



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA *GAIN* DAN *NOISE FIGURE* PADA *L-BAND EDFA*
DALAM KONFIGURASI *DOUBLE-PASS* PADA SISTEM
KOMUNIKASI OPTIK**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
sarjana**

DITA MUSTIKA OKTIAWATI

0606029403

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO DEPOK**

JUNI 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya
nyatakan dengan benar.**

Nama : Dita Mustika Oktiawati
NPM : 0606029403
Tanda Tangan :
Tanggal : 15 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Dita Mustika Oktiawati
NPM : 0606029403
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisa *Gain* dan *Noise Figure* pada L-BAND
EDFA Dalam Konfigurasi *Double-pass* Pada Sistem
Komunikasi Optik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Komputer, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc, Ph.D ()

Penguji : ()

Penguji : ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala rahmat dan hidayat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Purnomo Sidi Priambodo, MSc, Ph.D selaku pembimbing skripsi ini, yang telah meluangkan waktunya, serta masukan-masukan selama bimbingan;
2. Para peneliti sebelum ini yang juga memberikan sumber bacaan yang banyak bagi saya;
3. Papa, Mama, dan kedua adik saya yang selalu memberi nasehat dan memotivasi saya untuk selalu berusaha keras dan semangat dalam setiap pekerjaan yang dilakukan dan telah luar biasa mendukung saya selama ini sehingga saya mampu menyelesaikan skripsi saya;
4. Teman – teman yang selama ini telah mendengar dan menjadi saksi senang dan susah saya dalam menyelesaikan skripsi ini : Lakshmi, Rahmi, terima kasih atas bantuan, dan motivasi yang diberikan pada saya;
5. Dan seluruh Sivitas Akademik Departemen Teknik Elektro yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2010

Dita Mustika Oktiawati

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dita Mustika Oktiawati
NPM : 0606029403
Program studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**ANALISA GAIN DAN NOISE FIGURE PADA L-BAND EDFA DALAM
KONFIGURASI DOUBLE-PASS PADA SISTEM KOMUNIKASI OPTIK**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemegang Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 15 Juni 2010

Yang menyatakan

Dita Mustika Oktiawati

ABSTRAK

Nama : Dita Mustika Oktiawati

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Analisa *Gain* dan *Noise Figure* pada *L-BAND EDFA* Dalam Konfigurasi *Double-pass* Pada Sistem Komunikasi Optik.

Erbium-doped fiber amplifier atau *EDFA* menggunakan *pump* laser dengan panjang gelombang 980 nm atau 1480 nm untuk menghasilkan *beam* yang kuat pada panjang gelombang *C-band* (1530 nm – 1560 nm) dan *L-band* (1570 nm – 1610 nm). *L-band* memiliki efisiensi absorpsi dan emisi yang lebih rendah dibanding *C-band* karena rentang panjang gelombang sinyal yang lebih jauh sehingga penguatannya lebih rendah dengan *noise figure* yang lebih tinggi dibanding *C-band*. Telah dilakukan beberapa penelitian di beberapa universitas di luar negeri untuk melakukan pemerataan penguatan *L-band* dengan meningkatkan *gain* *L-band* dengan beberapa metode seperti konfigurasi dengan menggabungkan *C* dan *L-band* secara paralel. Pada skripsi ini, pemerataan peningkatan *gain* pada *L-band* *EDFA* dilakukan dengan melakukan simulasi penggabungan *C* dengan *L-band* *EDFA* dalam konfigurasi *double-pass* dengan memodelkan simulasi menggunakan perangkat lunak berbasis Matlab dan OASIX.

Kata kunci :

Konfigurasi *double-pass*, *L-band EDFA*, simulasi

ABSTRACT

Name : Dita Mustika Oktiawati
Study Program : Electrical Engineering
Title : Performance of Gain and Noise Figure of L-band EDFA with an Injection C-band ASE in A Double-pass Configuration for Optical Communication System

Erbium-Doped Fiber Amplifier or EDFA uses a pump laser with 980 nm or 1480 nm power to provide strong beam at *C-band* (1530 nm – 1560 nm) and *L-band* (1570 nm – 1610 nm) wavelength. L-band has lower efficiency of absorption and emission than C-band because the long spectral of the signal wavelength so that the gain is low and the noise figure is high. Some researches are done in case of the gain flatness with the improvement of the L-band gain with some methods such as parallel configuration. In this final project, gain flatness and improvement of L-band EDFA are achieved with combine C and L-band EDFA in a double pass configuration. Modelling by simulated using a software based on Matlab and OASiX.

Key words :

Double-pass configuration, L-band EDFA, simulation

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan	6
1.4 Pembatasan Masalah.....	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
2. TINJAUAN TEORI.....	8
2.1 Penguat Fiber yang di- <i>Doped</i>	8
2.2 Sifat Dasar Fiber yang di- <i>Doping Erbium</i>	10
2.2.1 Sifat Dasar <i>Erbium</i>	10
2.2.2 Absorpsi dan Emisi <i>Cross-section</i>	11
2.2.3 <i>Lifetime</i>	14
2.2.4 <i>Linewidth</i> dan <i>Broadening</i>	15
2.3 Teori Dasar <i>Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)</i>	15
2.3.1 <i>Rate Equation</i> Sistem 3-Level.....	15
2.3.2 Persamaan Propagasi.....	19
2.3.3 <i>Gain</i> dan <i>Noise Figure</i>	21
2.4 Prinsip Dasar Penguat Optik yang di- <i>Doping Erbium</i>	22

2.4.1 Pemilihan Bidang Pemompa.....	23
2.4.2 Komponen Penyusun <i>EDFA</i>	23
2.4.3 Prinsip Kerja Penguat Optik yang di- <i>Doping Erbium</i>	24
3. PERANCANGAN SIMULASI KONFIGURASI <i>DOUBLE-PASS L-BAND</i> DENGAN INJEKSI <i>ASE C-BAND EDFA</i>	26
3.1 Skenario Simulasi	26
3.2 Kondisi yang diamati	27
3.3 Tahapan Simulasi	29
3.4 Diagram Blok Tahapan Simulasi.....	30
4. ANALISA DAN HASIL KONFIGURASI <i>DOUBLE-PASS</i>	31
4.1 Analisa model matematis yang digunakan untuk proses penguatan, penghitungan <i>gain</i> , <i>Noise Figure (NF)</i>	33
4.2 Karakterisasi <i>gain</i> dan <i>noise figure</i> Penguatan Tahap Pertama	35
4.3 Karakterisasi Daya <i>ASE C-band</i>	38
4.4 Karakterisasi <i>gain</i> dan <i>noise figure</i> Penguatan Tahap Kedua	39
5. KESIMPULAN	43
DAFTAR REFERENSI	44
LAMPIRAN	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Atenuasi vs Panjang Gelombang.....	3
Gambar 2.1.	Diagram Sederhana Penguat Fiber yang di- <i>Doping</i>	8
Gambar 2.2.	Konfigurasi Dasar <i>EDFA</i>	10
Gambar 2.3.	Diagram level energi Er^{3+}	11
Gambar 2.4.	Level Eksitasi pada ion <i>Erbium</i>	13
Gambar 2.5.	Spektrum tipe absorpsi dan emisi <i>Erbium Doped Fiber</i>	13
Gambar 2.6.	Spektrum absorpsi dari <i>Erbium Doped Fibre</i> dengan pita daya pemompa untuk 800nm, B 980nm, dan C 1480 nm	14
Gambar 2.7.	Absorpsi dan emisi koefisiensi <i>cross-section</i>	14
Gambar 2.8.	Model Sistem Energi 3- <i>Level</i>	16
Gambar 2.9.	Grafik Output vs Input Power dengan <i>ASE</i> dan tanpa <i>ASE</i>	19
Gambar 3.1.	Diagram Blok Perancangan Eksperimen	28
Gambar 3.2.	Uraian <i>Double-pass</i>	28
Gambar 4.1.	Rangkaian Fisik dari Proses Simulasi	31
Gambar 4.2.	Hasil Simulasi gain optimum sebagai fungsi terhadap panjang <i>EDFA</i>	36
Gambar 4.3.	Hasil simulasi gain pada rentang panjang gelombang <i>C-band</i> dan <i>L-band</i> sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama	36

Gambar 4.4. Hasil Simulasi <i>noise figure</i> pada rentang panjang gelombang <i>C-band</i> dan <i>L-band</i> sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama	37
Gambar 4.5. Hasil simulasi daya <i>ASE</i> pada rentang panjang gelombang <i>C-band</i> sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama	38
Gambar 4.6. Hasil simulasi <i>gain</i> pada rentang panjang gelombang <i>L-band</i> sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap kedua dengan injeksi <i>ASE C-band</i>	40
Gambar 4.7. Hasil simulasi <i>gain</i> optimum sebagai fungsi terhadap panjang <i>EDFA</i>	41
Gambar 4.8. Hasil simulasi perbandingan <i>Noise Figure</i> pada rentang panjang gelombang <i>L-band</i> sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap kedua.....	41
Gambar 4.9. Hasil simulasi penguatan total sebagai fungsi panjang gelombang <i>C-band</i> (tahap pertama penguatan) dan <i>L-band</i> tahap kedua penguatan (terinjeksi <i>ASE</i>)	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	46
Lampiran 2	51
Lampiran 3	54
Lampiran 4	55
Lampiran 5	56
Lampiran 6	61



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri telekomunikasi telah berada pada tahap peningkatan yang sangat tinggi dalam beberapa tahun terakhir ini, digerakkan oleh kompetisi dan permintaan konsumen. Inovasi dalam hal teknologi informasi adalah sebagai pendorong dalam hal peningkatan industri telekomunikasi tersebut. Jaringan telekomunikasi harus dibangun semakin luas untuk menunjang kebutuhan akan *bandwidth* dan kecepatan. Sistem komunikasi serat optik mempunyai peran sangat penting dalam mendukung jaringan komunikasi kecepatan tinggi ke seluruh dunia melalui hubungan darat dan kabel laut.

Kabel *coax* tembaga yang digunakan sampai saat ini tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan perkembangan layanan informasi yang membutuhkan informasi dengan *bandwidth* yang lebar. Untuk itu dibutuhkan suatu kabel istimewa yang memiliki *bandwidth* yang lebar yang mampu untuk melayani informasi dengan kecepatan tinggi sesuai tuntutan perkembangan pasar.

Fiber optik menyediakan *bandwidth* yang jauh lebih lebar dimana frekuensinya mampu mencapai 10 THz untuk panjang gelombang pada jangkauan 1510 nm sampai dengan 1600 nm^[1]. Dalam transmisinya, fiber optik mengirimkan data dalam bentuk gelombang cahaya. Gelombang cahaya tersusun dari foton-foton atau paket energi, yang dikatakan tidak memiliki massa, kecepatan Bergeraknya tercepat. Hal ini berbeda dengan sistem komunikasi kabel yang mentransmisikan data berupa aliran listrik yang berarti juga aliran elektron. Elektron termasuk partikel yang berat. Massanya besar sehingga tidak dapat bergerak lincah seperti foton yang dapat bergerak dengan kecepatan mencapai 3×10^8 m/s dalam keadaan *vacuum*. Dengan jauh lebih cepatnya rambatan data pada cahaya ini, maka bit rate yang dihasilkan pun praktis jauh lebih tinggi. Transmisi dalam bentuk cahaya lebih terbebas dari pengaruh interferensi gelombang atau imbas elektromagnetis sekeliling. Medan magnet maupun medan

listrik yang mengganggu di sekitar daerah perambatan tidak akan memberi imbas apapun terhadap gelombang cahaya. Dengan demikian, (*noise*) yang terjadi pada sistem komunikasi kabel sangat minimum dijumpai pada komunikasi serat optis ini. Dalam pengiriman data yang tinggi maka dibutuhkan sejumlah besar kabel *coax* tembaga yang artinya membutuhkan infrastruktur dan ruang fisik yang luas. Lain halnya dengan fiber optik yang ringan dan mampu mentransmisikan data pada *bandwidth* yang lebih tinggi dengan frekuensi pembawa optik bekerja pada daerah frekuensi yang tinggi yaitu sekitar 10^{13} Hz sampai dengan 10^{16} Hz sehingga informasi yang dibawa menjadi jauh lebih banyak. Fiber optik berukuran kecil dan ringan sehingga bisa meminimalkan infrastruktur.

Fiber optik yang mentransmisikan data dalam bentuk gelombang cahaya ternyata beresiko mengalami atenuasi atau penyusutan energi. Atenuasi adalah besaran pelemahan energi sinyal informasi dari fiber optik yang dinyatakan dalam dB dan disebabkan oleh beberapa faktor utama yaitu absorpsi dan hamburan (*scattering*). *Silica glass* yang merupakan bahan pembuat fiber optik biasanya terbentuk dari silikon-dioksida (SiO_2). Atenuasi menyebabkan pelemahan energi sehingga amplitudo gelombang yang sampai pada penerima menjadi lebih kecil dari pada amplitudo yang dikirimkan oleh pemancar. Cahaya yang sedang merambat dalam sebuah serat optik teratenuasi sehingga kehilangan energi. Besarnya kehilangan energi bergantung dari panjang gelombang cahaya tersebut. Atenuasi dapat dinyatakan oleh persamaan berikut^[2] :

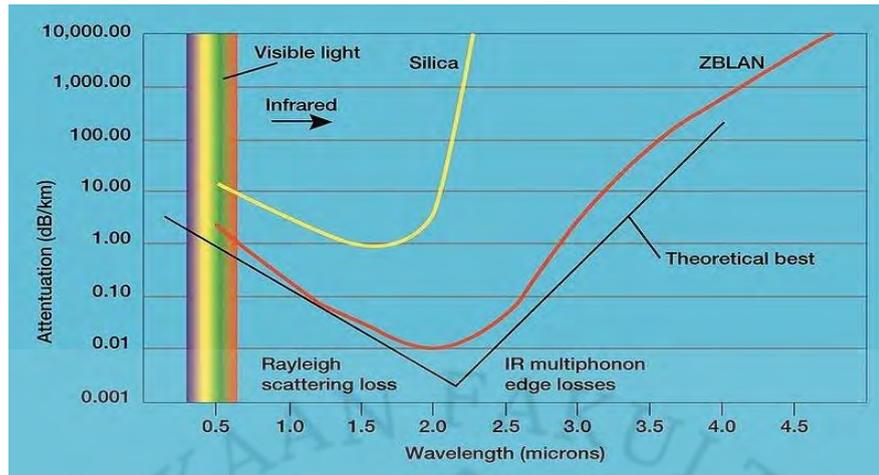
$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \text{ db / km} \quad (1.1)$$

L = Panjang serat opti (km)

P_{in} = Daya yang masuk ke dalam serat

P_{out} = Daya yang keluar dari serat

Atenuasi pada serat optik disebabkan oleh absorpsi energi sinyal oleh bahan dan efek *scattering*. Absorpsi merupakan suatu sifat alami dari silika *glass* dimana pada daerah tertentu *glass* mengabsorpsi sebagian besar cahaya.



Gambar 1.1 Atenuasi vs Panjang Gelombang^[3]

Propagansi cahaya yang melalui serat optik didasari oleh total refleksi internal pada panjang gelombang. Permukaan yang kasar dan tidak rata menyebabkan sinar direfleksikan dengan arah yang acak atau *random*. Hal inilah yang disebut hamburan atau *scattering* yang karakteristiknya bergantung pada sudut refleksi. Hamburan atau *scattering* cahaya bergantung pada panjang gelombang dari cahaya yang dihamburkan. Batasnya tergantung pada frekuensi dari panjang cahaya insiden dan tipe media dari pusat hamburan. Hamburan cahaya pada serat optik disebabkan oleh ketidakteraturan molekul pada struktur serat optik. Saat cahaya melewati bagian inti optik (*core*), maka cahaya tersebut akan berinteraksi dengan molekul-molekul silika pada serat optik. Hamburan yang terjadi pada serat optik lebih dikenal dengan sebutan *Rayleigh Scattering*. *Rayleigh Scattering* dihasilkan dari tumbukan elastis antara gelombang cahaya dengan molekul-molekul silika pada serat optik tersebut. Hamburan atau *scattering* ini dihitung sekitar 96% dari atenuasi pada serat optik. Jika cahaya yang terhambur menghasilkan sudut yang mendukung jalannya cahaya maka atenuasi tidak terjadi, lain halnya jika cahaya dialihkan keluar dari *core* maka atenuasi akan terjadi. Bergantung pada sudut insiden, beberapa bagian dari cahaya terpropagansi maju dan yang lainnya dialihkan keluar dari bagian propagansi dan keluar dari serat optik. Pendeknya panjang gelombang akan mengalami hamburan yang lebih banyak dibanding gelombang yang lebih panjang. Panjang gelombang di bawah 800 nm tidak bisa digunakan untuk komunikasi serat optik karena

atenuasi berdasarkan *scattering*-nya tinggi. Panjang gelombang di atas 1700 nm juga tidak bisa digunakan karena tingginya absorpsi.

Adanya pengaruh atenuasi pada serat optik menyebabkan terjadinya penurunan sinyal seiring bertambahnya jarak transmisi. Atenuasi pada serat optik dengan panjang gelombang 1500-nm sebesar 0,2 dB/km^[4]. Dengan demikian, bila sinyal akan ditransmisikan dengan jarak yang lebih jauh maka sinyal tersebut harus diperkuat. Untuk memperkuat sinyal tersebut dibutuhkan penguat (amplifier) untuk mengembalikan kekuatan sinyal seperti semula. Ada beberapa jenis penguat seperti *electronic repeater*, *SOA (Semiconductor Optical Amplifier)*, ataupun *EDFA*. *Electronic Repeater* merupakan rangkaian elektronik yang mampu mengoreksi distorsi yang terjadi sewaktu proses transmisi. Namun *electronic repeater* ini tidak digunakan lagi karena kecepatannya rendah dan dayanya yang besar.

Penguat fiber optik merupakan revolusi pada jaringan fiber optik. Alasan utamanya adalah pengaruh yang kuat pada penguatannya dan komunikasi datanya yang unik dalam penguatan data secara spontan terhadap berbagai jangkauan. Penggunaan penguat fiber optik lebih dipilih dibandingkan menggunakan *electronic repeater* karena penguat fiber memiliki kecepatan tinggi dengan daya yang rendah dalam mengirimkan data dibanding *electronic repeater*. Penggunaan penguat optik dapat menutupi kelemahan *electronic repeater* yang berkecepatan rendah. Keuntungannya antara lain bahwa penguat optik tidak memerlukan rekonstruksi data ke elektronik dan memiliki kecepatan tinggi dengan daya yang rendah.

Optical amplifier atau penguat optik yang dimaksud adalah penguat yang terbuat dari serat optik yang intinya berupa bahan kristal silica tunggal yang di-*doping* bahan lain seperti *aluminium (Al)*, *germanium (Ge)*, dan *fluride (f)* yang didoping dengan unsur kimia dari golongan lantanida seperti *Ytterbium(Yb)*, *Neodymium (Nd)*, dan *Erbium (Er)*. Untuk dapat bekerja sebagai penguat optik maka dibutuhkan *pump* laser yang prinsip kerjanya memiliki *wavelength* lebih pendek dari panjang gelombang operasionalnya.

Erbium-doped fiber amplifier atau *EDFA* menggunakan *pump* laser semikonduktor untuk menghasilkan *beam* yang kuat pada panjang gelombang

yang rendah. Sinar yang dipemompakan oleh *EDFA* tipikal 980-nm atau 1480-nm^[3]. *EDFA* merupakan penguat optik yang bekerja pada spektrum panjang gelombang 1530-nm -1560-nm dengan penguatan tinggi dan *noise* yang rendah^[1]. *EDFA* digunakan pada penguatan di semua kanal pada *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM).

1.2 Perumusan Masalah

Tugas akhir ini dibatasi pada pembahasan masalah performa *gain* dan *Noise Figure* pada *EDFA* yang bekerja pada rentang frekuensi *L-band* (1570 nm-1610 nm) dengan injeksi *ASE* dari *EDFA C-band*. *EDFA* bekerja pada rentang frekuensi sinyal pada rentang *C-band* (1530 nm -1560 nm) dan *L-band* (1570 nm – 1610 nm) yang diberi daya pemompa laser dengan panjang gelombang 980 nm atau 1480 nm. Pemberian daya pemompa pada *EDFA* ini akan menaikkan ion-ion *Erbium* dari tingkat energi *ground state* ke tingkat *excited state*. Ion-ion pada tingkat energi *excited state* cenderung kembali ke tingkat *ground state* secara spontan sehingga menghasilkan *Amplified Spontaneous Emission (ASE)*.^[4]

L-band memiliki rentang operasi yang lebih lebar selebar 40 nm (1570 nm -1610 nm) dibandingkan *C-band* selebar 30nm (1530 nm -1560 nm). Semakin lebar *bandwidth* yang dimiliki maka akan semakin besar gangguan yang akan terjadi selama transmisi data. Dengan konsekuensi seperti itu maka dibutuhkan suatu rancangan yang mampu memberikan pelebaran dengan pemerataan penguatan *bandwidth* sehingga terjadi penguatan lebih maksimal namun dengan mengurangi gangguan yang muncul selama proses transmisi data.

Sebuah penguat berpita lebar dapat dibangun atau dirancang dengan menggabungkan *EDFA* pada *C-band* dan *L-band*. *L-band* membutuhkan *Erbium-doped fiber* yang lebih panjang untuk menyeimbangi *gain* yang diperoleh pada *C-band*. Untuk menghindari permasalahan yang muncul maka dibutuhkan suatu rancangan yang mampu menghasilkan peningkatan *gain* pada *C-band* dan *L-band* dengan tujuan khusus mengurangi potensi untuk menghadirkan saturasi di sisi penerima atau kesalahan penyandian bit atau sandi.

Dari gambaran di atas maka perumusan masalah dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Analisa bentuk konfigurasi dari penguat optik *EDFA* berupa konfigurasi *double-pass C-band* dengan *L-band* sehingga menghasilkan peningkatan gain.
2. Performa *gain* dan *noise figure* dari masing-masing *EDFA* pada konfigurasi.
3. Simulasi dengan menggunakan Matlab untuk melihat performa gain *L-Band* yang diinjeksi *ASE* dari *C-band*.
4. Penghitungan efek yang ditimbulkan dari injeksi daya *ASE C-band* pada *L-band EDFA*.
5. Analisa performa *gain* dari *L-band EDFA* yang diperoleh dengan adanya injeksi *ASE* dari *C-band EDFA*.

1.3 Tujuan

Tujuannya adalah untuk menganalisa peningkatan gain dari rancangan penggabungan *EDFA C-band* dengan *L-band* dengan konfigurasi *double-pass* dengan menggunakan perangkat lunak simulasi yang berbasis Matlab dan OASiX[®]. Tujuan lainnya adalah untuk mengetahui pengaruh *ASE* dari kedua *EDFA (C-band dan L-band)* terhadap peningkatan atau penurunan *gain*.

1.4 Pembatasan Masalah

Pada tugas akhir ini permasalahan dibatasi pada analisa rancangan penguat optik *EDFA* dengan konfigurasi *double-pass* antara *C-band* dengan *L-band* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh injeksi dari *Amplitude Spontaneous Emission (ASE)* dari *C-band* terhadap peningkatan dan perataan *gain* pada *L-band* dengan analisa simulasi dibuat menggunakan program berbasis Matlab dan OASiX[®].

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan dalam seminar ini tersusun atas 5 bab yaitu :

Bab 1 Pendahuluan

Bab 1 terdiri dari uraian tentang latar belakang dari tugas akhir ini, perumusan masalah, tujuan masalah, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Teori

Bab 2 ini berisi tinjauan teori tentang karakteristik dan prinsip dasar penguat optik fiber yang di-*doping* oleh *Erbium* pada rentang kerja *C-band* dan *L-band*. Pada bab ini juga akan dibahas model matematika untuk analisa *EDFA*.

Bab 3 Perancangan Simulasi Konfigurasi *Double-pass L-band* dengan Injeksi *ASE C-band EDFA*

Bab 3 ini berisi tentang perancangan simulasi yang digunakan untuk melihat performa dari *gain* dan *noise figure* pada *L-band* dengan adanya injeksi *ASE C-band*. Rancangan akan dibuat dengan pemodelan dengan melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak berbasis Matlab dan OASiX[®].

Bab 4 Analisa dan Hasil Simulasi Konfigurasi *Double-pass L-band* dengan Injeksi *ASE C-band EDFA*

Bab 4 ini akan menganalisa rancangan dan hasil simulasi dari konfigurasi *double pass* dengan melihat performa *gain* dan *noise figure* dari *L-band* yang diinjeksi *ASE C-band*.

Bab 5 Kesimpulan

Bab 5 berisi kesimpulan dari analisa hasil simulasi dari konfigurasi *double pass* untuk melihat performa *gain* dan *noise figure* dari *L-band* yang diinjeksi *ASE C-band*.

BAB 2

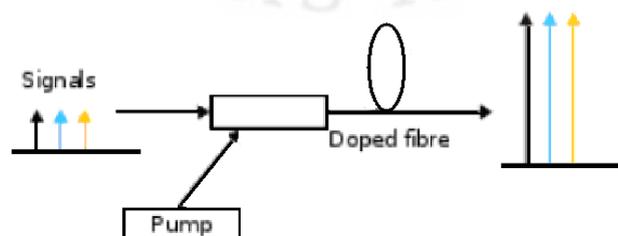
TINJAUAN TEORI

Fiber amplifier adalah penguat (*amplifier*) optik yang didasari oleh fiber optik sebagai media penguatan. Pada beberapa kasus, media penguatnya bisa berupa fiber *glass* yang di-*doping* oleh ion-ion langka seperti *Erbium (Er)*, *neodyum (No)*, *ytterbium(Yb)*, *praseodymium(Pr)*, atau *thulium(Tm)*. Serat optik dengan dopan aktif ini kemudian dipemompa oleh sinar dari sebuah *pump* laser melalui fiber yang sama yang dilalui oleh sinyal yang akan dikuatkan. *Pump* laser ini memiliki *wavelength* lebih pendek dari panjang gelombang operasi sinyal. Laser pemompa yang umum dipakai adalah 980 nm dan 1480 nm.

Penguat fiber yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah *EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier)*. *EDFA* beroperasi pada daerah panjang gelombang antara 1530 nm sampai 1560 nm untuk *C-band* dan antara 1570 nm sampai dengan 1610 nm untuk *L-band*.

2.1 Penguat Fiber yang di-Doped

Penguat fiber yang di-*doped* atau *Doped Fiber Amplifier (DFA)* adalah sebuah penguat optikal yang menggunakan serat optik yang di-*doping* sebagai media penguatan untuk memperkuat sinyal optikal. Agar bekerja sebagai penguat optik maka elektron-elektron pada DFA harus dipemompa agar sampai ke level eksitasi yang lebih tinggi oleh laser pemompa sehingga untuk siap menyediakan *photon* untuk stimulasi pada proses penguatan.



Gambar 2.1 Diagram Sederhana Penguat Fiber yang di-Doping

Pump laser akan mengeksitasi ion-ion menuju energi yang lebih tinggi dimana ion-ion tersebut mampu mengurai via emisi yang terstimulasi dari foton pada panjang gelombang sinyal balik menuju tingkat energi yang lebih rendah. Ion-ion yang tereksitasi tersebut mampu menghasilkan emisi spontan dan proses nonradiatif yang berinteraksi dengan phonon dari silica. Kedua proses tersebut yang akan mengurangi efisiensi penguatan cahaya. Batas penguatan dari sebuah penguat optik merupakan daerah dari panjang gelombang optik dimana penguat menghasilkan gain. Batas penguatan tersebut dipengaruhi oleh ion *dopingnya*, struktur *glass* dari serat optik, dan panjang gelombang serta daya pemompa *LASER*.

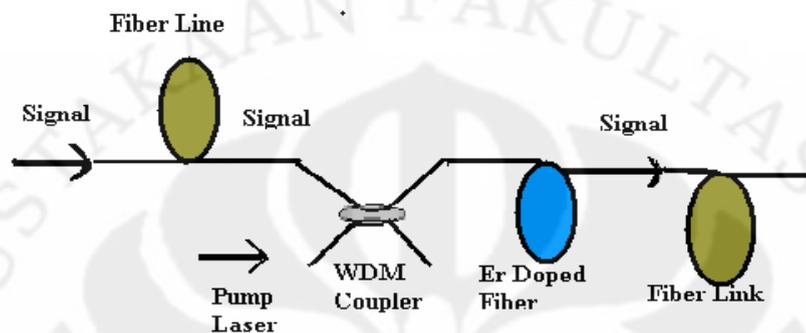
Sumber *noise* dari DFA berasal dari *Amplified Spontaneous Emission (ASE)* yang memiliki spektrum hampir serupa dengan spektrum penguat. Secara tipikal, *noise figure* (NF) dari sebuah DFA adalah 3 dB, dimana sebuah penguat biasanya memiliki NF sebesar 6-8 dB^[1].

Foton-foton yang berinteraksi kemudian diperkuat oleh emisi yang terstimulasi. *ASE* diperoleh penguat pada kedua arah baik *forward* atau *reverse*, tapi hanya *ASE* yang dipompa maju (*forward*) yang mempengaruhi performa penguat. Penguatan yang diperoleh cenderung dibatasi oleh *ASE* bukan dari daya pemompa yang tersedia.

Pada beberapa kasus, media penguatnya bisa berupa fiber *glass* yang di-*doping* oleh ion-ion langka seperti *Erbium*, *neodyum*, *yttrium*, *praseodymium*, atau *thulium*.

Didasari oleh komposisi dari *glass* pada serat optik, panjang gelombang transisi biasanya berada pada antara 1530 nm sampai dengan 1600 nm. Maka penguat yang di-*doping* yang dibutuhkan adalah yang memiliki daerah operasional pada panjang gelombang tersebut. *Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA)* memiliki batas penguatan yang hampir sama dengan batas penguatan serat optik berbasis silica. *C-band* dengan panjang gelombang 1530 nm – 1560 nm dan *L-band* dengan panjang gelombang 1570 nm – 1610 nm. Dengan batasan daerah operasional panjang gelombang yang dimiliki maka *EDFA* dapat memperkuat cahaya secara efisien pada daerah 1500 nm dimana pada sistem telekomunikasi serat optik memiliki losses yang minimum^[1].

EDFA memiliki *bandwidth* yang lebar, tipikal mencapai 40 nm, yang lebih dari cukup untuk memperkuat kanal-kanal data dengan data yang tinggi tanpa membuat *gain* menyempit. *EDFA single* bisa digunakan untuk memperkuat secara simultan banyak kanal data pada panjang gelombang yang berbeda yang disebut *Wavelength Division Multiplexing (WDM)* dimana penguat fiber sebelumnya belum mampu untuk memperkuat di banyak kanal.



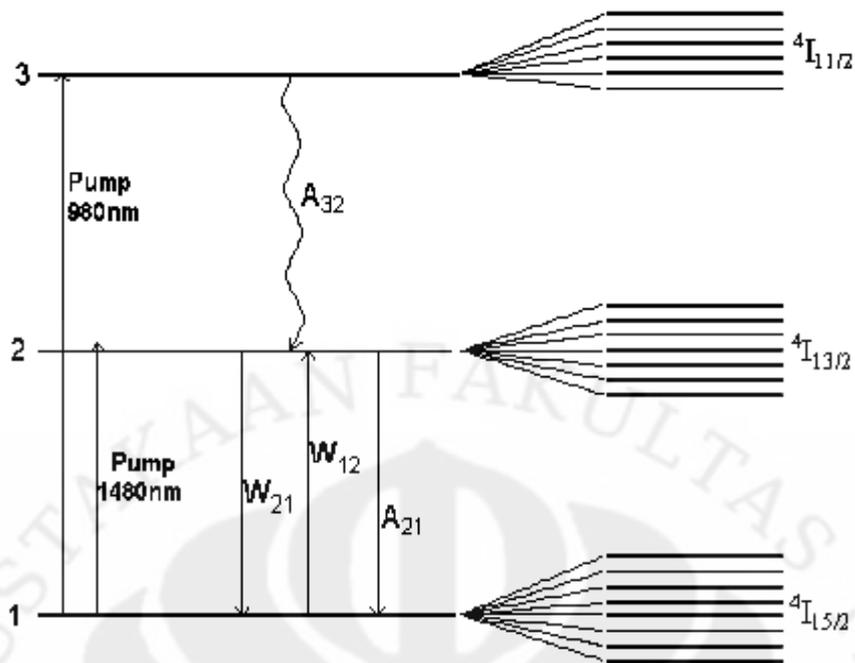
Gambar 2.2 Konfigurasi Dasar sebuah *EDFA*

2.2 Sifat Dasar Fiber yang Di-doping Erbium

2.2.1 Sifat Dasar Erbium (Er^{3+})

Penguat fiber yang di-doping oleh *erbium* sejauh ini merupakan penguat fiber yang mampu beroperasi pada sistem komunikasi serat optik jarak jauh. Dengan *doping Erbium*, penguat fiber ini mampu memperkuat sinyal pada *range* 1500 nm, dimana pada sistem komunikasi serat optik memiliki *losses* yang minimum.^[4]

Energi transisi dari Er^{3+} secara tipikal dalam sebuah *silica glass* diasosiasikan dengan tingkatan $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{15/2}$ dan diilustrasikan seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.3 Diagram level energi Er³⁺ [5]

2.2.2 Absorpsi dan Emisi *Cross Section*

Cross section adalah suatu parameter untuk menyatakan kemampuan suatu ion dalam mengabsorpsi atau mengemisi cahaya. Pada parameter *cross section*, ion-ion mengalami transisi probabilitas untuk melakukan emisi atau absorpsi cahaya persatuan luas. Keadaan tersebut mempunyai hubungan dengan energi E₁ dan E₂. Probabilitas transisi untuk mengabsorpsi suatu photon dari energi E₂-E₁ sebanding dengan absorpsi *cross section* σ₁₂, dan untuk emisi *photon* sebanding dengan emisi *cross-section* σ₂₁. Dimensi *cross-section* merupakan suatu luasan.

Hubungan yang menyatakan jumlah daya cahaya pada frekuensi ω yang diserap oleh sebuah ion ditunjukkan dalam persamaan (2.1)^[6].

$$P_{abs} = \sigma_{12} I \tag{2.1}$$

Dimana I adalah intensitas cahaya yang datang pada ion. Pembagian daya absorpsi oleh energi *photon* hω akan menghasilkan kecepatan absorpsi sejumlah *photon*, dan dinyatakan dalam bentuk persamaan (2.2).^[6]

$$N_{abs} = \sigma_{12} \frac{I}{h\omega} = \sigma_{12} \Phi(\omega) \quad (2.2)$$

Dimana $\Phi(\omega)$ adalah fluks *photon* dalam satuan jumlah *photon* per luasan waktu. Jumlah daya cahaya yang terstimulasi oleh *ion-ion* dengan intensitas cahaya yang mengenainya ditunjukkan dalam bentuk pers. (2.3)^[6].

$$P_{em} = \sigma_{21} I \quad (2.3)$$

$$\Delta P = P_{em} - P_{abs} = (N_2 \sigma_{21} - N_1 \sigma_{12}) I \quad (2.4)$$

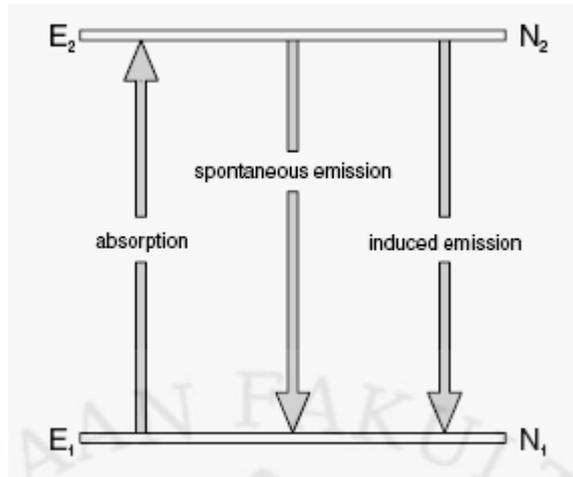
N_1 adalah populasi *ion-ion* pada level energi terbawah (*ground state*) atau level 1, dan N_2 adalah populasi *ion-ion* pada level energi terbatas (*excited state*) atau level 2.

Absorpsi dan emisi cahaya dalam sistem dua level mempunyai dua level degenerasi, yaitu level 1 mempunyai degenerasi g_1 dan level 2 mempunyai degenerasi g_2 . Perubahan populasi level 1 dan 2 ditentukan oleh kekuatan transisi antara *sublevel* individu yang menyusun masing-masing level. Saat dimana semua *sublevel* mempunyai populasi yang sama, atau kekuatan transisi antara *sublevel-sublevel* yang sama, maka akan didapat suatu bentuk pernyataan dalam bentuk persamaan seperti berikut^[6] :

$$\frac{dN_2}{dt} \Big|_{abs} = B_{12} \rho(\nu) N_1 \quad (2.5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} \Big|_{emis} = -(A_{21} + B_{21} \rho(\nu)) N_2 \quad (2.6)$$

Dimana $\rho(\nu)$ merupakan rapat fluks *photon* dalam satuan jumlah *photon* per-bandwidth frekuensi per-volume, $B_{12} \rho(\nu)$ adalah kecepatan absorpsi, A_{21} kecepatan emisi spontan dan $B_{21} \rho(\nu)$ adalah kecepatan emisi terstimulasi.



Gambar 2.3 Level eksitasi pada ion Erbium^[7]

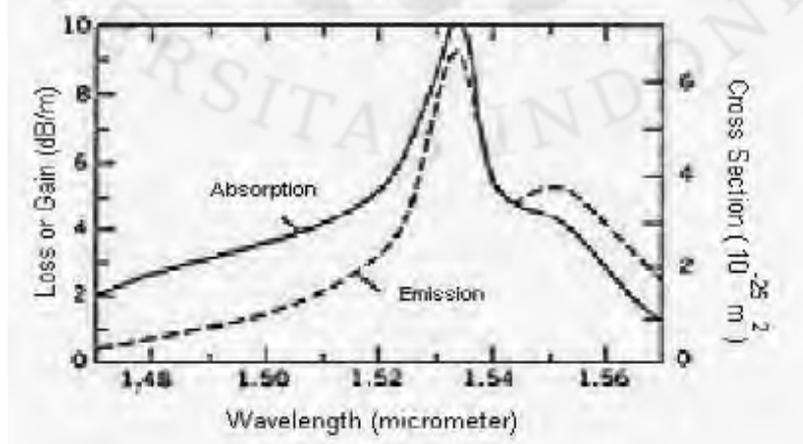
Emisi dan absorpsi *cross section* untuk transisi $1 \leftrightarrow 2$ mempunyai hubungan yang dinyatakan dalam persamaan^[7] :

$$\sigma_{EMS}(\nu) = \sum_{m_2, m_1} \frac{e^{-E_{m_2} / kT}}{Z_2} \sigma_{m_2, m_1}(\nu) \quad (2.7)$$

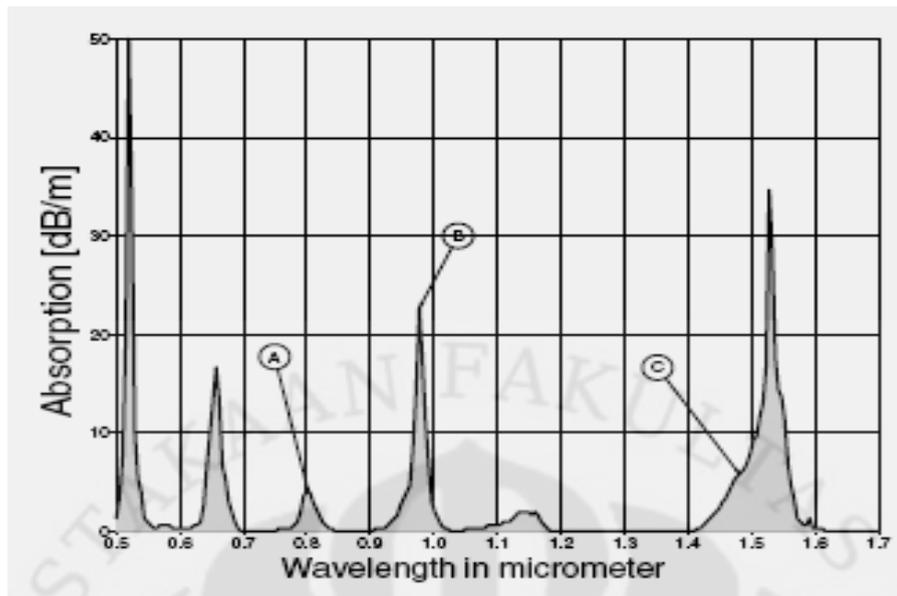
dan

$$\sigma_{abs}(\nu) = \sum_{m_1, m_2} \frac{e^{-E_{m_2} / kT}}{Z_1} \sigma_{m_1, m_2}(\nu) \quad (2.8)$$

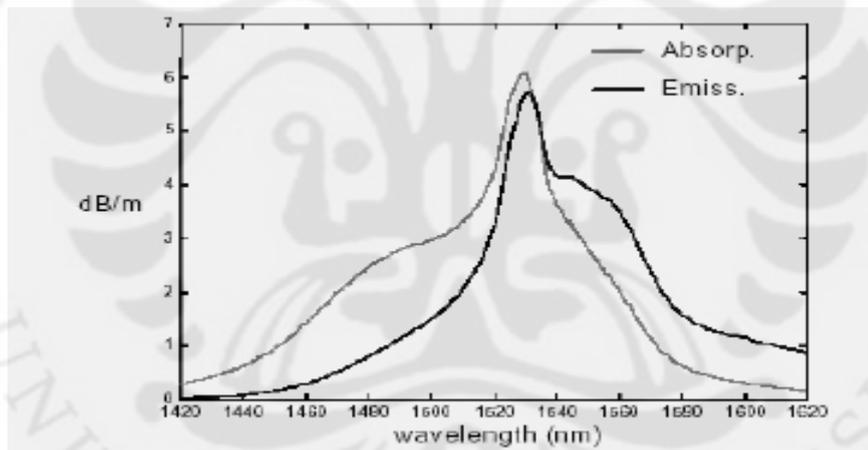
Cross-section antar *sublevel* $\sigma_{m_2, m_1}(\nu)$ mengandung semua informasi bentuk garis (*lineshape*). Semua sublevel dalam kasus ini adalah mempunyai populasi sama. Pada Erbium, absorpsi lebih tinggi pada 1480 nm dimana emisi lebih tinggi pada 1535 nm.^[7]



Gambar 2.4 Spektrum tipe absorpsi dan emisi dari Erbium Doped Fiber^[9]



Gambar 2.5 Spektrum absorpsi dari *Erbium Doped Fibre* dengan pita daya pemompa untuk 800nm, B 980nm, dan C 1480 nm^[9]



Gambar 2.6 Absorpsi dan emisi koefisien *cross section*^[10]

2.2.3 Lifetime

Lifetime merupakan lama waktu tinggal *ion-ion Erbium* dalam *level* energi tersebut. Besarnya nilai *lifetime* adalah berbanding terbalik dengan probabilitas transisi *ion-ion* dari *level excited state* ke *level ground state*.^[6] *Lifetime* yang diberikan pada *level ion Erbium* umumnya mempertimbangkan dua lintasan utama untuk peluruhan, yaitu *radiative* dan *nonradiative*.^[5]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (2.8)$$

Lifetime radiative muncul dari *fluorescence* yang berasal dari *level* eksitasi ke seluruh level di bawahnya. Karena transisi *radiative* secara alamiah tidak terjadi untuk orde pertama, maka *lifetime radiative* cenderung menjadi lama.

Lifetime nonradiative tergantung pada sifat dasar gelas utama dan hubungan antara energi vibrasi kisi-kisi gelas utama (*phonon*) dengan *ion-ion Erbium*. Kecepatan *nonradiative* akan meningkat seiring temperature karena populasi *phonon* meningkat terhadap kenaikan temperatur.

2.2.4 Linewidth dan Broadening

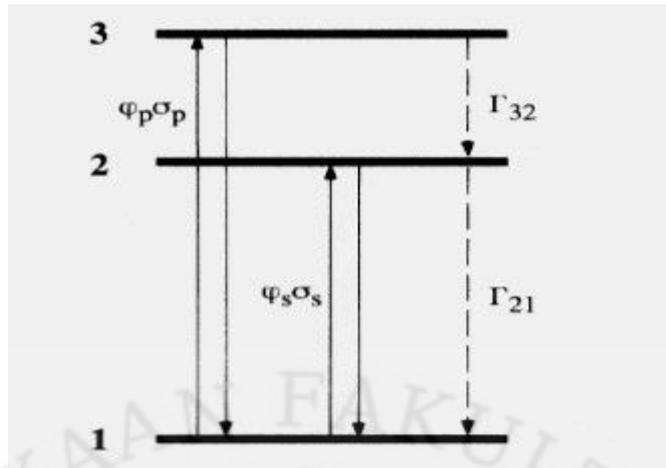
Linewidth adalah lebar spektrum cahaya dari emisi spontan atau emisi terangsang, *Linewidth* tersebut adalah batas spektrum *gain* dalam *domain* wavelength-nya. Pelebaran berkas tersebut terjadi karena pelebaran masing-masing *state energi*. *Linewidth* ada dua macam yaitu *linewidth* homogen dan tidak homogen. Pelebaran homogen atau pelebaran natural adalah pelebaran berkas cahaya karena adanya interaksi *phonon* dari suatu gelas utama dengan *ion-ion Erbium* yang ada dalam penguat fiber. Pelebaran homogen mempunyai hubungan dengan *lifetime* yang ada, dan tergantung pada proses *radiative* dan *nonradiative*.

2.3 Teori Dasar Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)

Pembahasan pada subbab ini merupakan penjelasan tentang teori dasar tentang penguat fiber yang di-*doping* oleh *Erbium*. Pemodelan *EDFA* dilakukan dengan menggunakan *EDFA* dengan sistem 3 *level*. Model matematikanya diuraikan dalam *rate equation*. Karakteristik *EDFA* sendiri dilihat dari sisi *gain*-nya, *noise figure*-nya, dan *ASE*..

2.3.1 Rate Equation Sistem 3 Level

Jika dipemompa pada panjang gelombang 980nm, maka dibutuhkan suatu model sistem dengan 3 *level* energi.



Gambar 2.7 Model Sistem Energi 3-Level^[6]

Transisi *rate* antara *level* 1 dengan *level* 3 seimbang dengan jumlah populasi pada tingkatan energi tersebut dan hasil dari pemompa flux ϕ_p dan *cross section* σ_p . Transisi *rate* antara *level* 1 dengan *level* 2 setara dengan jumlah populasi pada tingkatan energi tersebut dan hasil dari pemompa flux ϕ_s dan *cross section* σ_s . Transisi *rate* yang spontan antar ion diwakili oleh Γ_{32} dan Γ_{21} .

Persamaan untuk perubahan populasi pada tingkatan energi tersebut antara lain^[6]:

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.11)$$

Untuk persamaan berikut, $n_i(\text{ion}/\text{m}^3)$ disebut populasi total *ionic* dan seimbang dengan total populasi pada dua *level* energi ($N = N_1 + N_2$). Pada keadaan *steady state*, ($dn_2/dt = 0$), maka rasio dari populasi pada *level* 1 dan *level* 2 dengan populasi total dapat ditulis sebagai berikut:^[10]

Persamaan absorpsi dan emisi pada saat dipompa dan kekuatan sinyal menjadikan persamaan populasi menjadi:^[11]

$$N_2 = \frac{\tau(\sigma_{si}^a + \sigma_{si}^e)}{\tau(\sigma_{si}^a + \sigma_{si}^e) + \frac{P_p}{A h\nu_p} \Gamma_{si/p}} \tau(\sigma_{si}^a + \sigma_{si}^e) \quad (2.12)$$

keterangan :

τ = *lifetime* untuk Er^{3+} memiliki tipikal *lifetime* sebesar 10 ms^{-1}

$\sigma_{si/p}^a$ = parameter absorpsi *cross-section* sinyal atau *pump*

$\sigma_{si/p}^e$ = parameter emisi *cross-section* sinyal atau *pump*

$\Gamma_{si/p}$ = overlap rasio sinyal atau *pump*

$P_{si/p}$ = Daya sinyal atau *pump*

A = area *cross-section* yang efektif dari distribusi ion-ion Er^{3+}

$h\nu_{si/p}$ = Energi foton sinyal atau *pump*

Penguatan akan terjadi bilamana emisi terstimulasi dari *level 2* ke *level 1* lebih besar dibandingkan dengan absorpsi dari *level 1* ke *level 2*. Dengan kata lain, populasi *ion-ion Erbium* pada *level 2* harus dipertahankan lebih besar dari *level 1*. Keadaan seperti ini dimungkinkan terjadi dengan proses inverse populasi. Derajat inverse populasi dilakukan dengan pendekatan secara matematika pada persamaan berikut :^[12]

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad (2.13)$$

dimana, n_{sp} adalah faktor inverse populasi.

Dalam keadaan *steady-state*, derivatif terhadap waktu pada setiap level akan sama dengan nol.^[6]

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

dan populasi total N adalah,^[6]

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (2.15)$$

Nilai inversi populasi $N_2 - N_1$ dapat diperoleh dengan persamaan

berikut^[12]:



$$N_2 - N_1 = \frac{\phi_p \sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + \phi_s \sigma_s + \phi_p \sigma_p} N \quad (2.16)$$

Nilai ambang (*threshold*) akan terjadi untuk untuk $N_1 = N_2$ sehingga menghasilkan persamaan^[6] :

$$\phi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_{21} \sigma_p} \quad (2.17)$$

Untuk memperoleh daya *threshold* pada saat gelombang dipemompa dan daya saturasi sinyal saat dipemompa pada panjang gelombang tertentu yang dimaksud dapat diukur melalui pendekatan persamaan matematik berikut^[7] :

$$P_{sat} = \frac{h\nu_s \pi \omega_s^2 A_{21}}{\sigma_{12}^s} \quad (2.18)$$

$$P_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_{21}} \quad (2.19)$$

Proses pemompaan pada *EDFA* tidak hanya menyebabkan penguatan pada sinyal tapi juga menghasilkan emisi spontan. Emisi Spontan (SE) tidak koheren, merupakan polarisasi gelombang yang bersifat random dan memiliki *bandwidth* yang lebar dan pada umumnya dipropagasikan dua arah pada fiber. SE diperkuat secara berkelanjutan dengan sinyal yang terdiri dari *noise* yang dihasilkan pada penguat dan disebut Emisi Spontan Penguat atau *Amplified Spontaneous Emission (ASE)*. *ASE* secara sederhana menyebabkan penurunan pada *gain* penguat dan meningkat pada *noise figure*.

ASE itu sendiri merupakan efek lain yang timbul pada penguat fiber. Emisi yang terstimulasi yang menghadirkan efek “longsor” sepanjang kawat fiber yang menimbulkan *gain* dari penguat tersebut. Walaupun demikian, *gain* ini butuh untuk dibuat sedikit rendah dengan berdasarkan *fluorescence*, pengendoran alami dari *ion-ion*, dimana *ion-ion* tersebut menghasilkan *photon* yang membentuk *ASE* yang merupakan kebocoran pada sisi penerima.

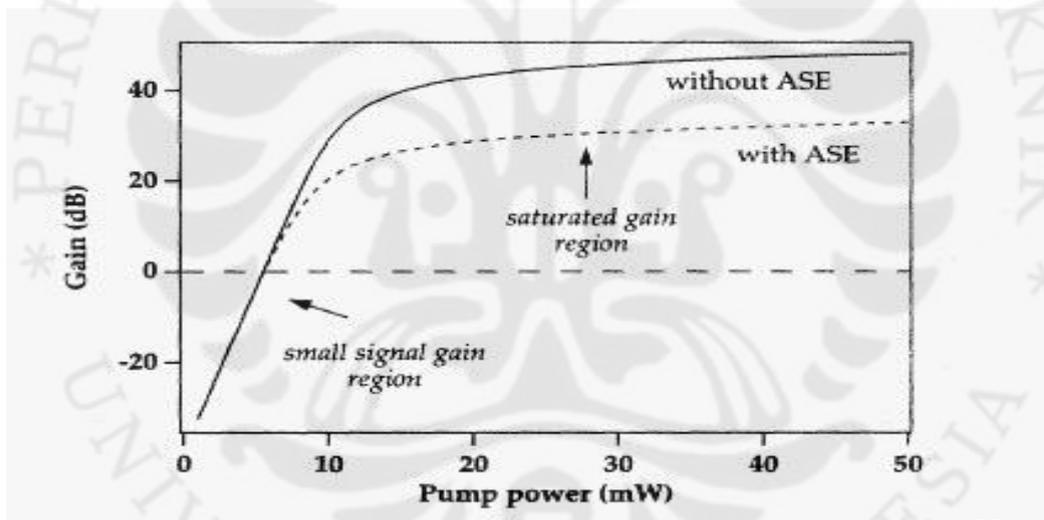
Model matematis dari absorpsi/emisi *ion-ion* pada *EDFA* dengan *ASE* :^[7]

$$\sum_{i \in \{S, A\}} \frac{r(t)}{\tau} + \dots = \dots \quad (2.20)$$

Walaupun demikian, daya maju atau mundur ASE dapat diikutsertakan pada persamaan *rate* dalam persamaan^[12]:

$$\begin{aligned}
 I + \frac{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s}\right) \frac{P_p \psi_p}{P_{th}} + (P_s + P_a + P_a^-) \psi_s}{P_{sat}} &= n \\
 n &= \frac{I + \frac{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s}\right) \frac{P_p \psi_p}{P_{th}} + (P_s + P_a + P_a^-) \psi_s}{P_{sat}}}{I + \frac{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s}\right) \frac{P_p \psi_p}{P_{th}} + (P_s + P_a + P_a^-) \psi_s}{P_{sat}}} \\
 n_2 = n_t - n_1 &
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Pengaruh dari ASE terhadap *gain* yang dihasilkan pada EDFA ditunjukkan pada grafik di bawah ini :



Gambar 2.8 Grafik Output vs Input Power dengan ASE dan tanpa ASE^[6]

2.3.2 Persamaan Propagasi

Penguatan pada sinyal yang bersifat optikal pada EDFA biasanya diartikan dengan bentuk persamaan propagansi yang berhubungan langsung dengan karakteristik fiber yang di-doping oleh Er. Persamaan propagansi dimana sinyal diberikan, dipompa, dan variasi ASE sepanjang fiber bergantung juga pada skema pemompaan. Untuk pemompaan yang bersifat *forward*, pemompa, sinyal dan daya dari propagansi *bi-directional ASE* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan^[12]:

$$\frac{dP_p}{dz} = + \pi \int_{r=0}^a \sigma_p^p \Phi^p \psi \quad r \, r dr - \alpha_p P_p^{\pm} \quad (2.22)$$

$$\frac{dP_s^+}{dz} = + \pi \int_{r=0}^a \sigma_s^s \Phi^s \psi \quad r \, r dr - \alpha_s P_s^+ \quad (2.23)$$

$$\frac{dP_a^{\pm}}{dz} = \pm \pi \int_{r=0}^a \sigma_s^s n P^{\pm} \psi + \quad - \sigma_s^s n P^{\pm} \psi \quad r \, r dr - \alpha P_a^{\pm} \quad (2.24)$$

keterangan :

α_s dan α_p : fiber loss pemompa dan sinyal, untuk fiber yang pendek maka

losses tersebut diabaikan

2π : nilai dari integrasi θ

Persamaan propagansi 2.16, 2.17, dan 2.18 merupakan persamaan diferensial yang *non-linear* yang hanya bisa diselesaikan dengan metode numerik. Untuk mempermudah penyelesaian persamaan maka dapat digunakan persamaan yang menggunakan overlap rasio (Γ) sebagai berikut :^[13]

$$\frac{dP_p^+ (z, t)}{dz} = - P_p^+ \Gamma_p (\sigma_{12}^p n_1 - \sigma_{21}^p n_2) - \alpha_p P_p^+ \quad (2.25)$$

$$\frac{dP_s (z, t)}{dz} = P_s \Gamma_s (\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1) - \alpha_s P_s \quad (2.26)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{\pm} (z, t)}{dz} = \pm P_a^{\pm} \Gamma_s (\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1) \pm 2\sigma_{21}^s n_2 \Gamma_s P_o \text{ m} \alpha_s P_a^{\pm} \quad (2.27)$$

dimana ,

$$\Gamma = (1 - e^{-R^2/w^2}) \quad (2.28)$$

Persamaan selanjutnya menyatakan besarnya peningkatan intensitas sinyal dan peredaman intensitas pemompa yang melintasi *EDFA* sepanjang sumbu z ^[14] :

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{\frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p} - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s}} \sigma_s I_s N \quad (2.29)$$

p
p
h
v
p



$$\frac{dI_p}{dz} = \frac{\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}} \sigma_p I_p N \quad (2.30)$$

Penguatan akan terjadi bila $I_p \geq I_{th}$. Jika $I_p \leq I_{th}$ maka sinyal akan teredam dan bila $I_p > I_{th}$ maka sinyal akan dikuatkan.

Persamaan propagansi di atas dapat disederhanakan dengan normalisasi terhadap nilai ambang (I_{th}).

$$I'_p = \frac{I_p}{I_{th}} \quad (2.31)$$

$$I'_s = \frac{I_s}{I_{th}} \quad (2.32)$$

2.3.3 Gain dan Noise Figure

Gain dari sebuah EDFA dengan panjang fiber L merupakan rasio dari besarnya sinyal pada fiber keluaran dengan besarnya sinyal yang diinjeksikan pada fiber input. Secara matematis adalah sebagai berikut^[12] :

$$G = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} \quad (2.33)$$

Noise pada ASE selama penguatan dan yang ditambahkan (diinjeksikan) pada sinyal bersifat *leading* untuk mengurangi rasio *noise* sinyal (SNR) pada penguat output. Pengurangan SNR dari input ke output dari sebuah amplifier dikenal sebagai *Noise Figure* (NF) yang biasa digunakan pada penguat elektronik. NF dapat diukur melalui pendekatan matematik sebagai berikut^[12] :

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (2.34)$$

Noise Figure dapat diukur melalui pendekatan matematik persamaan yang mengikutsertakan *gain* dan faktor emisi spontan (n_{sp}) atau faktor inverse populasi sebagai berikut^[12] :

$$NF = 2n_{sp} \frac{(G-1)}{G} \approx 2n_{sp} \quad (2.35)$$

$$n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \quad (2.36)$$

Spektrum kerapatan dari induksi *noise* pada emisi spontan merupakan sebuah fungsi frekuensi dan mengikuti spectrum emisi dari *ion-ion* Er^{3+} dengan persamaan sebagai berikut^[12] :

$$S_{sp}(\nu) = (G-1)n_{sp}h\nu \quad (2.37)$$

$$S_{sp}(\nu) = \frac{P_a^+}{\Delta\nu}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.26 maka *noise figure* pada *EDFA* untuk propagansi *forward* yang melibatkan *ASE* maka dapat diperoleh dari pendekatan matematis sebagai berikut :

$$NF = \frac{2P_a^+}{Gh\nu\Delta\nu} \quad (2.38)$$

dimana $\Delta\nu$ merupakan bandwidth dari *bandpass filter* optikal dan $h\nu$ adalah energi *photonnya*.

Seperti yang terlihat pada persamaan 2.31, *noise figure* dari *EDFA* secara langsung tergantung pada *ASE* dan *gain*. *Noise Figure* meningkat seiring meningkatnya *ASE*, sebaliknya, menurun seiring dengan peningkatan *gain*.

2.4 Prinsip Dasar Penguat Optik yang di-Doping Erbium

Pada dasarnya prinsip dasar penguat optik yang di-doping *Erbium* mirip dengan prinsip kerja *LASER*, dimana transisi elektron yang mula-mula menempati tingkat energi yang lebih tinggi menuju ke tingkat yang lebih rendah. Dan tentu saja elektron di tingkat yang lebih tinggi haruslah lebih banyak dibandingkan pada tingkat rendah, atau lebih dikenal dengan inversi populasi. Dengan demikian perpindahan itu akan memancarkan cahaya dengan intensitas yang tinggi.

2.4.1 Pemilihan Bidang Pemompaan

Bidang pemompaan *EDFA* terdiri atas 3 macam yaitu 800 nm, 980 nm, dan 1480 nm. Ketiganya berkaitan erat dengan transisi serapan dari tingkat dasar ke tingkat pengeksitasian. Apabila dipompa pada bidang pemompa 800 nm akan menyebabkan turunnya efisiensi pemompaan. Hal ini disebabkan karena bidang pemompa 800 nm berada pada daerah penyerapan spontan yang diperkuat (*Absortion Spontaneous Amplified, ESA*). Pada bidang 980 nm, *EDFA* dipandang sebagai sistem *LASER* 3 tingkat yaitu elektron-elektron *Erbium* di tingkat dasar dieksitasi ke tingkat pengeksitasian, lalu meluruh secara nonradioaktif dengan cepat ke tingkat atas. Sedangkan pada bidang pemompa 1480 nm, *EDFA* dapat dikatakan sebagai sistem *LASER* 2 tingkat di mana elektron-elektron *Erbium* dieksitasi secara langsung dari tingkat dasar ke tingkat atas dan penguatan terjadi pada saat kembalinya elektron dari tingkat atas ke tingkat dasar.

2.4.2 Komponen Penyusun *EDFA*

Pada dasarnya komponen penyusun penguat serat *doping Erbium* adalah sebagai berikut:

a. *Fiber doping Erbium*

Fiber ter-*doping Erbium* merupakan serat yang sama dengan serat optik transmisi biasa. Perbedaannya terletak pada inti serat, karena telah di-*doping* ion *Erbium*.

b. Sumber Cahaya Pemompa

Sumber cahaya pemompa berupa laser *diode* yang disesuaikan dengan panjang gelombang yang bersesuaian dengan tingkat energi ion *Erbium*. *LASER* yang digunakan daya pemompanya terdiri atas 800nm, 980nm, atau 1480nm.

Apabila dipompa pada dengan daya pemompa 800 nm akan menyebabkan turunnya efisiensi pemompaan. Hal ini disebabkan karena bidang pemompa 800 nm berada pada daerah penyerapan *ASE*. Dengan daya pemompa 980 nm maka elektron-elektron *Erbium* di tingkat dasar dieksitasi ke tingkat

pengeksitasian, lalu meluruh secara nonradioaktif dengan cepat ke tingkat atas. Dengan daya pemompa 1480 nm, elektron-elektron Er^{3+} dieksitasi secara langsung dari tingkat dasar ke tingkat atas dan penguatan terjadi pada saat kembalinya elektron dari tingkat atas ke tingkat dasar. Jangkauan spektrum dari daya pemompa sebesar 980 nm menjangkau 1525 nm – 1565 nm sedangkan untuk 1480 nm menjangkau 1570 nm – 1610 nm.

c. Kopler jenis WDM

Cahaya sinyal masukan dan cahaya pemompa digabung ke dalam fiber ter-*doping Erbium* dengan kopler jenis penggandaan panjang gelombang (*Wavelength Division Multiplexing Coupler, WDM Coupler*). Kopler jenis ini men-transmisikan panjang gelombang yang berbeda dalam satu serat. Di samping itu juga memudahkan dalam penggandaan panjang gelombang yang berbeda. Pada pengkopelan kanal jenis WDM, kapasitas total kanal yang dapat dilayani dalam suatu hubungan terkait erat dengan adanya rugi-rugi sisipan, refleksi yang ditimbulkan serta cakap silang yang diberikan oleh kopler.

d. Isolator Optik

Isolator optik merupakan sebuah alat yang akan dilewati oleh sinyal pada sebuah fiber optik diaman sinyal tersebut berupa sinar yang merambat pada satu arah. Isolator optik ini akan menghalangi sinyal yang berlawanan arah. Isolator optik ini akan mempropagansikan sinyal yang searah dan mencegah sinyal yang berlawanan arah. Isolator optik ini digunakan juga untuk menghilangkan sinyal yang tidak diinginkan. Pada setiap komunikasi optik, selama sinyal mengalami propagansi sinyal tersebut akan direfleksikan pada setiap elemen optik dan kemudian akan kembali pada sumbernya. Sinar yang mengalami refleksi balik inilah yang akan mempengaruhi interferensi dan frekuensi dari keluaran *LASER*. Disinilah isolator optik yang mentransmisikan sinyal untuk menghindari kembalinya sinar tersebut menuju laser.

2.4.3 Prinsip Kerja Penguat Optik yang di-*doping Erbium*

Sifat utama yang harus dimiliki oleh penguat optik adalah perolehan bersihnya. Perolehan penguat *doping Erbium* adalah lebih besar dari 20

dB. Penguat serat yang di-*doping Erbium* memerlukan *LASER* pemompa yang berdaya keluaran tinggi dan suplai arus yang lebih tinggi ke piranti. *LASER* pemompa dan spektrum perolehan dari penguat fiber harus berada di sekitar panjang gelombang tertentu. Untuk penguat yang di-*doping Erbium* memerlukan panjang gelombang 800 nm, 980 nm atau 1480 nm dan spektrum perolehannya dapat meluas dalam jangkauan 1525 - 1565 nm^[1].



BAB 3

Perancangan Simulasi Konfigurasi *Double-pass L-band* dengan Injeksi *ASE C-band EDFA*

L-band membutuhkan fiber yang di-*doping Erbium* lebih panjang untuk memperoleh *gain* yang diperoleh *C-band EDFA*. Sekarang ini berkembang cara dengan meningkatkan konsentrasi *Erbium* pada *L-band EDFA* untuk mengurangi panjang fiber. Dengan meningkatkan konsentrasi *ion Erbium* pada *EDFA L-band* ini dapat memunculkan efek peredaman yang berakibat mengurangi daya pemompa dan menurunkan *noise figure* pada *EDFA*. Sehingga dilakukanlah teknik *double-pass* dengan menggunakan *Fiber Brag Grating (FBG)* sebagai reflektor pada *EDFA* untuk mengurangi panjang fiber^[15].

3.1 Skenario Simulasi

Pada skripsi ini, sinyal input ada dalam *C-band* dan *L-band* secara bersamaan. Penguatan dilakukan dua tahap dengan penggunaan *laser* yang berbeda di antara dua tahap tersebut. Untuk penguatan yang pertama, sinyal *C-band* dikuatkan dan memancarkan *ASE*. *ASE* yang tidak diinginkan pada *C-band* tersebut dapat digunakan untuk memperkuat *L-band EDFA*. *ASE* dari *C-band* tersebut kemudian kembali di-pump dan diinjeksi untuk penguatan pada *L-band* untuk tahap keduanya. Penguatan total sinyal input pada penguat bervariasi sehingga menyebabkan inversi populasinya berubah berdasarkan variasi inputnya. Teknik injeksi *ASE* ini diharapkan merupakan sebuah aplikasi untuk peningkatan *gain* pada *EDFA L-band*. Teknik injeksi ini juga ditambah dengan konfigurasi *double-pass* dengan *FBG* untuk meningkatkan *gain* dan *NF* pada *L-band*. Pada *L-band EDFA*, sebuah konfigurasi *double-pass* bekerja sama dengan *FBG* digunakan. *FBG* tersebut akan merefleksikan bagian kuat dari daya *ASE* menuju penguat untuk dijalani sebagai pemompaan kedua untuk sinyal *L-band* bersifat *leading* untuk *gain* yang lebih tinggi dengan *NF* yang lebih rendah. Untuk menghasilkan *clamped gain* yang hampir serupa antara sinyal *C* dan *L-band* maka fiber yang digunakan pada *L-band* lebih panjang dari *C-band* dengan perbandingan 1:6.^[15] Daya yang dipompa pada *C-band* lebih besar

dibanding *L-band* yaitu pada *C-band* dipemompa dengan daya sebesar 980 nm yang menghasilkan daya output secara tipikal sampai 65 mW dan pada *L-band EDFA* dengan daya pemompa sebesar 1480 nm yang menghasilkan daya output secara tipikal mencapai 300 mW..

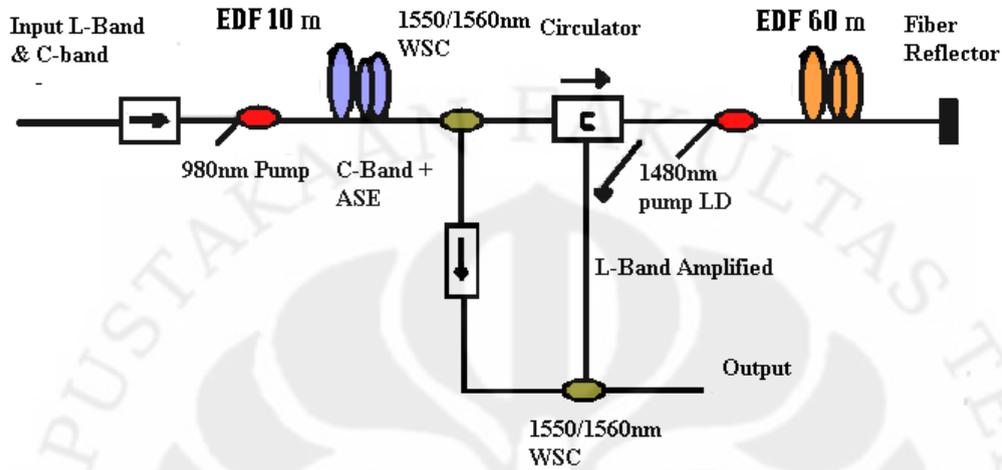
Ada dua tahap penguatan yang didiskusikan pada skripsi ini, penguatan yang pertama adalah penguatan *C-band* dan *L-band* dan untuk tahap keduanya adalah penguatan *L-band* dengan memanfaatkan injeksi *ASE* yang dihasilkan pada penguatan tahap pertama dari *C-band*. EDF (*Erbium Doped Fiber*) yang digunakan panjangnya secara tipikal 15 m dan 95 m. Dari referensi beberapa jurnal maka panjang EDF yang digunakan berasio 1:6. *Laser Diode* digunakan untuk menciptakan populasi *inversi* yang besar. Pada tahap pertama digunakan daya pemompa sebesar 980 nm dan diusahakan tidak bocor pada tahap kedua. Untuk tahap kedua digunakan daya pemompa sebesar 1480 nm untuk memaksimalkan *inversi*. Sebuah 1550/1560nm *wavelength selective coupler* (WSC) digunakan pada penguatan tahap pertama dan kedua setelah sinyal *C-band* dan *L-band* masuk dan dikuatkan. Sinyal *C-band* pada tahap pertama yang dikuatkan dihubungkan ke *output* melalui *optical isolator*. Sinyal *L-band* kemudian diumpankan pada penguatan tahap kedua dan dipantulkan untuk dikuatkan melalui *fiber brag grating* (FBG) untuk kembali dikuatkan dengan injeksi *ASE* dari *C-band*. Sinyal *L-band* yang telah dikuatkan kembali tersebut dihubungkan ke *output* melalui *circulator* dan dikombinasikan dengan sinyal *C-band* pada WSC 1550/1590 nm yang kedua.

3.2 Kondisi yang diamati

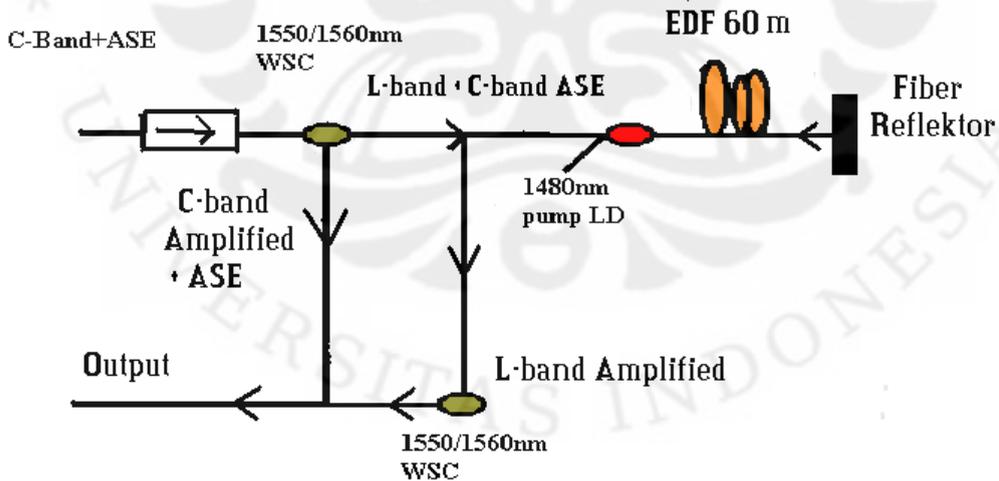
Pada tahap awal kita mengamati pembangkitan laser untuk penguatan sinyal input *C-band* dan *L-band*. *Pump* laser dengan daya pemompa pada *L-band EDFA* dengan tetap menjaga *gain* dan NF pada sinyal *C* dan *L-band* tetap berada pada *level* yang sama. Pada keadaan ini kita akan memperhatikan efek dari penguatan *gain*. *ASE* yang digunakan akan diinjeksikan pada penguatan *L-band* di tahap kedua. Kita akan mengamati efeknya untuk penguatan sinyal *L-band* tersebut.

ASE C-band dari sebuah *C-band EDFA* diberikan pada fiber yang di-*doping Erbium* menggunakan sebuah sirkulator optikal dan sebuah FBG. Sinar *forward*

ASE dari C-band EDFA diarahkan oleh sebuah sirkulator optikal yang direfleksikan oleh sebuah *grating* dan kemudian dipropagansikan dengan sinyal L-band.



Gambar 3.4.1 Diagram Blok Perancangan Eksperimen



Gambar 3.4.2 Uraian *Double-pass*

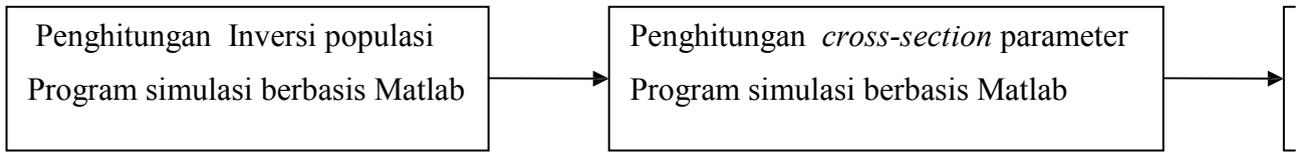
3.3 Tahapan Simulasi

Pada skripsi akan dilakukan beberapa tahapan simulasi untuk beberapa kondisi yang diamati. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB dan OASiX[®]. Tahapan-tahapan tersebut adalah sebagai berikut :

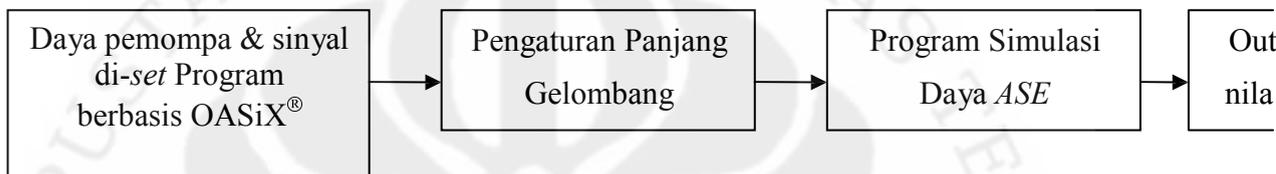
1. Analisa model matematis yang digunakan untuk proses penguatan, penghitungan *gain*, *Noise Figure* (NF).
2. Karakterisasi *gain* dan *noise figure* yang dikuatkan oleh *EDFA* sepanjang panjang gelombang *C-band* dan *L-band* terhadap panjang gelombang *pump* 980 nm.
3. Karakterisasi daya *ASE* yang dihasilkan oleh *C-band* yang akan digunakan untuk penguatan tahap kedua *L-band*.
4. Karakterisasi penguatan dan *noise figure* *L-band* tahap kedua dengan memanfaatkan daya *ASE* yang dihasilkan pada penguatan *C-band* tahap pertama.

3.4 Diagram Blok Tahapan Simulasi

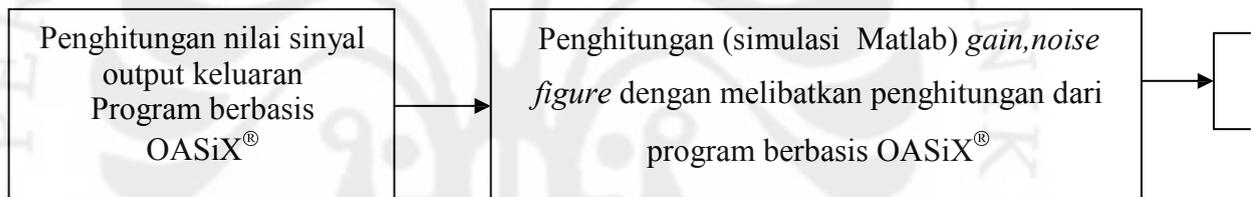
Simulasi Proses Penguatan Tahap Pertama



Simulasi Daya ASE C-band Penguatan Tahap Pertama



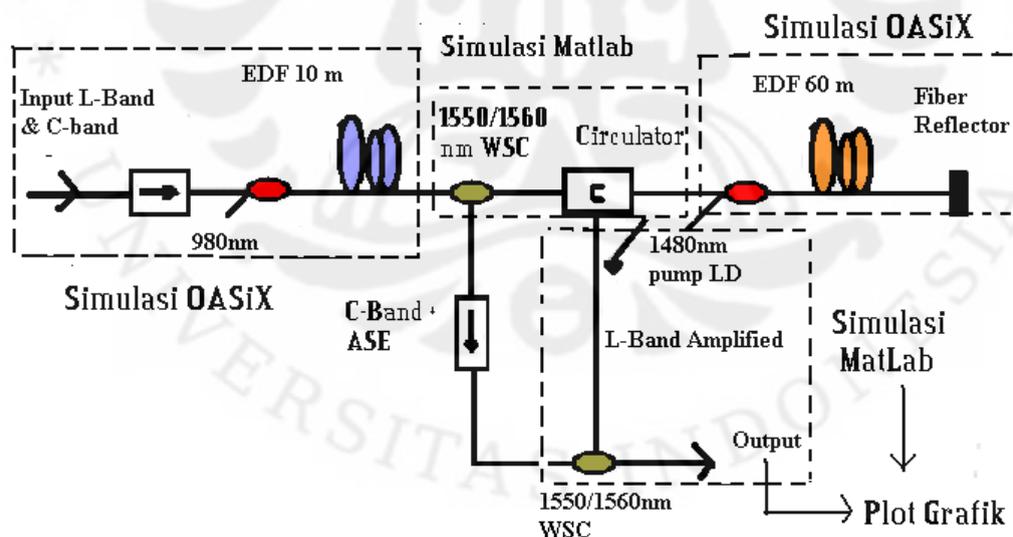
Simulasi Proses Penguatan Tahap Kedua



BAB 4

Analisa dan Hasil Simulasi Konfigurasi *Double-pass L-band* dengan Injeksi *ASE C-band EDFA*

Hasil simulasi performa penguatan dan *noise figure* pada *EDFA* yang dilakukan pada skripsi ini akan dianalisa dan disajikan pada Bab 4 ini. Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan program yang dibuat berbasis Matlab dan OASiX[®] ini menghasilkan beberapa karakteristik yang diamati pada skripsi ini, yaitu *amplified spontaneous emission (ASE)*, penguatan (*gain*), perubahan inversi populasi terhadap daya pemompa, dan *noise figure (NF)* pada *EDFA* baik pada tahap penguatan pertama atau penguatan tahap kedua. Simulasi yang dijalankan menghasilkan karakteristik yang mempunyai hubungan bervariasi terhadap panjang gelombang sinyal C dan L-band. Panjang gelombang sinyal ditetapkan pada rentang C-band (1530 nm – 1560 nm) dan L-band (1570 nm – 1610 nm) dengan jarak antar kanal sebesar 200 GHz.



Gambar 4.1 Rangkaian Fisik dari Proses Simulasi

Komponen yang dilibatkan dalam simulasi untuk melihat performa penguatan dan *noise figure* pada L-band dengan injeksi *ASE C-band* ini antara lain: laser diode (LD) dengan panjang gelombang 980 nm pada tahap pertama dan

1480 nm pada tahap kedua. 1550/1560 nm WSC-coupler yang melewati sinyal pada rentang panjang gelombang 1550 nm atau 1560 nm, *fiber bragg grating* (FBG) yang bekerja sebagai reflektor sinyal.

Prinsip kerja dari simulasi berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.1 dijelaskan dalam uraian berikut ini. Sumber pemompa dan sinyal masukan dilewatkan pada *WSC coupler*. Sinyal masukan berupa sinyal C dan L-band dengan *pump* laser 980 nm pada penguatan tahap pertama. Sinyal masukan di-set pada tahap pertama sebesar 1 μW dengan daya pemompa di-set sebesar 60 mW. Energi laser pemompa melewati sepanjang *EDFA* diabsorpsi oleh ion-ion *Erbium* untuk berpindah dari *ground state* ke tingkat *excited state*. Ion-ion yang dipompa (terekstasi) pada tingkat *excited state* dapat kembali ke tingkat *ground state* secara spontan atau ter-stimulasi sinyal dari luar. Perpindahan secara spontan akan menghasilkan emisi spontan atau yang dikenal dengan *amplified spontaneous emission (ASE)*. Perpindahan ion-ion ke tingkat *ground state* karena stimulasi sinyal dari luar dikenal sebagai emisi ter-stimulasi (*stimulated emission*) yang mengakibatkan penguatan pada sinyal masukan. Sinyal C-band dan L-band ini kemudian dikuatkan. Penguatan tahap pertama ini menghasilkan *ASE* dari C-band yang untuk C-band sendiri merupakan *noise*. *ASE* dari C-band digunakan sebagai daya pemompa tambahan untuk L-band pada tahap kedua. Sinyal L-band kemudian dikuatkan pada tahap kedua oleh LD 1480 nm dengan *ASE* dari C-band diinjeksikan sebagai daya pemompa tambahan. Sinyal C-band yang telah dikuatkan akan dilewatkan *WSC coupler*. Daya masukan sinyal pada tahap kedua ini sama dengan daya sinyal masukan pada tahap pertama sedangkan daya pemompa di-set sebesar 120 mW. Pada akhir EDF diletakkan sebuah reflektor yaitu FBG yang akan merefleksikan 90% sinyal L-band dengan panjang gelombang 1545 nm untuk meminimalkan panjang EDF dengan penguatan maksimal^[16]. Pada akhir penguatan tahap kedua, sinyal L-band yang telah dikuatkan dihubungkan ke output. Selanjutnya dikombinasikan dengan sinyal C-band yang telah dikuatkan sebelumnya pada tahap pertama.

4.1 Analisa model matematis yang digunakan untuk proses penguatan, penghitungan gain, Noise Figure (NF)

Pada *EDFA*, beberapa karakteristik seperti *gain*, *noise figure*, *ASE* memiliki persamaan matematis yang biasa digunakan untuk memperoleh parameter yang dibutuhkan untuk mengamati karakteristik itu sendiri. Persamaan matematis yang ada merupakan persamaan propagasi. Persamaan propagasi ini umumnya merupakan *dependent variabel* dimana satu sama lain saling berhubungan. Pada proses penguatan menggunakan *EDFA* maka daya pemompa, sinyal, dan intensitas cahaya merupakan proses pemompaan dengan sistem *forward*, *backward*, atau *bi-directional*. Nilainya akan berubah-ubah sepanjang fiber. Baik terhadap panjang sinyal gelombang atau terhadap panjang *EDFA*.

Perubahan daya pemompa terhadap panjang *EDFA* dinyatakan pada persamaan 2.25:

$$\frac{dP_p^+(z, t)}{dz} = -P_p^+ \Gamma_p (\sigma_{12}^p n_1 - \sigma_{21}^p n_2) - \alpha_p P_p^+ \quad (2.25)$$

Persamaan di atas dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ^[6]:

$$P_p(z) = P_p(0) \exp(-\sigma_a N_p z / 2) \quad (4.1)$$

dengan nilai z bervariasi terhadap panjang gelombang sinyal dan $P_p(0)$ merupakan nilai daya pemompa awal.

Intensitas saturasi dalam hal penguatan *EDFA* dapat dinyatakan dengan persamaan: ^[6]

$$I_{sat}(z) = \frac{1 + I_p'(z)}{2\eta} \quad (4.2)$$

Persamaan (2.29) dapat dinyatakan juga dengan ^[6]

$$\frac{dI_s'(z)}{dz} = I_{sat}(z) \frac{I_p'(z) - 1}{I_p'(z) + 1} \sigma_p \quad (4.3)$$

Substitusikan persamaan (4.2) pada persamaan (4.3) untuk memperoleh hasil diferensiasi persamaan (4.3):

$$\frac{dI_s'(z)}{dz} = \frac{1 + I_p'(z)}{2\eta} \frac{I_p'(z) - 1}{I_p'(z) + 1} \sigma_p N$$

$(z)+1 \square^s$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sigma_s N (I'_p(z) - 1)}{2\eta} \\
 &\equiv \frac{\sigma_s N}{2\eta} \frac{P_p(0)}{I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} - 1 \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

dengan $\eta = \frac{h\nu_s \sigma_s}{h\nu_p \sigma_p}$

Pengintegrasian untuk persamaan (4.4) akan menghasilkan persamaan:

$$\begin{aligned}
 I'_s(z) &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \int \frac{P_p(0)}{I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} dz \\
 &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \frac{2}{\sigma_p N} \frac{P_p(0)}{I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} + \frac{\sigma_s N}{2\eta} z + C \\
 C &= \frac{P_s(0)}{A I_{th}} + \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} \\
 I'_s(z) &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \frac{2}{\sigma_p N} \frac{P_p(0)}{I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} + \frac{\sigma_s N}{2\eta} z + \frac{P_s(0)}{A I_{th}} + \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} \\
 I'_s(z) &= \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} + \frac{P_s(0)}{A I_{th}} - \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan di atas kita bisa memperoleh nilai penguatan dari *EDFA* yang digunakan. Besarnya penguatan akan dipengaruhi oleh perubahan nilai intensitas sinyal yang bervariasi sepanjang sumbu *z* dari *EDF* itu sendiri.

Besarnya penguatan diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$G(dB) = 10 \log \frac{I'_s(z = \lambda)}{I'_s(z = 0)}$$

atau

$$+ \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} + \frac{P_s(0)}{A I_{th}} - \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z$$

$$G(dB) = 10 \log \frac{P_s(0)}{AI_{th}} \quad (4.6)$$



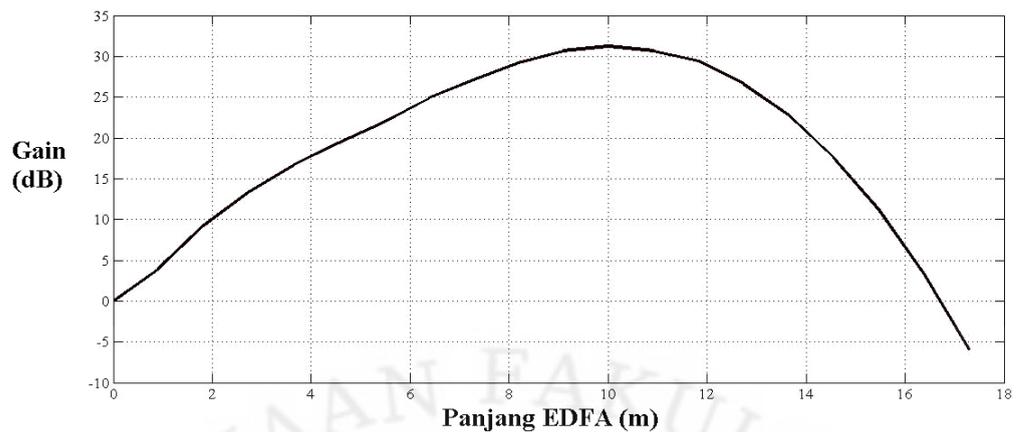
Persamaan di atas akan digunakan pada simulasi untuk melihat performa penguatan pada *C-band* dan *L-band* di kedua tahap penguatan.

Untuk memperoleh nilai NF dapat menggunakan persamaan (2.35) yang nilainya bergantung pada nilai penguatan (*gain*) dalam dB yang diperoleh melalui simulasi dengan menggunakan persamaan (4.6).

4.2 Karakterisasi *gain* dan *noise figure* pada rentang panjang gelombang *C-band* dan *L-band* EDFA pada Penguatan Tahap Pertama

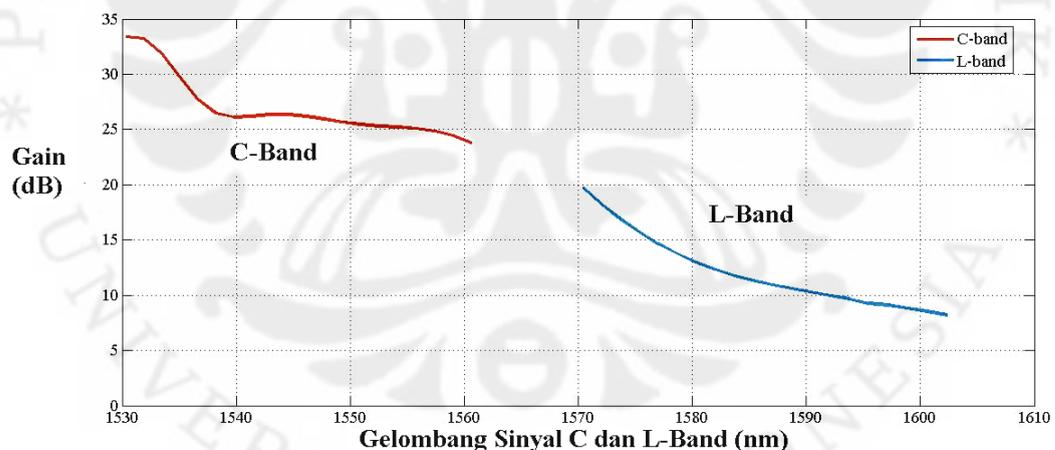
Gain dan *noise figure* (NF) merupakan parameter penting dalam sistem komunikasi. *Gain* merupakan parameter yang menentukan kuat sinyal yang ditransmisikan pada sebuah sistem transmisi dan menunjukkan berapa panjang lintasa transmisi yang dapat dilalui oleh sinyal tersebut. Dalam skripsi ini sinyal yang dilewatkan berada pada rentang gelombang *C-band* (1530 nm – 1560 nm) dan *L-band* (1570 nm – 1610 nm) dengan lebar antar kanal 200 GHz. NF menentukan kualitas sinyal yang akan diterima *receiver*. Nilai *gain* dan NF ini akan dipengaruhi oleh beberapa nilai yaitu, daya pemompa, daya sinyal, panjang EDFA, panjang gelombangnya, dan parameter absorpsi dan emisi. Nilai absorpsi dan emisi *cross section* ini akan berbeda-beda untuk panjang gelombang yang berbeda dengan kata lain, parameter *cross section* tersebut tergantung pada panjang gelombang sinyal.

Pada penguatan tahap pertama sinyal masukan berupa sinyal gelombang C dan *L-band* dipompa dengan *pump* laser 980 nm dengan daya pemompa masukan di-*set* sebesar 60 mW berdasarkan beberapa referensi pada daya pemompa tersebut *C-band* memperoleh *gain flatness*^[15]. Daya sinyal masukan di-*set* pada nilai 0,001 mW atau sebesar 1 μ W. Panjang EDFA pada penguatan tahap pertama adalah 10 m yang diperoleh dari hasil simulasi nilai *gain* optimum. Hasil simulasi nilai *gain* optimum sebagai fungsi panjang EDFA ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Hasil Simulasi gain optimum sebagai fungsi terhadap panjang *EDFA*

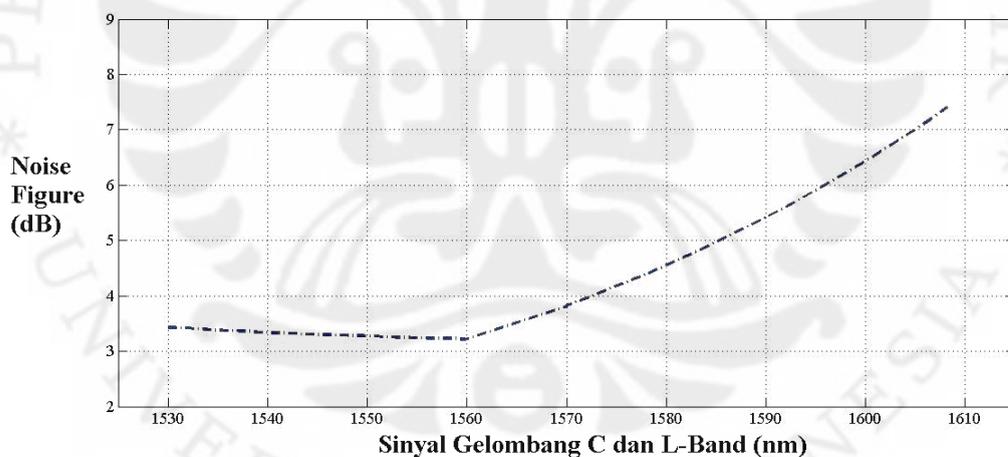
Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nilai *gain* maksimum diperoleh pada *EDFA* dengan panjang 10 m untuk *pump* laser 980 nm. Hasil simulasi *gain* optimum ini digunakan untuk mengukur perolehan *gain* C dan L-band pada tahap penguatan pertama. Karakteristik *gain* dan *NF* C dan L-band pada tahap penguatan pertama akan ditunjukkan pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil simulasi gain pada rentang panjang gelombang C-band dan L-band sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama

Gambar 4.3 menunjukkan penguatan yang dialami sinyal pada rentang panjang gelombang C-band dan L-band yang dikuatkan dengan *pump* laser 980 nm. C-band mengalami penguatan antara 28 dB – 33 dB sepanjang gelombang sinyal C-band sedangkan L-band mengalami penguatan antara 8 dB – 20 dB. Penguatan yang diperoleh sinyal masukan pada rentang panjang gelombang C-band lebih tinggi dibandingkan sinyal masukan pada rentang panjang gelombang

L-band. *Pump* laser yang digunakan yaitu 980 nm menyebabkan C-band memiliki daya absorpsi yang lebih tinggi dibandingkan L-band sehingga penguatan yang terjadi pada C-band akan lebih tinggi dibanding pada rentang panjang gelombang L-band. Jangkauan spektrum *pump* laser 980 nm menjangkau rentang panjang gelombang C-band sehingga efisiensi pemompaannya tinggi. Tingginya efisiensi pemompaan akan meningkatkan daya emisi dan absorpsi. Peningkatan yang terjadi pada daya emisi dan absorpsi akan meningkatkan populasi inversi ion-ion *Erbium* yang terserap sehingga penguatan yang dihasilkan akan tinggi. Karena *pump power* 980 nm lebih jauh menjangkau rentang panjang gelombang L-band sehingga penguatan yang terjadi pada L-band tidak sekuat pada rentang panjang gelombang C-band. Simulasi dibuat dengan menggunakan program berbasis Matlab dan OASiX[®] untuk karakteristik penguatan (*gain*) C dan L-band selengkapnya ada pada Lampiran 1, Lampiran 2, dan Lampiran 3.



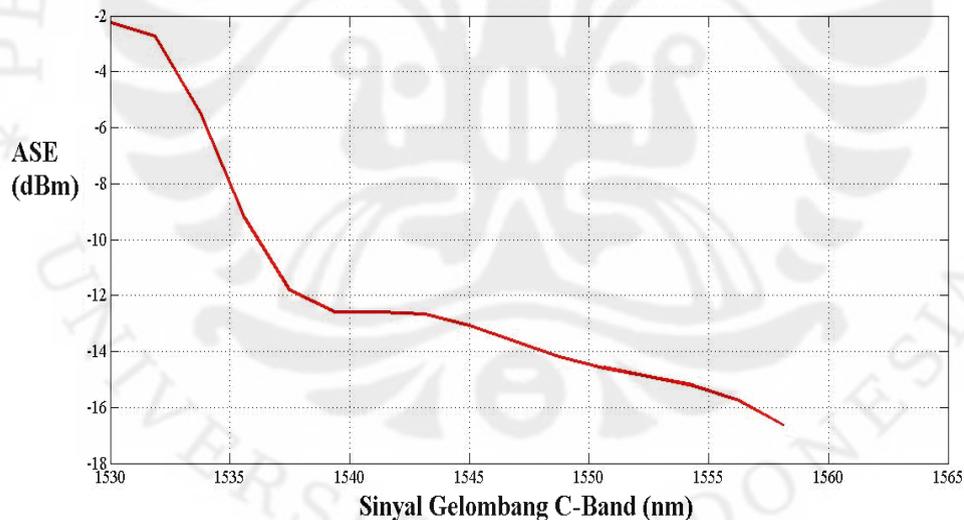
Gambar 4.4 Hasil Simulasi *noise figure* pada rentang panjang gelombang C-band dan L-band sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai *noise figure* pada rentang panjang gelombang C-band lebih tinggi dibanding pada rentang panjang gelombang L-band. Pada tahap penguatan pertama digunakan *pump* laser 980-nm yang menjangkau rentang panjang gelombang C-band dengan efisiensi tinggi sehingga pada saat transmisi sinyal pada rentang panjang gelombang C-band (1530-nm – 1560-nm) *noise* atau gangguan yang muncul rendah sehingga *NF* pada C-band

penguatan tahap pertama 3 dB – 4 dB. *L-band* memiliki *NF* yang lebih tinggi dibanding *C-band* pada penguatan tahap pertama karena jangkauan dari laser *pump* 980-nm terlalu jauh untuk menjangkau rentang panjang gelombang *L-band* (1570-nm – 1610-nm). *NF* yang muncul tinggi ketika mentransmisikan sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* yang jauh tersebut. Simulasi dibuat dengan program berbasis Matlab untuk karakteristik *noise figure* C dan *L-band* selengkapnya ada pada Lampiran 3, Lampiran 4, dan Lampiran 5.

4.3 Karakterisasi Daya ASE yang dihasilkan oleh C-band pada Penguatan Tahap Pertama

Karakteristik *ASE* bertujuan untuk mengetahui pola spectral yang terjadi karena emisi spontan. Karakteristik daya *ASE* yang dihasilkan sinyal pada rentang panjang gelombang *C-band* ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut ini.



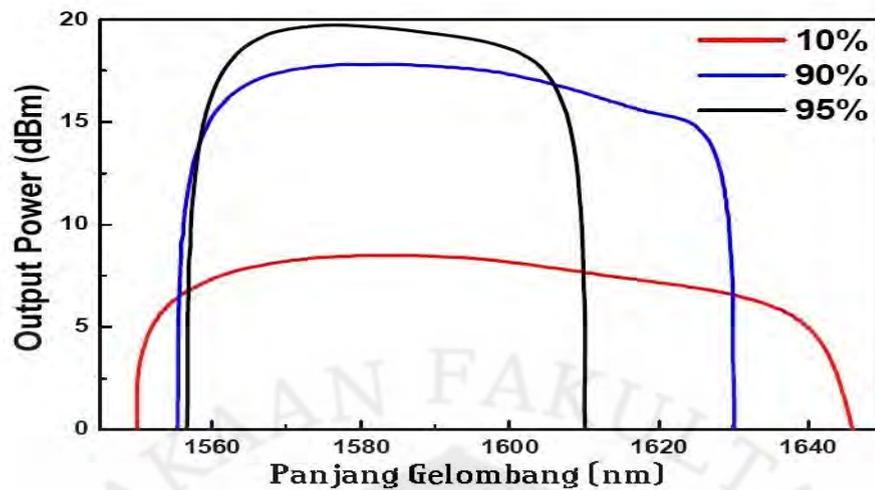
Gambar 4.5 Hasil simulasi daya *ASE* pada rentang panjang gelombang *C-band* sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap pertama

Gambar 4.5 menunjukkan daya *ASE* (*forward*) *spektral* dalam dBm yang dihasilkan pada penguatan tahap pertama pada rentang panjang gelombang *C-band*. Pola spectral daya *ASE* pada Gambar 4.4 menunjukkan pola yang hampir serupa dengan pola penguatan (*gain*) sinyal pada rentang panjang gelombang *C-band*. Pola daya *ASE* inilah yang memberikan informasi daya yang diinjeksikan

pada *L-band* pada penguatan tahap kedua. Daya spektral *ASE (forward)* inilah yang akan diinjeksikan menjadi daya pemompa tambahan untuk sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* pada tahap penguatan yang kedua. Daya spektral *ASE* yang dihasilkan pada penguatan tahap pertama pada rentang panjang gelombang *C-band* adalah -18 dBm hingga -2 dBm. Pada skripsi ini yang diamati dan digunakan adalah daya *ASE* spektral untuk skema *forward* karena secara keseluruhan dalam skripsi ini menggunakan skema *forward-pumping* untuk mengamati performa *gain* dan *noise figure* baik pada penguatan tahap pertama ataupun kedua. Puncak daya *ASE* terjadi pada panjang gelombang 1531.9 nm yaitu sebesar -2 dBm atau sekitar 0.6 mW. Fenomena ini sesuai dengan sifat spektrum absorpsi dan emisi *cross section cross section EDF* yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dimana pada panjang gelombang 1531 nm menunjukkan nilai parameter *cross section* paling tinggi. Hasil simulasi untuk melihat karakteristik *ASE* dibuat dengan program berbasis Matlab dan OASiX[®] dilampirkan pada Lampiran 4.

4. 4 Karakterisasi Penguatan dan *Noise Figure L-band* tahap kedua dengan Injeksi Daya *ASE C-band* Penguatan tahap pertama

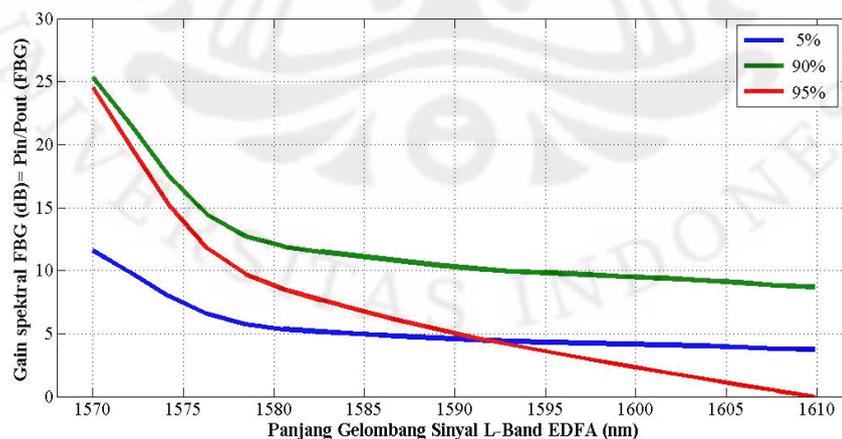
Pada penguatan tahap kedua, Sinyal *C-band* yang telah dikuatkan dan menghasilkan *ASE* pada penguatan tahap pertama, dayanya akan dimanfaatkan sebagai daya pemompa tambahan pada penguatan *L-band* tahap kedua. Penguatan tahap kedua akan menggunakan *pump* laser utama 1480 nm untuk memaksimalkan inversi populasi sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band*. Setelah dikuatkan dengan daya pemompa tambahan dari sinyal keluaran sinyal *C-band* yang telah dikuatkan dan daya *ASE* yang dihasilkan pada tahap pertama, sinyal *L-band* tersebut akan direfleksikan menggunakan reflektor FBG dengan refleksitifitas spektral rata-rata 90% pada rentang *L-band* untuk kembali dikuatkan sesuai dengan Gambar 3.4.2. Hal ini yang disebut konfigurasi *double-pass*. Penggunaan *fiber* reflektor atau filter dengan refleksitifitas spektral 90% didasarkan pada karakteristik reflektor atau filter itu sendiri berdasarkan respon spektral terhadap rentang *L-band* yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6. Spektral respon reflektor terhadap panjang gelombang L-band^[17]

4. 4. 1 Pemilihan Spektral Respon Reflektor Pada Rentang L-band

Dengan memanfaatkan karakteristik spektral respon dari reflektor pada rentang L-band, maka dapat diketahui pengaruh pemerataan penguatan yang terjadi pada sinyal pada rentang L-band. Simulasi dilakukan untuk menganalisa karakteristik reflektivitas fiber reflektor pada penguatan tahap kedua dalam konfigurasi *double-pass*. Hasil spektral penguatan terhadap spektral respon dari fiber reflektor ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut.

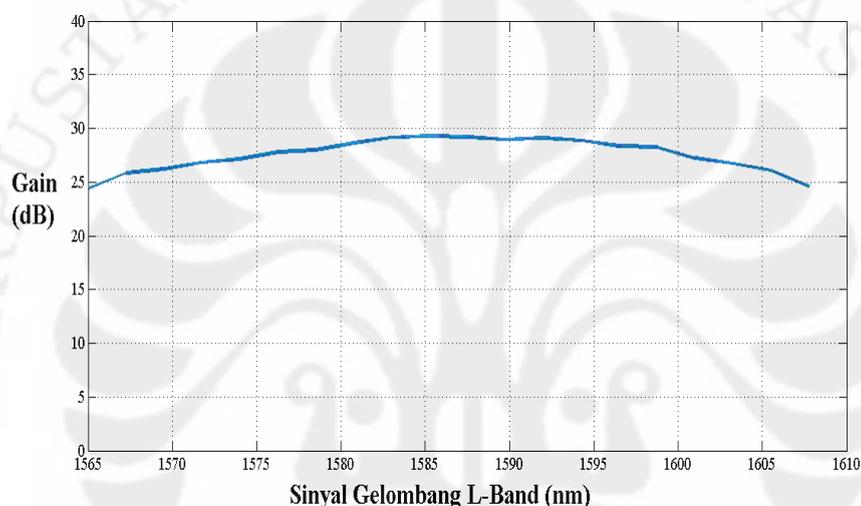


Gambar 4.7 Hasil simulasi karakteristik penguatan terhadap respon spektral fiber reflektor

Gambar 4.7 menunjukkan reflektivitas spektral 90% dari fiber reflektor menghasilkan respon spektral *gain* yang lebih rata dan tinggi dibandingkan

dengan reflektivitas 5% dan 95%. Dari hasil simulasi inilah maka fiber reflektor yang digunakan pada konfigurasi *double-pass* ditentukan dengan parameter reflektivitas sebesar 90% pada akhir penguatan tahap kedua dengan sinyal pada rentang *L-band*.

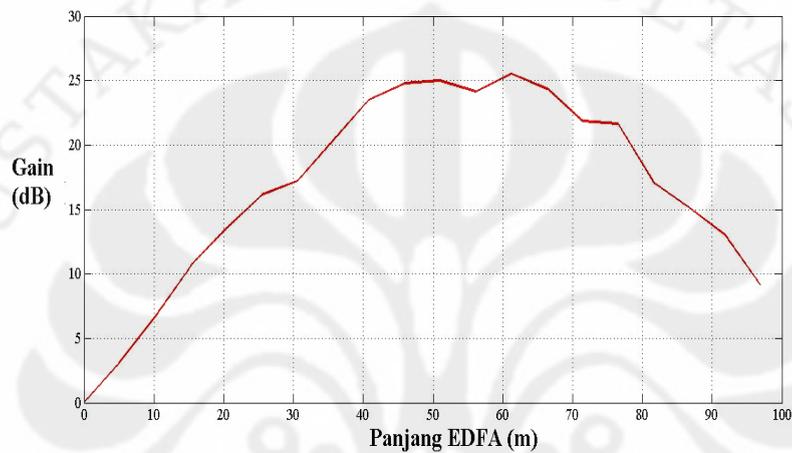
Sinyal yang direfleksikan adalah sinyal yang telah dikuatkan dengan injeksi sinyal keluaran *C-band* dan daya *ASE* yang dihasilkan oleh sinyal *C-band*. Sinyal tersebut merupakan sinyal dengan rentang panjang gelombang *L-band*. Karakteristik *gain* dan *noise figure* pada sinyal rentang *L-band* pada penguatan tahap kedua ditunjukkan pada Gambar 4.9 berikut.



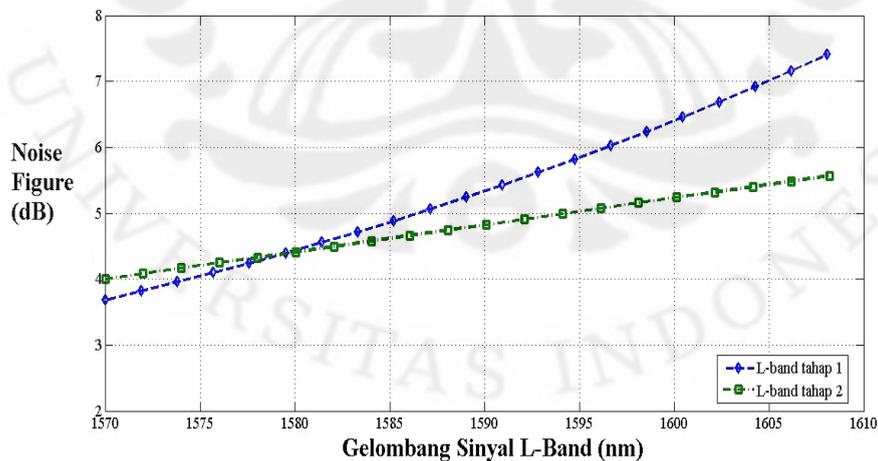
Gambar 4.8 Hasil simulasi *gain* pada rentang panjang gelombang *L-band* sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap kedua dengan injeksi *ASE C-band*

Gambar 4.8 menunjukkan penguatan *L-band* pada tahap kedua setelah diinjeksi daya *ASE C-band* sebagai daya pemompa tambahan mengalami peningkatan sebesar 4.7 dB pada panjang gelombang sinyal 1570 nm. Sinyal pada panjang gelombang *L-band* mengalami perataan penguatan sebesar 3 dB. Sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* mengalami perataan penguatan sebesar 26 dB dengan panjang EDF sepanjang 60 m. Daya *ASE* yang diinjeksikan pada sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* menjadi daya pemompa tambahan dalam proses penguatan tahap kedua sehingga menghasilkan peningkatan dan perataan *gain* sinyal pada *L-band* tahap kedua. Pada konfigurasi *double-pass* ini, sinyal pada panjang gelombang *L-band* dikatakan mengalami dua kali penguatan paa tahap kedua. Penguatan pertama terjadi ketika daya sinyal keluaran dan *ASE*

dari *C-band* yang diinjeksikan pada *L-band* untuk penguatan tahap kedua. Tambahan daya pemompa tersebut akan meningkatkan penguatan *L-band*. Penguatan tahap keduanya terjadi saat *L-band* diumpankan ke FBG dengan reflektivitas 90%. Penguatan dengan mengumpankan sinyal *L-band* yang telah dikuatkan ini bertujuan untuk mencapai perataan penguatan dengan panjang fiber yang minimum dan efisien kurang lebih pada 60 m. Alasan mengapa digunakan panjang fiber 60 m untuk penguatan tahap kedua seperti ditunjukkan Gambar 4.9 berikut.



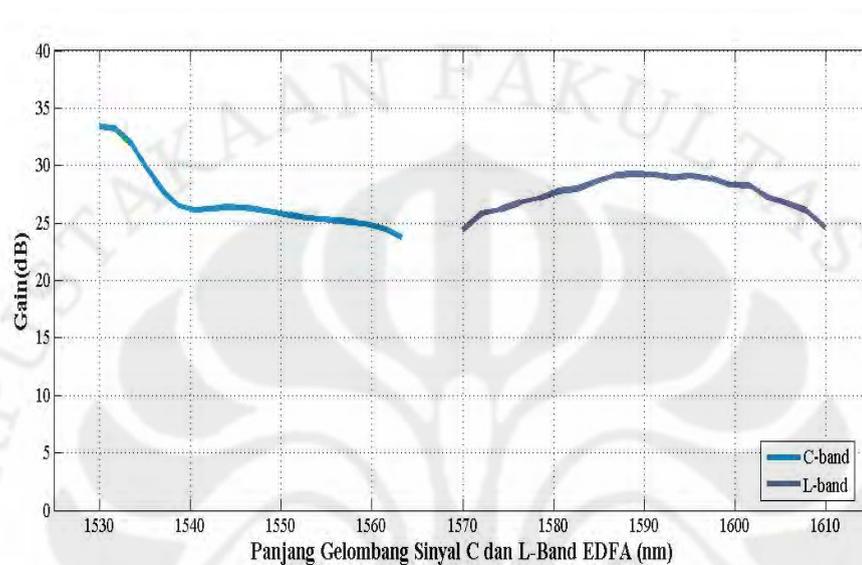
Gambar 4.9 Hasil simulasi *gain* optimum sebagai fungsi terhadap panjang *EDFA*



Gambar 4.10 Hasil simulasi perbandingan *Noise Figure* pada rentang panjang gelombang *L-band* sebagai fungsi panjang gelombang sinyal penguatan tahap kedua

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa *noise figure* pada penguatan tahap kedua sinyal *L-band* mengalami menurun nilainya. Penurunan nilai *NF* pada

penguatan tahap kedua ini muncul karena adanya efek dari *pump carrier* yang dibawa oleh *ASE C-band* yang tingkat absorpsinya tinggi karena dipemompa oleh 980 nm. Energi tinggi yang muncul ini kemudian dialihkan pada sinyal *L-band* untuk penguatan kedua sehingga *noise* nya berkurang walaupun panjang gelombang transmisi lebih jauh. Nilai *NF* berkisar antara 4 dB sampai dengan 5 dB.



Gambar 4.11 Hasil simulasi penguatan total sebagai fungsi panjang gelombang *C-band* (tahap pertama penguatan) dan *L-band* tahap kedua penguatan (terinjeksi *ASE*) dalam konfigurasi *double-pass*

Gambar 4.11 menunjukkan grafik penguatan total mulai dari penguatan *C-band* tahap pertama hingga penguatan *L-band* tahap kedua dengan injeksi daya *ASE* dari *C-band*. Perataan penguatan terjadi pada nilai 26 dB untuk sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band*. Simulasi dibuat menggunakan program berbasis Matlab dan OASiX[®] dapat dilihat pada Lampiran 5 dan Lampiran 6.

BAB 5

KESIMPULAN

Kesimpulan pada bab 5 ini dibuat berdasarkan analisa dan hasil simulasi yang telah dilakukan pada bab 4. Beberapa kesimpulan yang dapat diuraikan adalah sebagai berikut.

1. Telah dikembangkan suatu metoda analisa dengan pemodelan menggunakan perangkat lunak yang berbasis Matlab dan OASiX[®] untuk menganalisa pemerataan penguatan fiber optik amplifier yang di-*doping erbium (EDFA)* untuk rentang panjang gelombang sinyal *C-band* (1530 nm – 1560 nm) dan *L-band* (1570 nm – 1610 nm).
2. Dari hasil analisa tersebut terungkap bahwa dapat dilakukan pemerataan dan peningkatan penguatan sinyal dengan *EDFA* untuk rentang panjang gelombang *C* dan *L-band* dengan injeksi ASE *C-band* dengan konfigurasi *double-pass*.
3. Dari hasil analisa tersebut terungkap bahwa nilai *noise figure* sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* yang dikuatkan semakin rendah nilainya karena pengaruh injeksi ASE *C-band* dengan konfigurasi *double-pass*.
4. Dari hasil analisa diketahui bahwa dengan meng-injeksikan ASE yang diperoleh dari *C-band* pada penguatan tahap pertama pada *L-band* pada penguatan tahap kedua dapat meningkatkan dan meratakan *gain* pada sinyal dengan rentang panjang gelombang *L-band*.
5. Dengan konfigurasi *double-pass* maka dapat diperoleh pemerataan penguatan sinyal pada rentang panjang gelombang *L-band* dengan penghematan panjang fiber dengan syarat reflektansi sebesar 90% pada rentang panjang gelombang 1585 nm – 1600 nm.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Walidany, H. (2000). *Teknologi Serat Optik*. Seri Seminar Elektro Indonesia. April, 2000.
<http://www.elektroindonesia.com/elektro/index.html>.
- [2] Hidayat, A., Almaadin, Y., Pradipta, W.P., & Hartanto, R. (2006). Attenuation and Distortion. Makalah Data Communication Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [3] Pramono, S.H. (2008). Perataan Penguatan Erbium-Doped Fiber Amplifier C-Band Dengan Metode Pengaturan Daya Sinyal Masukan Pada Daya Pompa Tetap. Disertasi Program Studi Teknik Elektro (Opto Elektronika dan Aplikasi Laser) Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [4] Paschotta, Rudiger. "Amplified Spontaneous Emission." Encyclopedia of Laser Physics and Technology. 03 Juni. 2009. <<http://www.rp-photonics.com/ase>>.
- [5] Hamzah, Kamal. (2008). Adaptive Modulation and Coding (AMC) Spatial Diversity MIMO-OFDM untuk Sistem Mobile WIMAX. Skripsi Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [6] Becker, P.C. (2002). *Erbium-Doped Fiber Amplifier*. NY:Academic Press.
- [7] Jelacic, Z.D., & Nebojsa, P. (2008). On The Fractional Order Model of EDFAs With ASE. *Journal of University of Nottingham*.
- [8] Vemuru, S. A. (2008). Experimental and Theoretical of Absorption and Emission Cross-Sections in Rare Earth Doped GaN Epilayers. Thesis Program of Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.
- [9] Cokrak, A. C., & Altuncu, Ahmet. (2004). Gain and Noise Figure Performance Of Erbium Doped Fiber Amplifier. *Journal Of University of Istanbul*.
- [10] Luhs. 2003. Erbium Doped Amplifier. Eschbach.
- [11] Jordanova, Lidia & Topchiev, V. (2009). Amplification Of the Multiwavelength Signal by Using EDFA with constant Gain. *International*

Journal of Computer Science and Network Security, vol.9 No.12, Dec 2009.

- [12] Cokrak, A. C., & Altuncu, Ahmet. (2004). Gain and Noise Figure Performance Of Erbium Doped Fiber Amplifier. *Journal Of University of Istanbul*.
- [13] Hossain, N., Mishra, V., Hairul, A.A.R., Aboou, F.M., Faidz, A.R., Quadir, S.M.M., Al-Mansoori, M.H., & Naji, A.W. (2007, March). *A Numerical Analysis of R-EDFA for Long Haul Optical Fiber Communication System*. Paper presented at SETIT 4th International Conference: Science of Electronics. Tunisia.
- [14] Sun, Y., Zyskind, J.L., & Srivastava, A.K. (1997). Average Inversion Level, Modeling, Physics of Erbium Doped Fiber Amplifier. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. Vol. 3. No. 4, August 1997.
- [15] Hwang, S., Song, K., Kwon, H., Koh, J., Oh, Y., & Cho, K. (2001). Broadband Erbium-Doped Fiber Amplifier With Double-Pass Configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*. Vol. 13, No. 12, December 2001.
- [16] Oh, J.M., Choi, H.B., Lee, D., Ahn, S.J., Jung, S.J., & Lee, S.B. (2002). Demonstration of Highly Efficient Flat-Gain L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers by Incorporating a Fiber Bragg Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, No. 9. September 2002.
- [17] Chang, J.Y and Liao, Y.S, (2006), "L-band Erbium-doped fiber laser with coupling-ratio controlled wavelength tenability," *OPTICS EXPRESS*, vol.14, pp. 9744-9749, Oct. 2006.

LAMPIRAN

Lampiran 1

```
clc
clear all;
A=7.5e-12;
Rp1=0.85; %overlap pump ratio
Rp2=0.72;
Rp=0.77;
Rs1=0.4; %overlap signal ratio
Rs=0.74;
pump_absP=2.8e-25; %pump absorption cross section
ems_p_C=0.8e-25; %pump emission cross section
signal_absS=2.9e-25; %signal absorption cross section
signal_emsS=4.1e-25; %signal emission cross section
h=6.626e-34; %konstanta Plank
c=3e+8; %kecepatan cahaya
Lp1=980e-9;
Lp2=1480e-9; %pump wavelength
Ls=1531e-9; %signal wavelength
Pin=42e-3; %Pump power
Psig=0.67e-6; %Signal power
t21=10e-3; %lifetime
vp=c/Lp1;
N=7.8e24; %Erbium ion concentration
kb=1.38e-23;
T=300;
R=1.5e-6; % Distribution radius
a=1.55e-6; %Core radius/jari-jari EDFA
alfa_s=0.2;
alfa_p=0.24;
m=1e-3;
n1p=1.469; %indeks bias inti pump
n1s=1.462; %indeks bias signal
n2p=1.45; %indeks bias cladding pada saat pompa
n2s=1.444; %indeks bias cladding pd saat sinyal
Lamda_sig_C=[1530e-9:1.751e-9:1565e-9];
L_s_C=1550e-9;
phi=3.14;

%Menghitung Overlap rasio terhadap Lamda C-band

NA=sqrt((n1s^2-n2s^2));
V=2.*phi.*a./L_s_C.*NA;
b=0.65;
w=(a./sqrt(2)).*[b+(1.619./V.^1.5)+(2.879./V.^6)]; %omega=spot size
ax=-(a.^2)./w.^2;
Rs_L_C=(1-exp(ax)); %Gamma signal
Rs_lamda_C=0.4;

NA_p=sqrt((n1p^2-n2p^2)); V_p=2*phi*a/Lp1*NA_p;
w=(a./sqrt(2))*[0.65+(1.619/V_p^1.5)+(2.879/V_p^6)]; %omega=spot size
ax=-(a^2)/w^2;
Rp_lamda_C=(1-exp(ax)); %Gamma pump
```

%Menghitung emisi cross section signal dan absorpsi cross section pompa

```
g_Ls_C=[6.68,6.75,6.35,5.7,5.27,4.89,4.69,4.65,4.59,4.59,4.59,4.55,4.48,4.45,4.35,4.28,  
4.18,4.15,4.08,3.91]; %estimasi small gain dr grafik emisi-absorpsi  
ems_s_C=g_Ls_C./(Rs_lamda_C.*N); %emission cross section signal C-band  
add=zeros(1,20)+31.232;  
lmd=(48.007./(Lamda_sig_C*1e6));  
abs_s_C=ems_s_C./exp(add-lmd);  
alfa_lamda_pump=4.4; %estimasi small gain dr grafik emisi-absorpsi  
abs_p_C=4.4/(Rp_lamda_C*N);
```

```
Lamda_sig_C=[1530e-9:1.57e-9:1560e-9];  
L_s_C=1550e-9;  
L_p=980e-9;  
P_s0=1e-4;  
P_p0=0.06;  
A_eff=7.54e-12;  
h=6.626e-34; %konstanta Plank  
c=3e+8;  
sig_s=[1.98e-24 2e-24 1.88e-24 1.69e-24 1.56e-24 1.45e-24 1.39e-24 1.38e-24 1.36e-24  
1.36e-24 1.36e-24 1.35e-24 1.33e-24 1.32e-24 1.29e-24 1.27e-24 1.24e-24 1.23e-24  
1.21e-24 1.16e-24];  
Lamda_Cband_x=Lamda_sig_C.*1e9;  
lamda_s=1550.92e-9;  
vp=c./L_p;  
sig_p=7.0787e-025;  
N=7.85e24;  
v_s=c./Lamda_sig_C;  
tau_2=0.01; lth=h*vp/(sig_p*tau_2*0.4);  
n_=(vp.*ems_s_C.*0.8)/(v_s.*sig_p.*0.4);  
a1=((ems_s_C.*P_p0.*0.8)/(n_.*sig_p.*lth.*A_eff*0.4))  
a2=(sig_p*N*0.1/2);  
a3=P_s0/(A_eff*lth);  
a4=((ems_s_C.*N)*0.2)/(2*n_);  
a1_kal=a1*0.4;  
a2_kal=a2*1.1;  
a3_kal=a3*0.75;  
a4_kal=1.5*a4;  
a3_kal_m=zeros(1,20)+a3_kal;  
a2_kal_m=zeros(1,20)+a2_kal;
```

```
for L=10  
    ls=(a1_kal+a3_kal_m)-(a1_kal.*exp(-a2_kal_m.*L)-(a4_kal.*L));  
    G=ls./a3_kal_m;  
    gain=10.*log10(ls./a3_kal_m);  
end
```

```
gain_Lband2=[25.3296 25.1869 23.5259 19.9327 19.2692 18.9802 18.4176 18.4177  
18.4181 18.0950 17.6443 17.0571 16.8937 16.3400 15.5428 15.1975 13.9152 13.1492  
12.2830 10.6319];  
Lamda_sig_L=[1570e-9:2.01e-9:1610e-9].*1e9;  
plot(Lamda_Cband_x,gain,Lamda_sig_L,gain_Lband2,'linewidth',2.5)  
    hold all  
grid on  
xlabel('Panjang Gelombang Sinyal C-Band EDFA (nm)')
```

```

ylabel('Gain(dB)')
title('Gain vs Panjang Gelombang Sinyal C-Band')
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',14)

%Menghitung N2(z)

b1=((t21.*abs_s_C)./(A.*h.*v_s).*Rs_lamda_C);
b2=((t21.*abs_p_C)./(A.*h.*vp).*Rp);
b3=((t21.*(abs_s_C+ems_s_C))./(A.*h.*v_s)).*Rs_lamda_C;
b4=((t21.*(abs_p_C+ems_p_C))./(A.*h.*vp)).*Rp_lamda_C;

b1b=b1.*P_s0;
b2b=b2.*P_p0;
b2b_bar=zeros(1,20)+b2b;
b3b=b3.*P_s0;
b4b=b4.*P_p0;
b4b_bar=zeros(1,20)+b4b;

b5=((b1b+b2b_bar)./(b3b+b4b_bar));
N2=b5.*N;
N1=[N-N2];

%Menghitung nsp (spontaneous emission factor)

n_C=(sig_s./abs_s_C);
nsp=n_C.*N2./((n_C.*N2)-N1);

%Menghitung NF - Noise Figure

delta_lamda=1560e-9-1530e-9;
delta_v=(c./Lamda_sig_C).*(delta_lamda./Lamda_sig_C);

koef1=zeros(1,20)+1; NF=2.*nsp.*((gain-
koef1)./gain); NF_lamda=10.*log((2.*nsp.*((gain-
koef1)./gain)));
P_ASE=2.*nsp.*h.*v_s.*delta_v.*(gain-koef1);
P_ASE_mW=P_ASE.*1e3;
P_ASE_dBm=10.*log10(P_ASE_mW);

NF_Lband=[3.8172 3.9550 4.0975 4.2450 4.3974 4.5551 4.7181 4.8866 5.0609 5.2409
5.4270 5.6194 5.8182 6.0236 6.2358 6.4550 6.6815 6.9154 7.1571 7.4066];
Lamda_sig_L=[1570e-9:2.01e-9:1610e-9].*1e9;
NF_C=[3.43 3.42 3.40 3.38 3.37 3.36 3.34 3.332 3.32 3.31 3.3 3.29 3.28 3.272 3.26 3.25
3.245 3.237 3.230 3.22];
Lamda_gab=[Lamda_Cband_xLamda_sig_L];
NF_gab=[NF_C NF_Lband];
%plot(Lamda_gab,NF_gab,'b','linewidth',2.5)
%grid on
%hold all
%xlabel('Panjang Gelombang C dan L-band (nm)')
%ylabel('Noise Figure')
%ylim([2 9])
%xlim([1525 1615])
%title('Noise Figure vs Panjang gelombang sinyal C dan L-Band ')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',14)

```

```

%plot(Lamda_Cband_x,P_ASE_dBm,'r','linewidth',1.5)
%hold on
%grid on
%xlabel('wavelength signal of C-band EDFA (m)')
%ylabel('ASE Power of C-Band EDFA (W)')
%title('ASE Power vs C-Band wavelength signal')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

%Menghitung Intensitas cahaya

foton_fluks1=(N-N1+N2)/(N-N1-N2);
foton_fluksth=1/(t21*signal_absS); %foton fluks threshold
foton_fluksP=foton_fluks1*foton_fluksth;

Isig=P_s0.*Rs_lamda_C./A; %Light field intensities input per panjang gelombang

%Menghitung panjang fiber optimum pada gain optimum

lamda=1531.9e-9;
P_p0=0.06; sigma_p=sig_p;
sigma_s=sig_s;
gama_21=1/t21;
P_p0mW=P_p0.*1000;
Ip=(P_p0./A).*Rp_lamda_C;
fluks_p=Ip./(h.*vp);
fluks_s=Isig./(h.*v_s);
k1=fluks_p.*abs_p_C;
k2=2.*fluks_s.*ems_s_C;
gama_21m=zeros(1,20)+gama_21;
k3=k1-gama_21m;
k4=gama_21m+k2+k1;
inv_N=(k3./k4);

L_c=0:0.91:18; %Panjang EDFA
eksp=(abs_p_C*N/2).*L_c;
eksp_kal=eksp.*0.09;
P_pz=P_p0.*exp(-eksp_kal);
Wp_a=abs_p_C.*P_pz;
Wp_b=h.*vp.*A_eff;
Wp=(Wp_a./Wp_b);
Wp_kal=Wp.*0.4;
koefs1=zeros(1,20)+1;
beta=zeros(1,20)+0.38;
inv_N_a=((koefs1-beta).*(Wp_kal.*t21))-koefs1).*N;
inv_N_b=((koefs1+beta).*(Wp_kal.*t21))+koefs1;
inv_N_maks=(inv_N_a./inv_N_b);
inv_N_maks_kal=inv_N_maks.*0.25;
g_maks=sig_s.*inv_N_maks_kal;
g_maks_m=exp(g_maks.*L_c);
g_maks_m_kal=g_maks_m.*0.8;
G_dB=10.*log10(g_maks_m);

%plot(L_c,G_dB,'r','linewidth',1.1)

```

```

%hold on
%grid on
%xlabel('Panjang EDFA (m)')
%ylabel('Gain(dB)')
%title('Gain Maksimum vs Panjang EDFA')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

%plot(Lamda_Cband_x,P_ASE_dBm,'r','linewidth',1.1)
% hold on
%grid on
%xlabel('Panjang Gelombang Sinyal C-Band EDFA (nm)')
%ylabel('ASE Power(dBm)')
%title('ASE Power vs Panjang Gelombang Sinyal C-Band')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

```



Lampiran 2

```
clc
clear all;
A=7.5e-12;
h=6.626e-34; %konstanta Plank
c=3e+8; %kecepatan cahaya
Lp1=980e-9;
Lp2=1480e-9; %pump wavelength
Ls1=1531e-9; %signal wavelength C-band
Ls2=1571e-9; %signal wavelength L-band
Pin=42e-3; %Pump power
Psig=0.67e-6; %Signal power
t21=10e-3; %lifetime
vp=c/Lp1;
N=1e24; %Erbium ion concentration
kb=1.38e-23;
T=300;
R=1.5e-6; % Distribution radius
a=1.4e-6; %Core radius/jari-jari EDFA
n1p=1.469; %indeks bias inti pump
n1s=1.462; %indeks bias signal
n2p=1.45; %indeks bias cladding pada saat pompa
n2s=1.444; %indeks bias cladding pd saat sinyal
Lamda_sig_L=[1570e-9:1.9048e-9:1610e-9];
phi=3.14;
ems_p_L=0.8e-25;;

%Menghitung Overlap rasio terhadap Lamda L-band

NA=sqrt((n1s^2-n2s^2));
V=2.*phi.*a./Lamda_sig_L.*NA;
b=zeros(1,21)+0.65;
w=(a./sqrt(2)).*[b+(1.619./V.^1.5)+(2.879./V.^6)]; %omega=spot size
ax=-(a.^2)/w.^2;
Rs_lamda_L=(1-exp(ax)); %Gamma signal

NA_p=0.4; V_p=2*phi*a/Lp1*NA_p;
w=(a./sqrt(2)).*[0.65+(1.619/V_p^1.5)+(2.879/V_p^6)]; %omega=spot size
ax=-(a.^2)/w.^2;
Rp_lamda_L=(1-exp(ax)); %Gamma pump

%Menghitung emisi cross section signal dan absorpsi cross section pompa

g_Ls_L=[1.25,1.2,0.85,0.8,0.7,0.65,0.65,0.55,0.5,0.45,0.4,0.38,0.35,0.3,0.28,0.25,0.24,0.22,0.21,0.2,0.18]; %estimasi small gain dr grafik emisi-absorpsi
ems_s_L=g_Ls_L./(Rs_lamda_L.*N); %emission cross ection signal L-band
add=zeros(1,21)+31.232;
lmd=(48.007./(Lamda_sig_L*1e6));
abs_s_L=ems_s_L./exp(add-lmd);
alfa_lamda_pump=4.4; %estimasi small gain dr grafik emisi-absorpsi
abs_p_L=alfa_lamda_pump/Rp_lamda_L*N;
```

```

Psignal_mW=[0.282,0.275,0.245,0.234,0.204,0.178,0.145,0.117,0.087,0.046,0.026,0.012
,0.00794,0.000141,0.000011];
Psignal_W=Psignal_mW.*1e-3;
P_s0=(0.6e-3:0.053e-3:1.7e-3);
P_s0_mW=P_s0./1e-3;
P_p0=0.05; %daya pump masukan
P_s0_dBm=10.*log10(P_s0_mW); %P_s0=(0.25e-3:0.084e-3:1.995e-3);
%P_p0=0.1; %daya pump masukan

```

%Menghitung Gain berdasarkan perubahan panjang gelombang signal pada L-band

```

Lamda_sig_L_kal=Lamda_sig_L;
vs=c./Lamda_sig_L_kal;
tau_2=0.01;
l_th=h*vp/(abs_p_L*tau_2*0.4);
n_=(vp.*ems_s_L)/(vs.*abs_p_L);
a1=((ems_s_L.*P_p0.*0.8)/(n_.*abs_p_L.*l_th.*A.*0.4)).*0.4;
a2=(abs_p_L.*N*0.1).*1.1;
a3=P_s0./(A.*l_th).*0.75;
a4=(ems_s_L.*N).*0.2./(2.*n_).*-1.5;

```

```

for L=18;
    all=(a1+a3)-(a1.*exp((-a2.*L)/2)-a4.*L);
    G=all./a3;
    gain=10.*log10(all./a3);
end
%plot(Lamda_sig_L_kal,gain,'linewidth',1.5)
% hold on
% grid on
%xlabel('wavelength signal of L-band EDFA (m)')
%ylabel('Noise Figure of L-Band EDFA')
%title('Noise Figure vs L-Band wavelength signal')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

```

%Menghitung N2(z)

```

b1=((t21.*abs_s_L)/(A.*h.*vs).*Rs_lamda_L);
b2=((t21.*abs_p_L)/(A.*h.*vp).*Rp_lamda_L);
b3=((t21.*(abs_s_L+ems_s_L))/(A.*h.*vs)).*Rs_lamda_L;
b4=((t21.*(abs_p_L+ems_p_L))/(A.*h.*vp)).*Rp_lamda_L;

```

```

b1b=b1.*P_s0;
b2b=b2.*P_p0;
b2b_bar=zeros(1,21)+b2b;
b3b=b3.*P_s0;
b4b=b4.*P_p0;
b4b_bar=zeros(1,21)+b4b;

```

```

b5=((b1b+b2b_bar)/(b3b+b4b_bar));
N2=b5.*N;
N1=[N-N2];

```

%Menghitung nsp (spontaneous emission factor)

```

n_sp=ems_s_L/(abs_s_L);

```

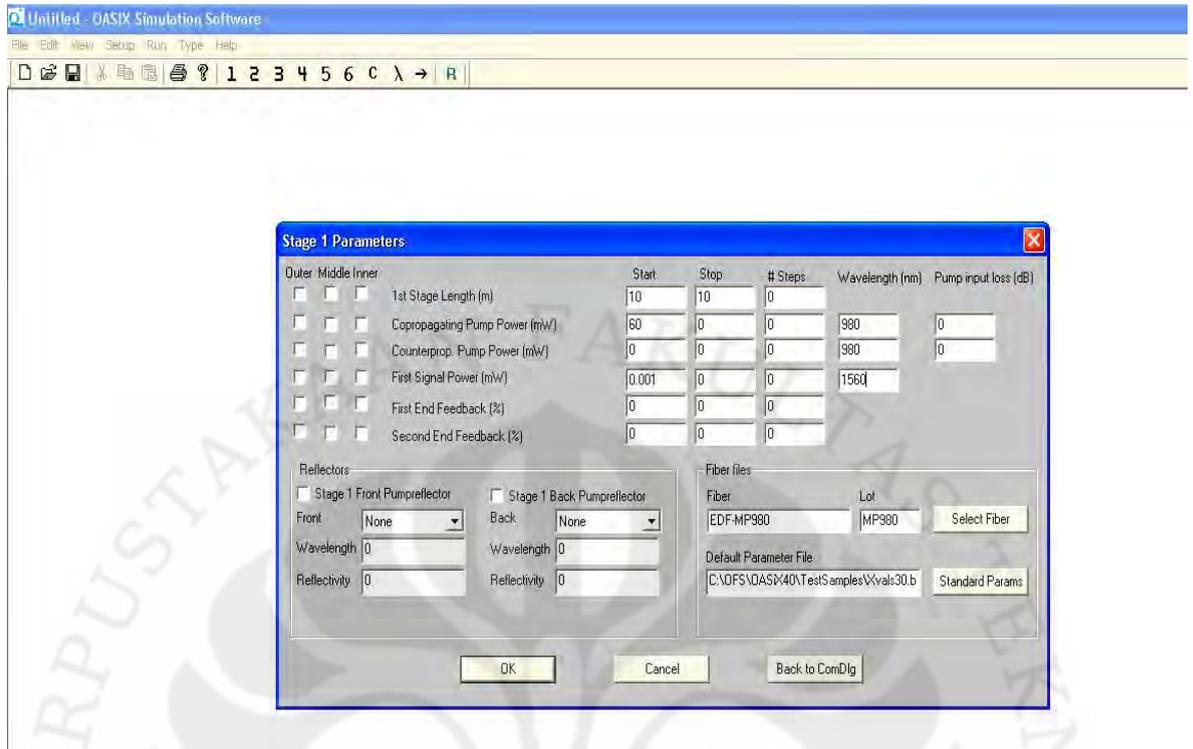
%Menghitung NF - Noise Figure

```
delta_v=40e-9;
```

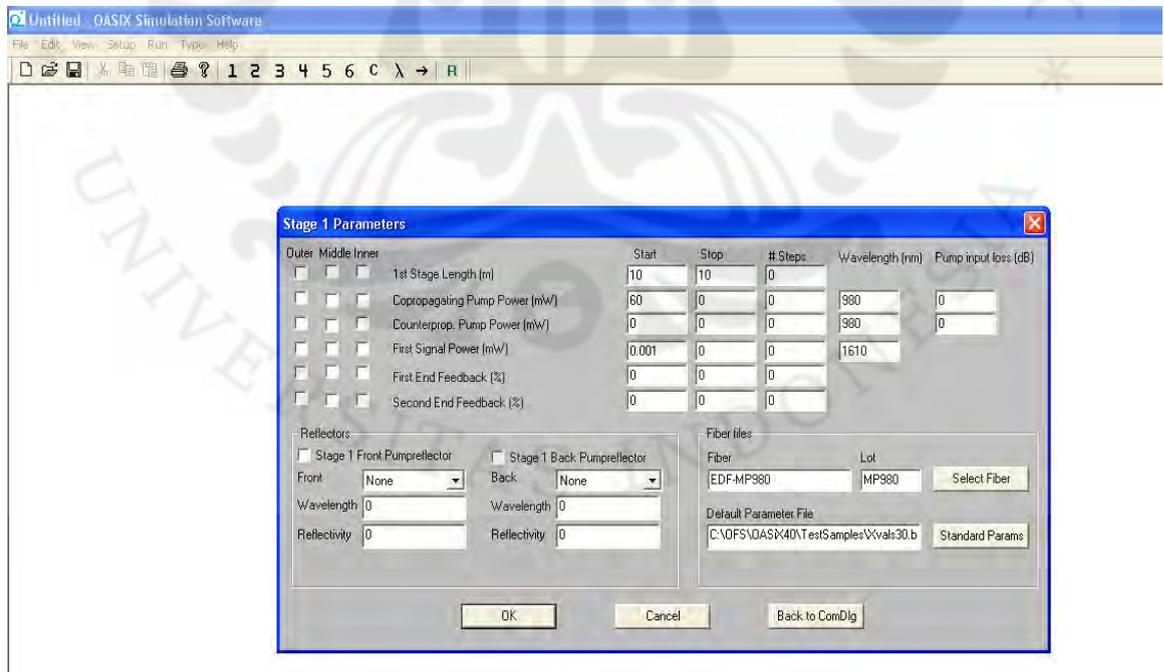
```
koef1=zeros(1,21)+1; NF=(koef1+(2.*n_sp).*(gain-koef1))./gain; P_ASE=2.*n_sp.*h.*vs.*delta_v.*(G-koef1)./10e-20; P_ASE_mW=P_ASE.*1e3; NF_Lband2=[4.00 4.05 4.11 4.17 4.70 4.72 4.97 5.05 5.14 5.16 5.24 5.36 5.395 5.5 5.6 5.62 5.63 5.64 5.65]; NF_L=[4:0.08251:5.65]; L_sig=[1570.42 1572.06 1573.71 1575.37 1577.01 1578.69 1580.35 1582.02 1583.69 1585.26 1587.04 1588.72 1590.41 1592.1 1593.79 1595.49 1597.19 1598.89 1600.6 1602.31]; L_sig_x=[1570:2.01:1610];
```

```
plot(Lamda_sig_L.*1e9,NF,L_sig_x,NF_L,'linewidth',2.5)  
  hold on  
  grid on  
  xlabel('Panjang gelombang Sinyal L-band (m)')  
  ylabel('Noise Figure of L-Band EDFA')  
  ylim([2 8])  
  title('Noise Figure vs Panjang Gelombang Sinyal L-band')  
  set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',14)
```

Lampiran 3



OASiX[®] Simulasi Penguatan C-band tahap Pertama



OASiX[®] Simulasi penguatan L-band Tahap Pertama

Lampiran 4

```

Untitled - OASIX Simulation Software
File Edit View Setup Run Type Help

-----
Stage 1 Fiber Doc ID: 04390
Stage 1 Std File Name: C:\OFS\OASIX40\TestSamples\Xvals90.bsn

ASE Simulation
Stage 1 Co-Pump wavelength (nm) 980
Stage 1 Crp-Pump wavelength (nm) 980

-----ASE Wavelengths-----
1510      1520      1522      1524      1526
1528      1530      1532      1534      1536
1538      1540      1542      1544      1546
1548      1550      1552      1554      1556
1558      1560      1562      1564      1566
1568      1570      1572      1574      1576
1578      1580      1582      1584      1586
1588      1590      1592      1594      1596
1598      1600      1602      1604      1606
1608      1610      1612      1614      1616
1618      1620

Not including input and output losses in calculations
Input loss 0.35 dB
Output loss 0 dB
Simulation without Spectral Hole Burning
Temperature: 22 degrees

Stage 1 Len (m) 10
Stage 1 Co-Pump (mW) 50
Stage 1 Crp-Pump (mW) 0
Stage 1 End 1 Ref (%) 0
Stage 1 End 2 Ref (%) 0

Stage 1
Position (m)
0
0.225524
0.482959
0.742021
1.00321
1.26341
1.52364
1.78388
2.04418
2.30447
2.56482
2.82522
3.0857
3.34627
3.60695
3.86779

```

OASiX[®] Simulasi Daya ASE C-band

Lampiran 5

```
clc
clear all;

A=7.5e-12;
h=6.626e-34; %konstanta Plank
c=3e+8; %kecepatan cahaya
Lp=1480e-9; %pump wavelength
Ls=1583e-9; %signal wavelength
t21=10e-3; %lifetime
vp=c/Lp;
ems_p_L=0.19e-25;
N=7.8e24; %Erbium ion concentration
kb=1.38e-23;
T=300;
R=1.5e-6; % Distribution radius
a=1.55e-6; %Core radius/jari-jari EDFA
alfa_s=0.2;
alfa_p=0.24;
m=1e-3;
n1p=1.469; %indeks bias inti pump
n1s=1.462; %indeks bias signal
n2p=1.45; %indeks bias cladding pada saat pompa
n2s=1.444; %indeks bias cladding pd saat sinyal
phi=3.14;
P_ASE_C=[0.2986e-4 0.2961e-4 0.2898e-4 0.2811e-4 0.2744e-4 0.2678e-4 0.2633e-4
0.2604e-4 0.2576e-4 0.2554e-4 0.2533e-4 0.2508e-4 0.2480e-4 0.2458e-4 0.2429e-4
0.2403e-4 0.2375e-4 0.2355e-4 0.2331e-4 0.2295e-4].*1e4;

%Menghitung Overlap rasio terhadap Lamda C-band

NA=sqrt((n1s^2-n2s^2));
V=2.*phi.*a./Ls;
b=0.65;
w=(a./sqrt(2)).*[b+(1.619./V.^1.5)+(2.879./V.^6)]; %omega=spot size
ax=-(a.^2)./w.^2;
Rs_L=(1-exp(ax)); %Gamma signal

NA_p=sqrt((n1p^2-n2p^2)); V_p=2*phi*a/Lp*NA_p;
w=(a./sqrt(2)).*[0.65+(1.619/V_p^1.5)+(2.879/V_p^6)]; %omega=spot size
ax=-(a^2)/w^2;
Rp_lamda_L=(1-exp(ax)); %Gamma pump

%Menghitung emisi cross section signal dan absorpsi cross section pompa

Lamda_sig_L=[1570e-9:2.1e-9:1610e-9];
g_Ls_L=[1.1,1.09,0.88,0.78,0.67,0.627,0.55,0.55,0.55,0.51,0.459,0.4,0.385,0.338,0.28,0.
258,0.19,0.158,0.128,0.085]; %estimasi small gain dr grafik emisi-absorpsi
ems_s_L=g_Ls_L./(Rs_L.*N); %emission cross ection signal C-band
add=zeros(1,20)+31.232;
lmd=(48.007./(Lamda_sig_L*1e9));
abs_s_L=ems_s_L./exp(add-lmd);
```

```
abs_p_L=0.75e-25
```

```
Lamda_sig_L=[1565e-9:2.251e-9:1610e-9];
L_p=1480e-9;
%P_s=[0.0939259 0.0664987 0.0487568 0.0371336 0.0290829 0.0235613 0.0197551
0.0170326 0.0150879 0.0136086 0.0124299 0.0114758 0.0106434 0.00991283
0.00925626 0.00866118 0.00810778 0.00759203 0.00709881 0.006633];
P_sigout_C=[372.297 351.938 250.103 147.545 0.887272 0.746843 0.686342 0.592921
0.609841 0.603024 0.57572 0.537807 0.501981 0.473799 0.454528 0.440505 0.425238
0.400212 0.361572 0.307204].*1e-3;
%P_ASECband=[0.135172 0.126997 0.125891 0.0895982 0.0761749 0.0524531
0.0373388 0.0313202 0.0231165 0.0226876 0.0204484 0.0203022 0.0205678
0.0208156 0.0210446 0.135172 0.126997 0.125891 0.0895982 0.0761749].*1e-3;
%P_inj=zeros(1,20)+0.04;
%P_pump_injec=(P_sigout_C+P_ASECband).*1e3;
%P_pump_tot=(P_inj+P_pump_injec);
P_s0=[0.0939259 0.0664987 0.0487568 0.0371336 0.0290829 0.0235613 0.0197551
0.0170326 0.0150879 0.0136086 0.0124299 0.0114758 0.0106434 0.00991283
0.00925626 0.00866118 0.00810778 0.00759203 0.00709881 0.006633].*1e-3;
%P_sig_out_Cband_mW=[218.216 209.635 154.024 0.949454 0.594752 0.4459
0.409974 0.417633 0.432156 0.430679 0.415053 0.391646 0.369133 0.351507
0.339799 0.331595 0.322286 0.305624 0.278652 0.239482].*1e-3;
%P_sig_out_Cband_dBm=10.*log10(P_sig_out_Cband_mW);
P_ASE_C_band=[0.960961 0.838123 0.427976 0.17065 0.0912923 0.0750154
0.0745175 0.072563 0.0655534 0.0569886 0.0498544 0.0448609 0.0448609 0.0448609
0.0414442 0.0414442 0.0381915 0.0335447 0.0270544 0.0270544];
P_p02=zeros(1,20)+0.3;
P_tot=[P_sigout_C+P_ASE_C_band+P_p02];
P_p0=P_tot.*1e-3;
A_eff=7.54e-12;
h=6.626e-34; %konstanta Plank
c=3e+8;
sig_s=g_Ls_L./(Rs_L*N);
Lamda_Lband_x=Lamda_sig_L.*1e9;
lamda_s=1583e-9;
vp=c./L_p;
sig_p=0.75e-025;
N=7.85e24;
v_s=c./Lamda_sig_L;
tau_2=0.01;
lth=h*vp/(sig_p*tau_2*0.4);
n_=(vp.*sig_s.*0.8)/(v_s.*sig_p.*0.4);
a1=((sig_s.*P_p0.*0.8)/(n_.*sig_p.*lth.*A_eff*0.4));
a2=(sig_p*N*0.1/2);
a3=P_s0/(A_eff*lth);
a4=((sig_s.*N)*0.2)/(2*n_);
a1_kal=a1*0.4;
a2_kal=a2*1.1;
a3_kal=a3*0.75;
a4_kal=1.5*a4;
a3_kal_m=zeros(1,20)+a3_kal;
a2_kal_m=zeros(1,20)+a2_kal;

for L=60
    ls=(a1_kal+a3_kal_m)-(a1_kal.*exp(-a2_kal_m.*L)-(a4_kal.*L));
    G=ls./a3_kal_m;
    gain=10.*log10(ls./a3_kal_m);
    %plot(Lamda_Lband_x,gain,'linewidth',1.1)
```

```

%hold all
%end
%grid on
xlabel('Panjang Gelombang Sinyal L-Band EDFA (nm)')
ylabel('Gain(dB)')
ylim([0 27])
title('Gain vs Panjang Gelombang Sinyal L-Band')
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

```

```

%Menghitung N2(z)

```

```

b1=((t21.*abs_s_L)/(A.*h.*v_s).*Rs_L);
b2=((t21.*sig_p)/(A.*h.*vp).*Rp_lamda_L);
b3=((t21.*(abs_s_L+ems_s_L)/(A.*h.*v_s)).*Rs_L);
b4=((t21.*(sig_p+ems_p_L)/(A.*h.*vp).*Rp_lamda_L);

```

```

b1b=b1.*P_s0;
b2b=b2.*P_p0;
b2b_bar=zeros(1,20)+b2b;
b3b=b3.*P_s0;
b4b=b4.*P_p0;
b4b_bar=zeros(1,20)+b4b;

```

```

b5=((b1b+b2b_bar)/(b3b+b4b_bar));
N2=b5.*N;
N1=[N-N2];

```

```

%Menghitung nsp (spontaneous emission factor)

```

```

n_L=(sig_s./abs_s_L);
nsp=n_L.*N2./((n_L.*N2)-N1);

```

```

%Menghitung NF - Noise Figure

```

```

delta_lamda=1570e-9-1610e-9;
delta_v=(c./Lamda_sig_L).*(delta_lamda./Lamda_sig_L);

```

```

koef1=zeros(1,20)+1; NF=2.*nsp.*(gain-koef1)./10; NF_lamda=10.*log((2.*nsp.*((gain-koef1)./gain)));

```

```

plot(Lamda_Lband_x,NF,'r','linewidth',2.5)
grid on
xlabel('wavelength of L-band EDFA (nm)')
ylabel('Noise Figure of L-Band EDFA')
title('Noise Figure vs L-Band wavelength signal')
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

```

```

plot(Lamda_Cband_x,P_ASE_dBm,'r','linewidth',1.5)
hold on
grid on
xlabel('wavelength signal of C-band EDFA (m)')
ylabel('ASE Power of C-Band EDFA (W)')
title('ASE Power vs C-Band wavelength signal')
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

```

%Menghitung Intensitas cahaya

```
foton_fluks1=(N-N1+N2)/(N-N1-N2);  
foton_fluksth=1./(t21.*abs_s_L); %foton fluks threshold  
foton_fluksP=foton_fluks1*foton_fluksth;
```

Isig=P_s0.*Rs_L./A; %Light field intensities input per panjang gelombang

%Menghitung panjang fiber optimum pada gain optimum

```
lamda=1583e-9;  
P_p0=P_tot.*1e-3;  
sigma_p=sig_p;  
sigma_s=sig_s;  
gama_21=1/t21;  
P_p0mW=P_p0.*1000;  
lp=(P_p0./A).*Rp_lamda_L;  
fluks_p=lp./(h.*vp);  
fluks_s=Isig./(h.*v_s);  
k1=fluks_p.*sig_p;  
k2=2.*fluks_s.*ems_s_L;  
gama_21m=zeros(1,20)+gama_21;  
k3=k1-gama_21m;  
k4=gama_21m+k2+k1;  
inv_N=(k3./k4);  
  
L_L=0:5.1:100 %Panjang EDFA  
eksp=(sig_p*N/2).*L_L;  
eksp_kal=eksp.*0.09;  
P_pz=P_p0.*exp(-eksp_kal);  
Wp_a=sig_p.*P_pz;  
Wp_b=h.*vp.*A_eff;  
Wp=(Wp_a./Wp_b);  
Wp_kal=Wp.*0.4;  
koefs1=zeros(1,20)+1;  
beta=zeros(1,20)+0.38;  
inv_N_a=((koefs1-beta).*(Wp_kal.*t21))-koefs1.*N;  
inv_N_b=((koefs1+beta).*(Wp_kal.*t21))+koefs1;  
inv_N_maks=(inv_N_a./inv_N_b);  
inv_N_maks_kal=inv_N_maks.*0.25;  
g_maks=sig_s.*inv_N_maks_kal;  
g_maks_m=exp(g_maks.*L_L);  
g_maks_m_kal=g_maks_m.*0.8;  
G_dB=10.*log10(g_maks_m).*(-1);  
  
plot(L_L,G_dB,'r','linewidth',1.1)  
hold on  
grid on  
xlabel('Panjang EDFA (m)')  
ylabel('Gain(dB)')  
title('Gain Maksimum vs Panjang EDFA')  
set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)
```

```

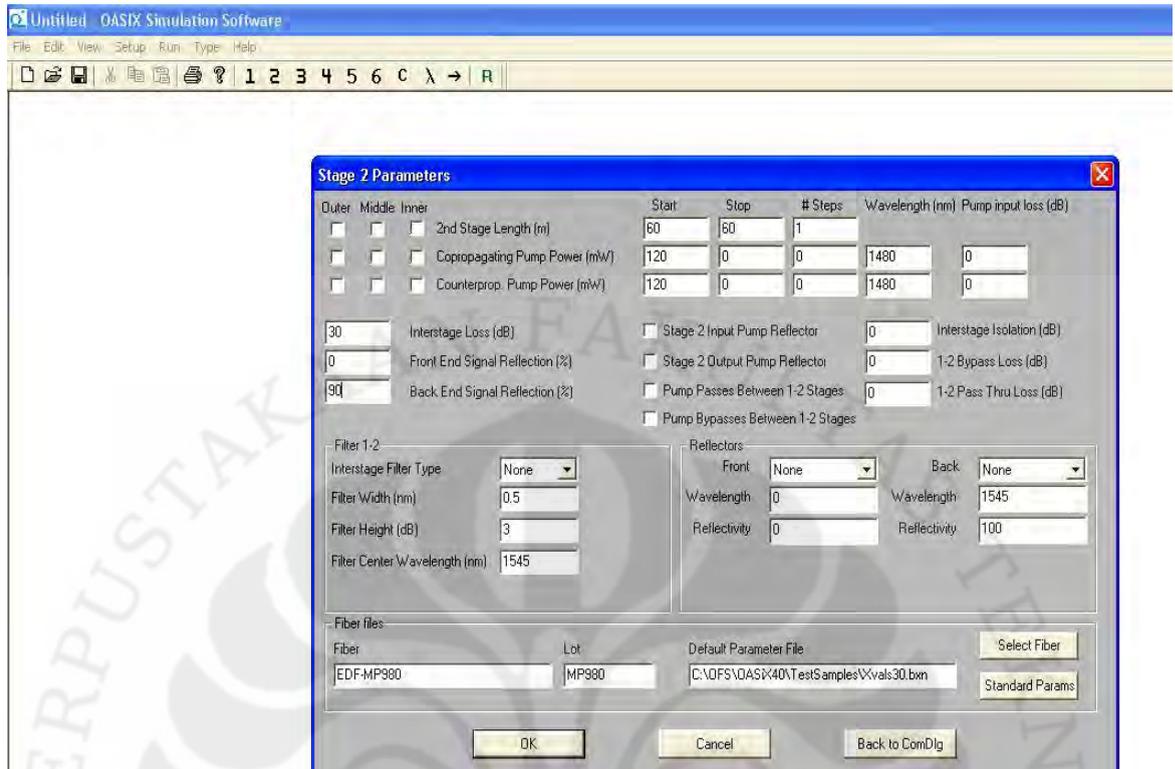
%plot(Lamda_Lband_x,P_ASE_dBm,'r','linewidth',1.1)
% hold on
%grid on
%xlabel('Panjang Gelombang Sinyal L-Band EDFA (nm)')
%ylabel('ASE Power(dBm)')
%title('ASE Power vs Panjang Gelombang Sinyal L-Band')
%set(gca,'fontname','times new roman','fontsize',12)

gain_Cband=[33.3889 33.2146 31.8759 29.7747 27.7434 26.4924 26.1276 26.2079
26.3564 26.3415 26.181 25.9289 25.6718 25.4593 25.3122 25.2061 25.0824 24.8519
24.4506 23.7927];
C_sig=[1530.33 1531.9 1533.46 1535.04 1536.61 1538.19 1539.77 1541.35 1542.94
1544.53 1546.12 1547.71 1549.31 1550.92 1552.52 1554.13 1555.75 1557.36 1558.98
1560.61];
NF_C=[3.43 3.42 3.40 3.38 3.37 3.36 3.34 3.332 3.32 3.31 3.3 3.29 3.28 3.272 3.26 3.25
3.245 3.237 3.230 3.22];
Gain_Lband2=[33.7928 31.7271 29.4814 26.0967 24.7484 23.5718 22.5944 21.7877
21.1453 20.6074 19.7335 19.341 18.9677 18.5883 18.4983 18.0193 17.4966 16.9332
16.3379 15.6489];

%Lamda_gab=[C_sig Lamda_Lband_x];
%gain_gab=[gain_Cband gain];
%plot(Lamda_gab,gain_gab,'r','linewidth',2.5)
%hold on
%grid on
%xlabel('Panjang Gelombang Sinyal L-Band EDFA (nm)')
%ylabel('Gain(dB)')
%ylim([0 40])
%title('Gain vs Panjang Gelombang Sinyal L-Band')

```

Lampiran 6



OASiX[®] Simulasi Penguatan *L-band* tahap Kedua