0.4 nm, 0.8 nm, dan 1.6 nm[5].



**Gambar 2.2 Panjang Gelombang DWDM[9]**

### 2.3.1 Komponen Penting Pada DWDM

Pada teknologi DWDM, terdapat beberapa komponen utama yang harus ada untuk mengoperasikan DWDM dan agar sesuai dengan standar kanal ITU sehingga teknologi ini dapat diaplikasikan pada beberapa jaringan optik seperti SONET dan yang lainnya. Komponen-komponennya adalah sebagai berikut:

a. *Transmitter*

*Transmitter* yaitu komponen yang menjembatani antara sumber sinyal informasi dengan multiplexer pada system DWDM. Sinyal dari transmitter ini akan dimultipleks untuk dapat ditransmisikan.

b. *Receiver*

*Receiver* yaitu komponen yang menerima sinyal informasi dari *demultiplexer* untuk dapat dipilah berdasarkan macam-macam informasi[2].

c. DWDM terminal *multiplexer*.

Terminal *mux* sebenarnya terdiri dari *transponder converting wavelength* untuk setiap sinyal panjang gelombang tertentu yang akan dibawa. *Transponder converting wavelength* menerima sinyal *input* optik (sebagai contoh dari system SONET atau yang lainnya), mengubah sinyal tersebut menjadi sinyal optik dan mengirimkan kembali sinyal tersebut menggunakan pita laser 1550 nm. Terminal *mux* juga terdiri dari multiplexer optikal yang mengubah sinyal 1550 nm dan

menempatkannya pada suatu fiber SMF-28[10].

d. *Intermediate optical terminal (amplifier)*

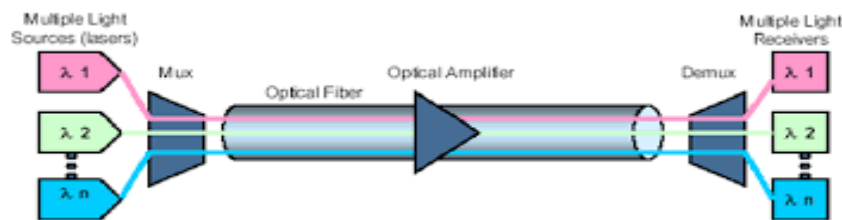
Komponen ini merupakan *amplifier* jarak jauh yang menguatkan sinyal dengan banyak panjang gelombang yang ditransfer sampai sejauh 140 Km atau lebih. Diagnostik optikal dan *telemetry* dimasukkan di sekitar daerah *amplifier* ini untuk mendeteksi adanya kerusakan dan pelemahan pada fiber. Pada proses pengiriman sinyal informasi pasti terdapat atenuasi dan dispersi pada sinyal informasi yang dapat melemahkan sinyal.

e. DWDM terminal *demux*

Terminal ini mengubah sinyal dengan banyak panjang gelombang menjadi sinyal dengan hanya 1 panjang gelombang dan mengeluarkannya ke dalam beberapa fiber yang berbeda untuk masing- masing *client* untuk dideteksi. Sebenarnya *demultiplexing* ini bertindak pasif, kecuali untuk beberapa *telemetry* seperti system yang dapat menerima sinyal 1550 nm[11].

F. *Optikal supervisory channel*.

Ini merupakan tambahan panjang gelombang yang selalu ada di antara 1510 nm-1310 nm. OSC membawa informasi optik *multi wavelength* sama halnya dengan kondisi jarak jauh pada terminal optik atau daerah EDFA. Jadi OSC selalu ditempatkan pada daerah *intermediate amplifier* yang menerima informasi sebelum dikirimkan kembali[12].



**Gambar 2.3 Ilustrasi tata letak komponen pada DWDM[11].**

## 2.4 Efek *Nonlinier*

Efek *nonlinear* pada jaringan komunikasi optik terjadi ketika indeks bias dalam serat optik berinteraksi dengan cahaya transmisi. Efek *nonlinier* yang terdapat pada bahan campuran silika lebih lemah jika dibandingkan dengan material yang lainnya. Fenomena yang terjadi dengan efek *nonlinier* ternyata dapat bersifat bertolak belakang. Karena efek *nonlinier* yang sama dapat menghambat beberapa fungsi penting, namun efek lainnya adalah dapat mengatur *bandwidth bottleneck*

dari proses pensinyalan untuk dapat dikembangkannya kecepatan yang lebih tinggi dari jaringan optik yang sekarang.

Interaksi daya yang terjadi pada medium bias berhubungan dengan *Kerr effect*, dimana penyebab dari *Kerr effect* adalah indeks bias yang berubah-ubah akibat adanya intensitas daya optik. Fenomena indeks bias yang terjadi pada *kerr effect* ditunjukkan pada rumus berikut [13]:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.1)$$

Dimana keterangan rumus diatas adalah :

- $n$  adalah indeks bias reaktif,
- $n_0 = 1,5$
- $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$  (indeks *non-linier*) dan
- $I$  = Intensitas daya pada optik

$n_{eff}$  adalah *effective refractive index*,  $n_0$  adalah *indeks bias* dari serat optik dan  $n_2$  adalah *indeks bias nonlinier* dan  $I$  adalah intensitas daya pada optik. Perubahan pada indeks bias berbanding lurus dengan intensitas cahaya, dan menyebabkan adanya sinyal pada fasa. Berikut ini adalah persamaan modulasi *fasa nonlinier* pada optik. Persamaan modulasi *fasa nonlinier* tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q_{NL} = \frac{2\pi n_2 I L}{\lambda} \quad (2.2)$$

Dimana keterangan rumus diatas adalah :

- $N$  adalah indeks bias reaktif,
- $L$  = panjang propagasi ideal *lossless*
- $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$  (indeks *non-linier*)
- $I$  = Intensitas daya pada optik
- $\lambda$  = propagasi cahaya

Sifat *non-linear* pada fiber optik dibagi menjadi 2 kategori, yaitu *stimulated scattering (Raman and Brillouin)* dan *Optical Kerr Effect* yang menyebabkan perubahan indeks bias terhadap daya optik (*non-linear refractive index*). *Stimulated scattering* menyebabkan kebergantungan *gain* atau *loss* terhadap intensitas,

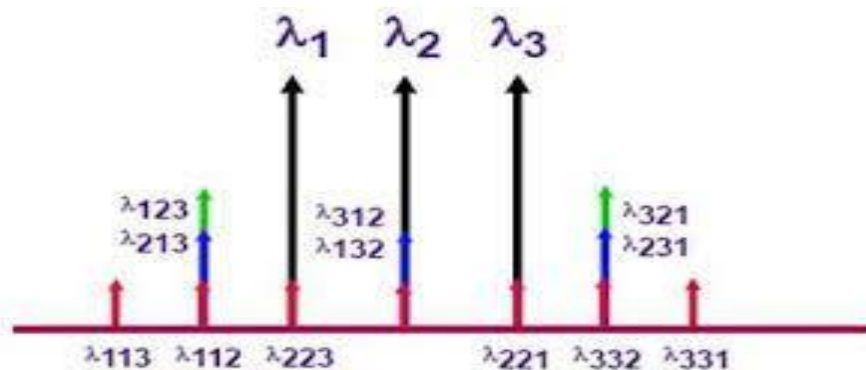
sedangkan *nonlinear refractive index* menyebabkan pergeseran *fase* yang bergantung pada sinyal optik *Self Phase Modulation* (SPM), *Cross Phase Modulation* (XPM) dan *Four Wave Mixing* (FWM). Perbedaan utama antara *stimulated scattering* dan *Kerr effect* adalah *stimulated scattering* memerlukan batas level daya untuk dapat terjadi sedangkan *Kerr effect* tak memerlukannya. Sebuah pulsa yang merambat di dalam *non-linear* fiber optik akan mengalami efek *non-linear* dari fiber optik[3].

Berdasarkan intensitas dari indeks bias didapatkan 3 efek, yaitu *Self-Phase modulation* (SPM), *Cross-Phase modulating* (XPM), dan *Four-Wave mixing* (FWM). Masing-masing dari 3 efek didalamnya memiliki penyebab yang berbeda-beda[14].

## A. Jenis Efek *Non-linear* Berdasarkan Intensitas Dari Indeks Bias

### 1. *Four Wave Mixing*

*Four Wave Mixing* (FWM) adalah suatu efek yang menjadi masalah bagi jaringan komunikasi optik [1]. FWM merupakan fenomena intermodulasi didalam efek *nonlinear* jaringan optik. Interaksi antara dua panjang gelombang menghasilkan dua *ekstra* panjang gelombang pada sinyal transmisi. Sinyal baru tersebut muncul akibat adanya *indeks bias nonlinier* pada serat optik sehingga mengakibatkan termodulasinya sinyal baru yang memiliki nilai spektrum frekuensi yang hampir sama dengan spektrum frekuensi informasi[14].



**Gambar 2.4** Spektrum frekuensi akibat FWM[1]

FWM terjadi jika ada tiga pulsa cahaya yang ditransmisikan dan memiliki nilai spektrum frekuensi berbeda, ditransmisikan melalui satu serat optik secara bersama-sama. Pada saat proses tersebut terbentuk spektrum frekuensi yang berinteraksi dan membangkitkan pulsa baru, Gambar 2.4 menunjukkan kemunculan 4 panjang gelombang baru yang tidak diinginkan diluar panjang gelombang yang berisi

informasi Tiga lamda yang berinteraksi jika dituliskan dalam persamaan adalah sebagai berikut :

$$\lambda_D = \lambda_A \pm \lambda_B \pm \lambda_C \text{ dimana } A \neq B \neq C \quad (2.3)$$

Dimana keterangan rumus diatas adalah :

- $\lambda_D$  = Gelombang baru
- $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  = Panjang gelombang pada efek *nonlinier* FWM

Jika ada tiga panjang gelombang dengan notasi  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  yang ditransmisikan dalam satu serat optik, maka ketiga panjang gelombang tersebut menurut persamaan (2.5) akan saling berinteraksi dan menimbulkan panjang gelombang baru ( $\lambda_D$ )[1].

Tiga lamda yang berbeda dan saling berinteraksi akan menghasilkan sebuah lamda yang baru yang mirip dengan lamda sinyal informasi. Lamda yang terbentuk akibat dispersi memiliki panjang gelombang yang hampir sama dengan sinyal aslinya, sehingga akan sulit untuk mem-filter lamda tersebut. Lamda yang terbentuk juga diakibatkan oleh spasi kanal dan dispersi pada serat. Sehingga semakin kecil spasinya, maka semakin besar FWM-nya[4].

Jika dispersi semakin berkurang, maka FWM akan semakin meningkat karena dispersi merupakan perlawanan dari *efektifitas mixing*. Secara umum, maka bisa dirumuskan sebagai berikut[1] :

$$M = N^2/2 (N - 1) \quad (2.4)$$

Dimana keterangan rumus diatas adalah :

- N = banyaknya input panjang gelombang
- M = banyak *crossing product*

FWM menghasilkan terbatasnya perfomasi dari semua jaringan optik termasuk pada *link* DWDM. Jumlah dari FWM akan meningkat sebanding dengan peningkatan pada jumlah lamda yang semakin banyak yang telah dijelaskan sebelumnya. Jika FWM ini terjadi pada *link* DWDM maka akan muncul panjang gelombang yang akan mengganggu sinyal informasi yang akan dikirimkan serta mengganggu nilai akurasi dari penerima dan menyebabkan tinggi nya nilai *Bit Error Rate* (BER)[14].

## 2. Self Phase Modulation (SPM)

*Self-Phae Modulation* (SPM) adalah munculnya modulasi baru yang



ditimbulkan oleh indeks bias *non-linear* pada orde ketiga. *Self-Phase Modulation* adalah salah satu konsekuensi efek yang terjadi dari *kerr effect*. SPM berarti gelombang cahaya pada serat optik mengalami *phase delay non-linear* yang berasal dari intensitasnya sendiri. Sebuah gelombang cahaya yang sangat pendek, ketika berjalan pada medium akan menstimulasi berbagai indeks bias pada medium berdasarkan *kerr effect*.

Jika intensitas bergantung pada waktu seperti halnya gelombang yang bisa di modulasi, maka modulasi fasa ini terjadi bergantung pada waktu. Variasi fasa terhadap waktu yang menimbulkan spektrum frekuensi baru. dengan persamaan perubahan yang terjadi pada modulasi fasa terhadap pergeseran waktu menyebabkan munculnya spektrum frekuensi baru[3].

### **3. Cross Phase Modulation (XPM)**

Intensitas daya mempengaruhi indeks bias *non-linear* membawa pada fenomena efek *non-linear* lain yang disebut *Cross Phase Modulation (XPM)*. Ketika dua atau lebih sinyal ditransmisikan secara simultan XPM selalu ditemani SPM. XPM membawa sebagian daya dari sinyal lain untuk memodulasi sinyal baru. Sinyal yang dihasilkan XPM ini bersifat tidak seimbang sehingga bisa merusak bentuk sinyal informasi.

XPM mengurangi performansi sistem melalui mekanisme yang hampir sama dengan SPM, yaitu frekuensi *chirp* dan dispersi. XPM dapat merusak performansi sistem pada lamda dengan jumlah besar[2].

## **B. Jenis Efek Non-linear Berdasarkan Stimulated Scattering**

### **1. Stimulated Raman Scattering (SRS)**

Proses hamburan *Raman* menjadi terstimulasi jika daya pompa melebihi nilai ambang batas. SRS dapat terjadi pada arah maju dan mundur pada serat optik. Secara fisik, pemukiman pompa dan dengan cahaya yang tersebar di dua arah ini menciptakan komponen *frekuensi* pada *frekuensi* denyut  $\omega_p - \omega_s$ , yang bertindak sebagai sumber yang mendapatkan osilasi molekuler. Sejak amplitudo gelombang yang tersebar meningkat sebagai respons terhadap osilasi ini, yang positif *loop* umpan balik masuk.

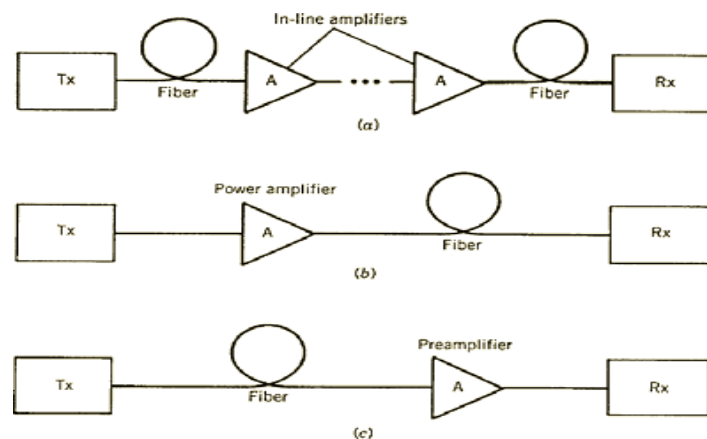
### **2. Stimulated Brillouin Scattering (SBS)**

Efek *stimulasi Brillouin scattered (SBS)* dalam profil *gain* SBS memiliki *bandwidth* frekuensi yang relatif sempit (dari urutan 100 MHz untuk serat tipikal)

yang berarti tidak menyebabkan efek kopling silang di antara saluran sinyal WDM. SBS mengarah melalui interaksi antara sinyal pompa optik dan gelombang akustik dalam serat ke pengaturan gelombang stimulasi yang distimulasi (*Stokes*) yang merambat dengan frekuensi 11 GHz relatif terhadap pompa. Proses *non-linear* terstimulasi lainnya (FWM, SRS) adalah proses pita lebar [*bandwidth* dalam kisaran ratusan GHz (FWM) hingga orde 12 THz (SRS)] di mana gelombang terstimulasi *copropagating* dengan sinyal pompa[3].

### 2.5 Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA)

*Erbium-doped Fiber Amplifiers* atau yang disingkat EDFA adalah perangkat yang memperkuat sinyal optik. Prinsipnya, laser digunakan untuk memompa serat *erbium doped* dan atom - atom di serat akan berpindah pita energi dari tingkat terendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Sinyal optik yang melewati serat *erbium doped* berfungsi sebagai perangsang sehingga terjadi emisi yang melepaskan energi foton. Energi tersebut bersifat koheren dan dengan demikian terjadi penguatan sinyal secara optik. EDFA terbagi atas 3 jenis, yaitu *Power (Booster) Amplifier*, *In-Line Amplifier*, dan *Pre-Amplifier*. akan dideteksi oleh *photodetector*. Sebagaimana gambar dibawah ini :



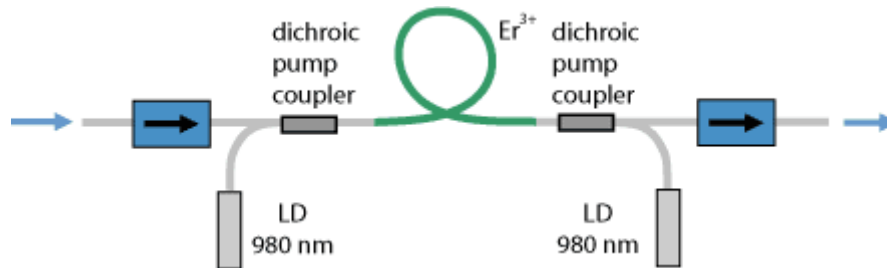
- a) . EDFA sebagai *in-line amplifier*
- b) . EDFA sebagai *booster amplifier*
- c) . EDFA sebagai *pre-amplifier*

**Gambar 2.5 Rangkaian EDFA[15].**

*Booster Amplifier* digunakan untuk meningkatkan daya sinyal yang keluar dari *transmitter* dan diletakkan setelah *multiplexer*, *In-Line Amplifier* digunakan untuk meningkatkan daya sinyal yang sedang bertransmisi di dalam serat optik dan diletakkan pada serat optik, sedangkan *Pre-Amplifier* digunakan untuk meningkatkan daya sinyal yang akan masuk ke *demultiplexer* yang selanjutnya akan

dideteksi oleh *photodetector*[15].

Proses penguatan optik dengan menggunakan EDFA dapat dilihat pada Gambar 2.6. Serat aktif dipompa dengan cahaya dari dua dioda laser (pompa dua arah). Kebanyakan pompa optik memiliki panjang gelombang sekitar 980nm atau 1450nm, dan menghasikan *ion erbium* ( $Er^{3+}$ ) dimana mereka akan menguatkan cahaya pada panjang gelombang 1.5- $\mu\text{m}$  melalui emisi terstimulasi.



**Gambar 2.6 Skema Penguatan Optik Menggunakan EDFA**

Pada proses setup juga dilakukan proses "*pig-tailed*" (*fiber-coupled*). Isolator mencegah datangnya cahaya emisi spontan hasil dari proses sebelumnya yang mungkin dapat menghancurkan cahaya yang telah dikuatkan. Selain isolator banyak komponen lainnya yang terdapat pada penguat optik. Misalnya *fiber coupler* dan *photodetectors* untuk memantau tingkat daya optik, terdapat juga pompa dioda laser dengan kontrol elektronik untuk mendapatkan penguatan yang merata. Berbagai komponen optik pasif dapat dikombinasikan ke dalam sirkuit *lightwave* planar[15].

## 2.6 Detektor Optik

### 2.6.1 Photodetector APD dan Prinsip Kerjanya

*Photodetector* terbagi menjadi 2 jenis yaitu *photodetector* PIN dan *photodetector* APD. Dalam penelitian ini digunakan *photodetector* APD sebagai detektor optik. APD secara internal melipat gandakan arus foto sinyal primer sebelum memasuki sirkuit penguat sehingga meningkatkan sensitifitas penerima. Mekanisme pelipatgandaan elektron/*hole* disebut *impact ionization*. *Carrier* baru yg dibangkitkan juga dipercepat oleh medan listrik kuat, sehingga menguatkan energi untuk *impact ionization* selanjutnya. Fenomena tersebut disebut efek *avalanche*. Dibawah tegangan *break down*, jumlah *carrier* yang dibangkitkan terbatas, sedangkan diatas tegangan *breakdown carrier* yg dibangkitkan tak terbatas[16].

Pada penggunaan normal RAPD bekerja ada modus *depleted* penuh. Cahaya memasuki *device* melalui daerah  $p^+$  dan diserap bahan  $\pi$  yg bekerja sebagai daerah pengumpul *carrier* yang dibangkitkan oleh *photon*. Saat diserap *photon* memberikan energi, sehingga membangkitkan pasangan *elektron-hole* yg kemudian dipisahkan oleh medan listrik di daerah  $\pi$ . Elektron yang dibangkitkan oleh *photon* bergeser dari daerah  $\pi$  ke  $pn^+$  *junction* yang terdapat medan listrik kuat. Pada daerah medan listrik kuat terjadi pelipat gandaan *carrier*[1].

## 2.7 Q-Factor dan Bit Error Rate (BER)

### 2.7.1 Q-Factor

*Q-factor* merupakan faktor kualitas yang menentukan bagus tidaknya kualitas sinyal optik dalam sistem DWDM. Standar ukuran *Q-factor* terkhusus DWDM, minimal yang baik adalah 6 atau  $10^{-9}$  *Bit Error Rate* (BER)[16].

### 2.7.2 Bit Error Rate (BER)

*Bit Error Rate* (BER) merupakan rasio perbandingan bit yang mengalami *error* dengan keseluruhan bit yang dikirim. Standar nilai BER dalam sistem DWDM yaitu dengan nilai minimal  $10^{-9}$ . Apabila jumlah bit *error* adalah  $N_E$  dan jumlah *bit* dikirim adalah  $N_T$  maka :

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.5)$$

Pada jaringan komunikasi optik secara umum, nilai BER yang harus dipenuhi adalah  $BER \ 10^{-9} - 10^{-12}$ . Artinya, tiap  $10^9$  hingga  $10^{12}$  bit data yang dikirim, *error* yang terjadi hanyalah pada 1 bit. BER juga disebut dengan *error probability* ( $P_e$ ), atau *probabilitas* munculnya *error* dalam transmisi data[16].

