



UNIVERSITAS INDONESIA

**METODE PERATAAN PENGUATAN *ERBIUM DOPED FIBER*
AMPLIFIERS (EDFA) C-BAND PADA PANJANG
GELOMBANG *ITU-STANDARD***

DISERTASI

**NAMA: SHOLEH HADI PRAMONO
NPM: 8403100026**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**METODE PERATAAN PENGUATAN *ERBIUM DOPED FIBER*
AMPLIFIERS (EDFA) C-BAND PADA PANJANG
GELOMBANG *ITU-STANDARD***

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**NAMA: SHOLEH HADI PRAMONO
NPM: 8403100026**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN OPTOELEKTROTEKNIKA DAN
APLIKASI LASER
DEPOK
JULI 2009**



HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Sholeh Hadi Pramono
NPM : 8403100026

Tanda Tangan :





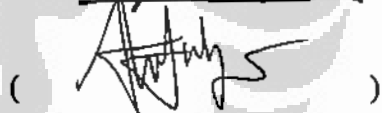

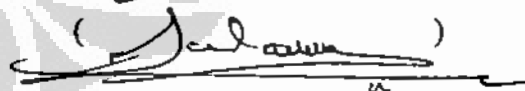

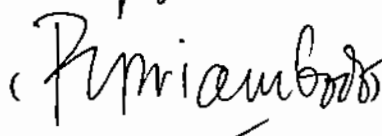
Tanggal : 01 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
Nama : Sholeh Hadi Pramono
NPM : 8403100026
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Disertasi : Metode Perataan Penguatan *Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA) C-Band* Pada Panjang Gelombang *ITU-Standard*

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

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Sardy S, M.Eng.Sc ()
Ko-promotor : Dr. Ary Syahriar, DIC ()
Tim Penguji : Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo, M.Sc ()
Dr. Ir. Syamsul El Yumin ()
Dr. Ir. Dodi Suidiana, M.Eng ()
Dr. Ir. Retno Wigajatri, MT ()
Dr. Purnomo Sidi P, M.S.E.E ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 01 Juli 2009

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT Tuhan Yang maha Esa, atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor Optoelektroteknika dan Aplikasi Laser Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan disertasi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Sardy S, M.Eng.Sc., dan Dr. Ary Syahriar, DIC selaku promotor dan ko-promotor yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan disertasi ini.
- (2) Direktur PTIK BPPT yang telah menyediakan fasilitas riset, sehingga penelitian untuk disertasi ini dapat terselesaikan.
- (3) Orang tua, mertua, istri dan anak-anak saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral sehingga penulisan disertasi ini dapat terselesaikan.
- (4) Kelompok peneliti komunikasi optik direktorat PTIK BPPT yang telah membantu saya dalam menyelesaikan disertasi ini.

Akhir kata, saya berharap semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga disertasi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 01 Juli 2009

Penulis

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

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

Nama : Sholeh Hadi Pramono

NPM : 8403100026

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Disertasi

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

**Metode Perataan Penguatan *Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA) C-Band*
Pada Panjang Gelombang *ITU-Standard***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal: 01 Juli 2009

Yang menyatakan



(Sholeh Hadi Pramono)

ABSTRAK

Nama : Sholeh Hadi Pramono
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Metode Perataan Penguatan *Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA) C-Band* Pada Panjang Gelombang *ITU-Standard*

EDFA sebagai penguat optik dapat memperkuat sinyal dalam daerah *C-band* dengan rentang panjang gelombang 1530-1560 nm. Ketidak rataan penguatan biasanya memunculkan masalah untuk mendapatkan karakteristik penguatan yang rata yang disebabkan oleh *cross section* yang tinggi pada daerah sekitar 1531 nm. Untuk mengatasi masalah ini, sejumlah metode telah diusulkan. Dalam disertasi ini suatu metode secara eksperimen untuk mendapatkan kerataan penguatan *EDFA C-band* telah dikembangkan. Kerataan penguatan dapat dicapai dengan mengatur variasi daya sinyal masukan dan daya pompa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang *EDFA* 12 m dapat menghasilkan penguatan rata-rata 20,66–25,23 dB, variasi penguatan 0,47–0,88 dB, *noise figure (NF)* rata-rata 4,31–4,85 dB, dan variasi *NF* 0,09–0,12 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm dan daya pompa 20–50 mW. *Spectral hole burning* rata-rata untuk 1530,33–1535,04 nm lebih besar dari 1536,61–1560,61 nm pada perubahan daya sinyal dari -22,7 dBm dan -17,7 dBm menjadi -2,7 dBm. Panjang *EDFA* 11 m dapat menghasilkan *gain* maksimum untuk daya sinyal -22,7 dBm hingga -2,7 dBm, dan daya pompa 20 mW hingga 60 mW.

Kata kunci:

Perataan penguatan, penguatan, *noise figure*, *EDFA*, *C-band*, *ITU-standard*

ABSTRACT

Name : Sholeh Hadi Pramono
Study Program : Electrical Engineering
Title : Gain Flattening Method of Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA) C-Band at ITU-Standard Wavelength

EDFA an optical amplifier can amplify signals in the C-band region with the wavelength range of 1530-1560 nm. Usually the inhomogeneous gain creates further problems to achieve flat gain characteristics due to high cross section around 1531 nm region. To overcome this problem a number of methods have been proposed. In this thesis an experimental methods to get gain flatness in the C-band EDFA have developed. Gain flatness maybe achieved by tuning the signal input powers, pump power variations. It is shows that EDFA length 12 m can result average gain 20.66–25.23 dB, gain variation 0.47–0.88 dB, average noise figure (NF) 4.31–4.85 dB, and NF variation 0.09–0.12 dB for input signal power -12.7 dBm and pump power 20–50 mW. Average spectral hole burning of 1530.33–1535.04 nm are greater than 1536.61–1560.61 nm for changing signal power from -22.7 dBm and -17.7 dBm to -2.7 dBm. Length of EDFA 11 m can obtain maximum gain for signal power -22.7 dBm to -2.7 dBm, pump power 20 mW to 60 mW.

Key words:

Gain Flattening, Gain, Noise Figure, EDFA, C-band, ITU-standard

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS	v
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xvii
DAFTAR NOTASI	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	12
1.4 Manfaat Penelitian	12
1.5 Batasan Penelitian	13
1.6 Sistematika pembahasan	14
2. TINJAUAN TEORI	14
2.1 Karakteristik Fiber Yang Di-doping Erbium	14
2.1.1 Sifat-sifat Dasar Erbium	14
2.1.2 Spektroskopi Ion-ion Er^{3+}	22
2.2 Teori Dasar <i>Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)</i>	32
2.2.1 <i>Rate Equation</i> Sistem Tiga Level	33
2.2.2 Penguatan Sinyal Kecil (<i>Small Signal Gain</i>)	39
2.2.3 Rejim Saturasi (<i>Saturation Regime</i>)	45
2.2.4 <i>Noise ASE</i> dan <i>Noise Figure</i>	52
3. METODE PENELITIAN	54
4. KARAKTERISASI KOMPONEN PENDUKUNG EDFA	57
4.1 Karakterisasi <i>Laser Diode</i>	57
4.2 Karakterisasi <i>Isolator</i>	59
4.3 Karakterisasi <i>WDM Coupler</i>	61
5. Hasil Eksperimen EDFA dan Pembahasan	64
5.1 Karakterisasi <i>Amplified Spontaneous Emission (ASE)</i>	65

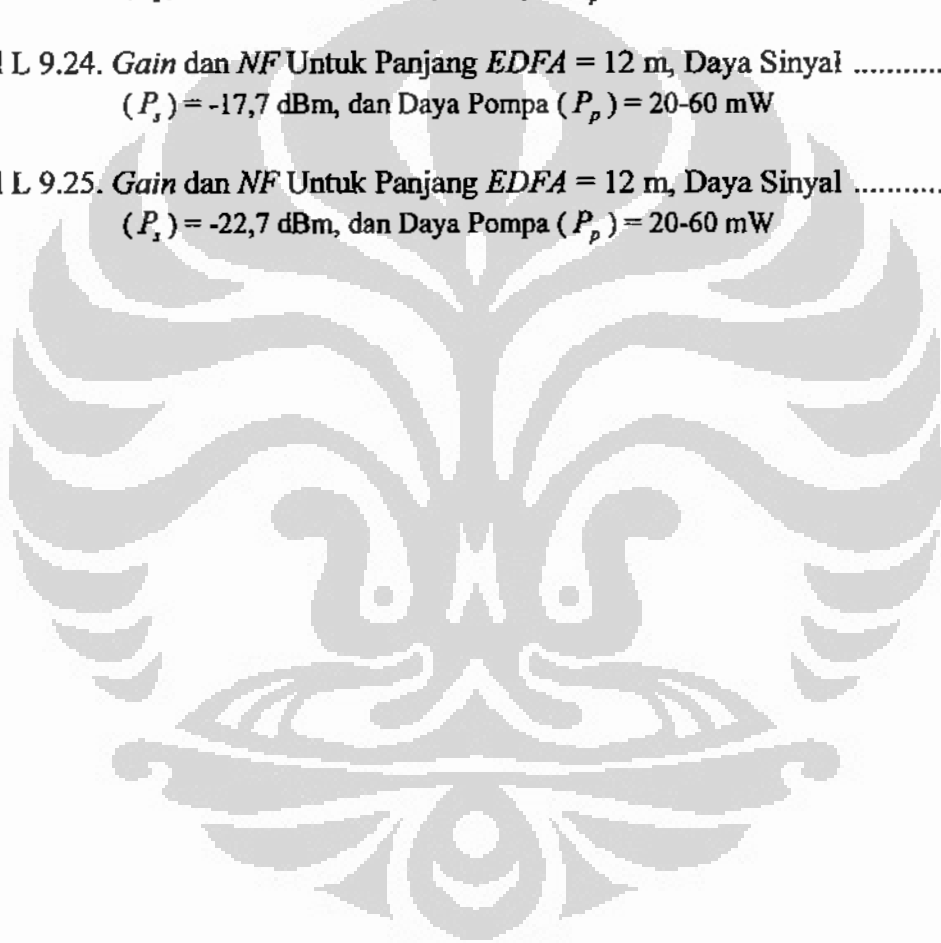
5.2 Karakterisasi <i>Gain</i> dan <i>Noise Figure (NF)</i> Pada Rentang Panjang Gelombang <i>C-band</i>	70
5.3 Karakteristik <i>Gain</i> dan <i>Noise Figure (NF)</i> Rata-rata Pada Rentang Panjang Gelombang <i>C-band</i>	102
6. KESIMPULAN DAN SARAN	118
6.1 Kesimpulan	118
6.2 Saran	119
DAFTAR ACUAN	121
DAFTAR REFERENSI	125
Lampiran 1 Penhitungan Nilai <i>Confinement factor</i> (Γ)	130
Lampiran 2 Nilai Emisi <i>Cross Section</i> untuk Sinyal dan Absorpsi <i>Cross Section</i> Untuk Pompa	132
Lampiran 3 Program Penghitungan Fraktional Inversi Populasi Terhadap Perubahan Daya Pompa untuk Daya Sinyal -22,7 dBm	133
Lampiran 4 Program Penghitungan Fraktional Inversi Populasi Terhadap Terhadap Perubahan daya Sinyal Pada Panjang Gelombang 1549,32 nm	135
Lampiran 5 Penghitungan <i>Gain</i> maksimum Terhadap Perubahan Panjang <i>EDFA</i> untuk Daya Pompa 20-60 mW	138
Lampiran 6 Penurunan Persamaan Diferensial untuk Perubahan Intensitas Sinyal Terhadap Perubahan Panjang <i>EDFA</i> , Dan Program Penghitungan Nilai Penguatannya Untuk Panjang Gelombang 1550,92	141
Lampiran 7 Program Perubahan <i>Gain</i> Terhadap Perubahan Panjang Gelombang Rentang <i>C-Band</i> untuk Daya Sinyal -22,7 dBm dan Daya Pompa 60 mW	145
Lampiran 8 Foto <i>Setup</i> Eksperimen	147
Lampiran 10 Tabel Penghitungan Hasil Eksperimen untuk <i>Gain</i> dan <i>Noise Figure</i>	149

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Hasil Penelitian Perataan Penguatan Dengan Menggunakan Metode Intrinsik	6
Tabel 1.2.	Hasil Penelitian Perataan Penguatan Dengan Menggunakan Metode Perata (<i>Equalizer</i>)	7
Tabel 1.3.	Hasil Penelitian Perataan Penguatan Dengan Menggunakan Metode <i>Hybrid</i>	9
Tabel 2.1.	Parameter Transisi <i>Nonradiative</i> pada Gelas Utama Fiber.....	20
Tabel 2.2.	Lifetime Untuk Level ${}^4I_{13/2}$ Pada Er^{3+} Dalam Berbagai Gelas Utama	24
Tabel 2.3.	Absorpsi (σ_{abs}) dan Emisi (σ_{em}) <i>Cross Section</i> Pada Transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ Dalam Er^{3+} Untuk Berbagai Gelas Utama	29
Tabel 2.4.	Lebar garis (<i>linewidth</i>) Homogen Untuk Transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ Pada Panjang Gelombang Tertentu Dalam Berbagai Gelas Utama	31
Tabel 5.1.	Perbandingan Hasil Perataan Penguatan Untuk Berbagai Metode Yang Pernah Dilakukan dan Metode Pengaturan Daya Sinyal Masukan	117
Tabel L 2.1.	Nilai Absorpsi <i>Cross Section</i> Untuk Sinyal.....	132
Tabel L 9.1.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 8 m, Daya Sinyal (P_s) = -2,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 Mw	149
Tabel L 9.2.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 8 m, Daya Sinyal (P_s) = -7,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	150
Tabel L 9.3.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 8 m, Daya Sinyal (P_s) = -12,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	151
Tabel L 9.4.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 8 m, Daya Sinyal (P_s) = -17,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	152
Tabel L 9.5.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 8 m, Daya Sinyal (P_s) = -22,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	153

Tabel L 9.6.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 9 m, Daya Sinyal 154 (P_s) = -2,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.7.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 9 m, Daya Sinyal 155 (P_s) = -7,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.8.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 9 m, Daya Sinyal 156 (P_s) = -12,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.9.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 9 m, Daya Sinyal 157 (P_s) = -17,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.10.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 9 m, Daya Sinyal 158 (P_s) = -22,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.11.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 10 m, Daya Sinyal 159 (P_s) = -2,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.12.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 10 m, Daya Sinyal 160 (P_s) = -7,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.13.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 10 m, Daya Sinyal 161 (P_s) = -12,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.14.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 10 m, Daya Sinyal 162 (P_s) = -17,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.15.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 10 m, Daya Sinyal 163 (P_s) = -22,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.16.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 11 m, Daya Sinyal 164 (P_s) = -2,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.17.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 11 m, Daya Sinyal 165 (P_s) = -7,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 10.18.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 11 m, Daya Sinyal 166 (P_s) = -12,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW
Tabel L 9.19.	<i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 11 m, Daya Sinyal 167 (P_s) = -17,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW

Tabel L 9.20. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 11 m, Daya Sinyal 168 (P_s) = -22,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	168
Tabel L 9.21. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 12 m, Daya Sinyal 169 (P_s) = -2,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	169
Tabel L 9.22. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 12 m, Daya Sinyal 170 (P_s) = -7,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	170
Tabel L 9.23. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 12 m, Daya Sinyal 171 (P_s) = -12,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	171
Tabel L 9.24. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 12 m, Daya Sinyal 172 (P_s) = -17,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	172
Tabel L 9.25. <i>Gain</i> dan <i>NF</i> Untuk Panjang <i>EDFA</i> = 12 m, Daya Sinyal 173 (P_s) = -22,7 dBm, dan Daya Pompa (P_p) = 20-60 mW	173



DAFTAR GAMBAR


Gambar 1.1.	Rugi-rugi (<i>losses</i>) Dalam Fiber Optik Pada Panjang 2 Gelombang Yang Berbeda-beda
Gambar 2.1.	Hubungan Absorpsi dan Emisi Transisi Cahaya Dalam 16 Sistem Dua <i>Level</i>
Gambar 2.2.	Struktur <i>level</i> energi untuk dua buah <i>multiplet</i> 1 dan 2 17
Gambar 2.3.	Kecepatan Transisi <i>Nonradiative</i> Er^{3+} Dalam Berbagai 20 Gelas Utama
Gambar 2.4.	(a) Garis Terlebarkan Secara Homogen, (b) Garis Yang 21 Terlebarkan Secara Tidak Homogen
Gambar 2.5.	Saturasi <i>Gain</i> Untuk Garis Yang Terlebarkan Secara 22 Homogen (a) dan Tidak Homogen (b)
Gambar 2.6.	Struktur <i>Level</i> Energi <i>Erbium</i> 23
Gambar 2.7.	Spektrum Absorpsi Yang Terukur Secara Eksperimen 24 Pada Er^{3+} yang di- <i>doping</i> kan pada fiber <i>germano-alumino-silica</i>
Gambar 2.8.	<i>Lifetime Fluorescence</i> Er^{3+} Dalam Fiber Gelas <i>Silica</i> dan 26 Gelas <i>CPG (Calcium Metaphosphate)</i> .
Gambar 2.9.	Diagram Tingkat Energi Yang Berhubungan Dengan 27 Pemisahan Stark Pada Sistem Laser Tiga Tingkat
Gambar 2.10.	Absorpsi <i>Cross Section</i> 28
Gambar 2.11.	Emisi <i>Cross Section</i> 29
Gambar 2.12.	Spektral <i>Hole Burning</i> Untuk Panjang Gelombang Sekitar 32 $1,5 \mu\text{m}$ pada Er^{3+} Dalam Fiber Gelas <i>Alumino-Germano-Silica</i>
Gambar 2.13.	Sistem tiga <i>level</i> yang digunakan untuk model 33 penguat <i>EDFA</i>
Gambar 2.14.	Karakteristik Fraksional Inversi Populasi Terhadap Daya 38 Pompa untuk Daya Sinyal Masukan $-22,7 \text{ dBm}$ dan Panjang Gelombang $1531,90$

Gambar 2.15.	Karakteristik Fraksional Inversi Populasi Terhadap Daya Sinyal Masukan Pada Panjang Gelombang 1531,90 nm	39
Gambar 2.16.	Karakteristik <i>Gain</i> Terhadap Panjang <i>EDFA</i> untuk Panjang Gelombang Sinyal 1531,90 nm dan Daya Pompa 20mW, 30mW, 40mW, 50mW, dan 60mW	44
Gambar 2.17.	Karakteristik <i>Gain</i> Terhadap Panjang <i>EDFA</i> Untuk Panjang Gelombang Sinyal 1550,92 nm	48
Gambar 2.18.	Karakteristik <i>Gain</i> Terhadap Perubahan Panjang Gelombang untuk Daya Pompa 60mW	51
Gambar 4.1	Disain <i>Setup</i> Karakterisasi <i>WDM Coupler</i> Dengan Sumber Optik Dari <i>Laser Diode</i>	57
Gambar 4.2.	Pola Radiasi <i>LD</i> Yang Terukur Diujung <i>WDM Coupler</i>	58
Gambar 4.3.	Hasil Karakterisasi <i>LD</i> Yang Terukur di Ujung Keluaran <i>WDM Coupler</i>	59
Gambar 4.4.	Disain Isolator untuk Lintasan Optik Yang Menjalar Maju (<i>forward</i>) dan Balik (<i>Backward</i>)	60
Gambar 4.5.	Susunan Rangkaian Karakterisasi Isolator	61
Gambar 4.6.	Hasil Karakterisasi <i>Level</i> Daya Sinyal Yang Telah Melewati Isolator	61
Gambar 4.7.	Disain <i>WDM Coupler</i> Yang Mengkombinasikan Daya Sinyal Masukan dan Daya Pompa	62
Gambar 4.8.	Susunan Rangkaian Karakterisasi <i>WDM Coupler</i>	62
Gambar 4.9.	Hasil Karakterisasi <i>Level</i> Daya Sinyal Yang Telah Melewati <i>WDM Coupler</i>	63
Gambar 5.1	Disain <i>Setup</i> Eksperimen Perataan Penguatan <i>EDFA C-Band</i>	64
Gambar 5.2.	Karakteristik Daya <i>ASE</i> Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang <i>EDFA</i> 8 m	66
Gambar 5.3.	Karakteristik Daya <i>ASE</i> Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang <i>EDFA</i> 12 m	66

Gambar 5.4.	Karakteristik Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Daya Pompa	67
Gambar 5.5.	Karakteristik Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Panjang EDFA	67
Gambar 5.6.	Persentase Kenaikan Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Daya Pompa	68
Gambar 5.7.	Persentase Kenaikan Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Panjang EDFA	68
Gambar 5.8.	Emission dan Absorption Cross Section untuk Fiber Silica Yang Di-doping Al-Ge-Er.	71
Gambar 5.9.	Daya Sinyal Keluaran dan Spektrum ASE Sebagai Fungsi Panjang Gelombang.	73
Gambar 5.10.	Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 8m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.	76
Gambar 5.11.	Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 9 m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.	79
Gambar 5.12.	Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 10 m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.	81
Gambar 5.13.	Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 11m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.	84
Gambar 5.14.	Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 12m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.	86
Gambar 5.15.	Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang untuk Panjang EDFA 8 m dan Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ = -12,7 dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm	91

- Gambar 5.16. *Gain* dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi..... 93
 Panjang Gelombang untuk Panjang *EDFA* 9 m dan
 Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm,
 $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm
- Gambar 5.17. *Gain* dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi..... 96
 Panjang Gelombang untuk Panjang *EDFA* 10 m dan
 Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm,
 $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm
- Gambar 5.18. *Gain* dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi..... 98
 Panjang Gelombang untuk Panjang *EDFA* 11 m dan
 Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm,
 $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm
- Gambar 5.19. *Gain* dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi..... 101
 Panjang Gelombang untuk Panjang *EDFA* 12 m dan
 Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm,
 $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm
- Gambar 5.20. *Gain* Rata-rata dan Variasi *Gain* Sebagai Fungsi Daya Pompa . 104
 untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm,
 $\ast = -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dbm dan $\square = -22,7$ dBm.
- Gambar 5.21. *Gain* Rata-rata dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai 107
 Fungsi Daya Pompa untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm,
 $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dbm dan
 $\square = -22,7$ dBm.
- Gambar 5.22. *Gain* Rata-rata dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai 110
 Fungsi Daya Sinyal untuk Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW,
 $\circ = 30$ mW, $\ast = 40$ mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.
- Gambar 5.23. *Gain* Rata-rata dan Persentase Perubahan *Gain* Sebagai 113
 Fungsi Panjang *EDFA* Untuk Daya Pompa : $\Delta = 20$ mW,
 $\circ = 30$ mW, $\ast = 40$ mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.
- Gambar 5.24. *NF* Rata-rata dan Variasi *NF* Sebagai Fungsi Daya Pompa 116
 untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm,
 $\ast = -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dbm dan $\square = -22,7$ dBm

DAFTAR SINGKATAN



<i>APD</i>	<i>Avalanche Photo Diode</i>
<i>ASE</i>	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
<i>C-Band</i>	<i>Conventional Band</i>
<i>CPG</i>	<i>Calcium Metaphosphate</i>
<i>DWDM</i>	<i>Densed Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>EDFA</i>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
<i>E-Band</i>	<i>Extended Band</i>
<i>ISO</i>	<i>Isolator Optik</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<i>LD</i>	<i>Laser Diode</i>
<i>LED</i>	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>OSA</i>	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
<i>PIN</i>	<i>Positive Intrinsic Negative</i>
<i>TLS</i>	<i>Tunable Laser Source</i>
<i>WDM</i>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Dimensi
$a = r$	Jari-jari inti fiber	m
A_{eff}	Luas penampang efektif inti fiber yang di- <i>doping</i> erbium	m^2
A_{21}	Kecepatan emisi spontan	s^{-1}
A_{kj}	Kecepatan emisi spontan	s^{-1}
A_{32}	Kecepatan peluruhan (<i>decay</i>) <i>nonradiative</i>	s^{-1}
A_{NR}^+	Kecepatan termal antara <i>sublevel</i> Stark yang berdekatan	
$\alpha(\lambda)$	Level absorpsi pompa	dB/m
α_p	Koefisien penguatan	
B_{12}	Kecepatan absorpsi	s^{-1}
B_{21}	Kecepatan emisi terstimulasi	s^{-1}
$\Delta\nu$	<i>Bandwidth</i> pada frekuensi sinyal	Hz
ε	Energi transisi rata-rata antara dua <i>manifold</i> (lapisan-lapisan dalam <i>level</i> energi)	J
ϕ_{th}	Fluks pemompaan ambang	$m^{-2}s^{-1}$
$\Phi(\omega)$	Fluks <i>photon</i> (jumlah <i>photon</i> per luasan per waktu)	$m^{-2}s^{-1}$
ϕ_p	Fluks intensitas cahaya datang pada frekuensi yang sesuai untuk transisi 1 ke 3, atau fluks intensitas cahaya pompa, atau fluks masukan <i>photon</i> pompa	$m^{-2}s^{-1}$
ϕ_s	Fluks intensitas cahaya datang pada frekuensi yang sesuai untuk transisi 1 ke 2, fluks intensitas cahaya sinyal, atau fluks masukan <i>photon</i> sinyal	$m^{-2}s^{-1}$
g_1	Degenerasi pada <i>level</i> 1	
g_2	Degenerasi pada <i>level</i> 2	
G	<i>Gain</i> (dB)	
$g^*(\lambda)$	Level absorpsi pompa	dB/m

Notasi	Keterangan	Dimensi
Γ	Faktor <i>overlap</i> (<i>confinement factor</i>)	
Γ_{21}	Kecepatan transisi <i>spontaneous</i> dari <i>level 2</i> ke <i>level 1</i> , atau atau probabilitas transisi dari <i>level 2</i> ke <i>level 1</i> (menghasilkan radiasi)	s^{-1}
Γ_{32}	Kecepatan transisi <i>spontaneous</i> dari <i>level 3</i> ke <i>level 2</i> , atau atau probabilitas transisi dari <i>level 3</i> ke <i>level 2</i> (tidak menghasilkan radiasi)	s^{-1}
h	Konstanta Planck = $6,62 \times 10^{-34}$	J s
\hbar	Konstanta Planck dibagi 2π	J s
I	Intensitas cahaya	Wm^{-2}
I_p	Intensitas cahaya (medan) pompa	Wm^{-2}
I_s	Intensitas cahaya (medan) sinyal	Wm^{-2}
I_{th}	Intensitas pemompaan ambang	Wm^{-2}
j	Momentum orbit total	J
k	Konstanta Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$	J/K
λ_k	Panjang gelombang yang berhubungan dengan sinyal pada frekuensi k (ν_k)	m
m_1	<i>Sublevel-sublevel</i> pada <i>level 1</i>	
m_2	<i>Sublevel-sublevel</i> pada <i>level 2</i>	
n_1	Indeks bias inti	
n_2	Indeks bias <i>cladding</i>	
n_{sp}	Faktor inversi populasi (<i>population inversion factor</i>)	
$N = N_i$	Populasi total <i>ion-ion erbium</i> dalam penguat fiber	m^{-3}
N_1	Populasi <i>ion-ion</i> pada <i>level</i> energi terbawah atau <i>level 1</i> (<i>ground state</i>)	m^{-3}
N_2	Populasi <i>ion-ion erbium</i> pada <i>level 2</i> (<i>level metastabil</i>)	m^{-3}
N_3	Populasi <i>ion-ion erbium</i> pada <i>level 3</i>	m^{-3}
NF	<i>Noise Figure</i> (dB)	

Notasi	Keterangan	Dimensi
ν	Frekuensi sinyal optik	Hz
ν_p	Frekuensi pemompaan	Hz
ω	Frekuensi cahaya = $2\pi\nu$	
P_{ASE}	Daya ASE (<i>Amplified Spontaneous Emission</i>)	W
P_{abs}	Daya cahaya yang diabsorpsi	W
P_{em}	Daya yang diemisikan	W
P_p	Daya pompa	W
P_s	Daya sinyal (Daya sinyal masukan)	W
P_{th}	Daya pompa ambang (<i>threshold</i>)	W
R_p	Kecepatan pemompaan	s^{-1}
$\sigma_{12} = \sigma_a = \sigma_{abs}$	<i>Absorption cross section</i>	m^2
$\sigma_{21} = \sigma_e = \sigma_{em}$	<i>Emission cross section</i>	m^2
$\sigma_{m_1, m_2} = \sigma_{m_2, m_1}$	<i>Cross section antar sublevel</i>	m^2
$\tau_{21} = \frac{1}{\Gamma_{21}} = \tau_2$	<i>Lifetime pada level 2</i>	s
$\tau_{32} = \frac{1}{\Gamma_{32}} = \tau_3$	<i>Lifetime pada level 3</i>	s
τ_{nr}	<i>Lifetime nonradiative</i>	s
τ_r	<i>Lifetime radiative</i>	s
$\tau = \tau_r + \tau_{nr}$	<i>Lifetime total</i>	s
T	Temperatur Kelvin	K
w	Jari-jari mode sinyal atau pompa	m
$W_p = \phi_p \sigma_p$	Kecepatan absorpsi <i>photon</i> pompa	s^{-1}
$W_s = \phi_s \sigma_s$	Kecepatan absorpsi <i>photon</i> sinyal	s^{-1}
W_{kj}	Kecepatan emisi terangsang	s^{-1}

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Penghitungan Nilai <i>Confinement Factor</i> (Γ)	130
Lampiran 2.	Nilai Emisi <i>Cross Section</i> untuk Sinyal, dan Absorpsi	132
	<i>Cross Section</i> untuk Pompa	
Lampiran 3.	Program Penghitungan Fraktional Inversi Populasi	133
	Terhadap Perubahan Daya pompa untuk Daya Sinyal -22,7 dBm	
Lampiran 4.	Program Penghitungan Fraktional Inversi Populasi	135
	Terhadap Perubahan Daya Sinyal Pada Panjang Gelombang 1549,32 dBm	
Lampiran 5.	Program Penghitungan <i>Gain</i> Maksimum Terhadap Perubahan..	138
	Panjang <i>EDFA</i> untuk Daya Pompa 20-60 mW	
Lampiran 6.	Penurunan Persamaan Diferensial Untuk Perubahan	141
	Intensitas Sinyal Terhadap Perubahan Panjang <i>EDFA</i> dan Program Penghitungan Nilai Penguatannya Untuk Panjang Gelombang 1550,92 nm	
Lampiran 7.	Perubahan <i>Gain</i> Terhadap Perubahan Panjang Gelombang	145
	Rentang <i>C-Band</i> untuk Daya Sinyal -22,7 dBm dan Daya Pompa 60 mW	
Lampiran 8.	Foto <i>Setup</i> Eksperimen	147
Lampiran 9.	Tabel Penghitungan Hasil Eksperimen Untuk <i>Gain</i> dan	149
	<i>Noise Figure</i>	

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

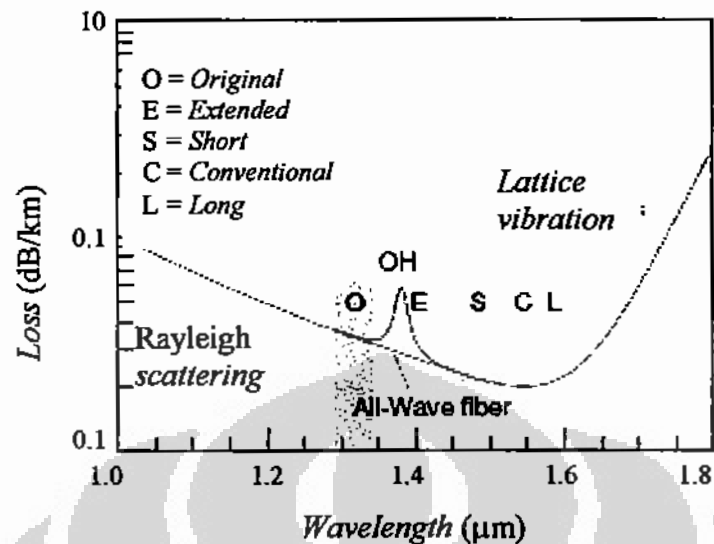
Sistem komunikasi serat optik mempunyai peran yang sangat penting untuk mendukung jaringan komunikasi kecepatan tinggi dalam orde *giga bit per second (Gbps)* hingga *tera bit per second (Tbps)* ke seluruh dunia melalui hubungan daratan (*terrestrial*) dan kabel laut (*submarine cable*) [1][2]. Komunikasi serat optik ini terdiri atas pemancar optik, serat optik, dan penerima optik (detektor optik).

Pemancar optik atau sumber optik adalah piranti pembangkit gelombang elektromagnetik pada frekuensi optik, yaitu antara 0,3 THz sampai dengan 30.000 THz. Sumber optik yang sering digunakan dalam komunikasi serat optik adalah *laser diode (LD)* atau *light-emitting diode (LED)*. Fungsi pemancar optik adalah sebagai pembawa informasi melalui proses modulasi. Informasi yang dikirim dapat berbentuk data, suara, dan gambar. Masing-masing pemancar optik mempunyai parameter dan karakteristik optik yang dipakai sebagai pertimbangan dalam pemilihan piranti tersebut. Parameter tersebut terdiri atas: waktu jangkit (*rise time*), daya keluaran optik, kepekaan terhadap suhu (variasi daya keluaran sebagai fungsi perubahan suhu), lebar spektrum sumber optik, dan rugi-rugi kopling.

Waktu jangkit adalah waktu yang diperlukan untuk membentuk amplitudo pulsa intensitas optik dari kondisi 10% sampai dengan 90%. Lebar spektrum merupakan lebar bidang panjang gelombang yang dibangkitkan, dan rugi-rugi kopling adalah rugi-rugi yang terjadi pada proses pengkoplingan berkas cahaya laser ke dalam serat optik.

Serat optik sebagai media transmisi dapat terbuat dari bahan gelas (*silica*) atau plastik yang bersifat transparan. Berdasarkan profil indeks bias, serat optik dikenal ada dua jenis yaitu *step-index* dan *graded-index*, dan bila dilihat dari mode penjarannya dikenal ada dua jenis yaitu *single mode* dan *multimode*. Serat optik sebagai media transmisi memberikan rugi-rugi (*losses*) paling rendah terhadap sinyal yang dilewatkan, yaitu sekitar 0,2 dB/km untuk bahan gelas dan jenis mode tunggal pada panjang gelombang 1550 nm. Gambar 1.1 menunjukkan rugi-rugi fiber optik

silica pada panjang gelombang yang berbeda [3].



Gambar 1.1. Rugi-rugi (*losses*) Dalam Fiber Optik Pada Panjang Gelombang yang Berbeda-beda

Sumber: Lam, Cedric F. (2007). *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. USA: Academic Press publications.

Rugi-rugi yang terjadi didalam serat optik untuk daerah panjang gelombang pendek disebabkan oleh hamburan Rayleigh, dan rugi-rugi pada daerah panjang gelombang panjang disebabkan oleh vibrasi *lattice*. Rugi-rugi terendah terjadi pada rentang panjang gelombang *C-band* (*conventional band*), dan karena itu sangat sesuai untuk transmisi *Wavelength-Division Multiplexing (WDM)* jarak jauh. Rugi-rugi puncak fiber terjadi pada daerah sekitar panjang gelombang 1,38 μm atau dalam rentang *E-band* (*Extended band*). Rugi-rugi puncak ini terjadi karena adanya absorpsi ketidakmurnian OH^- yang terdapat pada saat awal proses fabrikasi fiber.

Detektor optik merupakan piranti yang dapat mengubah sinyal optik menjadi sinyal elektrik, dan biasanya berupa diode *PIN* (*positive intrinsic negative*) dan *APD* (*avalanche photo diode*). Parameter yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan detektor optik adalah tingkat daya optik minimum, arus cahaya, responsivitas, penguatan, derau detektor, dan waktu jangkit.

Tingkat daya optik minimum adalah daya optik minimum yang dapat dideteksi oleh detektor optik, dan arus cahaya merupakan arus yang dibangkitkan pada tingkat daya optik minimum. Responsivitas adalah perbandingan arus cahaya

dan daya optik yang diterima, dan penguatan merupakan responsivitas pada *APD* yang ditimbulkan oleh efek *avalanche*.

Level daya informasi yang ditransmisikan melalui serat optik selalu mengalami penurunan terhadap panjang lintasannya. Penyebab utama penurunan *level* daya adalah rugi-rugi dalam serat optik. Rugi-rugi yang terjadi dalam serat optik merupakan masalah utama dalam pentransmisian informasi jarak jauh. Rugi-rugi dapat menyebabkan terbatasnya kecepatan dan jumlah informasi yang dikirim, dan juga membatasi ukuran jarak saluran [4][5][6][7]. Hal ini terjadi karena kecepatan informasi yang ditransmisikan berbanding langsung dengan besarnya daya sinyal, dan jarak transmisi akan menentukan besarnya daya sinyal yang diterima pada penerima. Daya sinyal yang diterima pada penerima optik dipengaruhi oleh besar kecil rugi-rugi yang terjadi pada saluran serat optik. Jarak transmisi yang semakin panjang pada umumnya akan memberikan rugi-rugi yang semakin besar.

Absorpsi, hamburan, dan radiasi material serat optik merupakan penyebab terjadinya rugi-rugi dalam serat optik. Rugi-rugi absorpsi merupakan mekanisme yang berhubungan dengan komposisi bahan dan proses pabrikasi serat optik, yang selanjutnya dapat mengakibatkan hilangnya sejumlah daya optik dalam bentuk panas. Peningkatan rugi-rugi yang terjadi pada saluran serat optik dapat mengakibatkan rendahnya daya sinyal yang diterima oleh detektor optik. Daya sinyal yang kurang dari nilai minimum sensitivitas penerimaan akan mengakibatkan sinyal tidak dapat diterima oleh detektor optik [4]. Rugi-rugi pada sistem jaringan serat optik dapat terjadi karena penyambungan antar fiber, rugi-rugi yang timbul di dalam komponen pasif: seperti komponen pencabangan, *coupler*, filter optik, dan *isolator* optik.

Daya sinyal optik yang hilang akibat rugi-rugi dapat diperbaiki atau ditingkatkan dayanya dengan memasang penguat pada saluran, sehingga jarak transmisi sinyal dapat diperpanjang [8]. Penguat yang pertama kali digunakan dalam komunikasi serat optik adalah penguat elektronik. Penguat elektronik melakukan penguatan melalui beberapa tahapan, yaitu mengubah bentuk sinyal optik ke bentuk sinyal elektrik, melakukan perbaikan sinyal dan penguatan, dan mengubah bentuk sinyal elektrik ke bentuk sinyal optik untuk ditransmisikan pada saluran serat optik.

Penguatan secara elektronik memberikan hasil yang baik untuk panjang gelombang tunggal dengan kecepatan 10-200 Mbps, namun dapat menimbulkan penundaan waktu transmisi informasi akibat proses pengolahan penguatan secara elektrik [9]. Penguat lain yang telah dikembangkan dan mampu memberikan penguatan sinyal pada kecepatan pengiriman informasi yang tinggi adalah penguat optik. Penguat optik mampu memberikan penguatan sinyal informasi dengan kecepatan 5 Gbps dengan jarak transmisi 6000 km, dan telah diterapkan dalam sistem komunikasi serat optik pada tahun 1995 [10]. Kecepatan 10 Gbps per kanal pada jarak transmisi 180 km juga telah diterapkan pada tahun 1998 [11]. Pengiriman informasi pada kecepatan 50 Tbps telah direalisasikan dalam skala laboratorium dengan menggunakan penguatan sinyal secara optik [12].

Penguat optik yang dimaksudkan dalam penelitian ini adalah penguat yang terbuat dari serat optik yang intinya berupa bahan *silica* tunggal atau perpaduan dengan bahan lain seperti *aluminium*, *germanium*, dan *fluoride* yang di-doping dengan unsur-unsur kimia dari golongan lantanida. Unsur *doping* yang biasa digunakan adalah *Ytterbium (Yb)* digunakan untuk memperkuat sinyal pada rentang panjang gelombang 975-1150 nm, *Neodymium (Nd)* atau *Praseodymium (Pr)* untuk panjang gelombang disekitar 1300 nm, dan *erbium (Er)* untuk panjang gelombang sekitar 1550 nm yang dikenal dengan *erbium-doped fiber amplifiers (EDFA)* [1][4][13][14][15].

EDFA sebagai penguat optik mempunyai beberapa sifat yang menarik, yaitu kemampuan untuk menghasilkan penguatan pada rentang spektrum panjang gelombang 1530-1560 nm atau *C-band*, penguatan tinggi, *noise* rendah, dan *insertion loss* rendah [16]. Sifat menarik yang dimiliki *EDFA* ini dapat digunakan untuk pengembangan sistem komunikasi serat optik jarak jauh pada kecepatan tinggi dengan menggunakan teknik *Wavelength-Division Multiplexing (WDM)* atau *Densed-WDM*. *EDFA* dapat difungsikan sebagai penguat optik tunggal atau multiplex yang ditempatkan pada sisi kirim (*power amplifier*), pada saluran (*in-line amplifier*), dan pada sisi penerima (*pre-amplifier*) [17].

1.2 Perumusan Masalah

EDFA akan memberikan penguatan sinyal pada rentang *C-band* (1530-1560 nm) bilamana diberi daya pompa laser dengan panjang gelombang 980 nm atau 1480 nm. Pemberian daya pompa pada *EDFA* akan menaikkan *ion-ion erbium* (Er^{3+}) dari tingkat energi *ground state* ke tingkat *excited state*. Ion-ion pada tingkat energi *excited state* cenderung kembali ke tingkat *ground state* secara spontan dan menghasilkan *amplified spontaneous emission (ASE)*. Ion-ion erbium yang kembali ke tingkat *ground state* karena rangsangan sinyal dari luar akan melepaskan energi dan memberikan penguatan pada sinyal perangsang tersebut. Penguatan sinyal perangsang terjadi karena cahaya yang dipancarkan pada perpindahan dari tingkat *excited state* ke *ground state* (yang disebut dengan proses peluruhan) mempunyai frekuensi dan fasa yang sama dengan cahaya sinyal perangsang. Energi cahaya yang dihasilkan pada peluruhan mempunyai rentang panjang gelombang sekitar 1550 nm, dan memperkuat sinyal pada panjang gelombang sekitar 1550 nm.

Penguatan yang dihasilkan oleh *EDFA* sangat dipengaruhi oleh dua parameter utama yaitu *absorption cross section* (σ_a) dan *emission cross section* (σ_e). *Absorption cross section* (σ_a) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat absorpsi *EDFA* terhadap daya pompa yang dikenakannya, sedangkan *emission cross section* (σ_e) adalah tingkat penguatan yang dihasilkan oleh medium tersebut. Kedua parameter tersebut mempunyai karakteristik spektrum yang bergantung pada komposisi bahan *co-doping* yang ada dalam fiber [7][18]. Penguatan sinyal tertinggi terjadi pada sinyal untuk panjang gelombang sekitar 1531 nm, karena absorpsi dan emisi *cross section* mempunyai nilai paling tinggi pada panjang gelombang tersebut [19].

Ketidaksamaan atau ketidakrataan penguatan sinyal yang dihasilkan oleh *EDFA* menimbulkan masalah pada sistem komunikasi serat optik kecepatan tinggi dan jarak jauh, misalnya dalam sistem *WDM* [20]. Masalah yang muncul adalah adanya sinyal pada panjang gelombang tertentu, yaitu sekitar 1531 nm tidak perlu dikuatkan, sementara sinyal pada panjang gelombang lainnya sangat lemah. Sinyal yang sangat lemah dan nilainya di bawah ambang batas penerimaan detektor tidak dapat direspon oleh detektor optik [4]. Persyaratan lain dalam sistem komunikasi

optik kecepatan tinggi (sistem *WDM*) yang perlu diperhatikan adalah stabilitas penguatan sebagai fungsi daya dan panjang gelombang sinyal masukan. Persyaratan ini diperlukan untuk menentukan berapa rentang panjang gelombang yang dihasilkan *EDFA* untuk penguatan yang relatif sama.

Metode yang paling sederhana untuk mengatasi ketidakrataan penguatan yang dihasilkan *EDFA* adalah membatasi rentang panjang gelombang (*bandwidth channel*) untuk penguatan yang cukup rata (variasi penguatan kecil). Solusi ini akan membatasi *bandwidth* yang tersedia dari seluruh kapasitas sinyal yang memungkinkan untuk dapat diterima dalam sistem komunikasi optik.

Metode lain yang telah banyak digunakan adalah metode pengaturan komposisi gelas fiber, metode perata (*equalizer*), dan metode penguat *hybrid* (penggabungan *EDFA* dan penguat Raman) [21].

Metode pengaturan komposisi gelas fiber atau metode intrinsik, yaitu metode perataan penguatan dengan menggunakan penguat tunggal dan tidak menggunakan komponen pasif perata penguatan untuk membentuk perataan penguatan. Metode komposisi gelas fiber dilakukan dengan cara mengkombinasi elemen-elemen *co-doping* dalam fiber. Elemen yang sering digunakan adalah *aluminium*, *fluoride*, *telluride*, dan *phospat* [22][23]. Beberapa hasil penelitian untuk meratakan penguatan *EDFA* dengan metode intrinsik ditunjukkan dalam Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Hasil Penelitian Perataan Penguatan Menggunakan Metode Intrinsik

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
1.	<i>C-band</i> dengan menggunakan <i>dual core fiber</i> dalam <i>EDFA</i> [24].	G (gain) < 20dB, variasi $G < 0,7$ dB.pada 1525–1555nm. $NF = 4$ dB P_p 980nm = 50mW L - <i>EDFA</i> = 11 m $G < 5$ dB, variasi $G = 1$ dB.pada 1525–1555nm. P_p 980nm = 28mW	Variasi $G < 1$ dB. Rentang panjang gelombang 30nm. P_p (daya pompa) rendah.	Harga <i>dual core fiber</i> dalam <i>EDFA</i> mahal. Daya sinyal (P_s) tidak disebutkan. Ada kemungkinan <i>setup</i> tidak stabil karena tanpa isolator.

Tabel 1.1. (sambungan)

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
2.	<i>L-band</i> dengan <i>ASE C-band</i> dimanfaatkan sebagai pompa [25].	$G=25\text{dB}$, variasi $G<4\text{dB}$ pada $1565\text{--}1607\text{nm}$. <i>L-EDFA</i> (panjang fiber amplifier atau panjang <i>EDFA</i>)= 150m	G tinggi ($>20\text{dB}$) Rentang panjang gelombang 42nm . $NF<5\text{dB}$.	<i>EDFA</i> sangat panjang, variasi $G > 1\text{dB}$. Daya pompa (P_p) dan daya sinyal (P_s) tidak disebutkan. Ada kemungkinan <i>setup</i> tidak stabil karena tanpa isolator.
		$G=18\text{dB}$, variasi $G<4\text{dB}$ pada $1570\text{--}1605\text{nm}$. <i>L-EDFA</i> = 90m	Rentang panjang gelombang 35nm . $NF<5\text{ dB}$.	

Metode perataan (*equalizer*) adalah metode yang menggunakan komponen pasif eksternal untuk mengatur perataan penguatan. Metode ini menggunakan komponen pasif yang diletakkan pada sisi antara dua buah *EDFA*. Hasil penelitian perataan *EDFA* dengan metode *equalizer* ditunjukkan dalam Tabel 1.2.

Tabel 1.2. Hasil Penelitian Perataan Penguatan Dengan Menggunakan Metode Perata (*Equalizer*)

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
1.	<i>C-band</i> dengan <i>fiber Bragg grating (FBG)</i> [26].	G rata-rata= 21dB , variasi $G<0,6\text{dB}$ pada $1546,1\text{--}1557,3\text{nm}$ P_p $980\text{nm}=90\text{mW}$ P_s $=-17,5\text{ dBm}$ <i>L-EDFA</i> = 13 m	$G>20\text{dB}$ Variasi $G<1\text{dB}$	Rentang panjang gelombang untuk kerataan <i>gain</i> adalah rendah
2.	<i>C-band</i> dengan <i>high-birefringence fiber loop mirror (Hibi-FLM)</i> [27].	$G_{\text{mak}}=20\text{dB}$, variasi $G=\pm 0,9\text{dB}$ pada $1526,5\text{--}1559,5\text{nm}$. P_p $=85\text{mW}$.	Variasi $G<1\text{dB}$. Rentang panjang gelombang 33nm	Disain <i>setup</i> kompleks dan perlu ketelitian tinggi. P_s dan <i>L-EDFA</i> tidak disebutkan.

Tabel 1.2. (sambungan)

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
3.	<i>C-band</i> dengan <i>long periode grating (LPG)</i> [28].	$G=21\text{dB}$, variasi $G=1\text{dB}$ pada 1528,7-1568,7nm P_p 980nm=76mW P_p 1480nm=34,5mW $P_s=10,2\text{dBm}$	$G>20\text{dB}$, Rentang panjang gelombang 40nm. $NF<4\text{dB}$.	Memerlukan 2 daya pompa dengan panjang gelombang yang berbeda. Penggunaan <i>LPG</i> memerlukan desain perencanaan yang sangat teliti untuk <i>gain</i> dan pola spektrumnya sehingga harganya mahal.
		$G=20,9\text{dB}$, variasi $G=0,7\text{dB}$ pada 1529-1566,7nm P_p 980nm=76mW P_p 1480nm=74,5mW $P_s=-6,1\text{dBm}$	$G>20\text{dB}$, Rentang panjang gelombang 37nm. $NF<4\text{dB}$.	
4.	<i>C-band</i> dengan dengan <i>long period fiber grating</i> [29].	Variasi kerataan (variasi G)= $\pm 0,5\text{dB}$ pada 1525-1560nm.	Variasi $G<1\text{dB}$ Rentang panjang gelombang 35nm.	Masih dalam simulasi, bila diaplikasikan belum tentu memberikan hasil yang sama.
5.	<i>S-band</i> dengan <i>fiber Bragg grating</i> [30].	$G_{\text{mak}}=28\text{dB}$, variasi $G=11\text{dB}$ pada 1483-1510nm. $P_p=280\text{mW}$. $L\text{-EDFA1}=20\text{m}$. $L\text{-EDFA2}=30\text{m}$.	Rentang panjang gelombang 27nm.	Variasi $G\gg 1\text{dB}$ P_p besar <i>L-EDFA</i> panjang.
6.	<i>C-band</i> dengan <i>embedded long periode grating (ELPG)</i> [31].	Variasi $G=1\text{dB}$ pada 1527,1-1561,1nm.	Rentang panjang gelombang 34nm.	Variasi $G=1\text{dB}$. Memerlukan ketelitian tinggi untuk pembengkokan dan proses pabrikasi <i>ELPG</i> .

Metode *hybrid* adalah metode perataan penguatan dengan cara mengkombinasikan beberapa penguat *EDFA* tunggal atau penguat *EDFA* dengan penguat Raman. Konfigurasi penguat sering dalam bentuk *cascade* atau bentuk lain, dan memungkinkan keterlibatan bersama-sama komponen perata pasif. Hasil penelitian perataan penguatan *EDFA* dengan metode *hybrid* ditunjukkan dalam Tabel 1.3.

Tabel 1.3. Hasil Penelitian Perataan Penguatan Dengan Menggunakan Metode Hybrid

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
1	<i>C-L Band</i> Gabungan <i>EDFA</i> dan Raman [32].	<p>Grata-rata=20dB, variasi $G=\pm 6$dB pada 1513-1578nm. $NF=5-7,7$dB $P_s=-20$dBm P_p 980nm(1)=250mW, P_p 980nm(2)=210mW, P_p 980nm(3)=110mW <i>L-EDFA</i> (1)=25cm, <i>L-EDFA</i> (2)=30cm</p>	<p>Rentang panjang gelombang 65nm. <i>L-EDFA</i> pendek.</p>	<p>Disain kompleks Variasi $G>1$dB P_p besar dan jumlahnya 3 buah <i>LD</i> $NF>5$dB</p>
		<p>$G_{mak}=34$dB, variasi $G=\pm 14$dB pada 1500-1600nm $NF<3,2$dB <i>L-EDFA</i> =50km, P_p 1410nm <i>forward</i>=150mW, P_p 1410nm <i>backward</i>=210mW</p>	<p>$G_{mak}>20$dB. Rentang panjang gelombang 100nm. $NF<5$dB.</p>	<p>Disain kompleks. Variasi $G>>1$dB. P_p besar dan jumlahnya 3 buah <i>LD</i>. <i>L-EDFA</i> panjang.</p>
2.	<i>C dan L band</i> [33].	<p>G_{mak}.-<i>C band</i>=15dB, variasi $G<1,3$dB pada 1515-1555nm $NF<4,5$dB <i>L-EDFA</i>=10m $P_p=50$mW $P_s=-10$dBm</p>	<p>$NF<5$dB. Rentang panjang gelombang 40nm.</p>	<p>$G_{mak}<20$dB Variasi $G>1$dB</p>
		<p>G_{mak}.-<i>L band</i> =14,2dB, variasi $G<1,5$dB pada 1562-1620nm $NF<4,8$dB <i>L-EDFA</i>=15m $P_p=60$mW $P_s=-10$dBm</p>	<p>$NF<5$dB. Rentang panjang gelombang 58nm.</p>	<p>$G_{mak}<20$dB Variasi $G>1$dB</p>

Tabel 1.3. (sambungan)

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
3.	<i>S-band</i> dengan <i>TDFFA</i> dan <i>EDFSA</i> [34].	<p>$G_{\text{mak}}=34\text{dB}$, variasi $G=9\text{dB}$ pada 1458-1540nm dan $P_s=-20\text{dBm}$, $NF=9\text{dB}$</p> <p>$G_{\text{mak}}=16\text{dB}$, variasi $G=4\text{dB}$ pada 1458-1540nm dan $P_s=0\text{dBm}$, $NF=10\text{dB}$</p> <p>$L\text{-TDFFA}=5\text{m}$, P_p 1390nm=400mW</p> <p>$L\text{-EDFSA}=7\text{m}$, P_p 980nm=165mW</p>	<p>Rentang panjang gelombang 82nm</p> <p>$L\text{-EDFA}$ pendek</p>	<p>Vaiasi $G \gg 1$.</p> <p>P_p besar.</p> <p>Harga fiber amplifier mahal.</p>
4.	<i>S</i> dan <i>C Band</i> [35].	<p>Untuk <i>C-band</i></p> <p>$G=16\text{-}20\text{dB}$, variasi $G=4\text{dB}$ pada 1520-1565nm.</p> <p>$NF=9\text{-}14\text{dB}$</p> <p>P_p 980nm=140mW.</p> <p>$P_s=-5\text{dBm}$.</p> <p>$L\text{-EDFA}=10\text{m}$.</p>	<p>Rentang panjang gelombang 35nm.</p>	<p>Variasi $G > 1\text{dB}$.</p> <p>$NF > 5\text{dB}$.</p> <p>P_p besar</p>
		<p>Untuk <i>S-band</i></p> <p>$G=8\text{-}18\text{dB}$, variasi $G=10\text{dB}$ pada 1480-1520nm.</p> <p>$NF=6\text{-}10\text{dB}$</p> <p>P_p 980nm=280mW.</p> <p>$P_s=-5\text{dBm}$.</p> <p>$L\text{-EDFA}=20\text{m}$ dan 30m tersusun secara <i>cascade</i>.</p>	<p>Rentang panjang gelombang 40nm.</p>	<p>Variasi $G > 1\text{dB}$.</p> <p>$NF > 5\text{dB}$.</p> <p>P_p besar</p> <p>$L\text{-EDFA}$ total=50m</p> <p>Disain untuk penggabungan <i>S</i> dan <i>C band</i> cukup kompleks.</p>

Dalam penelitian ini, perataan penguatan dilakukan dengan menggunakan metode pengaturan daya sinyal masukan dan daya pompa. Metode ini dilakukan dengan memperhatikan perilaku *EDFA*, yaitu besar kecilnya penguatan yang dihasilkan dipengaruhi oleh besar kecilnya sinyal masukan. Perubahan daya sinyal masukan juga berpengaruh terhadap tingkat kerataan penguatan yang dihasilkan. Kebaruan penelitian ini adalah ditunjukkannya perubahan tingkat kerataan penguatan akibat perubahan kenaikan daya sinyal masukan untuk panjang dan daya pompa tertentu. Kerataan terjadi karena saturasi inversi populasi ion-ion erbium, dan hal ini berpengaruh terhadap besarnya *spectral hole burning* yang terbentuk dalam spektrum penguatan. Pembuktian secara eksperimen perlu dilakukan karena belum ada penelitian yang menunjukkan secara publikasi hubungan daya sinyal, panjang *EDFA*, dan daya pompa terhadap efek saturasi yang terjadi. Panjang gelombang untuk daya sinyal yang dikuatkan jumlahnya 20 panjang gelombang pada rentang *C-band*. Jarak antar *channel* pada rentang *C-band* adalah 200 GHz sesuai dengan standar *ITU*. Pertimbangan lain digunakannya metode ini adalah kekompakan disain konfigurasi *EDFA*, kerataan penguatan yang dihasilkan, penguatan yang dihasilkan masih tinggi, dan *noise figure (NF)* yang rendah.

Berdasar pada masalah yang ada pada penguatan yang dihasilkan oleh *EDFA* dan model solusi dengan menggunakan metode pengaturan daya sinyal masukan, perumusan masalah dapat diuraikan sebagai berikut.

1. Bagaimana bentuk konfigurasi *setup* penguat optik *EDFA* sehingga menghasilkan kinerja penguat yang optimal, bentuk yang kompak, sederhana, dan mudah diterapkan secara aplikatif.
2. Berapa besar pengaruh daya *ASE* yang dihasilkan jika panjang *EDFA* dan daya pompa diubah.
3. Berapa besar pengaruh *gain* dan *NF* yang dihasilkan jika daya pompa, daya sinyal, dan panjang *EDFA* diubah.
4. Berapa panjang maksimum *EDFA* yang dapat memberikan *gain* maksimum untuk perubahan daya sinyal dan daya pompa yang diberikan

5. Berapa gain rata-rata tertinggi dengan variasi *gain* kurang dari 1 dB dan *noise figure* kurang dari 5 dB yang dihasilkan dalam eksperimen untuk berbagai perubahan panjang, daya sinyal, dan daya pompa yang diberikan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan kerataan penguatan yang dihasilkan oleh *EDFA* dengan mengatur daya sinyal masukan untuk panjang dan daya pompa yang bervariasi. Hasil eksperimen diharapkan dapat menunjukkan pengaruh daya sinyal masukan terhadap *gain*, variasi *gain*, *gain* rata-rata, dan *noise figure (NF)* yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian perataan penguatan *EDFA* dengan mengatur daya sinyal masukan pada variasi panjang *EDFA* dan daya pompa adalah sebagai berikut:

- Didapatkannya suatu metode untuk mengatur kerataan penguatan secara optik dengan mengatur daya sinyal masukan pada variasi panjang *EDFA* dan daya pompa.
- Didapatkannya suatu fleksibilitas penggunaan penguat pada jaringan komunikasi serat optik, yaitu sebagai *power amplifier*, *in-line amplifier*, atau *pre amplifier*.
- Didapatkannya suatu informasi tentang berapa rentang *bandwidth* dengan variasi penguatan yang kecil untuk mentransmisikan informasi sesuai dengan standar kanal yang ditetapkan oleh *ITU*.
- Didapatkannya data kuantitatif pengaruh perubahan daya sinyal terhadap *gain* dan *noise figure* yang dihasilkan sebagai akibat efek saturasi inversi populasi.
- Didapatkannya panjang optimum *EDFA* untuk variasi daya sinyal, daya pompa, dan panjang *EDFA*.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada aspek perataan *gain* (penguatan) yang dihasilkan oleh *EDFA*. Perataan *gain* yang didapat dengan mengatur daya sinyal masukan dilakukan dengan cara memasukkan satu sinyal dengan panjang gelombang dan daya tertentu pada *EDFA*. Sinyal tersebut dimasukkan secara bergantian pada kanal-kanal *C-band* sesuai dengan standar *ITU*. Jarak antar kanal pada rentang *C-band* adalah 200 GHz. Penelitian ini hanya memperhatikan fenomena empiris (terukur melalui *OSA*) yang merupakan akibat dari pengaruh daya sinyal masukan yang diberikan pada variasi panjang *EDFA* dan daya pompa.

Fiber optik yang digunakan terbuat dari *silica* yang di-*doping* dengan *erbium* dan *aluminium germanosilicate*. *Doping density* erbium adalah $7,85 \times 10^{24}$ ion/m³, panjang gelombang *cut-off EDFA* adalah 935 nm, dan diameter inti fiber 3,1 μ m. Indeks bias inti dan *cladding* untuk panjang gelombang 1550 nm masing-masing adalah 1,462 dan 1,444. Indeks bias inti dan *cladding* untuk panjang gelombang 980 nm masing-masing 1,469 dan 1,451. Laser pemompa yang digunakan adalah laser diode dengan panjang gelombang 974,6 nm. Sumber sinyal yang digunakan adalah *tunable laser source (TLS)* dimana sinyal keluarannya dapat diatur dari -20 dBm hingga 0 dBm. Sinyal yang dikuatkan adalah sinyal yang masuk pada ujung *EDFA* (sinyal keluaran *TLS* dikurangi rugi daya pada isolator, penyambungan, dan *WDM coupler*). Penerima sinyal menggunakan *optical spectrum analyzer (OSA)* dengan resolusi 0,5 nm. Penelitian dilakukan pada temperatur ruang $\pm 26^\circ\text{C}$.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini tersusun atas 6 bab. Uraian tentang alasan dilakukannya penelitian, masalah dan perumusannya, tujuan dan manfaat penelitian, batasan penelitian, dan sistematika pembahasan diuraikan dalam bab 1. Tinjauan teori tentang karakteristik fiber yang di-*doping erbium* dan model matematik untuk analisis *EDFA* diuraikan dalam bab 2. Bab 3 membahas tentang metode penelitian. Karakterisasi komponen pendukung *EDFA* diuraikan dalam bab 4. Hasil eksperimen *EDFA* dan pembahasan diuraikan dalam bab 5. Bab 6 merupakan kesimpulan dan saran.

BAB 2 TINJAUAN TEORI

Tinjauan teori adalah penjelasan tentang karakteristik fiber yang di-*doping erbium* dan teori dasar *EDFA*. Karakteristik fiber yang di-*doping erbium* memberikan penjelasan tentang sifat spektroskopi *EDFA* sesuai dengan fungsinya sebagai penguat. Pola spektroskopi pada penguat optik tidak hanya ditentukan oleh *erbium* saja, tetapi juga ditentukan oleh komposisi bahan *doping* lainnya. Berbagai jenis bahan *doping* yang digunakan dalam penguat fiber akan memberikan pola spektroskopi yang berbeda-beda. Teori dasar *EDFA* adalah teori pendekatan secara matematik yang digunakan untuk melakukan analisis perilaku *EDFA*.

2.1 Karakteristik Fiber Yang Di-*doping Erbium*

Sifat-sifat dasar dan spektroskopi *ion-ion erbium* sebagai penguat optik dibahas dalam subbab 2.1. Sifat-sifat dasar ini meliputi transisi *cross section*, *lifetime*, *linewidth*, dan *broadening*. Pembahasan lainnya adalah tentang spektroskopi *ion-ion erbium*. Pembahasan ini terdiri atas *lifetime*, spektrum *erbium*, *cross section*, dan *linewidth*.

2.1.1 Sifat-sifat Dasar Erbium

2.1.1.1 Absorpsi dan Emisi *Cross Section*

Cross section merupakan parameter yang menyatakan kemampuan suatu *ion* untuk mengabsorpsi atau mengemisi cahaya. Transisi *cross section* adalah suatu transisi antara dua keadaan dari suatu *ion* yang mewakili probabilitas transisi untuk melakukan emisi atau absorpsi cahaya. Dua keadaan tersebut mempunyai hubungan dengan energi E_1 dan E_2 ($E_1 < E_2$). Probabilitas transisi untuk mengabsorpsi suatu *photon* dari energi $E_2 - E_1$ adalah sebanding dengan absorpsi *cross section* σ_{12} , dan untuk emisi *photon* adalah sebanding dengan emisi *cross section* σ_{21} . Dimensi *cross section* adalah suatu luasan. Hubungan yang menyatakan tentang jumlah daya cahaya P_{abr} pada frekuensi ω yang diserap oleh sebuah *ion* ditunjukkan dalam persamaan (2.1) [21].

$$P_{abs} = \sigma_{12} I \quad (2.1)$$

dimana I adalah intensitas cahaya yang datang pada *ion*. Pembagian daya absorpsi oleh energi *photon* $\hbar\omega$ akan menghasilkan kecepatan absorpsi sejumlah *photon*, dan dinyatakan dalam bentuk pers. (2.2) [21].

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

dimana $\Phi(\omega)$ adalah fluks *photon* dalam satuan jumlah *photon* per luasan per waktu. Jumlah daya cahaya yang terstimulasi oleh *ion-ion* dengan intensitas cahaya yang mengenainya ditunjukkan dalam bentuk pers. (2.3) [21].

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

Total perubahan daya untuk suatu intensitas yang melintasi *ion-ion* ditunjukkan dalam pers. (2.4) [21].

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

dimana 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 teratas (*excited state*) atau *level* 2.

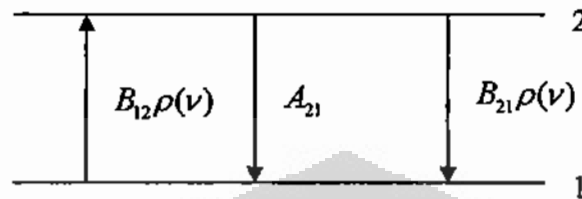
Absorpsi dan emisi cahaya dalam sistem dua *level* mempunyai dua *level* degenerasi, yaitu *level* 1 mempunyai degenerasi g_1 dan *level* 2 mempunyai degenerasi g_2 . Perubahan populasi *level* 1 dan 2 ditentukan oleh kekuatan transisi antara *sublevel* individu yang menyusun masing-masing *level*. Bilamana semua *sublevel* mempunyai populasi yang sama, atau kekuatan transisi antara *sublevel-sublevel* nya sama, maka akan didapat suatu pernyataan dalam bentuk persamaan seperti berikut [21].

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

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

dimana N_1 dan N_2 adalah populasi *ion-ion* pada *level ground state* dan *level exited state*, $\rho(\nu)$ adalah rapat fluks *photon* dalam satuan jumlah *photon* per *bandwidth*

frekuensi per volume, $B_{12}\rho(\nu)$ adalah kecepatan absorpsi, A_{21} adalah kecepatan emisi spontan, dan $B_{21}\rho(\nu)$ adalah kecepatan emisi terstimulasi (*stimulated*). Hubungan transisi *ion-ion* tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Hubungan Absorpsi dan Emisi Transisi Cahaya Dalam Sistem Dua Level

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

Secara umum *level-level* energi mengalami suatu degenerasi. *Level 1* dengan degenerasi g_1 mempunyai *sublevel-sublevel* m_1 , dan *level 2* dengan degenerasi g_2 mempunyai *sublevel-sublevel* m_2 . Pers. (2.5) dan pers. (2.6) mempunyai hubungan transisi antar *sublevel-sublevel*. Kecepatan transisi terstimulasi antara *sublevel-sublevel* m_1 dan m_2 yang dinyatakan sebagai $R(m_1, m_2)$ dan mempunyai bentuk persamaan seperti berikut [21].

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{abs} = \sum_{m_1, m_2} R(m_1, m_2) N m_1 \quad (2.7)$$

dan syarat hubungan untuk emisi adalah

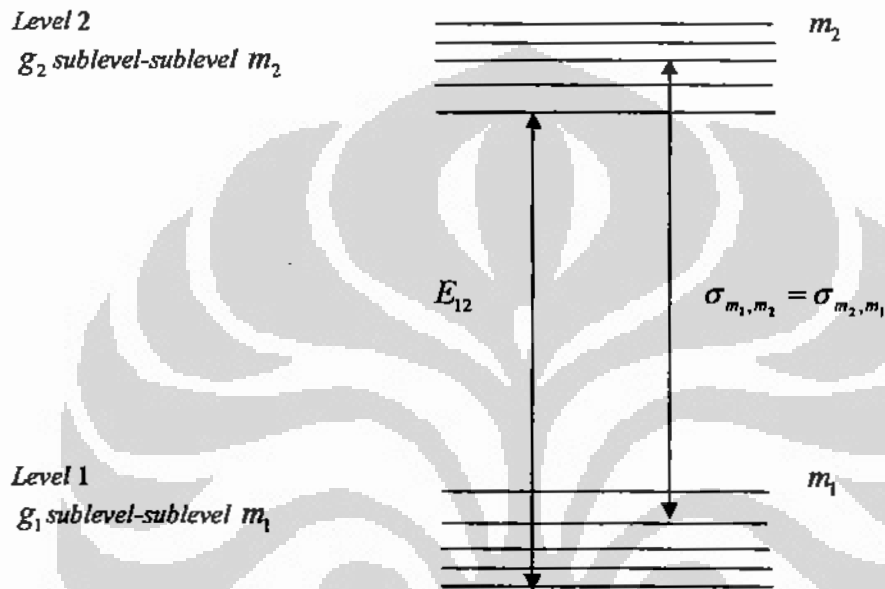
$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{emis} = - \sum_{m_1, m_2} (A(m_1, m_2) + R(m_1, m_2)) N m_2 \quad (2.8)$$

dimana $A(m_1, m_2)$ adalah kecepatan transisi *spontaneous* antara *sublevel* m_1 dan m_2 . Bilamana semua *sublevel* mempunyai populasi sama, dan masing-masing *sublevel* m_1 untuk *level 1* mempunyai $N m_1 = N_1 / g_1$ dan untuk *level 2* mempunyai $N m_2 = N_2 / g_2$, selanjutnya didapat hubungan persamaan seperti berikut [21].

$$B_{21}\rho(\nu) = \frac{1}{g_2} \sum_{m_1, m_2} R(m_1, m_2) \quad (2.9)$$

dan
$$B_{12}\rho(\nu) = \frac{1}{g_1} \sum_{m_1, m_2} R(m_1, m_2) \quad (2.10)$$

Gambar 2.2 memberikan ekspresi eksak untuk semua *cross section* transisi level 1 ke level 2 sebagai jumlah yang dipertimbangkan dari transisi *cross section* antar *sublevel*.



Gambar 2.2. Struktur Level Energi Untuk Dua Buah *Multiplet* 1 dan 2

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

Emisi dan absorpsi *cross section* untuk transisi $1 \leftrightarrow 2$ mempunyai hubungan yang dinyatakan dalam pers. (2.11) dan pers. (2.12) [21].

$$\sigma_{em}(\nu) = \sum_{m_1, m_2} \left(\frac{e^{-E_{m_2}/kT}}{Z_2} \right) \sigma_{m_1, m_2}(\nu) \quad (2.11)$$

dan

$$\sigma_{abs}(\nu) = \sum_{m_1, m_2} \left(\frac{e^{-E_{m_1}/kT}}{Z_1} \right) \sigma_{m_1, m_2}(\nu) \quad (2.12)$$

Z_i adalah fungsi pembagi, $Z_i = \sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_1}/kT}$, $\sigma_{em}(\nu)$ dan $\sigma_{abs}(\nu)$ adalah emisi dan absorpsi *cross section*, k adalah konstanta Boltzmann (J/K) dan T adalah temperatur dalam derajat Kelvin.

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 dan pernyataan pers. (2.11) dan pers. (2.12) dapat direduksi menjadi [21].

$$\sigma_{21}(\nu) = \frac{1}{g_2} \sum_{m_2, m_1} \sigma_{m_2, m_1}(\nu) \quad (2.13)$$

$$\sigma_{12}(\nu) = \frac{1}{g_1} \sum_{m_1, m_2} \sigma_{m_2, m_1}(\nu) = \frac{g_2}{g_1} \sigma_{21}(\nu) \quad (2.14)$$

Pembagian pers. (2.11) dengan pers. (2.12), dan menggunakan fakta bahwa $E_{m_2} = E_{m_1} + h\nu - E_{12}$ akan didapat hasil seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut ini [21].

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{em}(\nu)}{\sigma_{abs}(\nu)} &= \frac{Z_1 \sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_2}/kT} \sigma_{m_2, m_1}(\nu)}{Z_2 \sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_1}/kT} \sigma_{m_1, m_2}(\nu)} \\ &= \frac{Z_1}{Z_2} e^{(E_{12} - h\nu)/kT} \frac{\sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_1}/kT} \sigma_{m_1, m_2}(\nu)}{\sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_1}/kT} \sigma_{m_1, m_2}(\nu)} \\ &= \frac{Z_1}{Z_2} e^{(E_{12} - h\nu)/kT} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Pernyataan kuantitas $Z_1/Z_2 e^{E_{12}/kT}$ sering digantikan dengan pernyataan $e^{\varepsilon/kT}$, dimana ε adalah energi transisi rata-rata antara dua *manifold* (lapisan-lapisan dalam *level* energi).

Transisi Er^{3+} untuk level ${}^4I_{15/2} \leftrightarrow {}^4I_{13/2}$ yang berhubungan dengan emisi *cross section* σ_{21} dan absorpsi *cross section* σ_{12} dinyatakan dalam bentuk persamaan matematik oleh teori McCumber seperti berikut [21].

$$\sigma_{21}(\nu) = \sigma_{12}(\nu) e^{(\varepsilon - h\nu)/kT} \quad (2.16)$$

2.1.1.2 Lifetime

Lifetime elektron dari suatu *level* adalah lama waktu tinggal *ion-ion erbium* dalam *level* tersebut. Besarnya nilai *lifetime* adalah berbanding terbalik dengan probabilitas transisi *ion-ion* dari *level excited state* ke *level ground state*. *Lifetime ion erbium* biasanya mempertimbangkan dua lintasan utama untuk peluruhan, yaitu *radiative* dan *nonradiative* [21].

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (2.17)$$

dimana τ adalah *lifetime* keseluruhan, τ_r adalah *lifetime radiative* dan τ_{nr} adalah *lifetime nonradiative*. *Lifetime radiative* muncul dari *fluorescence* yang berasal dari *level* eksitasi ke seluruh *level* dibawahnya. Karena transisi *radiative* adalah terlarang untuk orde pertama, maka *lifetime radiative* cenderung menjadi lama, dan dalam tingkatan *microsecond* hingga *milisecond*.

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 dengan temperatur karena populasi *phonon* meningkat terhadap kenaikan temperatur. Kecepatan transisi *nonradiative* pada temperatur T mempunyai hubungan dalam bentuk persamaan seperti berikut [21].

$$(1/\tau_{nr})_{n,T} = (1/\tau_{nr})_{n,0} [1 - \exp(-\hbar\omega/kT)]^n \quad (2.18)$$

dimana $\hbar\omega$ adalah energi *phonon*, $n = \Delta E / \hbar\nu_m$ adalah jumlah *phonon* yang diperlukan untuk celah (*gap*) energi (ΔE adalah energi *gap* dan $\hbar\nu_m$ adalah energi *phonon* maksimum dari suatu *phonon* yang dapat menghubungkan ke *ion*), dan $(1/\tau_{nr})_{n,0}$ adalah kecepatan transisi pada $T = 0$. Pers. (2.18) selanjutnya dapat ditulis dengan menggunakan parameter B dan α seperti berikut [21].

$$(1/\tau_{nr})_{n,T} = B \exp(-\alpha\Delta E) [1 - \exp(-\hbar\omega/kT)]^n \quad (2.19)$$

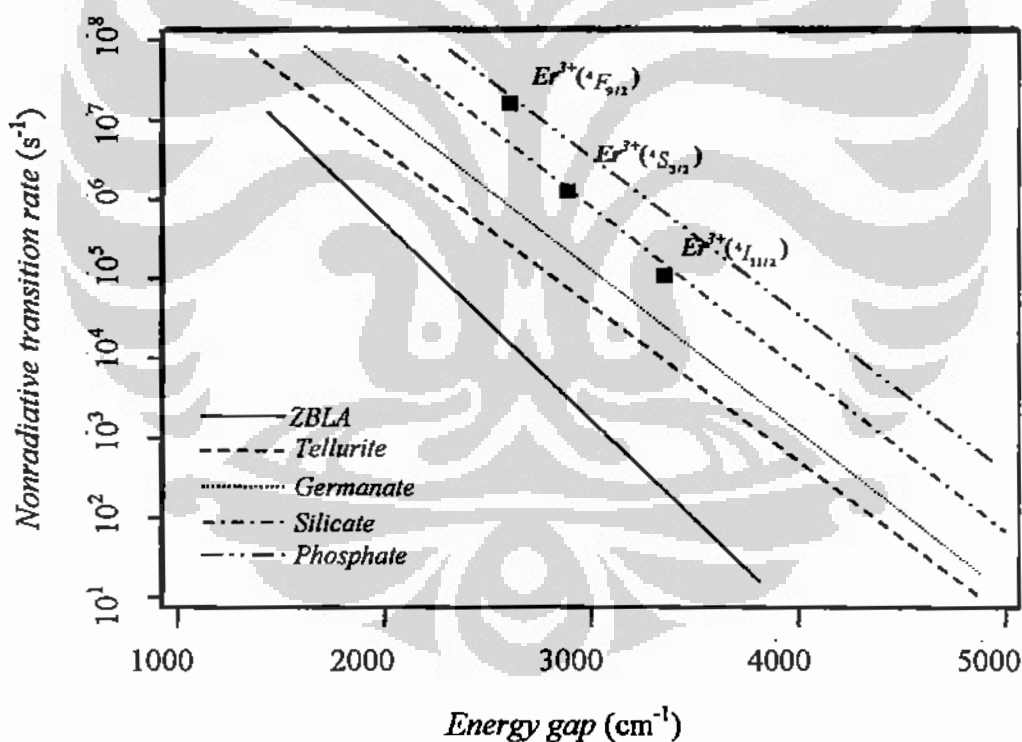
Nilai parameter B dan α yang berhubungan dengan energi *phonon* untuk proses *nonradiative* ditunjukkan Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Parameter Transisi *Nonradiative* Pada Gelas Utama Fiber

Gelas Utama	B (s^{-1})	α (cm)	$h\nu$ (cm^{-1})
Tellurite	$6,3 \times 10^{10}$	$4,7 \times 10^{-3}$	700
Phosphate	$5,4 \times 10^{12}$	$4,7 \times 10^{-3}$	1200
Borate	$2,9 \times 10^{12}$	$3,8 \times 10^{-3}$	1400
Silicate	$1,4 \times 10^{12}$	$4,7 \times 10^{-3}$	1100
Germanate	$3,4 \times 10^{10}$	$4,9 \times 10^{-3}$	900
ZBLA	$1,59 \times 10^{10}$	$5,19 \times 10^{-3}$	500
Fluoroberyllate	9×10^{11}	$6,3 \times 10^{-3}$	500

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., Simpson, J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. USA: Academic Press.

Kecepatan transisi *nonradiative* untuk Er^{3+} dalam beberapa gelas utama ditunjukkan dalam Gambar 2.3.

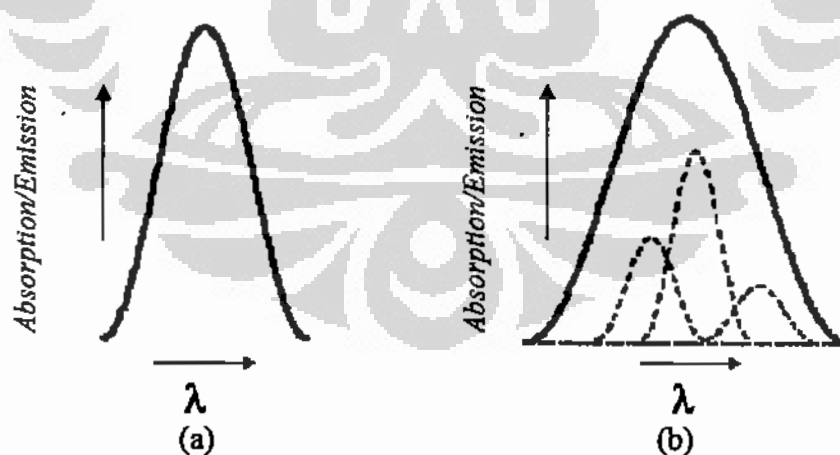
**Gambar 2.3.** Kecepatan Transisi *Nonradiative* Er^{3+} Dalam Berbagai Gelas Utama

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. USA: Academic Press.

2.1.1.3 Linewidth dan Broadening

Linewidth adalah pelebaran berkas cahaya dari spektrum emisi yang dihasilkan oleh pancaran akibat emisi spontan atau emisi terangsang [36]. *Linewidth* menggambarkan batas spektrum *gain* pada rentang panjang gelombang untuk *gain* yang dihasilkan. Pelebaran berkas terjadi karena pelebaran *state* energinya, yaitu masing-masing *state* pada kenyataannya merupakan kumpulan dari banyak tingkatan energi yang jaraknya saling berdekatan. *Linewidth* atau pelebaran dari suatu transisi mengandung kontribusi homogen dan tidak homogen. Pelebaran homogen atau pelebaran natural adalah pelebaran berkas cahaya yang dipancarkan karena adanya interaksi *phonon* dari suatu gelas utama. Pelebaran homogen mempunyai hubungan dengan *lifetime* yang ada, dan tergantung pada proses *radiative* dan *nonradiative* [37].

Pelebaran tidak homogen adalah pelebaran berkas cahaya yang dipancarkan oleh perpindahan elektron dari *level excited state* ke *level ground state*, dimana pada masing-masing *level* energi tersebut terbentuk *sublevel-sublevel* energi sebagai akibat dari efek Stark. Bentuk garis homogen dan tidak homogen ditunjukkan dalam Gambar 2.4.

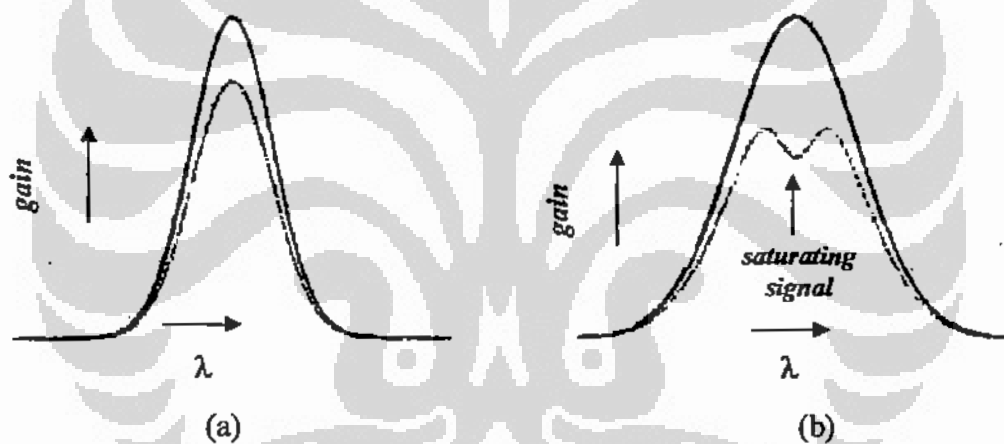


Gambar 2.4. (a) Garis Terlebarkan Secara Homogen, (b) Garis Yang Terlebarkan Secara Tidak Homogen

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

Gambar 2.4 (a) menunjukkan garis yang melebar secara homogen untuk kumpulan *ion-ion* dengan panjang gelombang dan *lifetime* transisi yang identik. Gambar 2.4 (b) menunjukkan garis yang melebar secara tidak homogen yang tersusun dari kumpulan garis yang melebar secara homogen dengan frekuensi pusat (*center*) dan lebar garis yang berbeda.

Transisi *level* energi pada penguat fiber dipengaruhi oleh kuat lemahnya sinyal yang akan dikuatkan. Sinyal yang kuat akan mengakibatkan saturasi pada transisi energi. Kejadian ini akan berpengaruh pada absorpsi dan emisi yang dihasilkan. Pengaruh yang terjadi adalah turunnya nilai *gain* dan terbentuknya *hole* pada spektrum *gain* yang dihasilkan dari pelebaran garis secara homogen dan tidak homogen. Gambar 2.5 menunjukkan saturasi *gain* untuk garis yang melebar secara homogen dan tidak homogen.



Gambar 2.5. Saturasi *Gain* Untuk Garis Yang Terlebar Secara Homogen (a) dan Tidak Homogen (b).

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. USA: Academic Press.

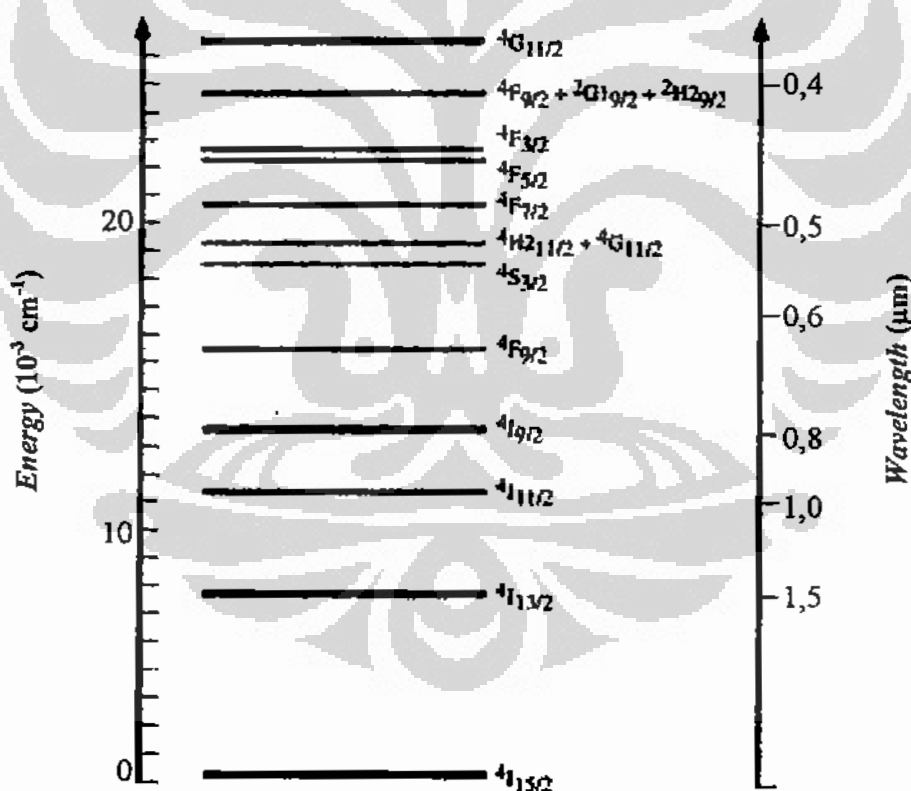
Garis padat pada Gambar 2.5 adalah *gain* yang tidak tersaturasi, dan garis putus-putus adalah *gain* yang tersaturasi sebagai akibat pengaruh daya sinyal yang besar.

2.1.2 Spektroskopi *ion-ion* Er^{3+}

Transisi *ion* Er^{3+} dari *level* energi ${}^4I_{13/2}$ ke *level* energi ${}^4I_{15/2}$ mampu memberikan *lasing* dan penguatan sinyal pada panjang gelombang sekitar 1500 nm.

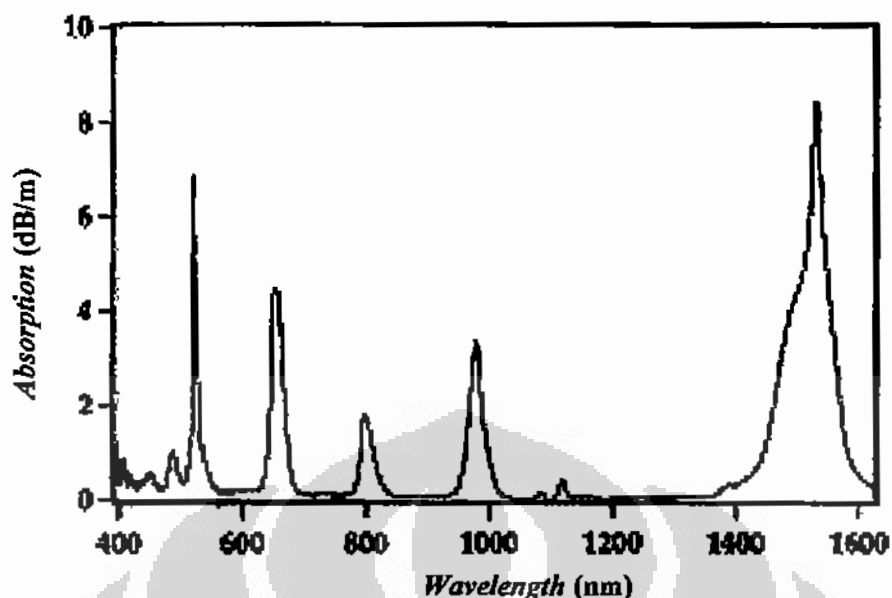
Skema level energi pada Er^{3+} dan spektrum yang dihasilkan ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Hasil pengukuran absorpsi ion erbium yang di-doping kedalam fiber dan terukur pada temperatur ruang ditunjukkan dalam Gambar 2.7. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sumber cahaya putih (*white light source*) dan *optical spektrum analyzer (OSA)*. Berbagai puncak muncul pada transisi antara *ground state* ($^4I_{15/2}$) dan *state* yang terletak lebih tinggi.

Erbium mempunyai *lifetime* yang sangat panjang pada transisi penguatan. Kenyataan ini terjadi karena celah energi (*energy gap*) yang dimiliki *erbium* antara *level excited state* ($^4I_{13/2}$) dan *level ground state* ($^4I_{15/2}$) sangat besar. Nilai *lifetime*-nya diperkirakan 10 ms dan bervariasi tergantung pada komposisi gelas utama dan konsentrasi *erbium*.



Gambar 2.6. Struktur Level Energi Erbium

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.



Gambar 2.7. Spektrum Absorpsi Yang Terukur Secara eksperimen pada Er^{3+} yang di-doping kan pada fiber *germano-alumino-silica*

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

2.1.2.1 Lifetime

Lifetime radiative dan *nonradiative ion-ion erbium (Er^{3+})* sangat dipengaruhi oleh komposisi gelas yang ada dalam fiber. *Lifetime Er^{3+}* pada level energi $^4I_{13/2}$ untuk berbagai komposisi gelas utama seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.2. Gelas *phosphate* mempunyai indeks bias tertinggi dibandingkan dengan gelas yang berbasis *silica*. Fenomena ini memberikan kontribusi *cross section radiative* yang tertinggi, yang berakibat pada menurunnya *lifetime* pada level $^4I_{13/2}$.

Tabel 2.2. *Lifetime* Untuk level $^4I_{13/2}$ Pada Er^{3+} Dalam Berbagai Gelas Utama

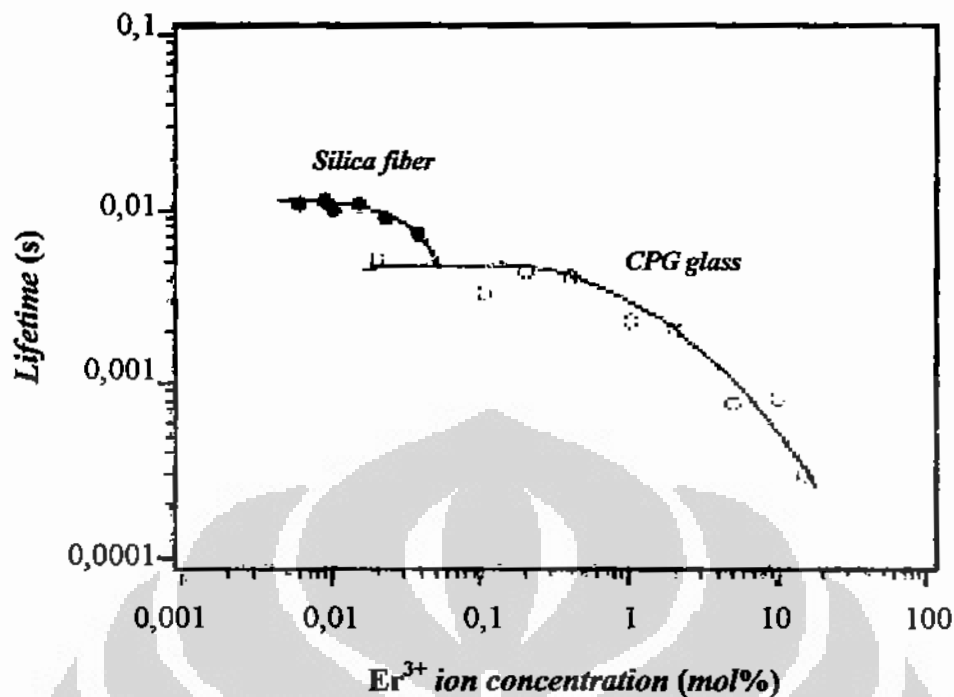
<i>Host Glass (Gela Utama)</i>	<i>Lifetime (ms)</i>
Na-K-Ba-silicate	14
ED-2 (silicate)	12
Silicate	14,7
Silicate L-22	14,5
Al-P Silica	10,8
Al-Ge silica	9,5-10,0

Tabel 2.2. (sambungan)

<i>Host Glass (Gelas Utama)</i>	<i>Lifetime (ms)</i>
Na-Mg-phosphate	8,2
LGS-E (phosphate)	7,7
LGS-E7 (phosphate)	7,9
Phosphate	10,7
Phosphate	8,5
Fluorophosphate	8,0
Fluorophosphate L11	8,25
Fluorophosphate L14	9,5
Ba-La-borate	8,0
Na-K-Ba-Al-germanate	6,5
Fluoride	10,3
Fluorozirconate F88	9,4
Tellurite	4

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press

Kecepatan transisi *ion-ion erbium* pada *state* tertinggi ($^4I_{11/2}$ dan di atasnya) adalah tercepat, hal ini disebabkan karena kecepatan transisi *nonradiative*-nya yang tinggi. Kecepatan transisi level $^4I_{11/2}$ adalah 10^5 s^{-1} untuk gelas utama berbasis *silica* dan 10^6 s^{-1} untuk gelas utama berbasis *phosphate*. Konsentrasi *erbium* yang tinggi pada penguat fiber akan menurunkan *lifetime* pada *level excited state*. Gambar 2.8 menunjukkan *lifetime* Er^{3+} pada *level state* $^4I_{13/2}$ sebagai fungsi konsentrasi Er^{3+} dalam fiber gelas *silica* dan *CPG (calcium metaphosphate)*. *CPG* adalah komponen gelas utama yang terbaik untuk *ion erbium* dibandingkan dengan *silica* [21].

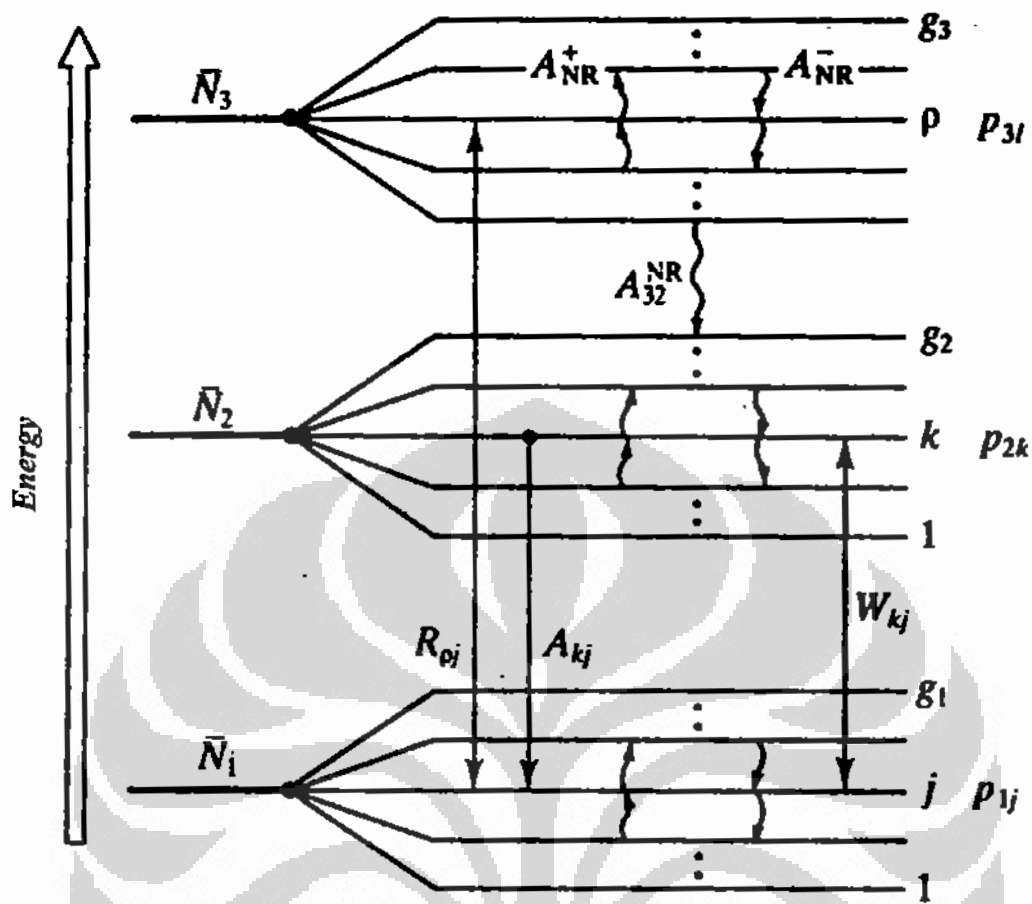


Gambar 2.8. Lifetime Fluorescence Er^{3+} Dalam Fiber Gelas Silica dan Gelas CPG (calcium metaphosphate).

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. USA: Academic Press

2.1.2.2 Spektrum Er^{3+} , Cross Section, dan Linewidth

Erbium yang di-doping kedalam gelas fiber sebagai penguat optik dapat digambarkan secara sederhana dengan sistem laser tiga tingkat. Penggambaran sistem laser tiga tingkat didasarkan atas panjang gelombang laser pemompa yang digunakan, yaitu 980 nm. Distribusi muatan dalam gelas utama fiber membangkitkan medan listrik permanen yang disebut dengan medan *ligant*. Medan *ligant* menghasilkan efek Stark, yaitu terbentuknya *sublevel-sublevel* energi pada tingkatan energi. Gambar 2.9 menunjukkan diagram tingkat energi yang berhubungan dengan pemisahan Stark pada sistem laser tiga tingkat.



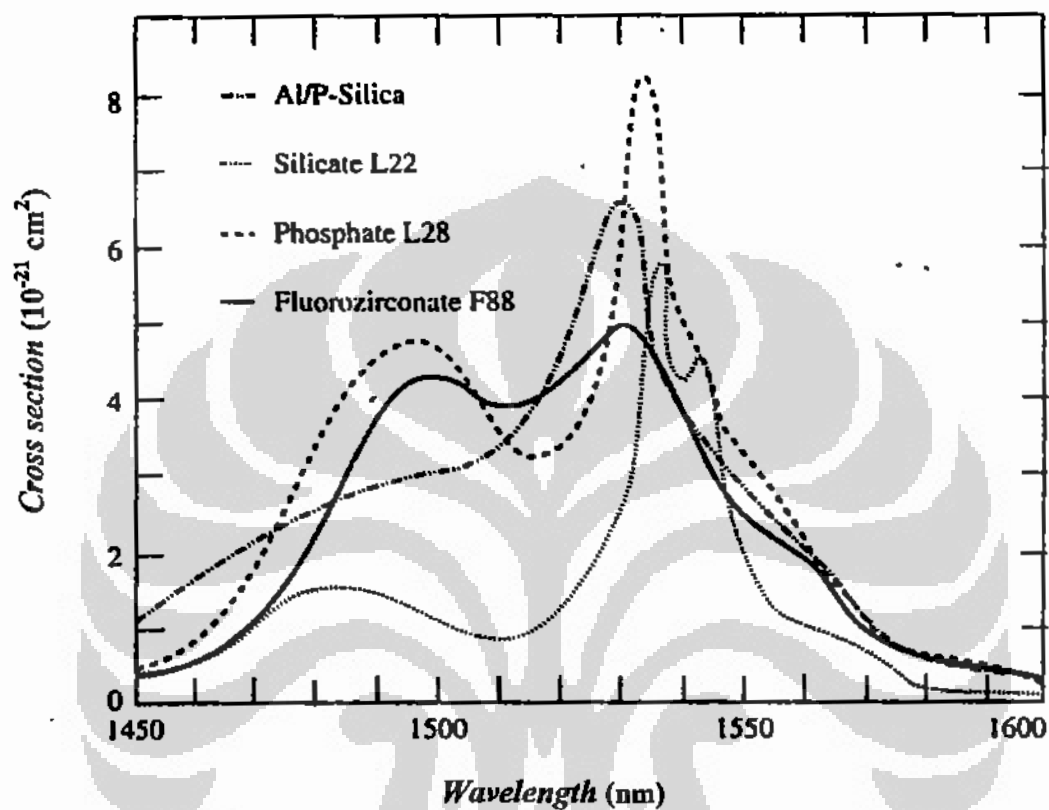
Gambar 2.9. Diagram Tingkat Energi Yang Gerhubungan Dengan Pemisahan Stark Pada Sistem Laser Tiga Tingkat

Sumber: Desurvire, Emmanuel. (1994). Erbium Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Masing-masing tingkat energi ditandai dengan angka 1, 2, dan 3. Simbul A_{NR}^+ menunjukkan kecepatan termal antara *sublevel* Stark yang berdekatan, g adalah penurunan (degenerasi) tingkat keseluruhan, j momentum orbit total, R_{ij} kecepatan pemompaan, W_{kj} kecepatan emisi terangsang, A_{kj} kecepatan emisi spontan, dan A_{32}^{NR} kecepatan peluruhan (*decay*) *nonradiative*.

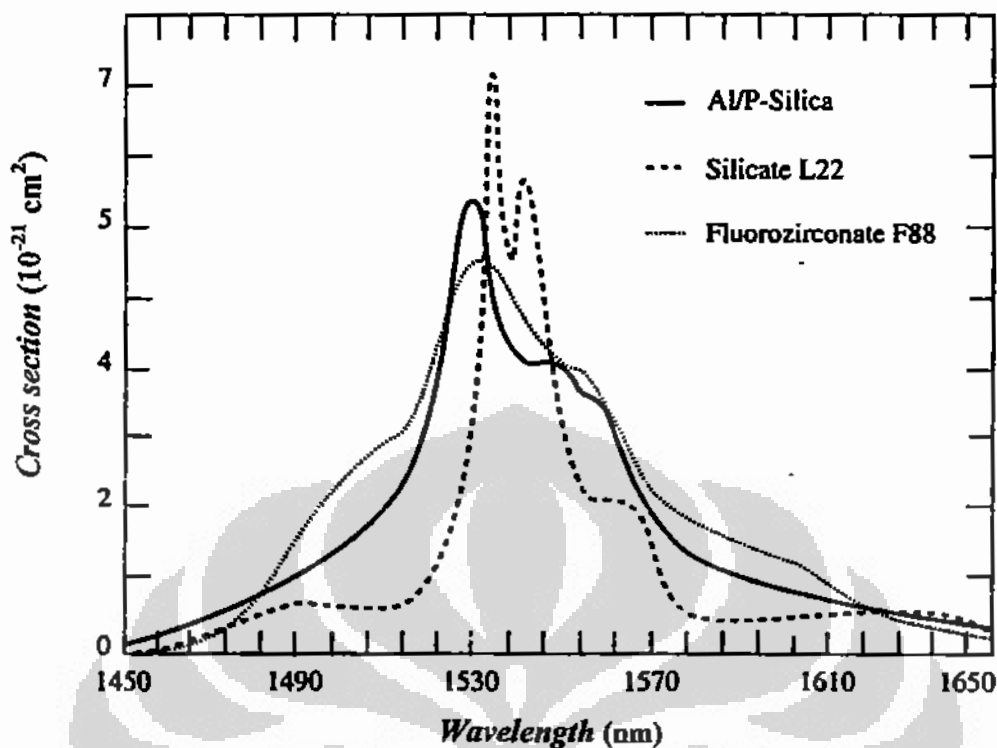
Spektrum Er^{3+} pada daerah panjang gelombang 1500 nm tergantung pada gelas utamanya. Puncak dan lembah spektrum mempunyai bentuk yang berbeda tergantung pada ketepatan lokasi *sublevel* energi pada Stark *level*, intensitas transisi diantara Stark *level*, dan sejumlah pelebaran homogen dan tidak homogen pada *level*

tersebut. Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 menunjukkan spektrum absorpsi dan emisi *cross section* untuk transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ pada berbagai komposisi gelas utama yang di-doping erbium (Er^{3+}).



Gambar 2.10. Absorpsi *Cross Section*

Sumber: Liu, Max Ming-Kang. (1996). Principles and Applications of Optical Communications. USA: R.R. Donnelley & Sons Company.



Gambar 2.11. Emisi Cross Section

Sumber: Liu, Max Ming-Kang. (1996). Principles and Applications of Optical Communications. USA: R.R. Donnelley & Sons Company.

Absorpsi dan emisi *Cross section* pada transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ untuk berbagai gelas utama ditunjukkan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Absorpsi (σ_{abs}) dan Emisi (σ_{em}) Cross Section Pada Transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ Dalam Er^{3+} Untuk Berbagai Gelas Utama.

Host Glass (Gelas Utama)	Wavelength (nm)	σ_{abs} $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	σ_{em} $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$
Al-P silica	1531	6,60	5,70
Silicate L-22	1536	5,80	7,27
Fluorophosphate L11	1533	6,99	7,16
Fluorophosphate L14	1532	5,76	5,79
Fluorozirconate F88	1531	4,98	4,95
$\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$	1530	$7,9 \pm 0,3$	$6,7 \pm 0,3$

Tabel 2.3. (sambungan)

Host Glass (Gelas Utama)	Wavelength (nm)	σ_{abs} $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	σ_{em} $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	1530	$5,1 \pm 0,6$	$4,4 \pm 0,6$
$\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	1530	$4,7 \pm 1,0$	$4,4 \pm 1,0$
Tellurite	1532		6,6

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology. USA: Academic Press

Studi tentang mekanisme pelebaran garis (*line-broadening mechanisms*) untuk Er^{3+} dalam *crystal* dan gelas telah dibuat. Hasil penelitian secara eksperimen menunjukkan cukup penting untuk pelebaran garis homogen dan tidak homogen dalam fiber yang di-*doping* Er^{3+} pada transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$. Lebar garis (*linewidth*) homogen untuk transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ ditunjukkan dalam Tabel 2.4. Nilai yang ada dalam Tabel 2.4 diperoleh dari pengukuran pada temperatur ruang dan tidak melibatkan penghitungan kemungkinan untuk temperatur rendah.

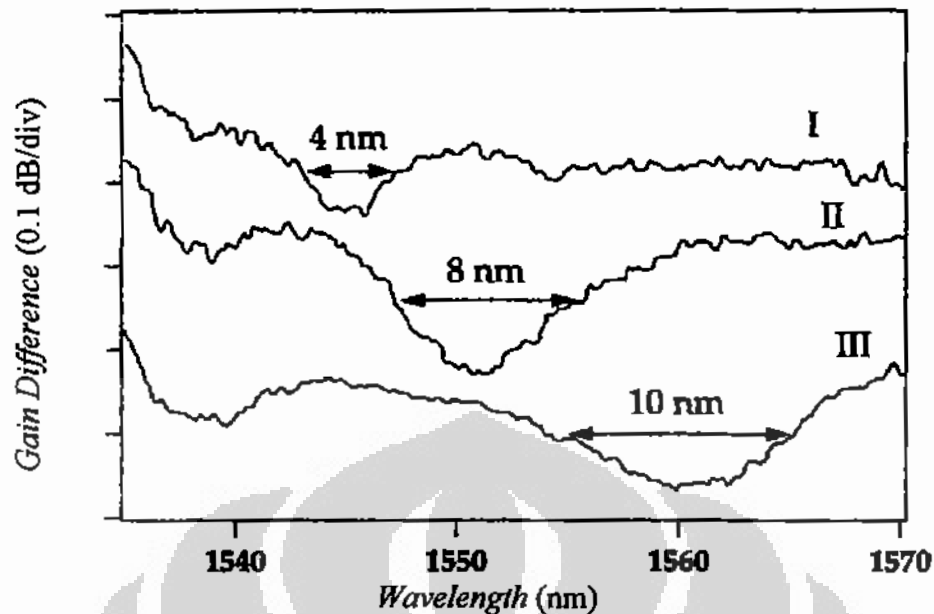
Lebar garis homogen dari suatu transisi tergantung pada temperatur, karena kecepatan transisi *nonradiative* ditentukan oleh emisi *multiphonon* yang tergantung pada temperatur. Kecepatan transisi *nonradiative* yang dihasilkan akan rendah untuk temperatur rendah, dan begitu juga sebaliknya. Hal ini terjadi karena pada temperatur rendah populasi *phonon* sangat kecil dan kecepatan transisi *nonradiative* adalah terendah. Kenaikan temperatur semakin tinggi akan menaikkan *linewidth* yang terjadi sepanjang komponen homogenitasnya. Pelebaran garis (*line broadening*) keseluruhan pada temperatur rendah terjadi sebagian besar karena pelebaran tidak homogen atau Stark *splitting* dari suatu garis-garis yang ada pada *level* energi.

Tabel 2.4. Lebar Garis (*linewidth*) Homogen Untuk Transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ Er^{3+} Pada Panjang Gelombang Tertentu Dalam Berbagai Gelas Utama.

<i>Host Glass</i> (Gelas Utama)	<i>Wavelength</i> (nm)	<i>Homogeneous Linewidth</i> (nm)
Al-Ge Silica	1545	2
Al-Ge Silica	1551	4
Al-Ge Silica	1562	5
Al-P Silica	1522	1,8
Ge Silica	1535	4
Fluorophosphate (low fluorine)	1522	1,6-2,2
Fluorophosphate (high fluorine)	1522	4,5-7,9
Fluorozirconate	1522	4,5-7,9

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press

Kehadiran sinyal yang kuat pada proses penguatan dengan *EDFA* akan memberikan efek saturasi transisi inversi populasi, dan hal ini akan berakibat pada penurunan penguatan yang dihasilkan. Penurunan penguatan yang terjadi tidak sama sepanjang spektrum penguatan karena pelebaran tidak homogen, dan keadaan ini akan memunculkan adanya *hole-burning* pada spektrum penguatan yang dihasilkan. Hasil studi *hole-burning* yang dilakukan pada temperatur ruang untuk fiber *Al-Ge Silica* ditunjukkan dalam Gambar 2.12. Semakin besar daya sinyal yang akan dikuatkan oleh penguat, semakin dalam dan lebar *hole* yang terjadi. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan umur *nonradiative* diantara *sublevel* Stark dari suatu *multiplet* yang ada pada *level* energi. Hasil studi yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 tidak menunjukkan berapa besar daya sinyal, daya pompa, dan panjang *EDFA*.



Gambar 2.12. Spektral *Hole Burning* Untuk Panjang Gelombang Sekitar 1,5 μm Pada Er^{3+} Dalam Fiber Gelas *Alumino-Germano-Silica*.

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press

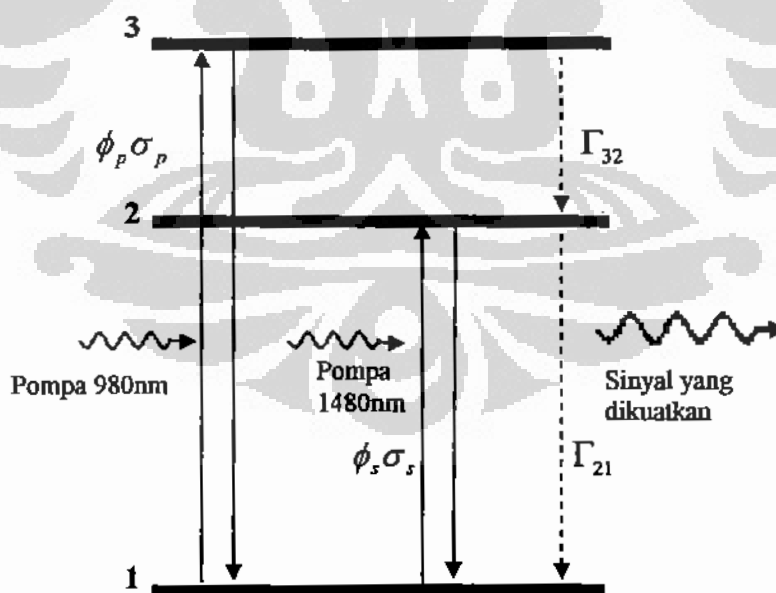
Kurva I pada Gambar 2.12 menunjukkan *spectral hole burning* terjadi pada panjang gelombang 1545 nm, kurva II terjadi pada panjang gelombang 1551 nm, dan kurva III terjadi pada panjang gelombang 1562 nm.

2.2 Teori Dasar *Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)*

Pembahasan dalam subbab ini menekankan pada dasar-dasar yang diperlukan untuk memodelkan penguat fiber yang di-*doping erbium*. Model penghitungan *gain* dalam rejim sinyal kecil dan sinyal saturasi diuraikan dalam subbab ini. Pemodelan dilakukan dengan memperlakukan *EDFA* dalam sistem 3 level. Model matematik untuk sistem 3 level diuraikan dalam bentuk *rate equation*. Persamaan-persamaan lain yang berhubungan dengan propagasi fluks cahaya, inversi populasi *ion-ion erbium*, dan proses absorpsi dan emisi *cross section* dilibatkan dalam persamaan ini. Pengaruh parameter *overlap* (penggambaran *overlap* geometri antara distribusi *ion-ion erbium* dan profil intensitas cahaya) dilibatkan dalam penghitungan *gain* yang dihasil *EDFA*. Pembahasan terakhir untuk subbab ini adalah *noise* yang ada dalam *EDFA*.

2.2.1 Rate Equation Sistem Tiga Level

Rate equation sistem tiga level adalah suatu pendekatan solusi secara matematik untuk perilaku *erbium* ditinjau dari tiga tingkatan (*level*) energi. Ilustrasi sistem tiga level ditunjukkan dalam Gambar 2.13 [21]. Level bawah (*ground state*) diberi notasi 1, level kedua dan lebih dikenal dengan tingkatan metastabil diberi notasi 2, dan level ketiga diberi notasi 3. Pada level 2, ion-ion *erbium* mempunyai waktu tinggal yang lama dan ini merupakan suatu keunggulan dalam sistem penguat optik. Keunggulan yang dimiliki adalah dimungkinkannya terjadi penguatan sinyal dalam orde yang tinggi. Level 2 merupakan transisi amplifikasi (penguatan), dan level 1 merupakan tingkatan energi paling bawah (*ground state*). Populasi ion-ion *erbium* pada masing-masing level diberi notasi N_1 , N_2 , dan N_3 . Sistem tiga level ini diharapkan menggambarkan bagian-bagian struktur tingkatan energi Er^{3+} yang relevan dengan proses penguatan. Penguatan dalam *EDFA* dapat terjadi bilamana ada inversi populasi antara level 1 dan level 2, dan paling sedikit setengah dari populasi keseluruhan ion-ion *erbium* harus tereksitasi pada level 2 [21]. Hal ini memberikan pengertian bahwa perlu adanya daya pompa ambang (*threshold*) untuk terjadinya penguatan



Gambar 2.13. Sistem Tiga Level Yang Digunakan Untuk Model Penguat *EDFA*.

Sumber: Kaminow, Ivan P., Koci, Thomas L. (1997). *Optical Fiber Telecommunications IIIA*. California: Academic Press.

Keterangan gambar:

ϕ_p = *flux* intensitas cahaya datang pada frekuensi yang sesuai untuk transisi 1 ke 3, atau *flux* intensitas cahaya pompa, atau *flux* masukan *photon* pompa.

σ_p = *cross section* pompa, atau *absorption cross section* pompa (m^2).

ϕ_s = *flux* intensitas cahaya datang pada frekuensi yang sesuai untuk transisi 1 ke 2, *flux* intensitas cahaya sinyal, atau *flux* masukan *photon* sinyal.

σ_s = *cross section* sinyal, atau *emission cross section* sinyal (m^2).

Γ_{32} = kecepatan transisi *spontaneous* dari level 3 ke level 2, atau probabilitas transisi dari level 3 ke level 2 (tidak menghasilkan radiasi) (1/sec).

Γ_{21} = kecepatan transisi *spontaneous* dari level 2 ke level 1, atau probabilitas transisi dari level 2 ke level 1 (menghasilkan radiasi) (1/sec).

Rate equation untuk perubahan populasi dinyatakan secara matematik sebagai berikut [21][8][40].

Rate equation untuk level ke 1, ke 2, dan ke 3 adalah

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.20)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (2.21)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \quad (2.22)$$

Persamaan (4.1), (4.2), dan (4.3) dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{21}} - (N_1 - N_3)W_p + (N_2 - N_1)W_s \quad (2.23)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_{21}} + \frac{N_3}{\tau_{32}} - (N_2 - N_1)W_s \quad (2.24)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + (N_1 - N_3)W_p \quad (2.25)$$

dimana:

$$\tau_{21} = \frac{1}{\Gamma_{21}} = \tau_2 = \text{lifetime pada level 2 (ms)}$$

$$\tau_{32} = \frac{1}{\Gamma_{32}} = \tau_3 = \text{lifetime pada level 3 (ms)}$$

$$W_p = \phi_p \sigma_p = \text{kecepatan absorpsi photon pompa (1/sec)}$$

$$W_s = \phi_s \sigma_s = \text{kecepatan absorpsi photon sinyal (1/sec)}$$

$$N_1 = \text{populasi ion-ion erbium pada level 1 (m}^{-3}\text{)}$$

$$N_2 = \text{populasi ion-ion erbium pada level 2 (m}^{-3}\text{)}$$

$$N_3 = \text{populasi ion-ion erbium pada level 3 (m}^{-3}\text{)}$$

Dalam keadaan *steady-state*, derivatif terhadap waktu untuk semua persamaan pada masing-masing *level* akan sama dengan nol [21][38],

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (2.26)$$

dan populasi total N adalah,

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (2.27)$$

Populasi *ion-ion erbium* pada *level* ketiga dapat ditentukan dari pers. (2.25), dan hasilnya ditunjukkan dalam pers. (2.29).

$$N_3 = \frac{1}{1 + \Gamma_{32} / \phi_p \cdot \sigma_p} N_1 \quad (2.28)$$

Bilamana Γ_{32} mempunyai nilai yang besar (peluruhan terjadi secara cepat dari *level* 3 ke *level* 2) dibanding dengan kecepatan pemompaan (*pump rate*) pada *level* 3 ($\phi_p \sigma_p$), maka nilai N_3 mendekati nol. Hal ini memungkinkan terjadinya

populasi paling banyak ada pada tingkatan energi 1 dan 2. Besarnya nilai populasi pada N_2 didapat dengan mensubstitusikan pers. (2.29) kedalam pers. (2.21), dan hasil yang didapat ditunjukkan dalam pers. (2.30).

$$N_2 = \frac{(\phi_p \sigma_p / \Gamma_{32}) + \phi_s \sigma_s}{\Gamma_{21} + \phi_s \sigma_s} N_1 \quad (2.29)$$

Nilai inversi populasi $N_2 - N_1$ didapat dengan menggunakan pers (2.28), dan hasilnya ditunjukkan dalam pers. (2.31) [21].

$$N_2 - N_1 = \frac{\phi_p \sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\phi_s \sigma_s + \phi_p \sigma_p} N \quad (2.30)$$

Pers.(2.31) menunjukkan keadaan pada inversi populasi, dan penguatan pada transisi 2 ke 1 (dengan menganggap tidak ada rugi-rugi), dimana $N_2 \geq N_1$. Nilai ambang (*threshold*) penguatan terjadi untuk $N_1 = N_2$, dan menghasilkan pernyataan seperti pada pers. (2.32) untuk fluks pemompaan yang diperlukan [21].

$$\phi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_{21} \sigma_p} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_p} \quad (2.31)$$

dimana, ϕ_{th} = fluks pemompaan ambang

Bilamana intensitas sinyal sangat kecil, dan kecepatan peluruhan Γ_{32} sangat besar dibandingkan dengan kecepatan transisi yang disebabkan oleh medan pemompaan $\phi_p \sigma_p$, maka inversi populasi dapat ditulis dalam bentuk persamaan (2.33) [21].

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\phi_p' - 1}{\phi_p' + 1} \quad (2.32)$$

$$\text{dimana, } \phi_p' = \frac{\phi_p}{\phi_{th}} \quad (2.33)$$

Bilamana intensitas pemompaan dalam satuan energi per satuan luas per satuan waktu dinyatakan sebagai $I_p = h\nu_p \phi_p$, maka intensitas pemompaan ambang dapat dinyatakan secara sederhana dalam bentuk persamaan [21].

$$I_{th} = \frac{h\nu_p \Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \quad (2.34)$$

$$P_{th} = I_{th} \cdot A_{eff} \quad (2.35)$$

dimana:

h = konstanta Plank ($= 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js)

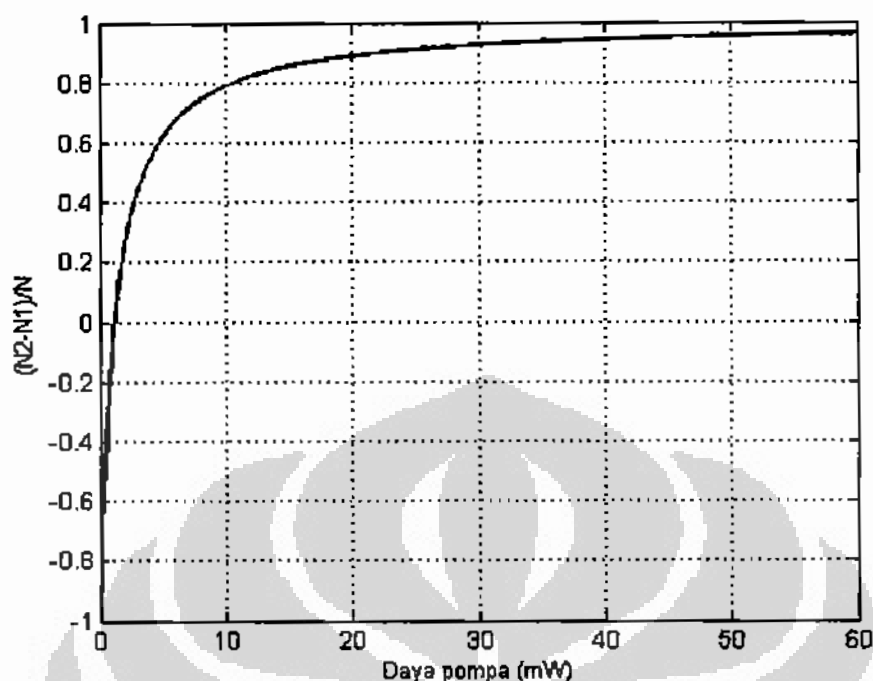
ν_p = frekuensi pemompaan (Hz)

P_{th} = daya pompa ambang (mW)

A_{eff} = luas penampang efektif inti fiber yang di-*doping* erbium (μm^2)

Pers. (2.35) secara intuisi mudah untuk dipahami. Nilai σ_p yang tinggi menunjukkan bahwa terjadi absorpsi *photon* pompa yang tinggi pula. Kejadian ini menunjukkan bahwa dengan sejumlah kecil *photon* pompa yang terabsorpsi sudah dapat mencapai nilai ambang penguatan. Disisi lain, *life time* yang sangat lama pada *level* 2 akan mengakibatkan energi tinggal lama pada *level* tersebut, dan sebagai akibatnya hanya sejumlah kecil *photon* pompa per satuan waktu yang diperlukan untuk mempertahankan energi pada *level* 2.

Gambar 2.14 menunjukkan hubungan antara fraksional inversi populasi $\left(\frac{N_2 - N_1}{N}\right)$ terhadap daya pompa yang diberikan untuk daya sinyal -22,7 dBm dan panjang gelombang 1531,90 nm. Gambar 2.14 merupakan hasil penghitungan secara simulasi dengan menggunakan program MATLAB seperti ditunjukkan dalam Lampiran 3.

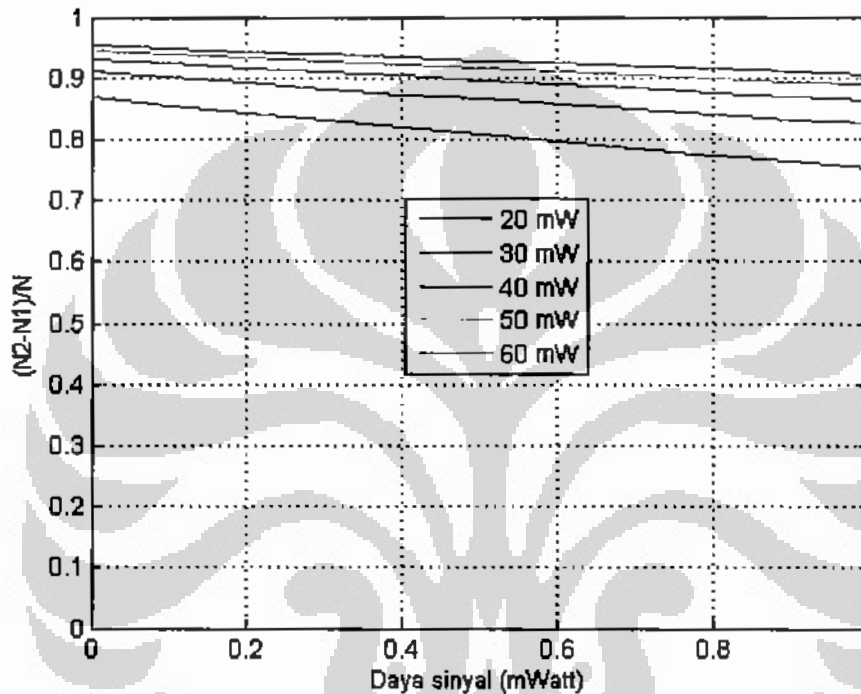


Gambar 2.14. Karakteristik Fraksional Inversi Populasi Terhadap Daya Pompa Untuk Daya Sinyal $-22,7$ dBm dan Panjang Gelombang $1531,90$ nm.

Sumber: Hasil simulasi dengan menggunakan program MATLAB (Lampiran 3)

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa nilai *threshold* terjadi pada daya pompa sekitar 1 mW. Nilai *threshold* adalah nilai yang menunjukkan bahwa awal penguatan akan terjadi, dan juga menunjukkan bahwa jumlah *ion-ion erbium* pada *level 2* sama dengan jumlah *ion-ion erbium* pada *level 1*. *Ion-ion erbium* melakukan absorpsi pada sinyal $-22,7$ dBm ketika daya pompa pada posisi 0 mW. Hasil absorpsi *ion-ion erbium* terhadap sinyal ditunjukkan adanya nilai fraksional inversi populasi di sekitar $-0,8$. Nilai inversi populasi satu menunjukkan bahwa *ion-ion* pada *level ground state* terpindahkan semuanya pada *level excited state*. Kenaikan daya pompa secara linier memberikan akibat kenaikan nilai inversi populasi naik secara eksponensial pada batas daya pompa tertentu, dan selanjutnya mendekati saturasi untuk kenaikan daya pompa yang lebih tinggi. Inversi populasi terjadi secara sempurna bilamana jumlah *ion-ion erbium* pada *level 1* sama dengan nol ($N_1 = 0$), sehingga $N_2 = N$.

Gambar 2.15 menunjukkan hubungan antara fraksional inversi populasi $\left(\frac{N_2 - N_1}{N}\right)$ terhadap daya sinyal untuk daya pompa 20-60 mW, panjang gelombang sinyal 1531,90 nm. Gambar 2.15 merupakan hasil penghitungan secara simulasi dengan menggunakan program MATLAB seperti ditunjukkan dalam Lampiran 4.



Gambar 2.15. Karakteristik Fraksional Inversi Populasi Terhadap Daya Sinyal Masukan Pada Panjang Gelombang 1531,90 nm.

Sumber: Hasil simulasi dengan menggunakan program MATLAB (Lampiran 4)

Gambar 2.15 menunjukkan bahwa semakin besar daya sinyal yang akan dikuatkan oleh *EDFA* menghasilkan nilai fraksional inversi populasi yang semakin kecil untuk semua daya pompa. Kenyataan ini terjadi karena pengaruh saturasi pada proses inversi populasi. Sinyal yang semakin besar dayanya akan memberikan pengaruh yang semakin besar pada saturasi dalam proses inversi populasi.

2.2.2 Penguatan Sinyal Kecil (*Small Signal Gain*)

Dalam subsubbab ini akan dijelaskan penguatan atau rugi-rugi propagasi cahaya pompa dan sinyal yang melewati suatu medium. Penguatan dan rugi-rugi

terjadi karena adanya interaksi dengan *ion-ion erbium* yang ada dalam medium tersebut. Kedua propagasi cahaya atau medan cahaya tersebut mempunyai intensitas I_s (intensitas medan sinyal), dan I_p (intensitas medan pompa). Hubungan fluks *photon* dengan intensitas kedua medan cahaya tersebut dinyatakan sebagai berikut [21].

$$\phi_s = \frac{I_s}{h\nu_s} \quad (2.36)$$

$$\phi_p = \frac{I_p}{h\nu_p} \quad (2.37)$$

Dalam kasus satu dimensi, intensitas medan cahaya yang diturunkan dari daya medan cahaya melalui hubungan yang tersederhanakan dapat dinyatakan sebagai,

$$I(z) = \frac{P(z)\Gamma}{A_{eff}} \quad (2.38)$$

$$\Gamma = \left(1 - e^{-r^2/w^2}\right) \quad (2.39)$$

$$w = \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{1,5}} + \frac{2,879}{V^6}\right) \quad (2.40)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (2.41)$$

$$NA = \left(n_1^2 - n_2^2\right)^{1/2} \quad (2.42)$$

dimana :

Γ = faktor *overlap (confinement factor)*, yaitu nilai yang menggambarkan *overlap* antara *ion-ion erbium* dengan mode medan cahaya.

A_{eff} = luas penampang melintang efektif distribusi *ion-ion erbium* (m^2).

w = jari-jari moda untuk sinyal dan pompa (m^2).

V = frekuensi ternormalisasi untuk fiber jari-jari inti fiber.

$a=r$ = jari-jari inti penguat fiber (*EDFA*) (m).

n_1 = indeks bias inti penguat fiber (*EDFA*).

n_2 = indeks bias *cladding* penguat fiber.

Medan cahaya pompa dan sinyal yang akan teredam dan terkuatkan sepanjang sumbu dz oleh adanya absorpsi *ion-ion* yang ada pada *ground state* (N_1) dan emisi terstimulasi oleh *ion-ion* yang ada pada *exited state* (N_2 dan N_3) dinyatakan sebagai berikut [21].

$$\frac{d\phi_s}{dz} = (N_2 - N_1)\sigma_s\phi_s \quad (2.43)$$

$$\frac{d\phi_p}{dz} = (N_2 - N_1)\sigma_p\phi_p \quad (2.44)$$

Persamaan selanjutnya adalah menyatakan besarnya peningkatan intensitas sinyal dan peredaman intensitas pompa yang melintasi *EDFA* sepanjang sumbu z [21].

$$\frac{dI_s}{dz} = \frac{\frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p} - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}} \sigma_s I_s N \quad (2.45)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\Gamma_{21} + \frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s}}{\Gamma_{21} + 2\frac{\sigma_s I_s}{h\nu_s} + \frac{\sigma_p I_p}{h\nu_p}} \sigma_p I_p N \quad (2.46)$$

Pers. (2.45) dan (2.46) menunjukkan bahwa kondisi penguatan medan sinyal terjadi bilamana $I_p \geq I_{th}$.

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \quad (2.47)$$

Persamaan yang menyatakan perubahan intensitas sinyal dan pompa seperti ditunjukkan diatas dapat dinyatakan dalam bentuk tampilan yang sederhana dengan cara melakukan normalisasi terhadap nilai ambang (*threshold*).

$$I'_p = \frac{I_p}{I_{th}} \quad (2.48)$$

$$I'_s = \frac{I_s}{I_{th}} \quad (2.49)$$

Pendefinisian selanjutnya adalah menetapkan kuantitas η dan intensitas saturasi $I_{sat}(z)$ sebagai [21]

$$\eta = \frac{h\nu_p \sigma_s}{h\nu_s \sigma_p} \quad (2.50)$$

$$I_{sat}(z) = \frac{1 + I_p'(z)}{2\eta} \quad (2.51)$$

Selanjutnya, persamaan propagasi untuk intensitas sinyal dan pompa yang ternormalisasi dinyatakan sebagai [21],

$$\frac{dI_s'(z)}{dz} = \frac{1}{1 + I_s'(z)/I_{sat}(z)} \left(\frac{I_p'(z) - 1}{I_p'(z) + 1} \right) \sigma_s I_s'(z) N \quad (2.52)$$

$$\frac{dI_p'(z)}{dz} = - \frac{1 + \eta I_s'(z)}{1 + 2\eta I_s'(z) + I_p'(z)} \sigma_p I_p'(z) N \quad (2.53)$$

Sebagaimana dinyatakan dalam pers. (2.47) bahwa penguatan terjadi bilamana $I_p \geq I_{th}$. Bilamana $I_p < I_{th}$ sinyal akan teredam, dan bila $I_p > I_{th}$ sinyal akan diperkuat (diampifikasi). Pada kondisi penguatan sinyal kecil (*small signal gain*) dimana $I_s' \ll I_{sat}$ (kondisi ini dipenuhi ketika sinyal lemah dan daya pompa kuat) dan diasumsikan daya pompa adalah konstan terhadap penjalaran (z), maka persamaan propagasi sinyal sebagai fungsi posisi sepanjang fiber ditunjukkan seperti dalam pers. (2.54) [21].

$$I_s'(z) = I_s'(0) \exp(\alpha_p z) \quad (2.54)$$

dimana koefisien penguatan α_p dinyatakan sebagai,

$$\alpha_p = \frac{I_p' - 1}{I_p' + 1} \sigma_s N \quad (2.55)$$

Pers. (4.35) menunjukkan bahwa sinyal mengalami peningkatan secara eksponensial dengan faktor eksponen emisi *cross section* sinyal, derajat inversi populasi, dan intensitas pompa yang relatif terhadap *threshold*. Bilamana intensitas pompa sangat kuat yang nilainya beberapa kali nilai *threshold*, ion-ion erbium akan terinversi semuanya dan koefisien penguatannya diperkirakan menjadi [21],

$$\alpha_p = \sigma_s N \quad (2.56)$$

Penguatan sinyal kecil per satuan panjang fiber untuk daya pompa yang kuat menunjukkan hubungan yang sangat sederhana, yaitu antara jumlah erbium dan emisi *cross section* sinyal.

Panjang optimal *EDFA* yang didasarkan atas daya pompa yang diberikan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan matematik seperti berikut [7].

$$P_p(z) = P_p(0) \exp(-\sigma_a N_s z / 2) \quad (2.57)$$

Besarnya nilai penguatan (*gain*) dinyatakan dalam pers. (2.58) [40].

$$G(\text{dB}) = 10 \log e^{g_{\text{mak}} L} \quad (2.58)$$

dimana g_{mak} adalah faktor penguatan maksimum, dan dinyatakan secara matematik dalam pers. (2.59).

$$g_{\text{mak}} = \sigma_s (N_2 - N_1)_{\text{mak}} \quad (2.59)$$

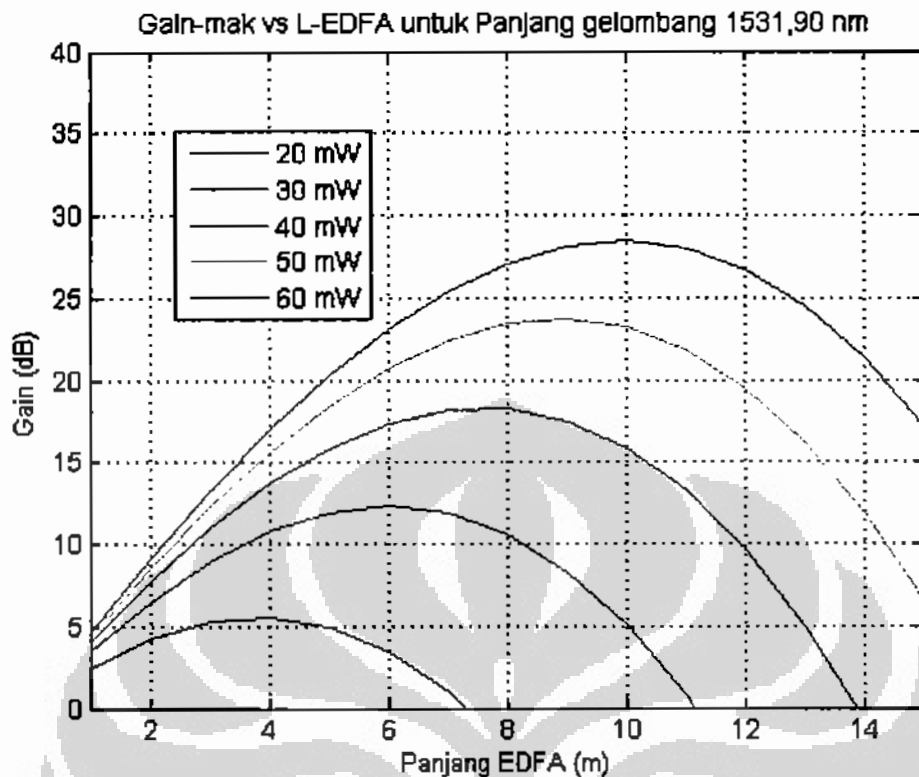
$$(N_2 - N_1)_{\text{mak}} = \frac{(1 - \beta) W_p \tau_2 - 1}{(1 + \beta) W_p \tau_2 + 1} N_{\text{mak}} \quad (2.60)$$

$$W_p = \frac{\sigma_p P_p(z)}{h \nu_p A_{\text{eff}}} \Gamma_p \quad (2.61)$$

$$\beta \text{ (Boltzmann population ratio)} = e^{-(\Delta E / kT)} = 0,38 \text{ pada temperatur ruang}$$

Pers. (2.57) menyatakan bahwa daya pompa akan mengalami penurunan sepanjang lintasan *EDFA*.

Grafik yang menyatakan hubungan *gain* maksimum terhadap panjang *EDFA* untuk perubahan daya pompa dari 20-60 mW ditunjukkan dalam Gambar 2.16. Hasil penghitungan secara simulasi dengan menggunakan MATLAB untuk Gambar 2.16 ditunjukkan dalam Lampiran 5.



Gambar 2.16. Karakteristik *Gain* Terhadap Panjang *EDFA* Untuk Panjang Gelombang Sinyal 1531,90 nm dan Daya Pompa: 20 mW, 30 mW, 40 mW, 50 mW, dan 60 mW

Sumber: Hasil simulasi dengan menggunakan program MATLAB (Lampiran 5)

Gambar 2.16 menyatakan bahwa nilai daya pompa yang semakin bertambah besar akan menghasilkan *gain* yang bertambah besar pula. Daya pompa yang semakin bertambah besar akan menghasilkan *gain* maksimum pada panjang *EDFA* yang semakin panjang. *Gain* maksimum terjadi pada panjang tertentu sesuai dengan daya pompa yang diberikan. Kenyataan ini terjadi karena daya pompa akan mengalami penurunan pada panjang *EDFA* yang semakin bertambah panjang. Penurunan daya pompa akan memberikan konsekuensi pada proses inversi populasi. Daya pompa yang semakin menurun akan menghasilkan nilai inversi populasi yang semakin turun. Turunnya nilai inversi populasi akan mengakibatkan turunnya nilai *gain* yang dihasilkan oleh *EDFA*. Karakteristik *gain* terhadap panjang *EDFA* ini selanjutnya dipakai sebagai acuan untuk menentukan panjang *EDFA* yang digunakan dalam eksperimen.

2.2.3 Rejim Saturasi (*Saturation Regime*)

Pers. (2.55) akan kehilangan validitasnya ketika daya sinyal dinaikkan cukup besar nilainya dan kondisi ini dikenal dengan rejim saturasi. Kondisi ini terjadi ketika I_s' menjadi sebanding dengan nilai I_{sat} . Sinyal yang naik nilainya, selanjutnya diperkecil oleh faktor $1/(1 + I_s' / I_{sat})$. Ketika I_s' menjadi sangat besar, dan rasionya terhadap I_{sat} menjadi lebih besar dari satu, maka kenaikan sinyal ditentukan secara aproksimasi oleh persamaan (2.62) [21].

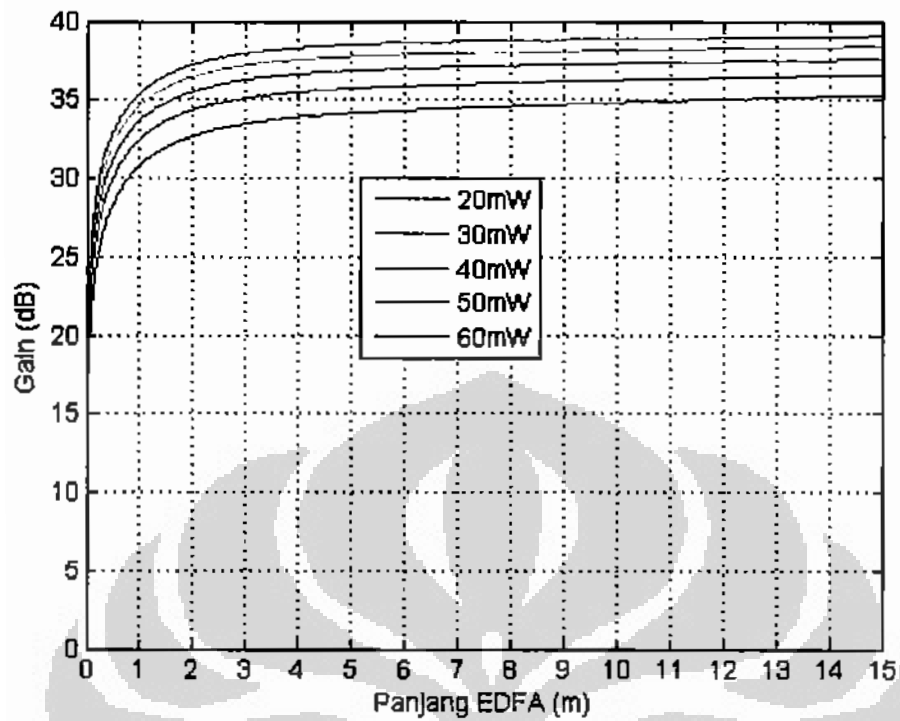
$$\frac{dI_s'(z)}{dz} = I_{sat}(z) \left(\frac{I_p' - 1}{I_p' + 1} \right) \sigma_s N \quad (2.62)$$

Nilai penguatan dalam dB didapat setelah sinyal menjalar sepanjang *EDFA*.

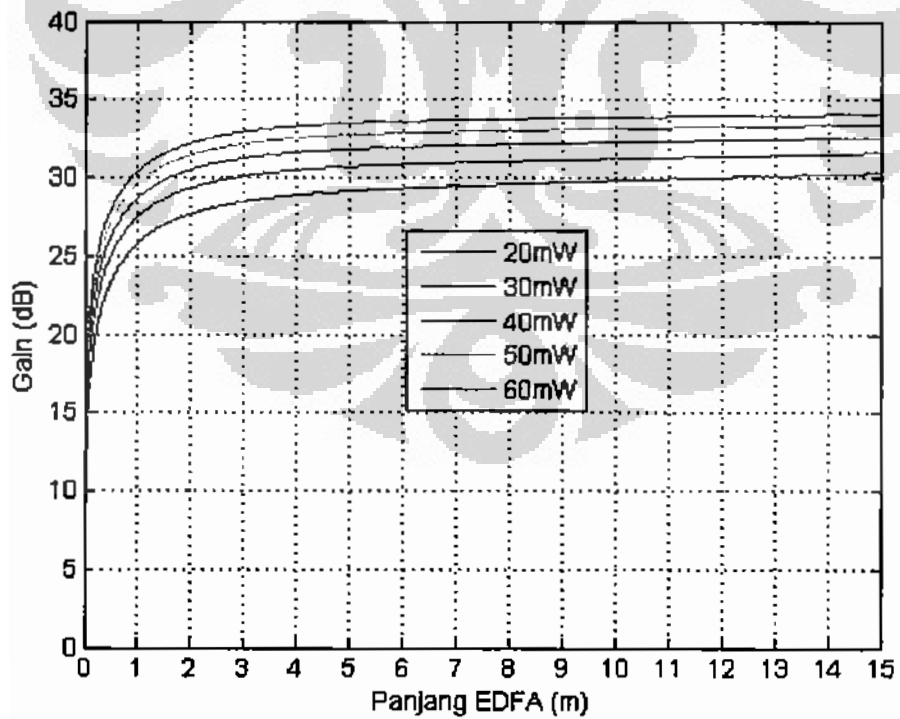
$$G = 10 \log \left(\frac{I_s'(z=L)}{I_s'(z=0)} \right) \quad (2.63)$$

Fenomena yang menarik ditunjukkan bahwa intensitas saturasi I_{sat} tidak konstan, tetapi ada kenaikan secara linier dengan daya pompa. Kondisi saturasi yang tinggi terjadi untuk sinyal pada *level* daya yang tinggi.

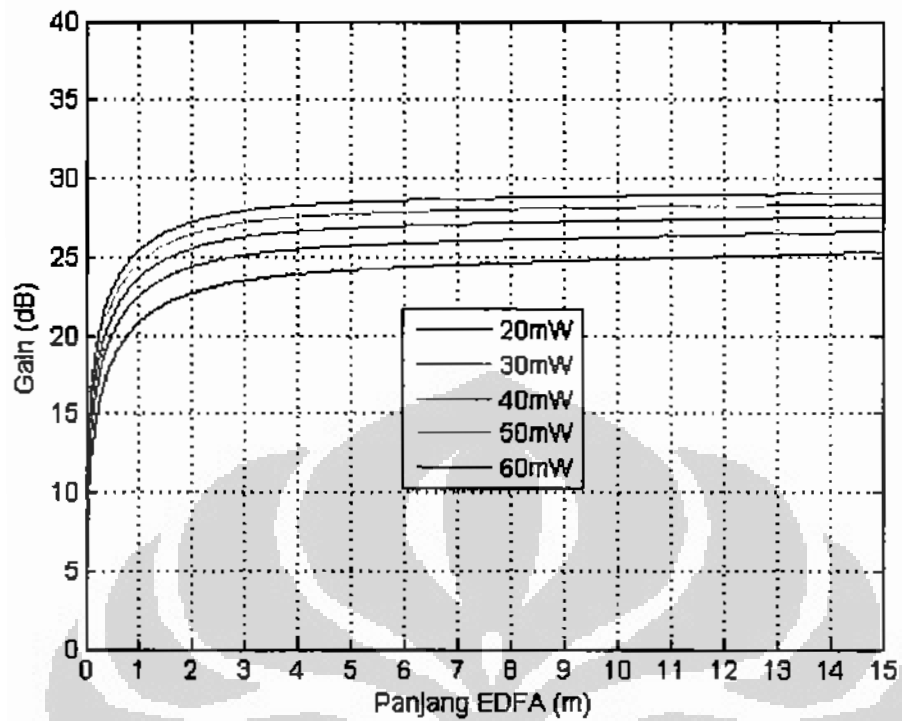
Gambar 2.17 menyatakan hubungan *gain* terhadap panjang *EDFA* untuk rejim saturasi. Penurunan secara matematik untuk pers. (2.62) dan program simulasi MATLAB untuk penghitungan perubahan *gain* terhadap panjang *EDFA* ditunjukkan dalam Lampiran 6.



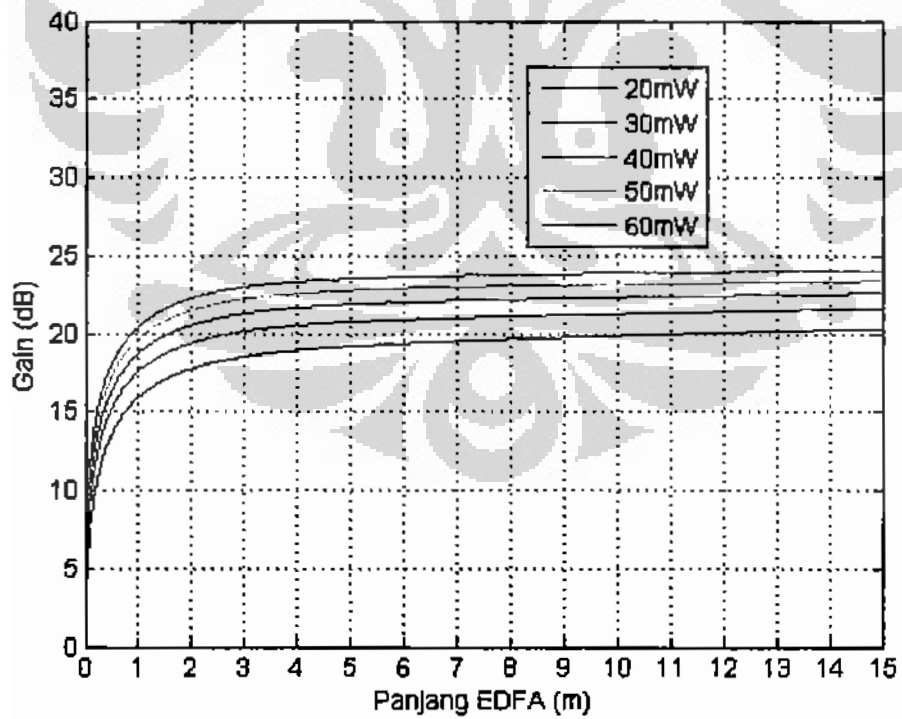
(a) Daya Sinyal -22,7 dBm



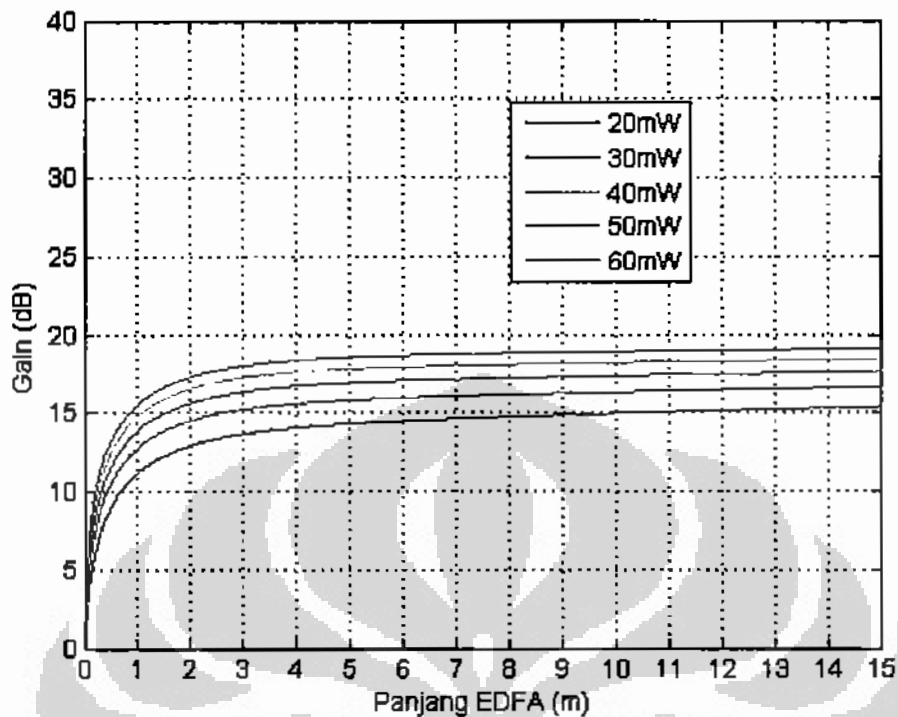
(b) Daya Sinyal -17,7 dBm



(c) Daya Sinyal -12,7 dBm



(d) Daya Sinyal -7,7 dBm



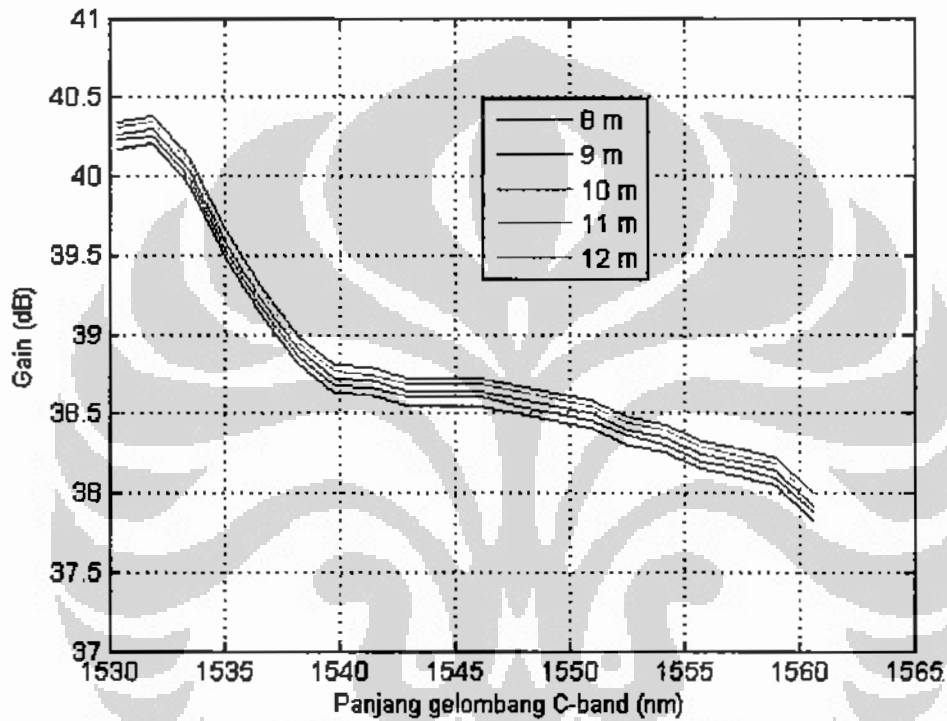
(e) Daya Sinyal -2,7 dBm

Gambar 2.17. Karakteristik *Gain* Terhadap Panjang *EDFA* Untuk Panjang Gelombang Sinyal 1550,92 nm.

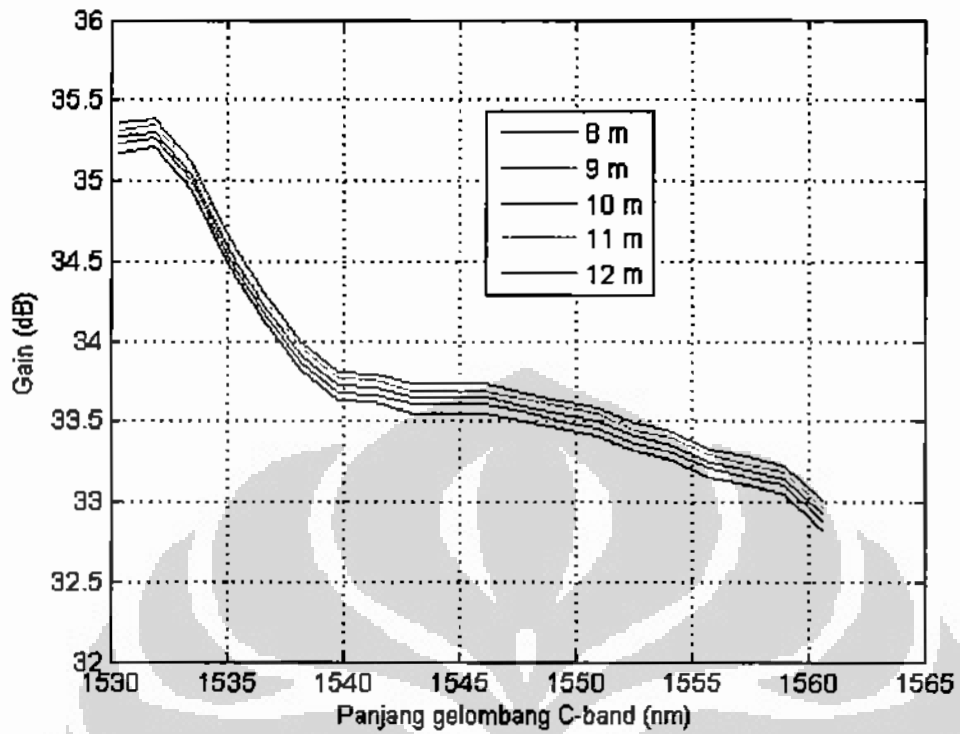
Sumber: Hasil simulasi dengan menggunakan program MATLAB (Lampiran 7)

Gambar 2.17 menyatakan bahwa untuk daya pompa yang bertambah besar akan menghasilkan *gain* yang bertambah besar pula. Kenaikan *gain* terhadap panjang *EDFA* terjadi dengan perubahan nilai yang cukup besar untuk panjang *EDFA* kurang dari 3 m. Hal ini terjadi karena jumlah populasi *ion-ion erbium* pada *level ground state* sudah banyak berkurang, sehingga kenaikan daya pompa tidak memberikan kontribusi yang besar terhadap perubahan kenaikan *gain* yang dihasilkan. Penurunan *gain* juga terjadi pada perubahan *level* daya sinyal yang akan dikuatkan. *Gain* akan mengalami penurunan terhadap kenaikan daya sinyal yang akan dikuatkan. Penurunan *gain* dapat mencapai $\pm 55\%$ untuk daya sinyal -22,7 dBm ke daya sinyal -2,7 dBm. Penurunan ini terjadi karena pengaruh saturasi pada proses inversi populasi. Nilai saturasi pada proses inversi populasi akan meningkat terhadap peningkatan daya sinyal yang akan dikuatkan.

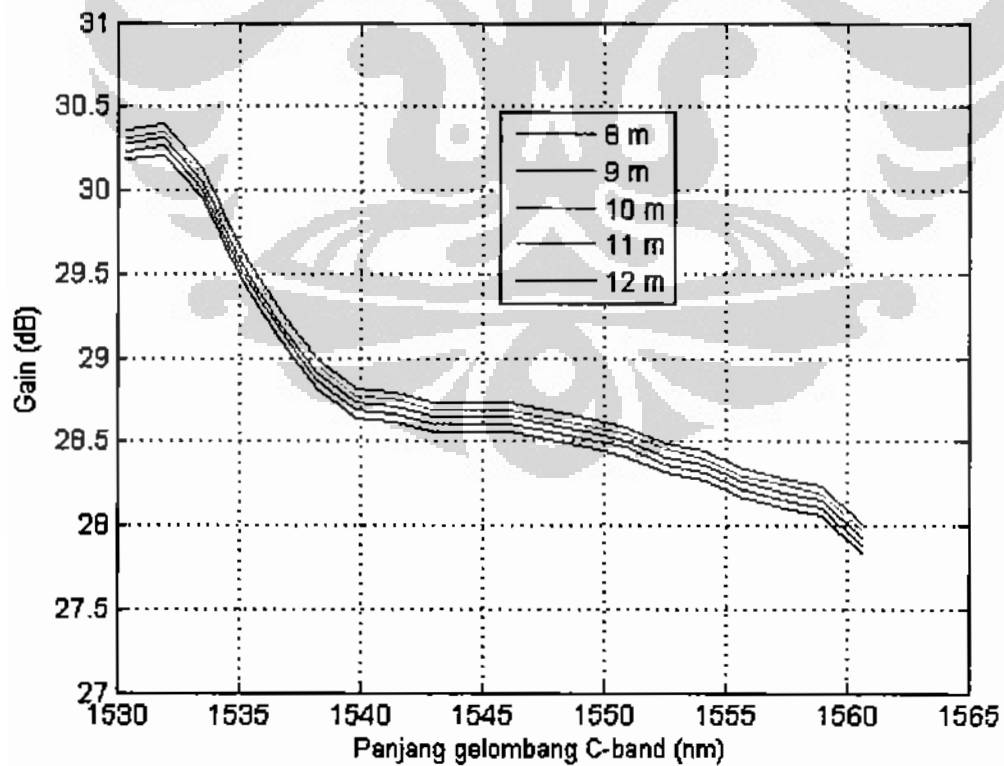
Gambar 2.18 menyatakan hubungan *gain* terhadap perubahan panjang gelombang sinyal untuk daya sinyal -22,7 dBm, -17,7 dBm, -12,7 dBm, -7,7 dBm, dan -2,7 dBm. Daya pompa yang dikenakan pada simulasi ini adalah 60 mW pada panjang *EDFA* 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, dan 12 m. Hasil penghitungan secara simulasi dengan menggunakan MATLAB ditunjukkan dalam Lampiran 7.



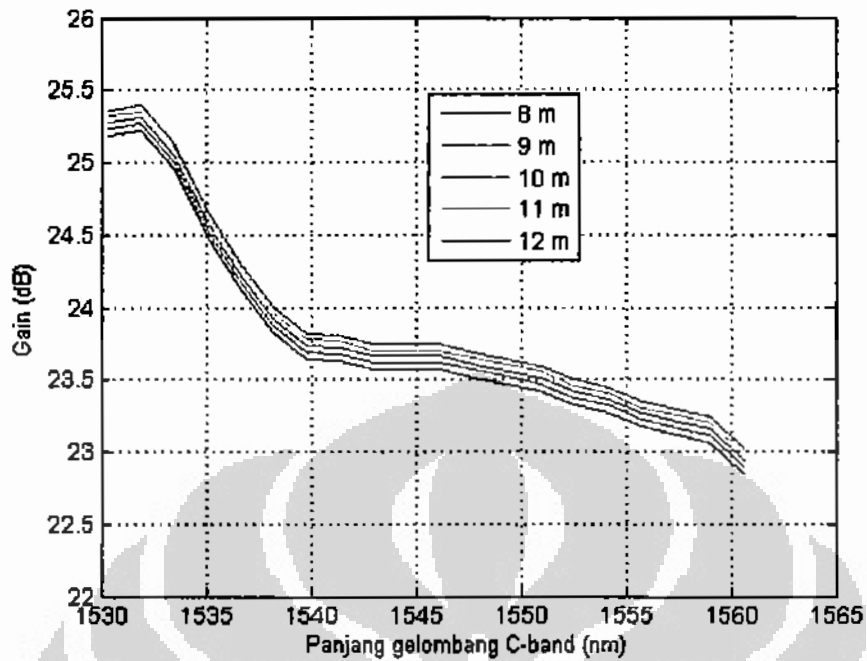
(a) Daya Sinyal -22,7 dBm



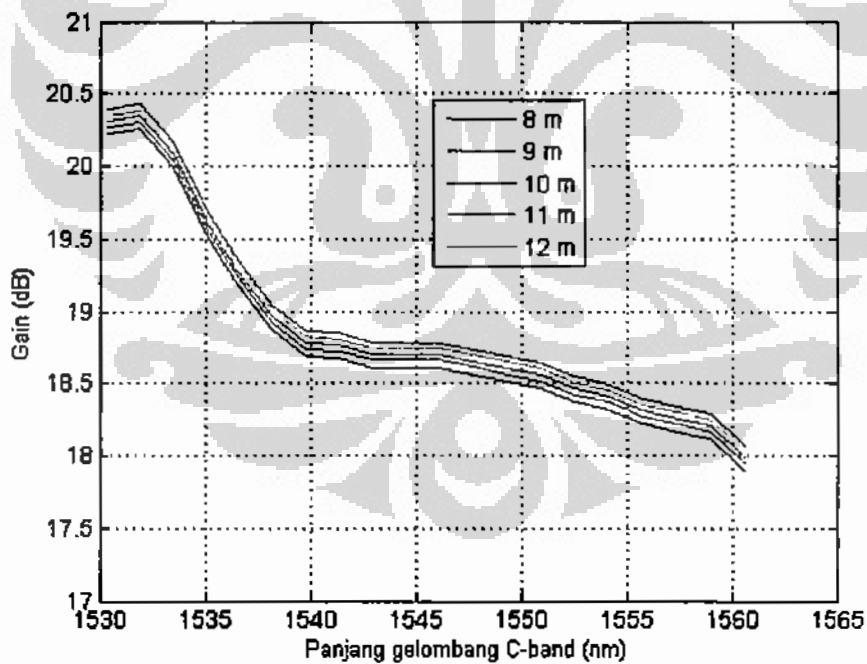
(b) Daya Sinyal -17,7 dBm



(c) Daya Sinyal -12,7 dBm



(d) Daya Sinyal -7,7 dBm



(e) Daya Sinyal -2,7 dBm

Gambar 2.18. Karakteristik *Gain* Terhadap Perubahan Panjang Gelombang Untuk Daya Pompa 60 mW

Sumber: Hasil simulasi dengan menggunakan program MATLAB (Lampiran 7)

Gambar 2.18 menyatakan bahwa daya sinyal yang semakin bertambah besar akan menghasilkan *gain* yang semakin menurun. Penurunan *gain* mencapai $\pm 55\%$ untuk perubahan daya sinyal dari $-22,7$ dBm menjadi $-2,7$ dBm. Kenyataan ini disebabkan karena pengaruh saturasi yang disebabkan oleh daya sinyal yang besar. Saturasi akan bertambah besar dengan bertambah besarnya nilai daya sinyal yang akan dikuatkan. Saturasi yang bertambah besar akan mengakibatkan penurunan nilai *gain* yang dihasilkan oleh *EDFA*. Pola karakteristik *gain* yang dihasilkan menyerupai pola spektrum emisi dan absorpsi *cross section* yang ditunjukkan dalam Gambar 5.8.

2.2.4 Noise ASE dan Noise Figure (NF)

Sumber utama derau (*noise*) dalam *EDFA* adalah emisi spontan dari transisi antara tingkatan energi atas (*upper level*) ke tingkatan energi dasar (*ground state*) [41]. Sepanjang penguat, emisi spontan akan menjalani penguatan yang sama halnya dengan sinyal yang akan dikuatkan oleh *EDFA*. *NF* suatu penguat optik adalah mengukur rasio daya sinyal terhadap daya derau (*signal to noise ratio*) untuk sinyal yang dilewatkan pada suatu penguat, atau perbandingan antara *signal to noise ratio* pada sisi masukan (SNR_{in}) terhadap *signal to noise ratio* pada sisi keluaran (SNR_{out}) suatu penguat [21].

$$NF = SNR_{in} / SNR_{out} \quad (2.64)$$

Noise figure akan selalu lebih besar dari satu, hal ini terjadi karena suatu kenyataan bahwa penguat selalu memberikan tambahan noise selama proses penguatan dan SNR_{out} selalu lebih kecil dari SNR_{in} . Nilai *noise figure* biasanya ditunjukkan dalam satuan dB. Nilai *NF* yang tinggi menyatakan bahwa *signal to noise ratio* mengalami degradasi akibat proses amplifikasi (penguatan). Untuk penguatan yang tinggi $G \gg 1$, *noise figure* mempunyai hubungan dengan faktor emisi spontan yang dinyatakan dalam bentuk persamaan seperti berikut [38].

$$NF = 2n_{sp} \quad (2.65)$$

Faktor emisi spontan (n_{sp}) selalu lebih besar atau sama dengan satu, nilai satu dicapai bilamana terjadi inversi populasi secara sempurna dalam medium tersebut.

Dalam kenyataannya, faktor emisi spontan pada *EDFA* tergantung pada rasio *cross section* $\eta = \sigma_e / \sigma_a$ pada panjang gelombang pompa dan sinyal, dan dinyatakan dalam bentuk persamaan seperti berikut [38].

$$n_{sp}^{\min}(\lambda_p, \lambda_k) = \frac{1}{1 - \frac{\eta_p}{\eta_k}} = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_e(\lambda_p)\sigma_a(\lambda_k)}{\sigma_a(\lambda_p)\sigma_e(\lambda_k)}} \quad (2.66)$$

Nilai *noise figure* minimum yang berhubungan faktor emisi spontan minimum adalah,

$$NF^{\min}(\lambda_p, \lambda_k) = \frac{2}{1 - \frac{\eta_p}{\eta_k}} = \frac{2}{1 - \frac{\sigma_e(\lambda_p)\sigma_a(\lambda_k)}{\sigma_a(\lambda_p)\sigma_e(\lambda_k)}} \quad (2.67)$$

dimana λ_k adalah panjang gelombang yang berhubungan dengan sinyal pada frekuensi k (ν_k). Untuk kasus *EDFA* yang terpompa pada sistem tiga tingkatan (tiga *level*), dimana $\sigma_e(\lambda_p) = 0$ akan memberikan nilai *NF* minimum sama dengan 3 dB.

Noise figure dapat juga dinyatakan dalam bentuk persamaan yang sederhana yang berhubungan dengan daya *ASE EDFA* dan *bandwidth* frekuensi sinyal yang dikuatkan [21][42][43].

$$NF = \frac{P_{ASE}}{h\nu\Delta\nu G} + \frac{1}{G} \quad (2.68)$$

$$P_{ASE} = 2n_{sp} h\nu\Delta\nu(G-1) \quad (2.69)$$

dimana:

$\Delta\nu$ = *bandwidth* pada frekuensi sinyal(Hz)

P_{ASE} = daya ASE (μ W)

ν = frekuensi sinyal optik (Hz)

BAB 3 METODE PENELITIAN

Penelitian perataan penguatan *EDFA C-band* ini merupakan penelitian yang didasarkan atas hasil eksperimen. Disain eksperimen perataan penguatan *EDFA* didukung oleh komponen optik aktif dan pasif, dan beberapa instrumen optik. Komponen optik aktif berupa *laser diode (LD)* berfungsi sebagai laser pompa untuk *EDFA*. Komponen optik pasif terdiri atas isolator optik dan *WDM coupler*.

Isolator optik berfungsi untuk menyalurkan cahaya optik pada satu arah dan mengisolasi cahaya optik dari arah yang berlawanan. Isolator optik dihubungkan pada sisi keluaran *TLS* dan sisi keluaran *EDFA*. Isolator optik yang terhubung pada sisi keluaran *EDFA* berfungsi untuk mencegah sinyal yang terkuat kembali ke dalam piranti penguat. Sinyal yang masuk kembali ke *EDFA* dapat menaikkan *noise* dan menurunkan efisiensi penguat. Hal ini terjadi karena adanya interferensi dalam media tersebut.

WDM coupler berfungsi sebagai piranti optik yang menyalurkan dua cahaya optik dengan panjang gelombang yang berbeda untuk digabung dan diteruskan dalam satu piranti optik lainnya. *WDM coupler* dalam eksperimen ini berfungsi untuk menggabungkan daya sinyal optik dan daya pompa optik, dan selanjutnya menghubungkannya dengan *EDFA*.

Alat ukur yang digunakan dalam eksperimen ini adalah *TLS* dan *OSA*. *TLS* berfungsi sebagai pembangkit sinyal yang akan dikuatkan oleh *EDFA*. Rentang daya sinyal keluaran *TLS* adalah -20 dBm hingga 0 dBm, dan rentang frekuensi adalah 1520 nm hingga 1700 nm. Daya sinyal yang dikuatkan adalah daya sinyal yang ada pada sisi masuk *EDFA*, untuk itu daya keluaran *TLS* harus dikurangi dengan daya yang hilang pada konektor, isolator, *WDM coupler*, dan sambungan (*splice*). *OSA* berfungsi sebagai alat monitor dan alat ukur hasil keluaran sinyal yang telah dikuatkan oleh *EDFA*. *OSA* mampu mengukur sinyal pada rentang panjang gelombang 600 nm hingga 1750 nm. Ketelitian *OSA* untuk menerima panjang gelombang sinyal adalah $\pm 0,05$ nm.

Semua komponen pasif, *laser diode*, dan *EDFA* tersambungkan secara *fuse splicing*. Tujuan dilakukan penyambungan secara *fuse splicing* adalah untuk mendapatkan nilai yang tetap (tidak berubah-ubah), sehingga menjamin ketepatan dan keajekan nilai data yang didapat. Penyambungan dengan menggunakan konektor cukup sulit untuk menjamin ketepatan dan keajekan data yang didapat. Pengaruh guncangan dan kontaminasi lingkungan akibat adanya debu akan mempengaruhi data yang didapat pada penyambungan secara konektor.

Panjang *EDFA* ditetapkan 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, dan 12 m. Daya pompa ditetapkan antara 20 mW, 30 mW, 40 mW, 50 mW, dan 60 mW. Penentuan panjang didasarkan atas pengaruh daya pompa terhadap *gain* yang dihasilkan untuk panjang *EDFA* yang ditetapkan. Penentuan daya pompa antara 20 mW hingga 60 mW didasarkan atas *gain* minimal yang harus dihasilkan, yaitu 20 dB. Penghitungan untuk menentukan panjang *EDFA* disimulasikan menggunakan MATLAB. Hasil simulasi ditunjukkan secara grafik dalam Gambar 2.16, dan program dengan menggunakan MATLAB ditunjukkan pada Lampiran 5.

Tahapan eksperimen perataan penguatan *EDFA* untuk variasi daya sinyal, daya pompa, dan panjang *EDFA* dilakukan sebagai berikut.

1. Karakterisasi daya keluaran laser pemompa terhadap arus bias yang diberikan. Karakterisasi dilakukan untuk menentukan besarnya daya keluaran terhadap arus bias yang diberikan. Karakterisasi ini juga untuk menguji kestabilan daya keluaran yang dihasilkan oleh *laser diode (LD)*. Karakterisasi dilakukan pada ujung keluaran *LD* dan ujung keluaran *WDM coupler*. Ujung *LD* dan ujung *WDM coupler* tersambungkan dengan cara *fuse splicing*.
2. Karakterisasi isolator optik untuk sinyal masukan pada panjang gelombang kanal standar ITU. Karakterisasi dilakukan dengan melewatkan sinyal dari *TLS* ke isolator dan mengukurnya sinyal tersebut dengan *OSA*. Karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui redaman yang diakibatkan oleh isolator.
3. Karakterisasi daya sinyal dari *TLS*, yaitu mengukur *level* daya sinyal pada ujung keluaran *WDM coupler*. Karakterisasi ini dilakukan untuk menentukan *level* daya sinyal yang masuk pada *EDFA* setelah melewati isolator optik, penyambungan, dan *WDM coupler*, dan juga untuk mengetahui kestabilan

daya sinyal keluaran *TLS*. Kesetabilan daya sinyal dapat diketahui dari pengulangan pengukuran melalui *OSA*. Pengulangan pengukuran dilakukan 3 kali untuk setiap panjang gelombang pada rentang *C-band*, dan selanjutnya dirata-rata nilai pengukurannya.

4. Karakterisasi pola *ASE*, yaitu karakterisasi pola spektrum emisi spontan yang dihasilkan oleh *EDFA* tanpa adanya sinyal masukan yang akan dikuatkan. Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui inversi populasi yang terjadi sebagai akibat daya pompa yang diberikan pada *EDFA*, dan juga dipakai sebagai indikator untuk menunjukkan kesempurnaan *setup* eksperimen yang dibuat. Karakterisasi dilakukan untuk panjang *EDFA* 12 m, 11m, 10 m, 9 m, dan 8 m pada variasi daya pompa 20 mW, 30 m W, 40 mW, 50 mW, dan 60 mW.
5. Karakterisasi penguatan (*gain*) dan *NF*, yaitu karakterisasi penguatan dan *NF* sinyal yang dikuatkan oleh *EDFA* untuk seluruh spektrum panjang gelombang *C-band* dengan daya sinyal masukan -22,7 dBm, -17,7 dBm, -12,7 dBm, -7,7 dBm, dan -2,7 dBm. Variasi daya pompa yang diberikan pada *EDFA* adalah 20 mW, 30 m W, 40 mW, 50 mW, dan 60 mW. Variasi panjang *EDFA* ditetapkan 12 m, 11m, 10 m, 9 m, dan 8 m.

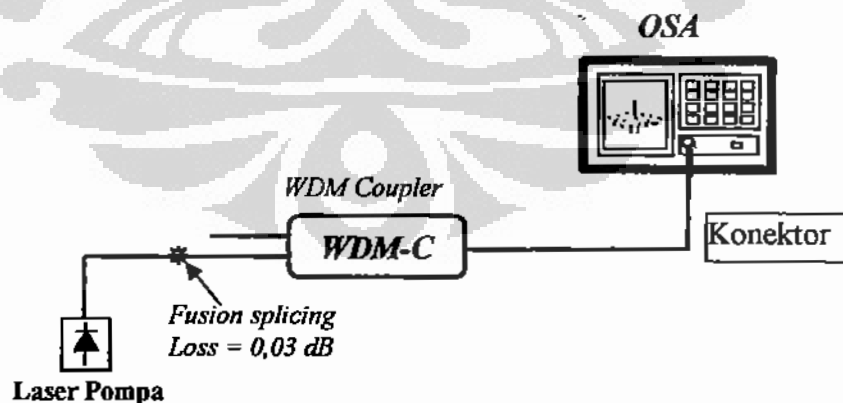
Semua hasil eksperimen diukur oleh *OSA*. Data yang teramati dan terukur pada *OSA* terdiri atas dua data yaitu pola spektrum sinyal dan data parameter sinyal (amplitudo dan panjang gelombang). Analisis data dilakukan secara matematik sesuai dengan solusi matematik untuk penguatan dan *noise figure (NF)* yang terukur pada *OSA*. Analisis matematik dilakukan untuk seluruh perubahan daya sinyal masukan yang dikenakan pada variasi panjang *EDFA* dan daya pompa. Hasil analisis matematik selanjutnya disusun dalam bentuk grafik karakteristik yang menyatakan hubungan *gain* dan *noise figure* terhadap panjang gelombang, perubahan panjang *EDFA*, perubahan daya pompa, dan perubahan daya sinyal masukan.

BAB 4 KARAKTERISASI KOMPONEN PENDUKUNG *EDFA*

Karakterisasi komponen pendukung *EDFA* adalah karakterisasi terhadap komponen aktif dan komponen pasif yang mendukung sistem *EDFA*. Komponen aktif dalam sistem *EDFA* adalah laser diode yang berfungsi sebagai laser pemompa *EDFA*, dan komponen pasif terdiri atas isolator optik dan *WDM coupler*. Sinyal yang masuk kedalam *EDFA* adalah sinyal optik yang akan dikuatkan, dan sinyal pompa. Sinyal pompa adalah sinyal optik yang memompa *EDFA* agar berfungsi sebagai penguat optik.

4.1 Karakterisasi Laser Diode

Laser diode dalam penelitian ini difungsikan sebagai laser pompa *EDFA* dan mempunyai panjang gelombang 974,6 nm. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui daya keluaran yang ada pada ujung *WDM coupler* yang akan disambung dengan *EDFA*. Tujuan utama karakterisasi *LD* adalah untuk mengetahui kesetabilan daya yang dikeluarkan terhadap arus bias (arus *LD*) yang diberikan. Karakterisasi dilakukan pada temperatur ruang ($\pm 26^{\circ}\text{C}$). Disain *setup* karakterisasi ditunjukkan dalam Gambar 4.1. Ujung *WDM coupler* yang terhubung dengan *OSA* dalam Gambar 4.1 adalah konektor yang terfabrikasi jadi satu dengan fiber *pigtail*.



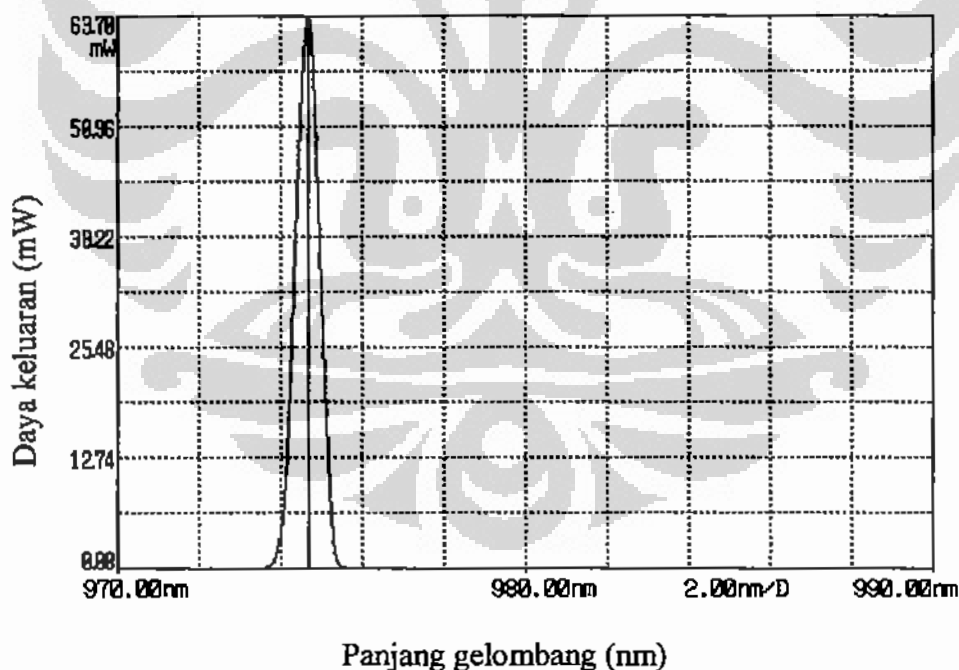
Gambar 4.1. Disain *Set up* Karakterisasi *WDM Coupler* Dengan Sumber Optik Dari *Laser Diode*

Sumber: Hasil disain eksperimen

Langkah-langkah pengukuran untuk karakterisasi *LD* dilakukan sebagai berikut.

1. Arus bias (arus *LD*) dimulai dari 0 mA hingga 270 mA, dan skala perubahan arusnya adalah 10 mA.
2. Pengukuran daya keluaran dilakukan pada setiap perubahan 10 mA, dan lama operasi untuk setiap pengukuran adalah 5 menit. Ketentuan 5 menit dilakukan karena *LD* nantinya akan memompa *EDFA* untuk lama waktu ± 3 menit pada setiap pengukuran.
3. Pengukuran yang sama diulang sampai 3 kali, dan dimulai dari 0 mA hingga 270 mA. Perilaku pengukuran seperti ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kesetabilan daya keluaran yang dihasilkan oleh *LD*.
4. Langkah pengukuran nomor 1 hingga nomor 3 diatas dilakukan pada ujung keluaran *WDM coupler*.

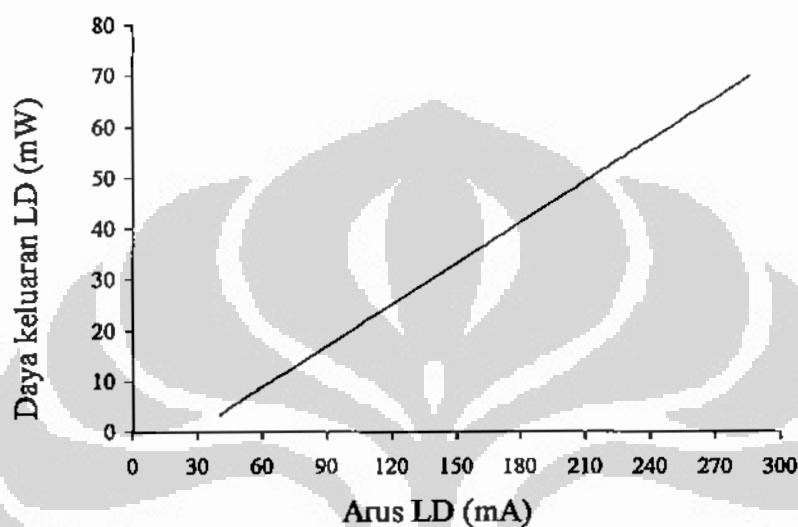
Salah satu hasil pengukuran yang menunjukkan pola radiasi daya keluaran *LD* yang terukur di ujung *WDM coupler* ditunjukkan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Pola Radiasi *LD* Yang Terukur Diujung *WDM Coupler*

Sumber: Hasil eksperimen

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pola radiasi yang terukur pada ujung *WDM coupler* tidak mengalami kecacatan, artinya keluaran *LD* masih membentuk pola radiasi daya yang menyerupai pola Gaussian. Hubungan perubahan arus bias (arus *LD*) terhadap daya keluaran *LD* yang terukur di ujung *WDM coupler* ditunjukkan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Hasil Karakterisasi *LD* Yang Terukur di Ujung Keluaran *WDM Coupler*

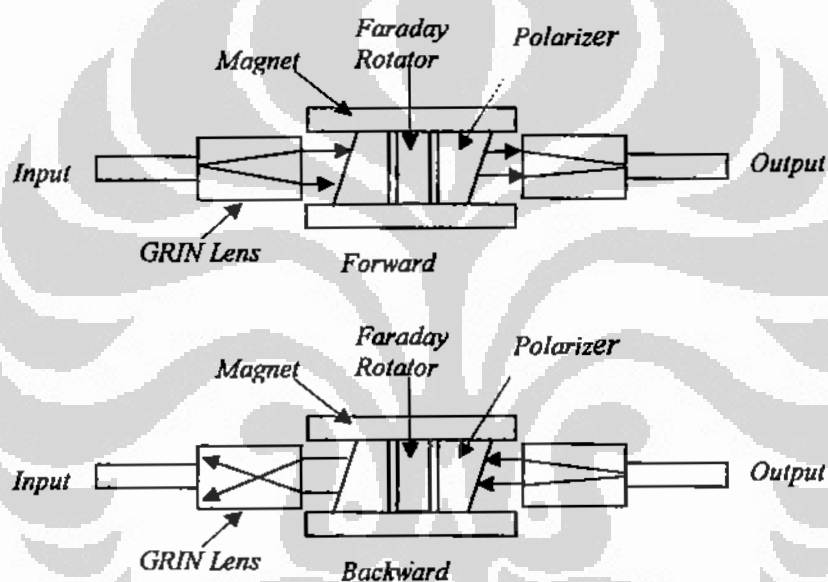
Sumber: Hasil eksperimen

4.2 Karakterisasi Isolator

Isolator adalah suatu piranti optik yang hanya membolehkan sinyal optik menjalar dalam satu arah dan tidak membolehkan menjalar untuk arah yang berlawanan [21][44]. Struktur tipikal isolator polarisasi *independent* ditunjukkan dalam Gambar 4.4.

Dalam arah menjalar maju (*forward*), sinyal optik yang keluar dari fiber disejajarkan (*collimated*) dengan menggunakan lensa *graded index (GRIN)* yang selanjutnya melewati piranti *birefringent rutile (TiO₂)*. Pasangan berkas sinyal optik *ordinary* dan *extraordinary* yang keluar dari material ini diteruskan melalui Faraday rotator yang terdiri atas *Yttrium Iron Garnet (YIG)* dan kristal $Y_3Fe_5O_{12}$ yang dikelilingi oleh magnet permanen. Polarisasi berkas sinyal optik yang melewati Faraday rotator sudutnya diputar 45° dari sumbu polarisasi, dan selanjutnya

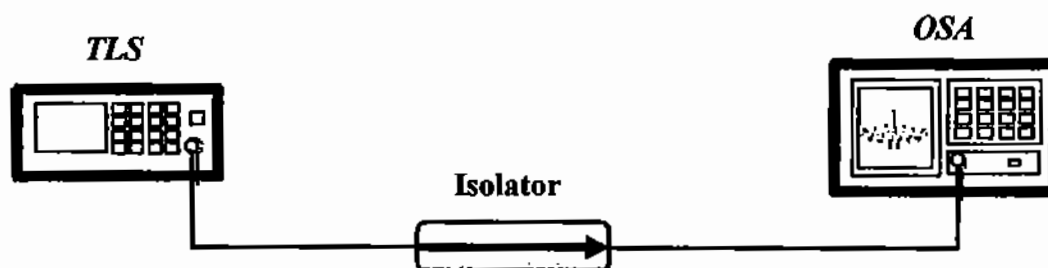
dilewatkan pada piranti *birefringent* kedua yang menggabungkan berkas tersebut untuk dilewatkan pada ujung keluaran fiber. Berkas sinyal optik yang menjalar kearah balik (*backward*) akan dipisahkan menjadi dua berkas, yaitu berkas *ordinary* dan *extraordinary*. Berkas sinyal optik tersebut akan diputar sudut polarisasinya oleh *Faraday rotator* menjadi 90° dari polarisasi masukannya, dan selanjutnya dilewatkan pada piranti *birefringent* kedua. Berkas yang menjalar secara divergen tersebut tidak dapat terfokus pada ujung fiber masukan, sehingga berkas balik tidak dapat masuk kedalam fiber.



Gambar 4.4. Disain Isolator Untuk Lintasan Optik Yang Menjalar Maju (*Forward*) dan Balik (*Backward*)

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

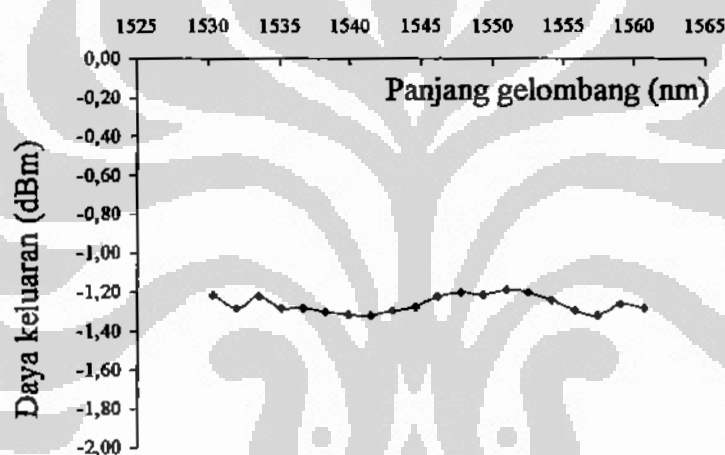
Karakterisasi isolator bertujuan untuk mengetahui rugi-rugi sinyal yang dilewatkan pada isolator. Daya sinyal untuk karakterisasi ini ditetapkan 0 dBm dari sumber *TLS*, dan panjang gelombang diatur mulai dari 1531,90 nm hingga 1560,61 nm dengan skala perubahan 200 GHz. Susunan (*setup*) rangkaian untuk karakterisasi ditunjukkan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Susunan Rangkaian Karakterisasi Isolator.

Sumber: Hasil disain eksperimen.

Hasil karakterisasi level daya sinyal untuk daya optik 0 dBm yang berasal dari *TLS* dan setelah melewati isolator ditunjukkan dalam Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Hasil karakterisasi *level* daya sinyal yang telah melewati isolator.

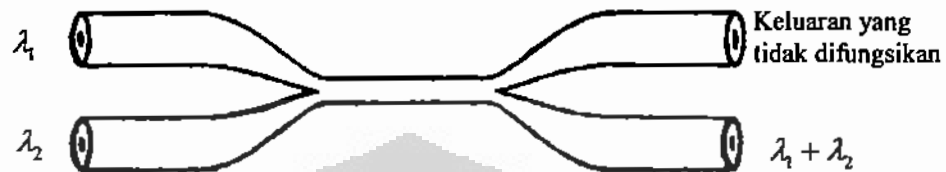
Sumber: Hasil eksperimen.

Berdasarkan hasil pengukuran terlihat bahwa *insertion loss* yang diakibatkan oleh *isolator* rata-rata besarnya $\pm 0,3$ dB, rugi-rugi lainnya disebabkan oleh konektor yang terhubung ke *TLS* dan ke *OSA* yang besarnya ± 1 dB.

4.3 Karakterisasi *WDM Coupler*

Wavelength division multiplexing coupler (WDM Coupler) merupakan piranti optik yang menggabungkan dua cahaya dengan panjang gelombang yang tidak sama. Kedua cahaya tersebut masuk melalui fiber yang berbeda dan keluar pada satu fiber

yang sama. Cahaya yang masuk dalam *WDM coupler* ini adalah cahaya yang berasal dari *LD* dan *TLS*. Kedua cahaya tersebut selanjutnya keluar melalui satu fiber yang akan dihubungkan dengan *EDFA*. Gambar 4.7 menunjukkan piranti *WDM Coupler* yang terbuat dari dua buah fiber yang dilebur menjadi satu.



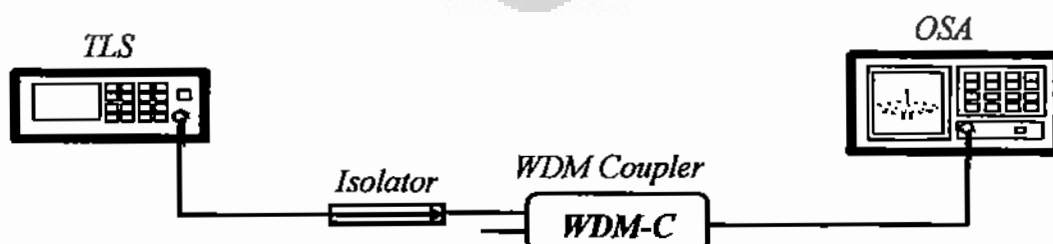
Gambar 4.7. Disain *WDM Coupler* Yang Mengkombinasikan Daya Sinyal Masukan dan Daya Pompa.

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

Panjang pengkoplingan pada *WDM coupler* ini bergantung pada panjang gelombang. Pergeseran daya antara dua buah fiber yang paralel terjadi pada tempat yang berbeda sepanjang *coupler* untuk panjang gelombang yang berbeda. Bilamana panjang pengkoplingan yang dibuat adalah tepat, maka pengkombinasian sinyal dapat terjadi.

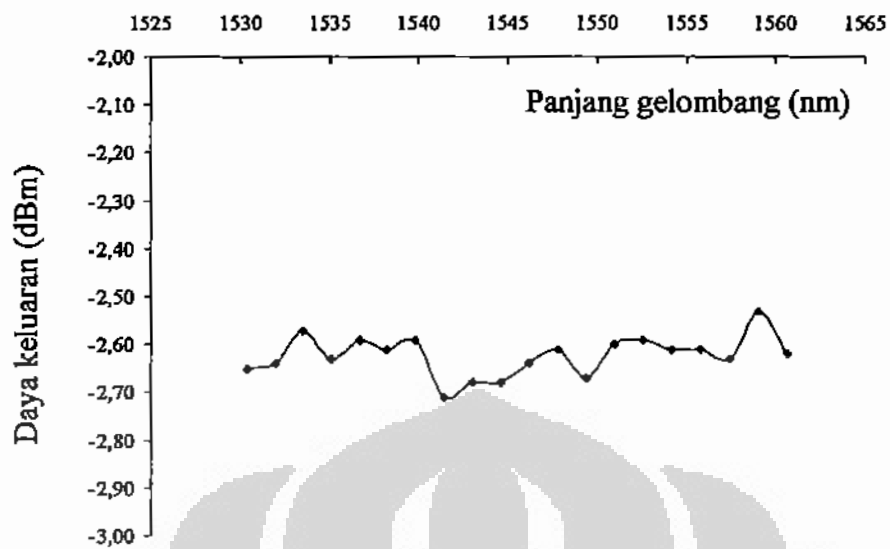
Peralatan yang digunakan untuk karakterisasi *WDM Coupler* sama seperti untuk karakterisasi *isolator*, yaitu *TLS* dan *OSA*. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui *insertion loss* yang ada pada *WDM Coupler*.

Ujung fiber isolator terhubung dengan ujung fiber *WDM Coupler* dengan cara *fuse splicing*. Rugi-rugi hasil penyambungan *fuse splicing* adalah 0,38 dB. Susunan rangkaian untuk karakterisasi ditunjukkan dalam Gambar 4.8. Hasil karakterisasi yang terukur pada ujung *WDM coupler* ditunjukkan dalam Gambar 4.9.



Gambar 4.8. Susunan Rangkaian Karakterisasi *WDM Coupler*.

Sumber: Hasil disain eksperimen.



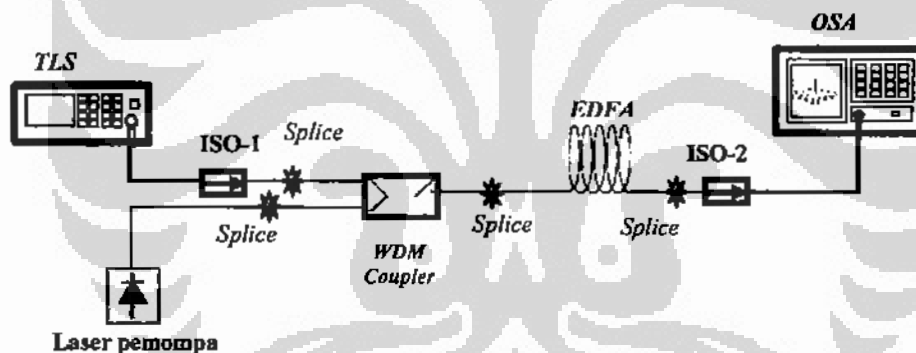
Gambar 4.9. Hasil Karakterisasi Level Daya Sinyal Yang Telah Melewati *WDM Coupler*.

Sumber: Hasil eksperimen.

Berdasarkan hasil pengukuran terlihat bahwa daya rata-rata yang terukur pada ujung *WDM coupler* adalah -2,623 dBm dengan fluktuasi 0.18 dBm.

BAB 5 HASIL EKSPERIMEN *EDFA* DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen yang dilakukan dalam penelitian perataan penguatan *EDFA* akan disajikan dan dibahas dalam bab 5 ini. Eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini menghasilkan beberapa karakteristik, yaitu *amplified spontaneous emission (ASE)*, penguatan (*gain*), dan *noise figure (NF) EDFA*. Karakteristik yang dihasilkan mempunyai hubungan yang bervariasi terhadap panjang *EDFA*, daya sinyal masukan, dan daya pompa. Panjang gelombang sinyal yang merupakan bagian dari parameter sinyal ditetapkan pada rentang *C-band* (1531,90 nm hingga 1560,61 nm) dengan jarak antar kanal 200 GHz sesuai dengan standar *ITU (International Telecommunication Union)*. Disain *setup* eksperimen ditunjukkan dalam Gambar 5.1, dan foto *setup* eksperimen ditunjukkan dalam Lampiran 9.



Gambar 5.1. Disain *Setup* Eksperimen Perataan Penguatan *EDFA C-Band*

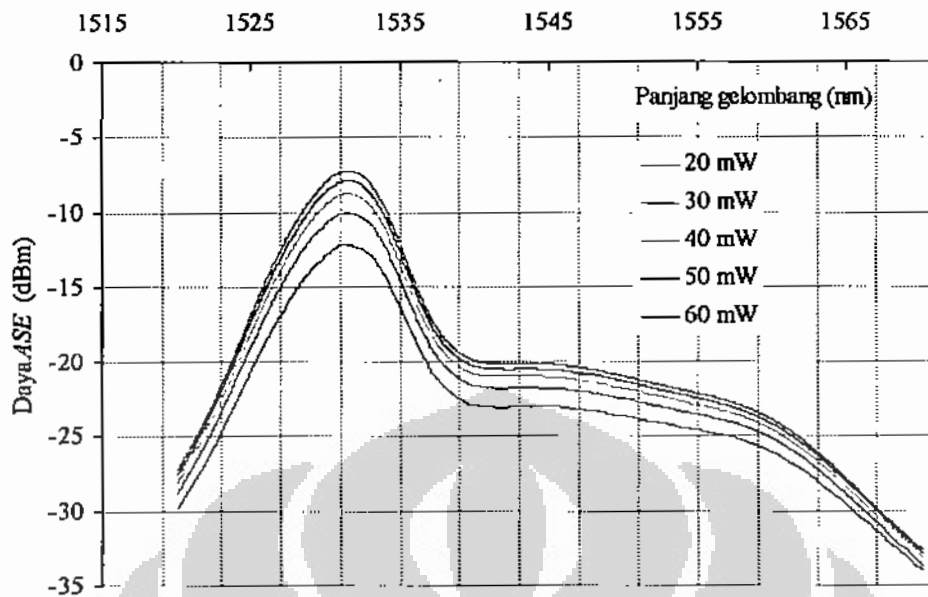
Komponen yang yang dilibatkan dalam eksperimen sistem perataan penguatan optik *EDFA* ini adalah: isolator optik, *laser diode*, *WDM-coupler*, dan *EDFA*. Daya sinyal masukan yang dilewatkan dalam isolator optik dan *WDM coupler*, serta daya optik *LD* telah terkarakterisasi seperti ditunjukkan dalam bab 4.

Prinsip kerja disain *setup* eksperimen dapat disejelaskan seperti berikut. Sumber pompa (laser pemompa) dan sinyal masukan (*input signal*) yang dibangkitkan oleh *TLS* dilewatkan pada *WDM coupler* untuk dihubungkan dengan *EDFA*. Energi yang dihasilkan oleh laser pompa yang menjalar sepanjang *EDFA*

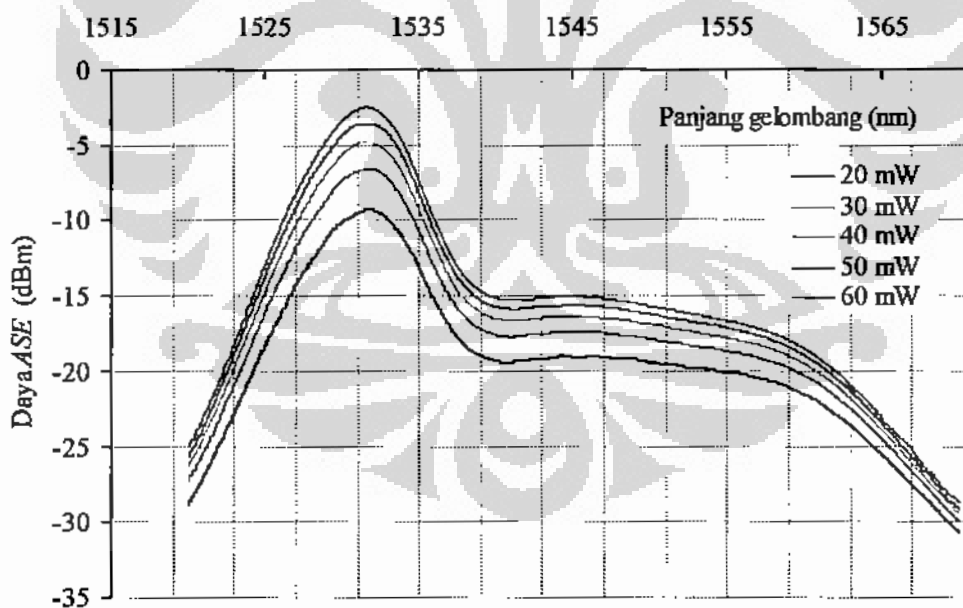
akan diabsorpsi oleh *ion-ion erbium* untuk berpindah dari tingkat energi *ground state* ke tingkat *excited state*. Untuk mendapatkan kembali distribusi yang seimbang, ion-ion yang dipompa (terekstisasi) pada tingkat *excited state* (energi tertinggi) dapat kembali pada tingkat *ground state* (energi terendah) secara spontan atau melalui stimulasi (rangsangan) oleh sinyal dari luar. Perpindahan ion-ion dari tingkat *excited state* ke tingkat *ground state* yang dilakukan secara spontan menghasilkan emisi spontan, dan dikenal sebagai *amplified spontaneous emission (ASE)*. Ion-ion yang kembali ke tingkat *ground state* karena adanya sinyal dari luar (sebagai sinyal perangsang) yang masuk kedalam *EDFA* dikenal sebagai emisi terstimulasi (*stimulated emission*). Emisi terstimulasi ini akan mengakibatkan penguatan pada sinyal perangsang. Penguatan sinyal terjadi karena cahaya yang dipancarkan pada proses perpindahan dari tingkat *excited state* ke *ground state* yang dilakukan oleh ion-ion tersebut mempunyai frekuensi dan fasa yang sama dengan cahaya sinyal perangsang. Energi cahaya yang dihasilkan pada proses peluruhan (perpindahan dari *excited state* ke *ground state*) mempunyai rentang panjang gelombang sekitar 1550 nm, dan memperkuat sinyal perangsang pada rentang panjang gelombang tersebut.

5.1 Karakterisasi *Amplified Spontaneous Emission (ASE)*

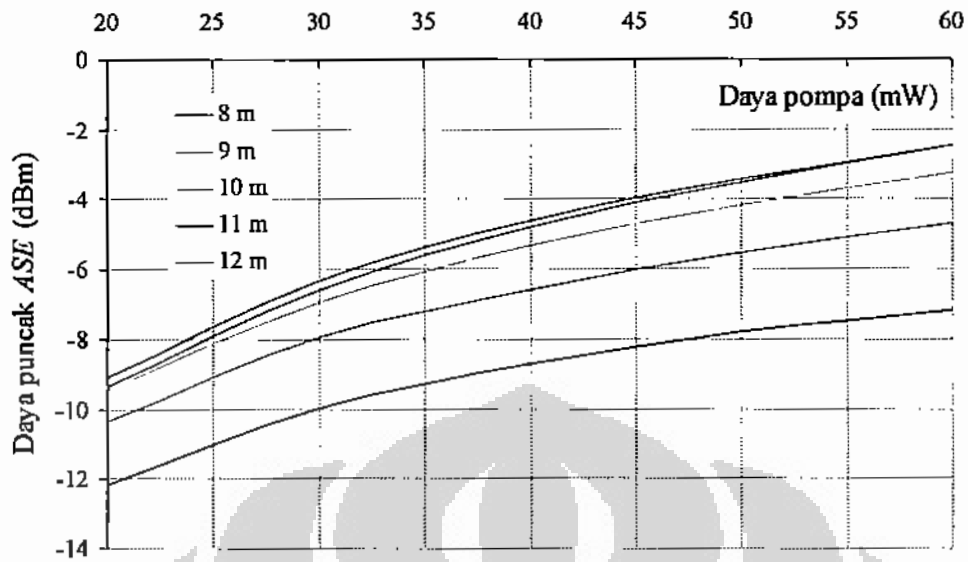
Karakterisasi *ASE* bertujuan untuk mengetahui pola spektrum daya *ASE* yang terjadi karena emisi spontan. Pola *ASE* merupakan data yang dapat memberikan indikasi proses inversi populasi yang menyerupai spektrum penguatan yang dihasilkan oleh *EDFA*, sehingga memberikan informasi yang berguna terhadap karakterisasi *EDFA* untuk berbagai daya pompa dan daya sinyal. Pola *ASE* dapat digunakan untuk menentukan nilai *NF* yang terjadi. Grafik karakteristik pola *ASE*, yaitu daya *ASE* terhadap panjang gelombang ditunjukkan dalam Gambar 5.2 dan Gambar 5.3. Grafik daya puncak *ASE* terhadap perubahan daya pompa dan panjang *EDFA* ditunjukkan dalam Gambar 5.4 dan Gambar 5.5. Persentase perubahan daya puncak *ASE* terhadap daya pompa dan panjang *EDFA* ditunjukkan dalam Gambar 5.6 dan Gambar 5.7.



Gambar 5.2. Karakteristik Daya ASE Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 8 m
Sumber: Hasil Eksperimen

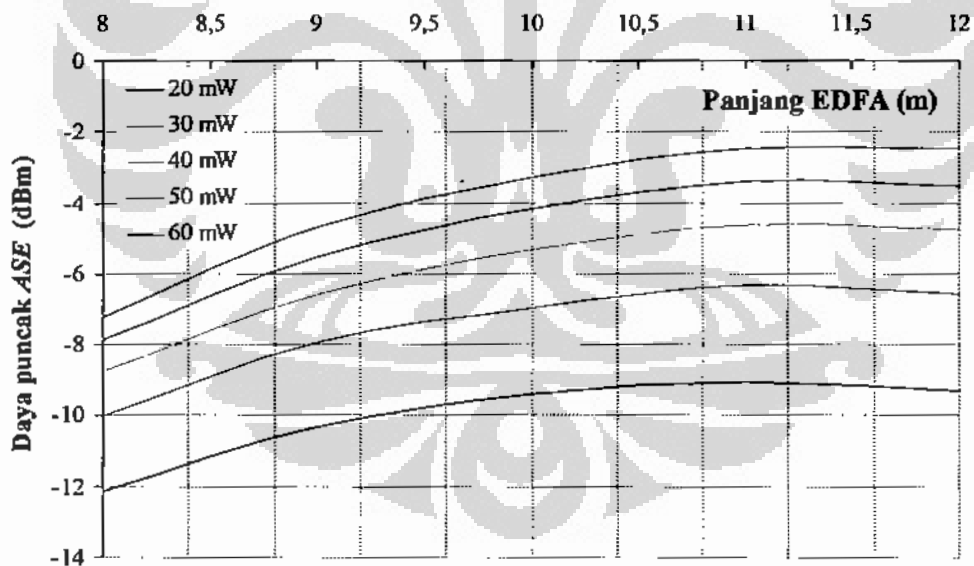


Gambar 5.3. Karakteristik Daya ASE Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 12 m
Sumber: Hasil Eksperimen



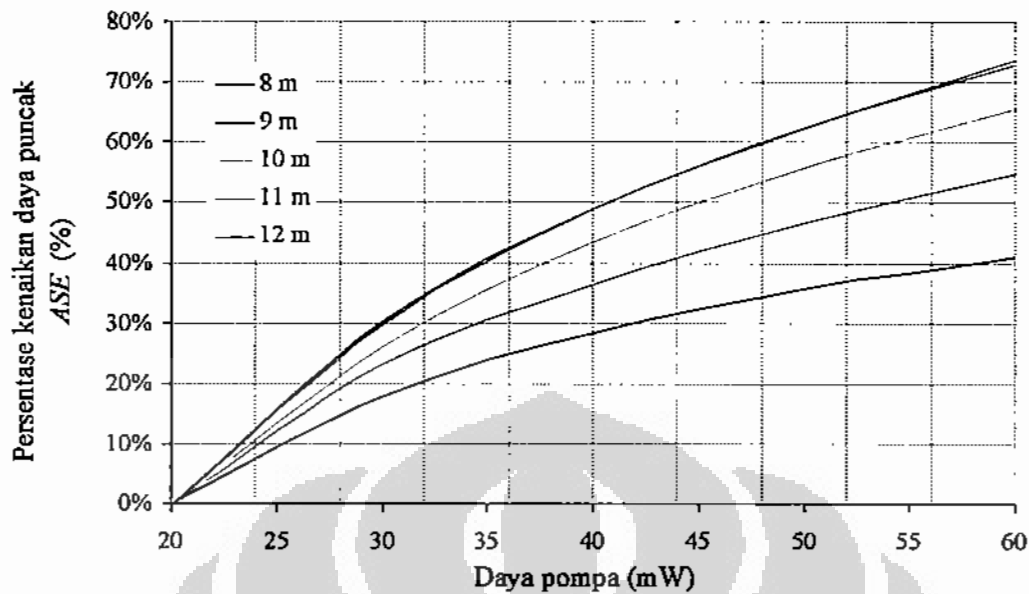
Gambar 5.4. Karakteristik Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Daya Pompa

Sumber: Hasil Eksperimen

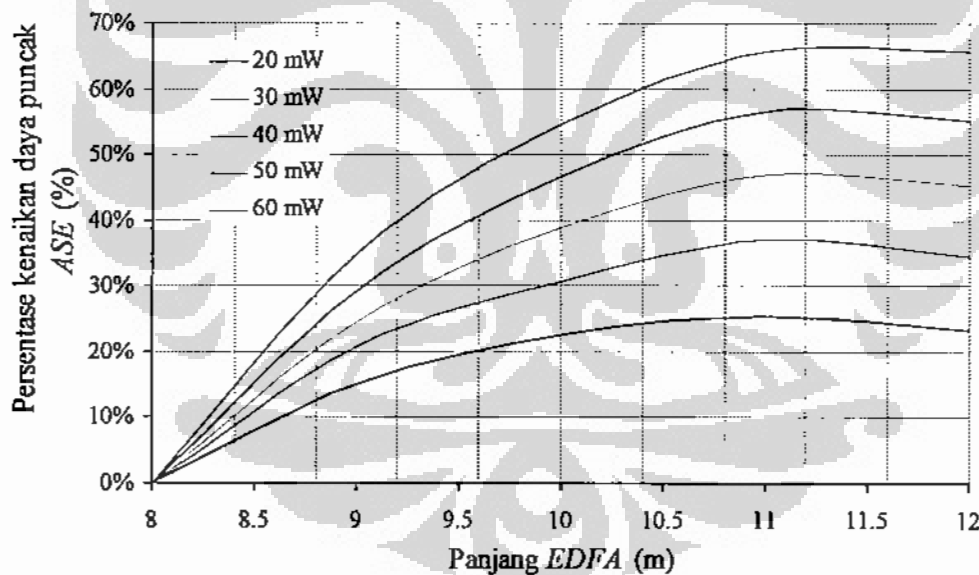


Gambar 5.5. Karakteristik Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Panjang EDFA

Sumber: Hasil Eksperimen



Gambar 5.6. Persentase Kenaikan Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Daya Pompa
Sumber: Hasil Eksperimen



Gambar 5.7. Persentase Kenaikan Daya Puncak ASE Sebagai Fungsi Panjang EDFA
Sumber: Hasil Eksperimen

Karakteristik pola spektrum ASE yang ditunjukkan pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3 mempunyai pola yang tidak cacat karena interferensi. Kenyataan ini menunjukkan bahwa disain *setup* eksperimen yang dibuat sudah baik dan akan menghasilkan data pengukuran sesuai dengan proses penguatan yang dihasilkan oleh

EDFA. Puncak *ASE* untuk seluruh panjang *EDFA* dan daya pompa yang diberikan terjadi pada panjang gelombang 1531,55 nm. Fenomena ini sesuai dengan sifat spektroskopi *erbium* dimana pada panjang gelombang sekitar 1531 nm Er^{3+} memiliki absorpsi dan emisi *cross section* paling tinggi. Pola spektrum *ASE* menunjukkan bahwa semakin tinggi daya pompa yang diberikan pada *EDFA* semakin tinggi daya *ASE*-nya. Hal ini terjadi karena faktor inversi populasinya semakin meningkat, atau jumlah populasi ion-ion *erbium* pada *level energi excited state* lebih besar dari yang ada pada *level ground state*. Fenomena hasil eksperimen untuk Gambar 5.2. dan Gambar 5.3 menyerupai dengan model simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, yaitu semakin tinggi daya pompa yang diberikan semakin tinggi nilai fraksional inversi populasi. Kenaikan nilai fraksional inversi populasi pada daya >30 mW menunjukkan perubahan yang kecil, dan kenyataan ini sesuai dengan eksperimen dimana perubahan daya *ASE* >30 mW menunjukkan perubahan yang semakin kecil. Hal ini terjadi karena jumlah *ion-ion erbium* yang ada *level ground state* sudah semakin berkurang, sehingga tidak sebanding dengan perubahan daya pompa yang diberikan.

Gambar 5.4 menunjukkan bahwa nilai puncak daya *ASE* untuk panjang *EDFA* 8 m ke 9 m mengalami perubahan yang besar. Perubahan nilai puncak yang besar terjadi karena perubahan jumlah *ion-ion erbium* mengalami pertambahan untuk panjang *EDFA* yang lebih panjang. Daya pompa yang diberikan pada perubahan panjang 8 m dan 9 m masih memenuhi untuk menaikkan nilai inversi populasi yang lebih besar. Perubahan panjang *EDFA* dari 11 m ke 12 m tidak menunjukkan kenaikan daya puncak, dan bahkan menunjukkan kesamaan hingga penurunan nilai daya puncak *ASE*-nya. Kenyataan ini terjadi karena daya pompa yang diberikan mengalami penurunan yang sangat besar dan bahkan mencapai 0 mW sebelum mencapai ujung akhir *EDFA*.

Gambar 5.5 menunjukkan bahwa daya puncak *ASE* terjadi pada panjang *EDFA* 11 m dan untuk panjang lebih besar 11 mengalami penurunan. Penurunan daya puncak terjadi karena daya pompa pada panjang yang lebih besar dari 11m sudah habis. Sebagai akibat habisnya daya pompa, daya *ASE* yang melewati *EDFA* dengan panjang lebih besar dari 11 m akan diabsorpsi dan mengakibatkan penurunan

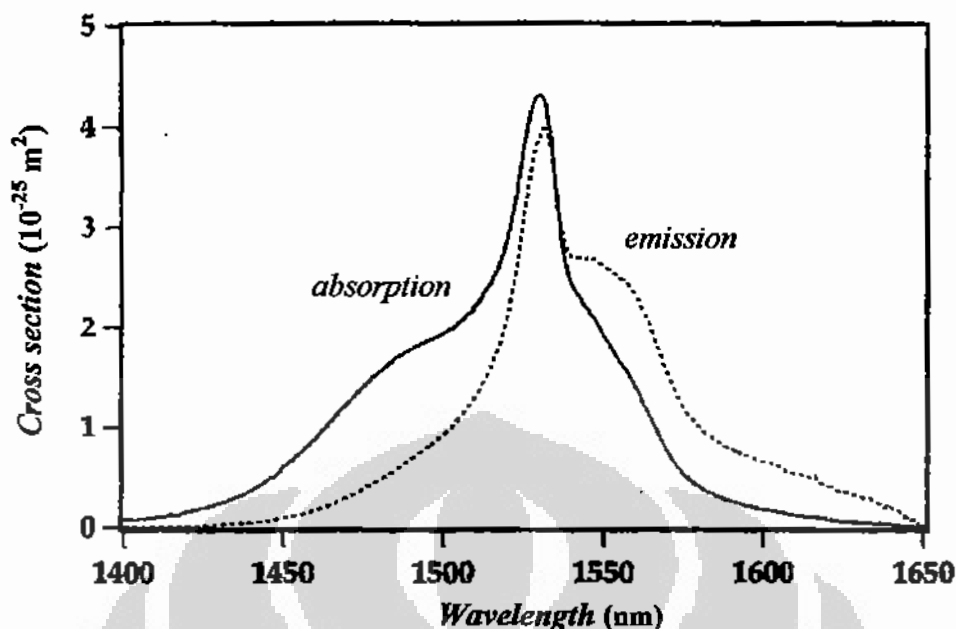
nilai puncaknya.

Gambar 5.6 menyatakan persentase kenaikan daya puncak ASE untuk daya pompa 30-60 mW terhadap daya pompa 20 mW pada panjang *EDFA* yang sama. Tujuan karakterisasi ini adalah untuk mengetahui berapa persen perubahan daya puncak yang diberikan terhadap perubahan panjang *EDFA* untuk daya pompa yang sama. Persentase kenaikan paling tinggi terjadi pada *EDFA* 11 m dan 12 m, dan pada kedua panjang ini nilai persentase kenaikan hampir sama dan bahkan cenderung menurun.

Gambar 5.7 menunjukkan kenaikan persentase daya puncak ASE untuk panjang *EDFA* 9 m – 12 m terhadap panjang 8 m untuk daya pompa yang sama. Panjang *EDFA* dari 11 m ke 12 m persentase kenaikan daya puncaknya mengalami penurunan untuk daya pompa yang sama. Kenyataan ini menunjukkan bahwa nilai fraksional inversi populasi untuk 12 m lebih rendah dari 11 m.

5.2 Karakterisasi *Gain* dan *Noise Figure (NF)* pada rentang Panjang gelombang *C-band*

Gain dan *noise figure (NF)* merupakan parameter yang sangat penting dalam sistem komunikasi. *Gain* menentukan kuatnya sinyal yang ditransmisikan, dan menunjukkan berapa panjang lintasan transmisi yang dapat dilalui oleh sinyal tersebut. *NF* menentukan tingkat kualitas sinyal yang akan diterima pada sisi penerima. Nilai *gain* dan *NF* pada *EDFA* dipengaruhi oleh daya pompa, panjang *EDFA*, daya sinyal dan panjang gelombangnya, emisi dan absorpsi *cross section*. Nilai emisi dan absorpsi *cross section* berbeda-beda untuk panjang gelombang yang berbeda seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.8. Karakterisasi *gain* dan *NF* dilakukan pada panjang gelombang rentang *C-band*. Panjang gelombang yang dipilih sesuai dengan ketentuan standar *ITU*, yaitu mulai dari 1531,90 nm (195,70 THz) hingga 1560,61 nm (192,10 THz) dengan jarak antar panjang gelombang 200 GHz.



Gambar 5.8. Emisi dan Absorpsi Cross Section Untuk Fiber Silica yang Di-doping Al-Ge-Er.

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

Langkah-langkah untuk mendapat nilai *Gain* dan *NF* secara eksperimen adalah sebagai berikut.

1. Disain *set up* seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.1.
2. Daya pompa dan daya sinyal secara bersamaan dimasukkan pada *EDFA* untuk panjang yang ditetapkan. Nilai daya pompa dan daya sinyal dapat dibuat bervariasi, begitu juga panjang gelombang sinyalnya.
3. Mencatat dan merekam data sinyal keluaran *EDFA* yang dimonitor dan diukur oleh *OSA*.
4. *Gain* dan *NF* dihitung dengan menggunakan pers. (5.1) dan pers. (5.2) [21][43].

$$G(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{(P_{\text{signal-out}} + P_{\text{noise-out}}) - P_{\text{noise-out}}}{P_{\text{signal-in}}} \right] \quad (5.1)$$

$$NF = \frac{P_{\text{ASE}}}{h\nu_s \Delta\nu_s G} + \frac{1}{G} \quad (5.2)$$

dimana

$P_{\text{signal-out}} + P_{\text{noise-out}}$ = daya sinyal keluaran yang terukur pada *OSA* (dBm atau mW).

ν_s = frekuensi sinyal (Hz).

$\Delta\nu$ = *bandwidth* frekuensi optik atau *bandwidth* sinyal pada -3 dB (Hz).

$$\Delta\nu = B_0 = \frac{c}{\lambda_s} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} \right) \text{ Hz}$$

λ_s = panjang gelombang sinyal (m).

$\Delta\lambda$ = *bandwidth* sinyal pada -3 dB (nm)

$P_{ASE} = P_{noise-out}$ = daya ASE yang terukur pada OSA (dBm)

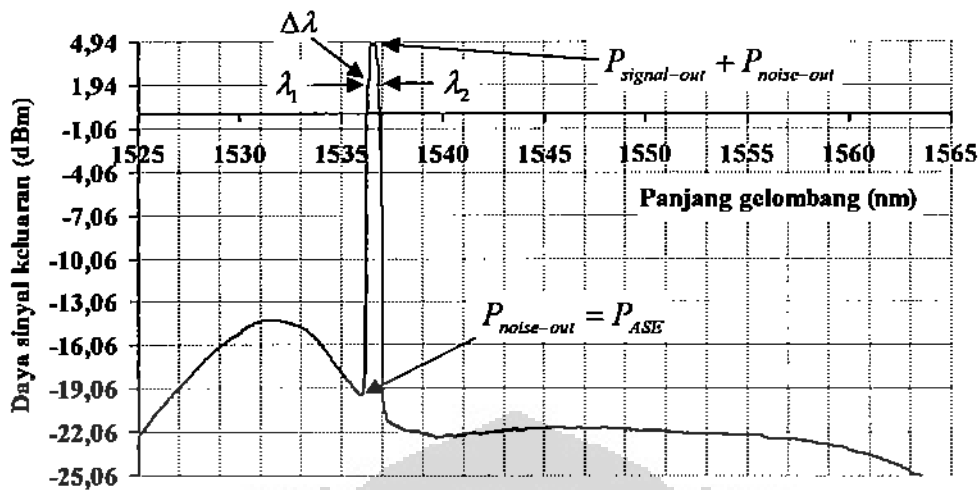
Data yang diperlukan dalam karakterisasi *gain* dan *NF* ada 2 jenis data, yaitu data yang ditentukan dan data yang terukur dari hasil eksperimen. Data yang ditentukan terdiri atas daya sinyal masukan yang akan dikuatkan dan panjang gelombangnya, daya pompa, dan parameter optik lainnya (kecepatan cahaya, dan konstanta Planck). Data hasil eksperimen adalah daya sinyal yang dikuatkan (daya sinyal keluaran), daya *noise ASE*, dan spektrum pola ASE.

Analisis matematik untuk salah satu kelompok data dari seluruh data eksperimen yang dilakukan dapat diuraikan penyelesaiannya seperti berikut.

Data yang ditentukan :

- Daya sinyal masukan (P_s atau $P_{signal-in}$) = -22,7 dBm (= $5,37 \times 10^{-6}$ W)
- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1536,61 nm
- Daya pompa = 20 mW (= 0,02 W)
- Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
- Konstanta Planck (h) = $6,626 \times 10^{-34}$ J.s

Data yang teramati dan terukur oleh OSA dari hasil eksperimen ditunjukkan dalam Gambar 5.9.



Gambar 5.9. Daya Sinyal Keluaran dan Spektrum ASE Sebagai Fungsi Panjang Gelombang.

Sumber: Hasil Eksperimen

- $P_{\text{signal-out}} + P_{\text{noise-out}} = 4,94 \text{ dBm} = 0,00312 \text{ W}$
- $P_{\text{noise-out}} = P_{\text{ASE}} = -19,15 \text{ dBm} = 1,216 \times 10^{-5} \text{ W}$
- $\lambda_1 = 1536,35 \text{ nm}$
- $\lambda_2 = 1536,85 \text{ nm}$
- $\Delta\lambda = 1536,85 \text{ nm} - 1536,35 \text{ nm} = 0,5 \text{ nm}$

$$G = \left[\frac{(P_{\text{signal-out}} + P_{\text{noise-out}}) - P_{\text{noise-out}}}{P_{\text{signal-in}}} \right]$$

$$= \left(\frac{0,00312 - 1,216 \cdot 10^{-5}}{5,37 \cdot 10^{-6}} \right) = 578,5$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log G$$

$$= 10 \log(578,5) = 27,62 \text{ dB}$$

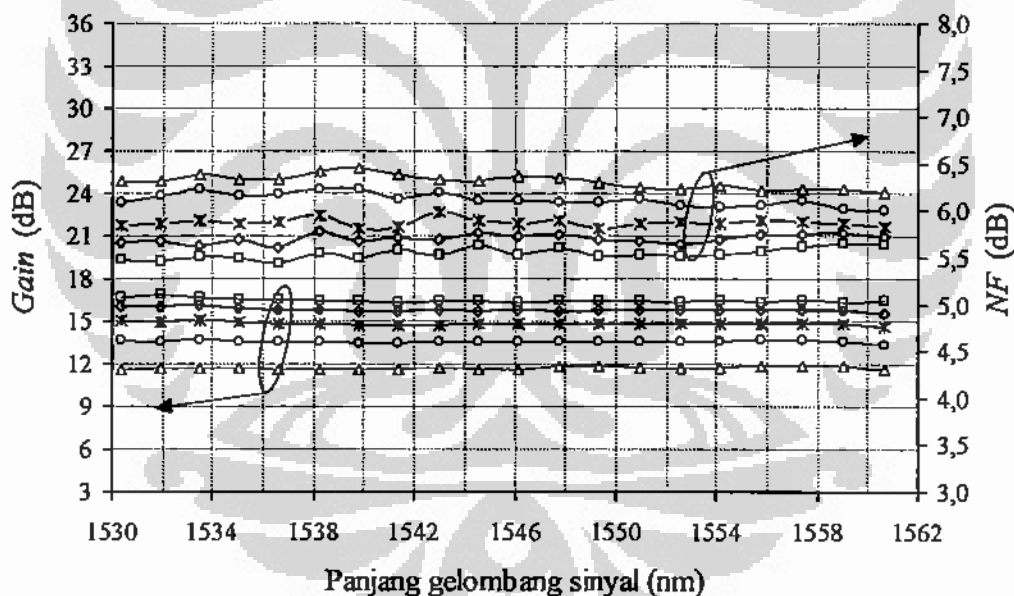
$$\nu_s = \frac{c}{\lambda_s} = \frac{3 \cdot 10^8}{1536,61 \cdot 10^{-9}} = 1,95 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\Delta\nu = B_0 = \frac{c}{\lambda_s} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} \right)$$

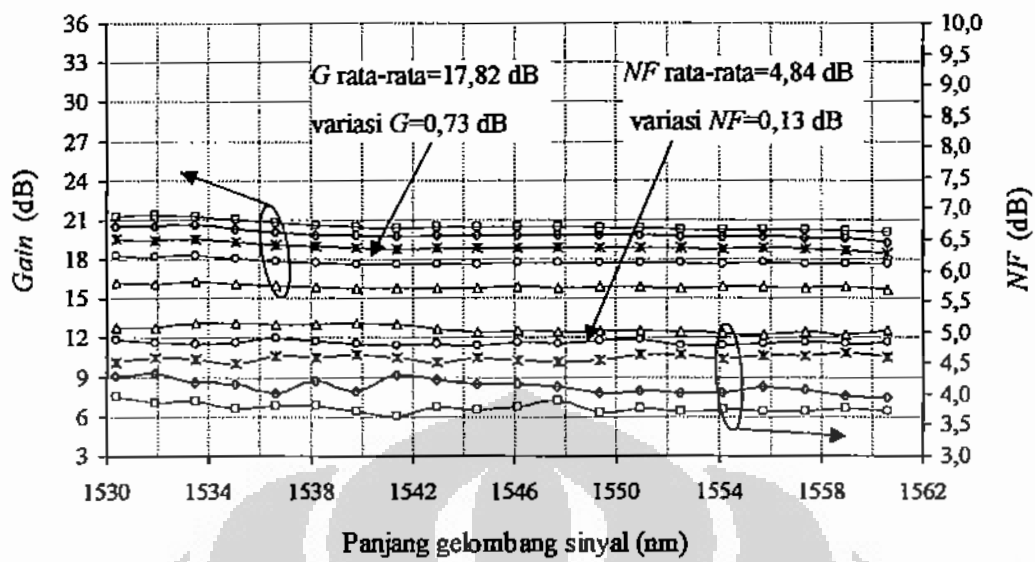
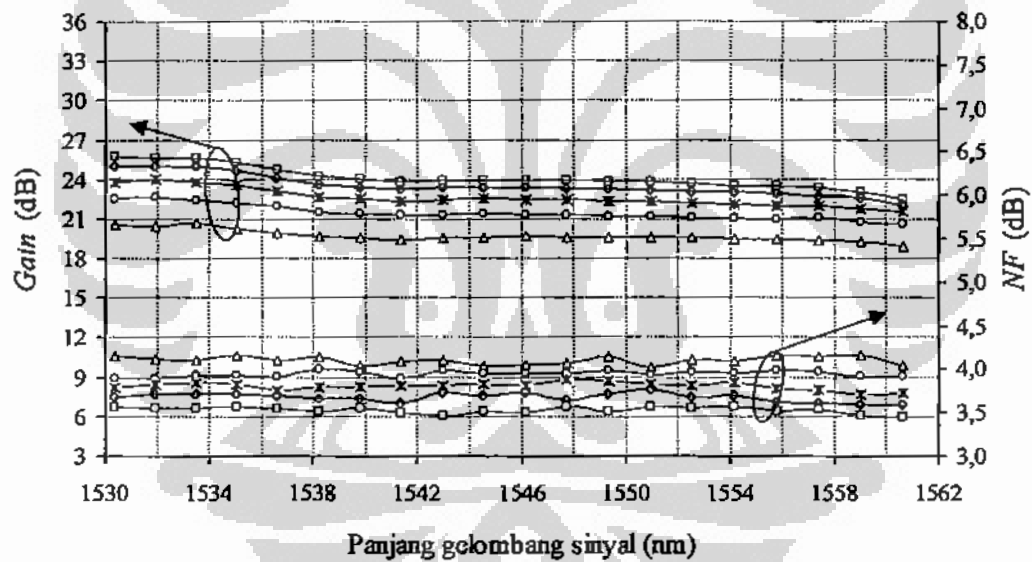
$$\Delta\nu = B_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{1536,61 \cdot 10^{-9}} \left(\frac{0,5 \cdot 10^{-9}}{1536,61 \cdot 10^{-9}} \right) = 6,35 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

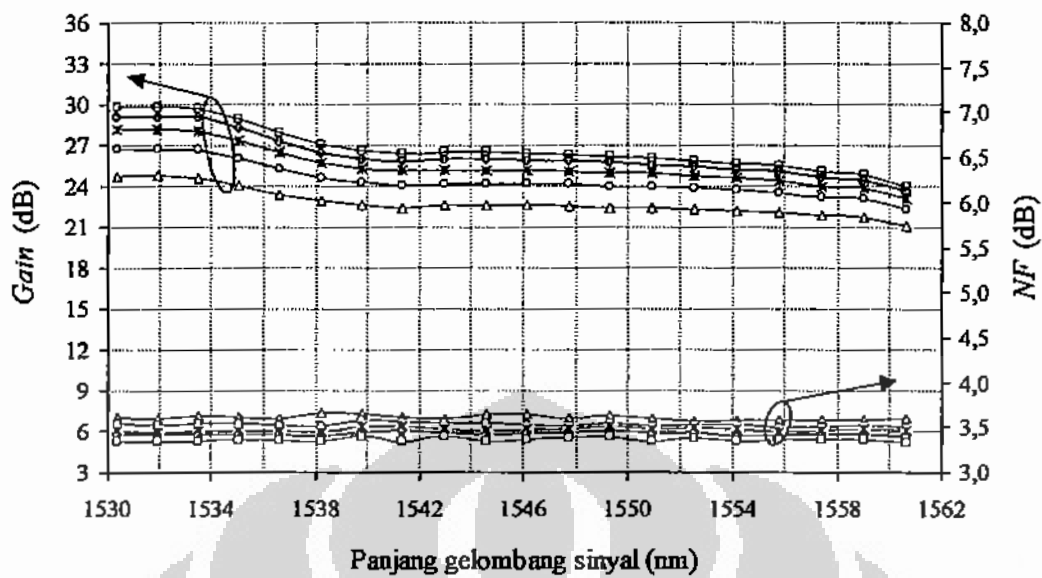
$$\begin{aligned}
 NF \text{ (dB)} &= 10 \log \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu_s \cdot B_o \cdot G} + \frac{1}{G} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{1,216 \cdot 10^{-5}}{6,626 \cdot 10^{-34} \times 1,95 \cdot 10^{14} \times 6,35 \cdot 10^{10} \times 578,5} + \frac{1}{578,5} \right) \\
 &= 4,08 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Data untuk sinyal masukan, panjang *EDFA*, daya pompa, panjang gelombang yang berbeda-beda dapat dihitung dengan cara yang sama, yaitu menggunakan pers. (5.1) dan pers. (5.2). Hasil penghitungan ditunjukkan dalam bentuk grafik dan tabulasi. Hasil penghitungan yang dinyatakan secara tabulasi ditunjukkan dalam Lampiran 10. Hasil penghitungan dalam bentuk grafik karakteristik *gain* dan *NF* sebagai fungsi panjang gelombang ditunjukkan dalam Gambar 5.10 hingga Gambar 5.14.

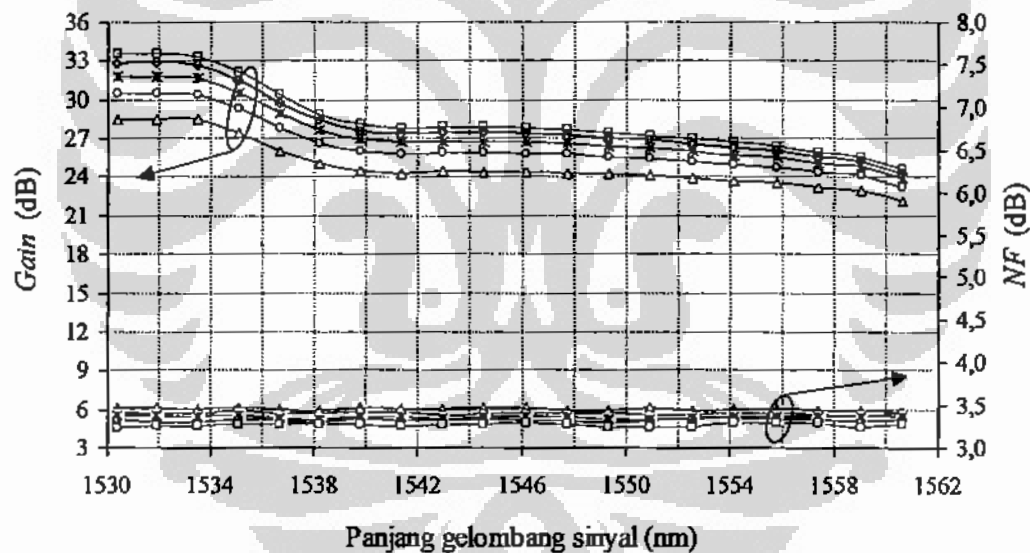


(a) Daya Sinyal Masukan -2,7 dBm

(b) Daya Sinyal Masukan $-7,7$ dBm(c) Daya Sinyal Masukan $-12,7$ dBm



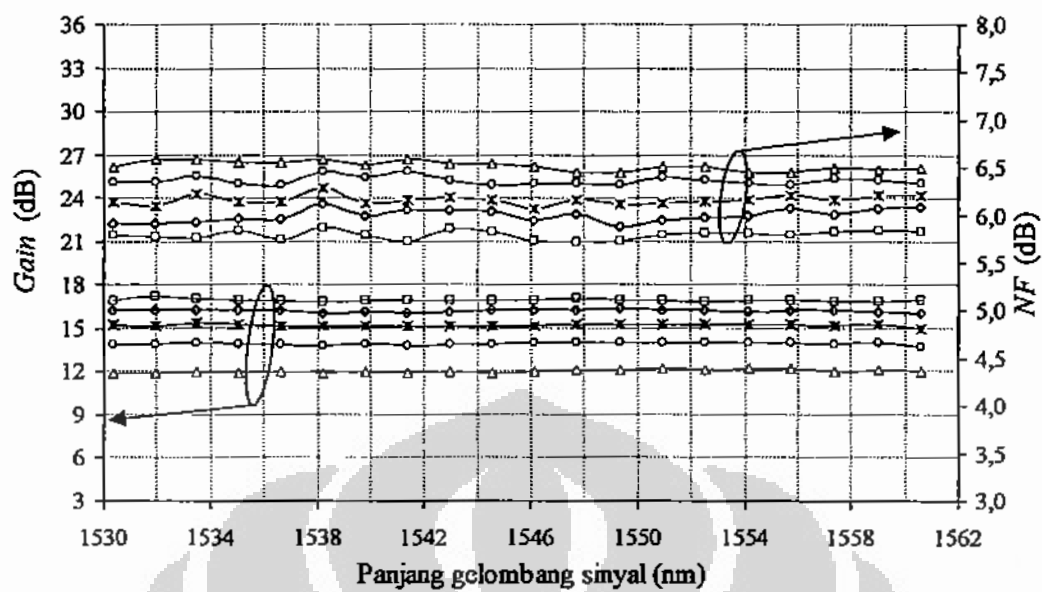
(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm



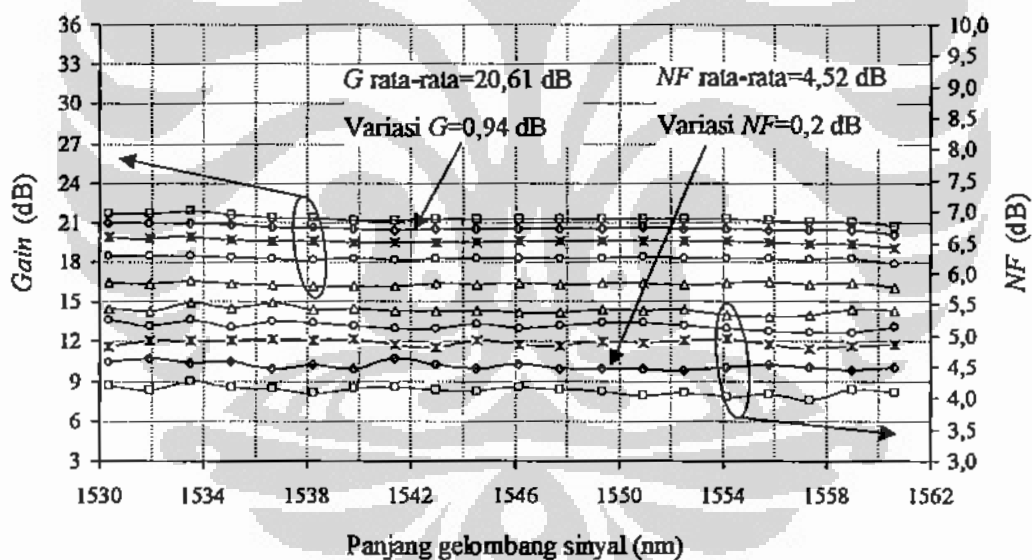
(e) Daya Sinyal Masukan -22,7 dBm

Gambar 5.10. Gain dan *NF* Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang *EDFA* 8m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.

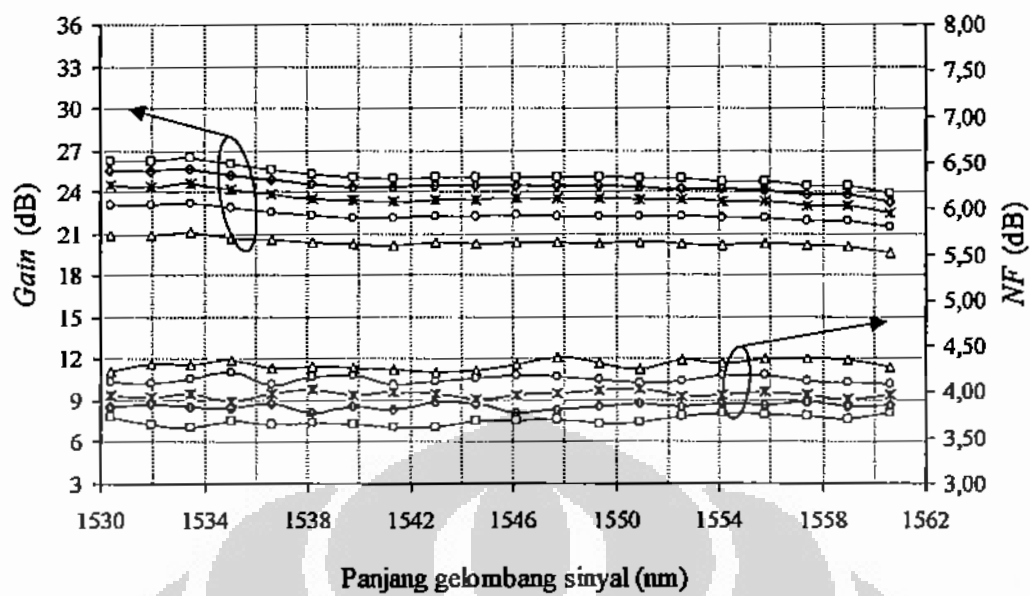
Sumber: Hasil eksperimen



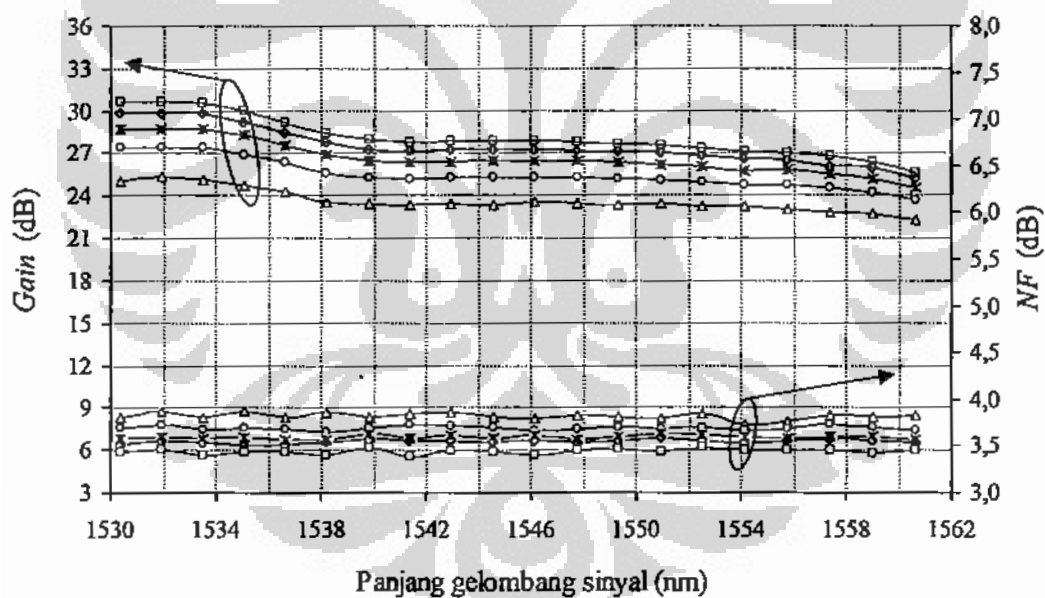
(a) Daya Sinyal Masukan -2,7 dBm



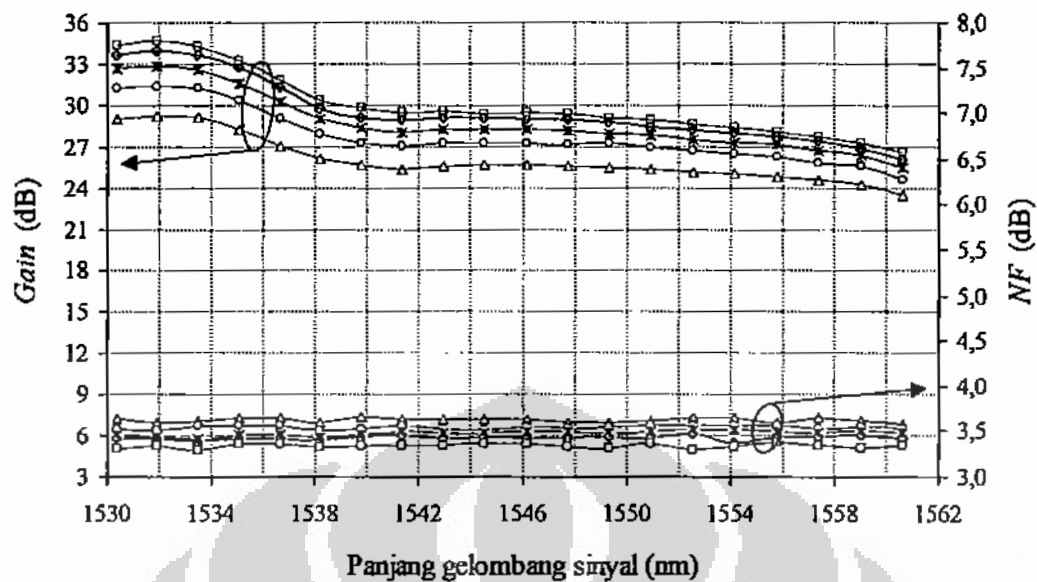
(b) Daya Sinyal Masukan -7,7 dBm



(c) Daya Sinyal Masukan -12,7 dBm



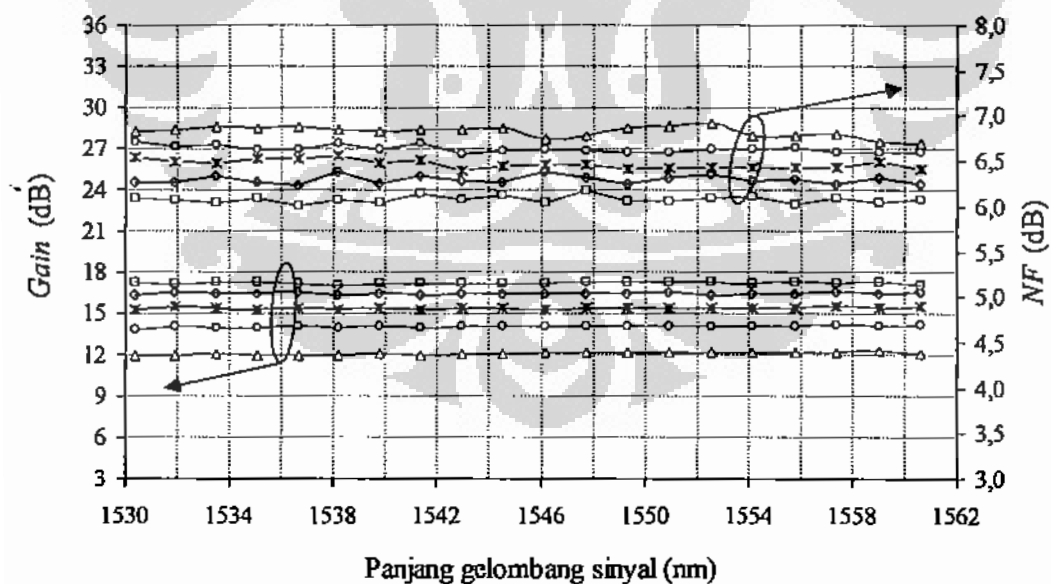
(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm



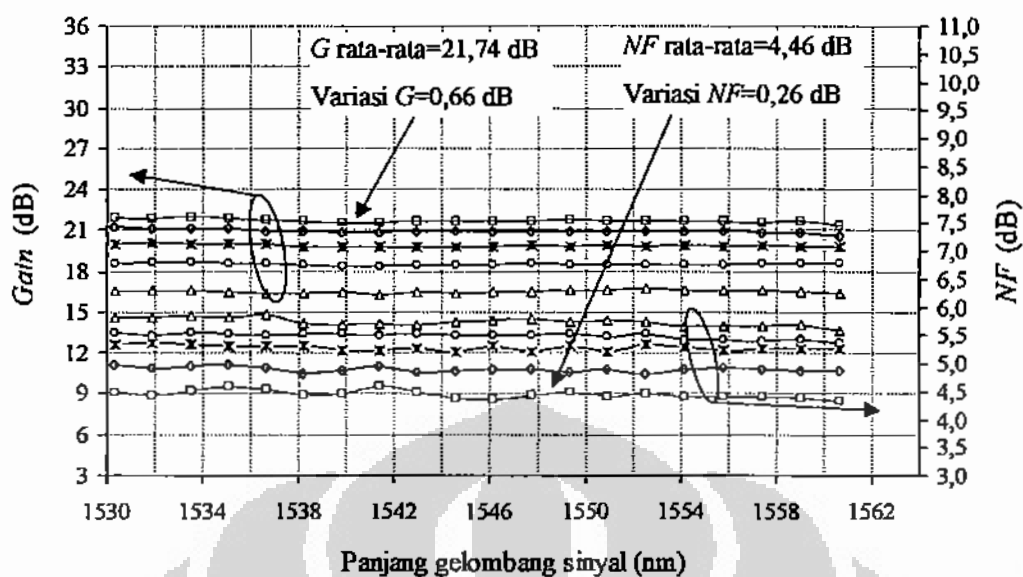
(e) Daya Sinyal Masukan $-22,7$ dBm

Gambar 5.11. Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 9 m dan Daya Pompa: $\Delta = 20$ mW, $\circ = 30$ mW, $*$ = 40 mW, $\diamond = 50$ mW dan $\square = 60$ mW.

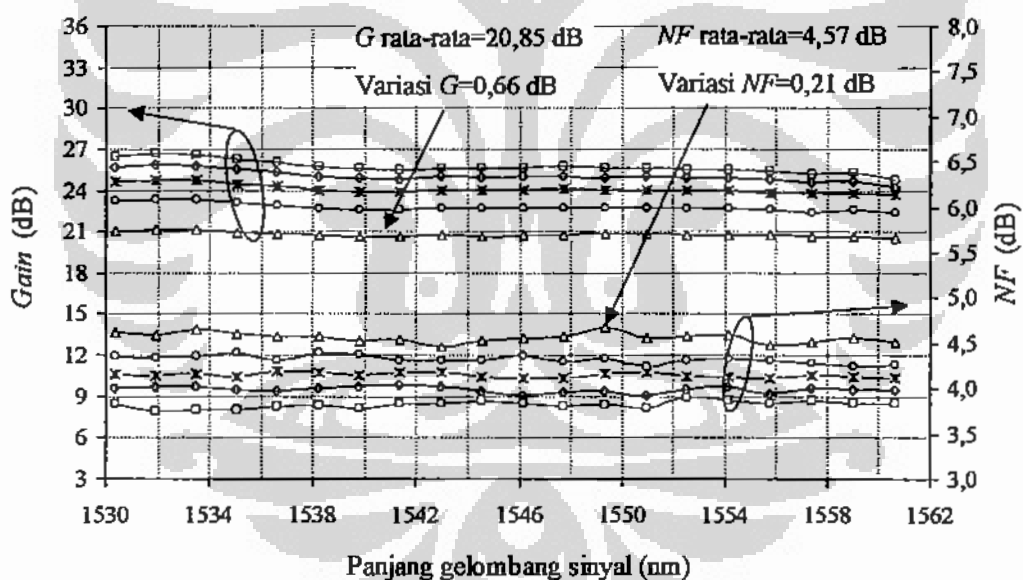
Sumber: Hasil eksperimen



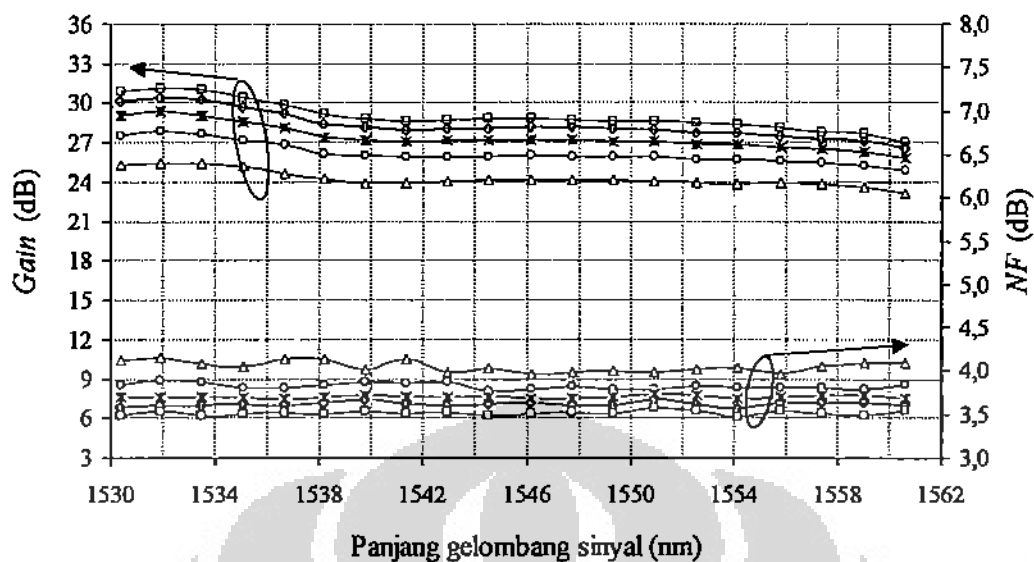
(a) Daya Sinyal Masukan $-2,7$ dBm



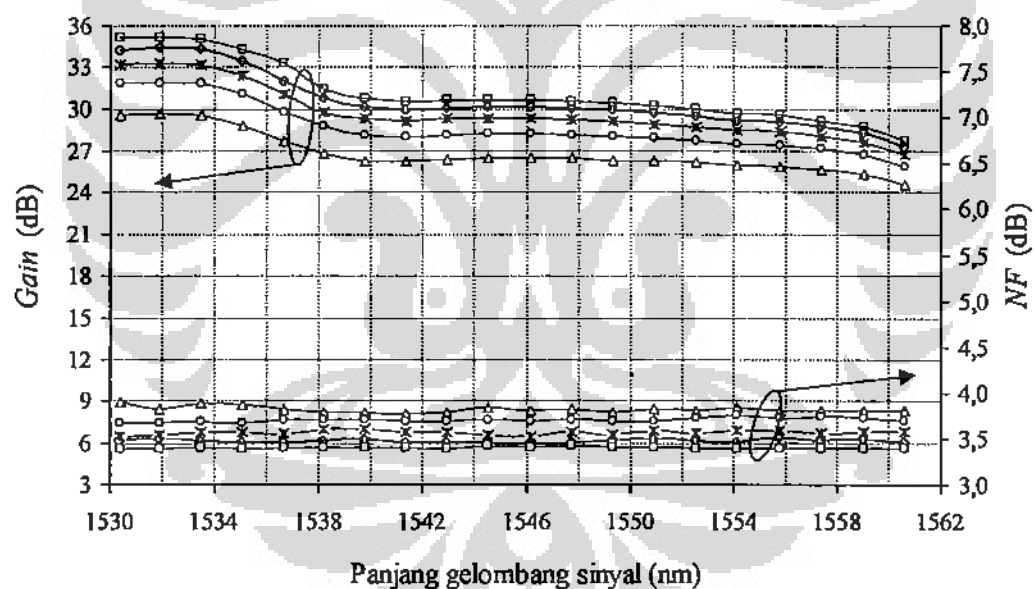
(b) Daya Sinyal Masukan -7,7 dBm



(c) Daya Sinyal Masukan -12,7 dBm



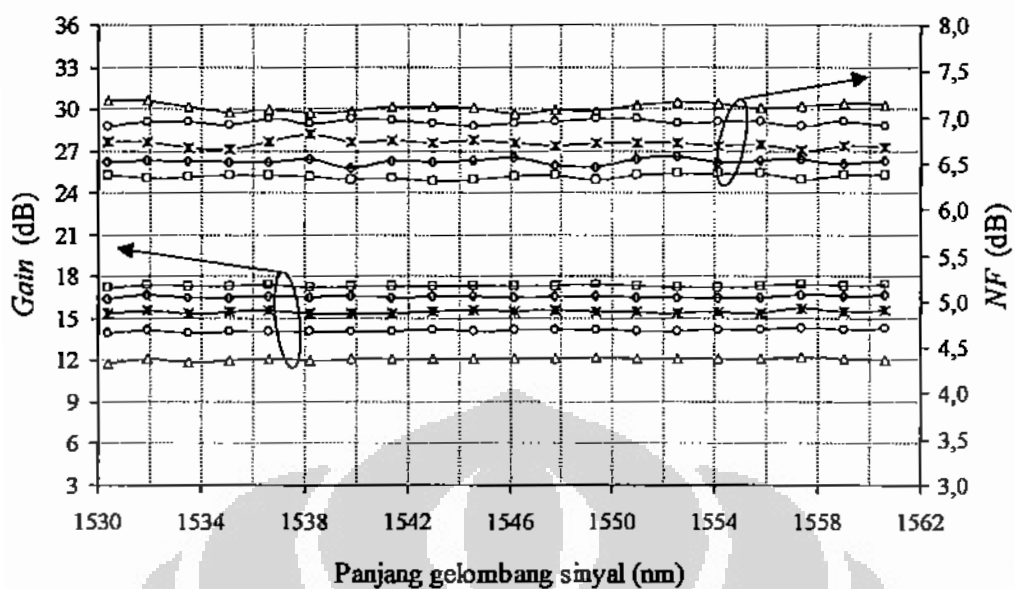
(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm



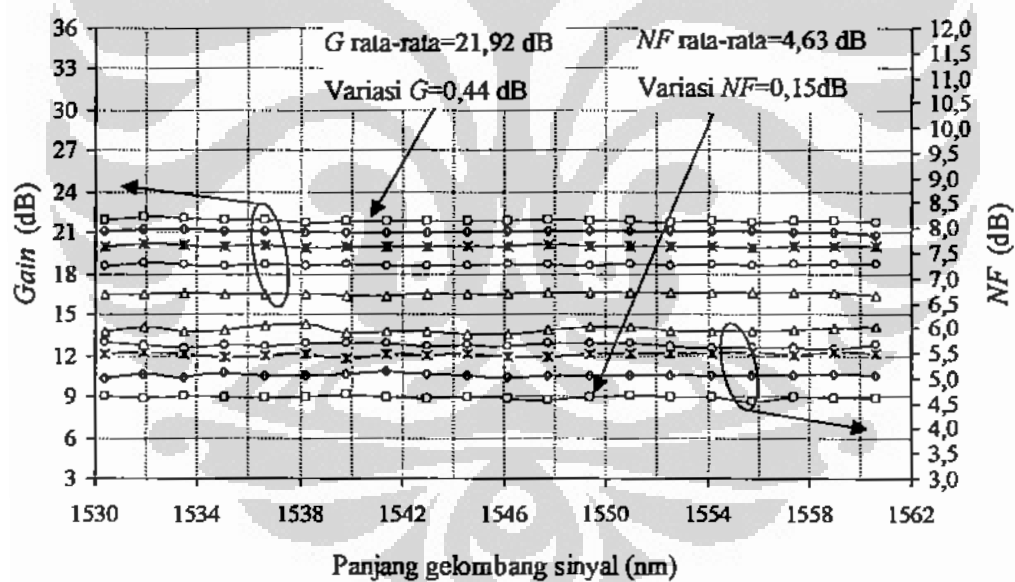
(e) Daya Sinyal Masukan -22,7 dBm

Gambar 5.12. *Gain* dan *NF* Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang *EDFA* 10 m dan Daya Pompa: Δ = 20 mW, \circ = 30 mW, $*$ = 40 mW, \diamond = 50 mW dan \square = 60 mW.

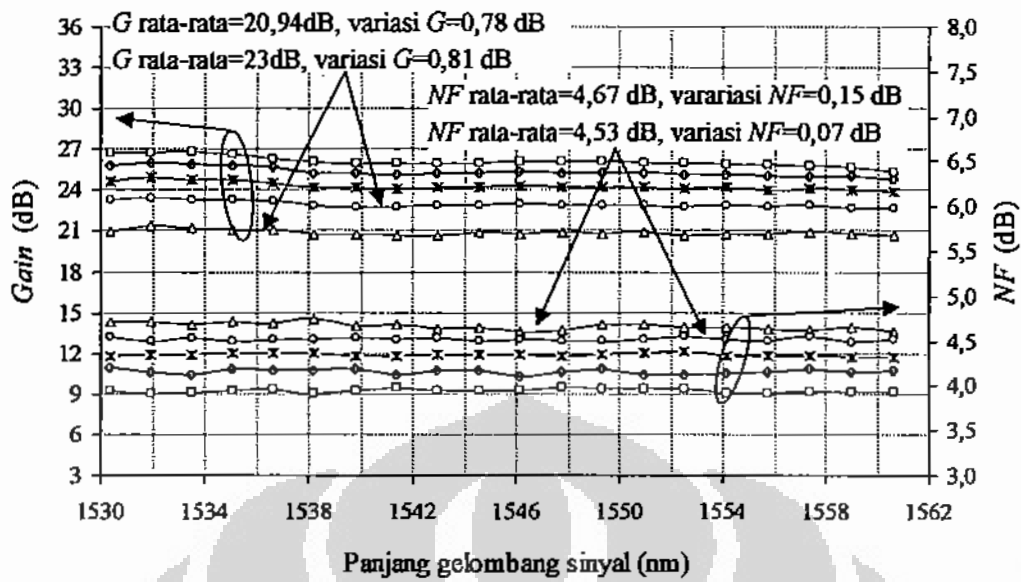
Sumber: Hasil eksperimen



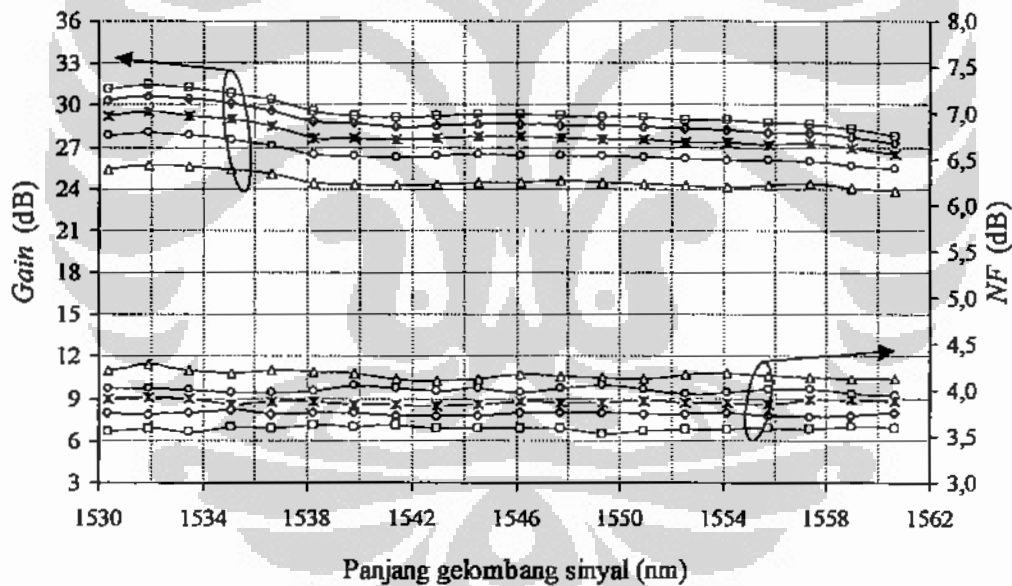
(a) Daya Sinyal Masukan -2,7 dBm



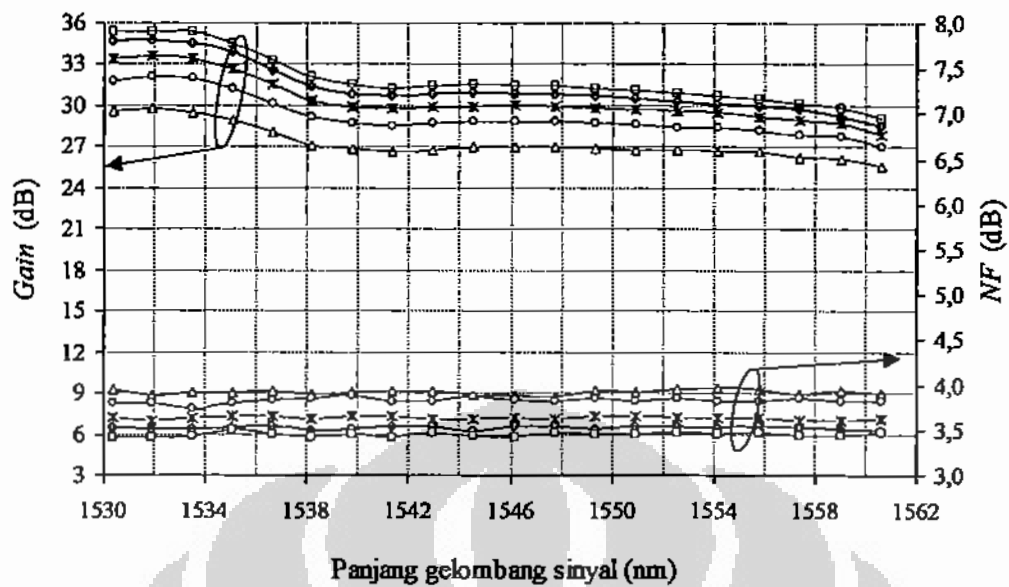
(b) Daya Sinyal Masukan -7,7 dBm



(c) Daya Sinyal Masukan -12,7 dBm



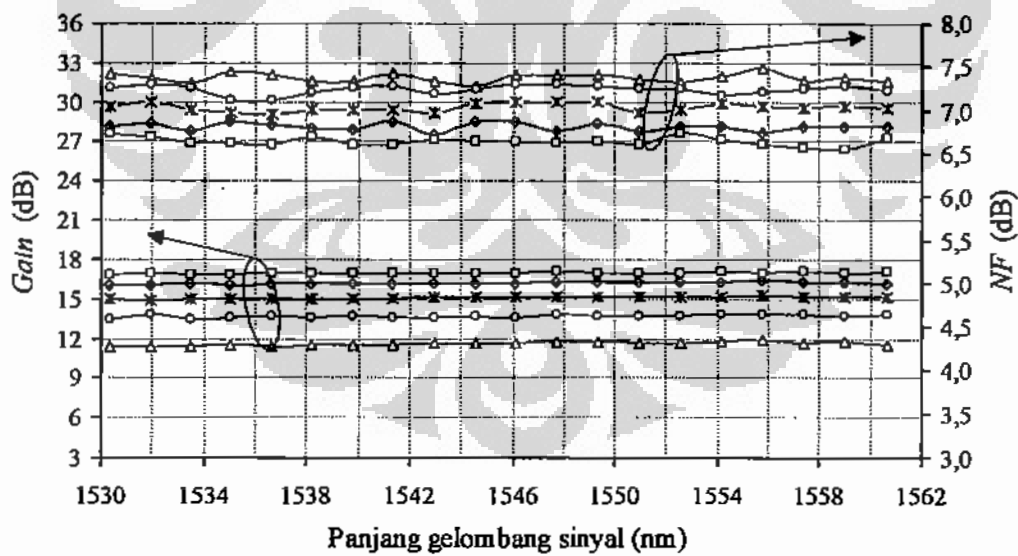
(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm



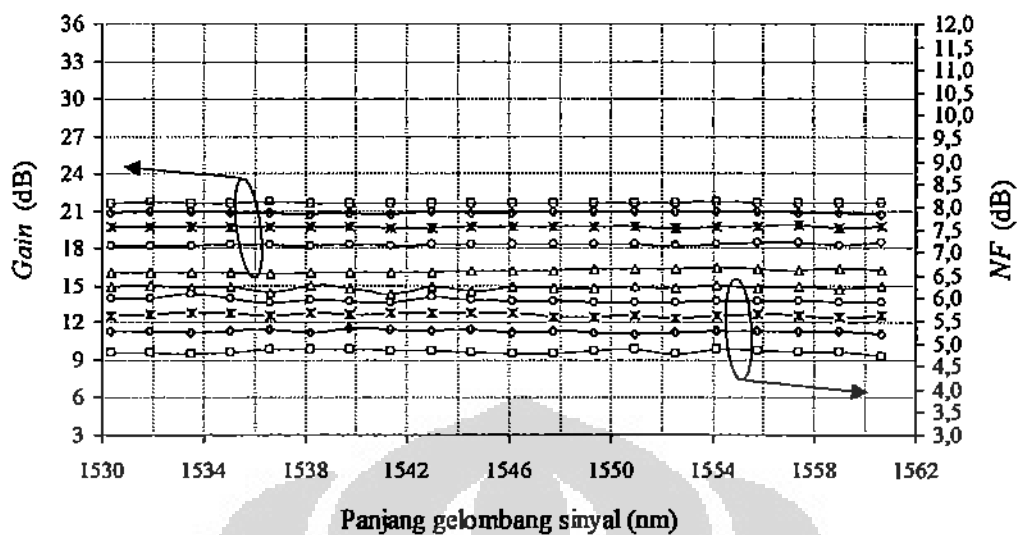
(e) Daya Sinyal Masukan -22,7 dBm

Gambar 5.13. Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 1m dan Daya Pompa: Δ = 20 mW, \circ = 30 mW, $*$ = 40 mW, \diamond = 50 mW dan \square = 60 mW.

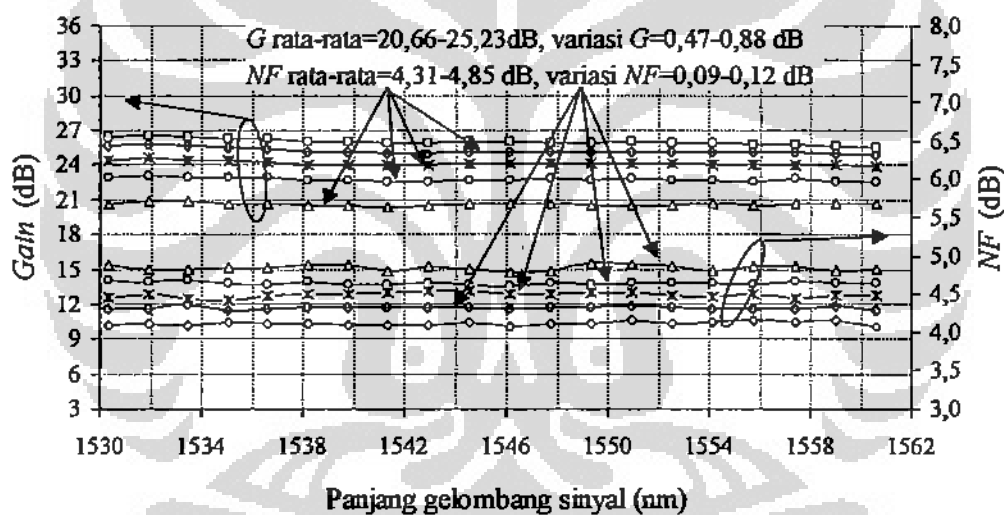
Sumber: Hasil eksperimen



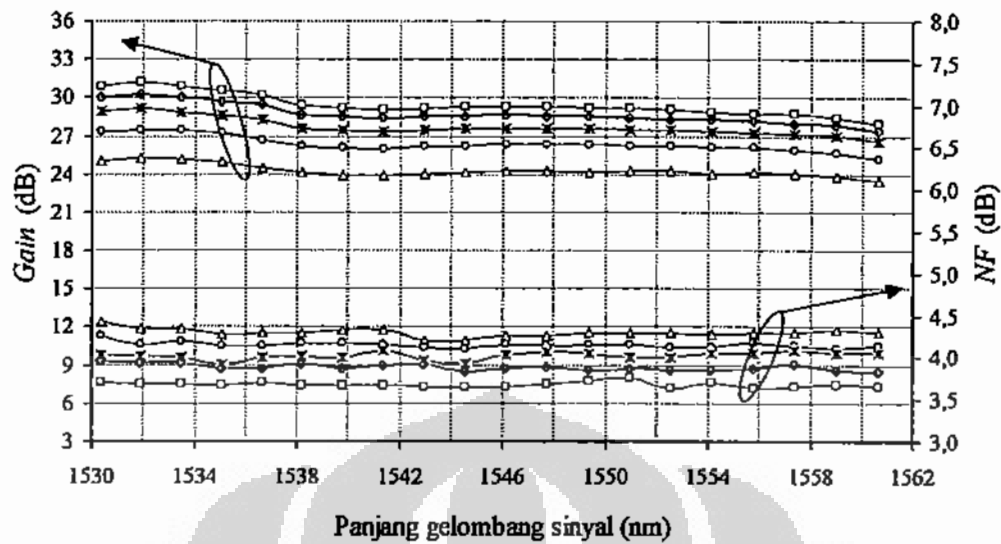
(a) Daya Sinyal Masukan -2,7 dBm



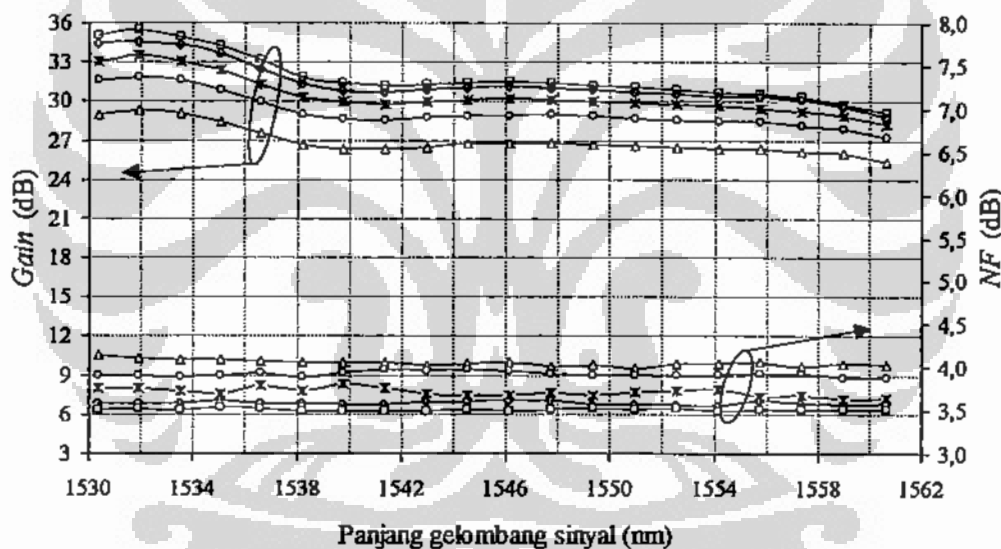
(b) Daya Sinyal Masukan -7,7 dBm



(c) Daya Sinyal Masukan -12,7 dBm



(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm



(e) Daya Sinyal Masukan -22,7 dBm

Gambar 5.14. Gain dan NF Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 12 m dan Daya Pompa: Δ = 20 mW, \circ = 30 mW, $*$ = 40 mW, \diamond = 50 mW dan \square = 60 mW.

Sumber: Hasil eksperimen

Karakteristik *gain* dan *noise figure (NF)* yang ditunjukkan pada Gambar 5.10 hingga Gambar 5.14 mempunyai perilaku secara umum sebagai berikut:

1. Daya pompa bertambah besar menghasilkan penguatan bertambah besar.

Perubahan penguatan ini terjadi untuk sinyal -2,7 dBm, -7,7 dBm, -12,7 dBm, -17,7 dBm, dan -22,7 dBm pada panjang panjang *EDFA* 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, dan 12 m. Bertambah besarnya penguatan terjadi karena jumlah *ion-ion erbium* yang berpindah dari *level ground state* ke *level excited* semakin bertambah.

2. Daya pompa bertambah besar menghasilkan *noise figure (NF)* yang semakin kecil. Perubahan nilai *NF* terjadi untuk sinyal -2,7 dBm, -7,7 dBm, -12,7 dBm, -17,7 dBm, dan -22,7 dBm pada panjang panjang *EDFA* 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, dan 12 m. Nilai *NF* akan semakin kecil bilamana nilai faktor inversi populasinya semakin bertambah besar. Nilai faktor inversi populasi merupakan perbandingan antara selisih jumlah *ion-ion erbium* pada *level excited state* dengan jumlah *ion-ion erbium* yang ada pada *level ground state* dan dibagi dengan jumlah *ion-ion erbium* pada *level excited state*. Nilai perbandingan akan semakin besar bilamana jumlah *ion-ion* yang berpindah ke *level excited state* semakin besar. Perpindahan dalam jumlah yang bertambah besar akan terjadi bilamana daya pompa bertambah besar.

Perilaku karakteristik *gain* dan *noise figure* secara kuantitatif dapat dinyatakan sebagai berikut.

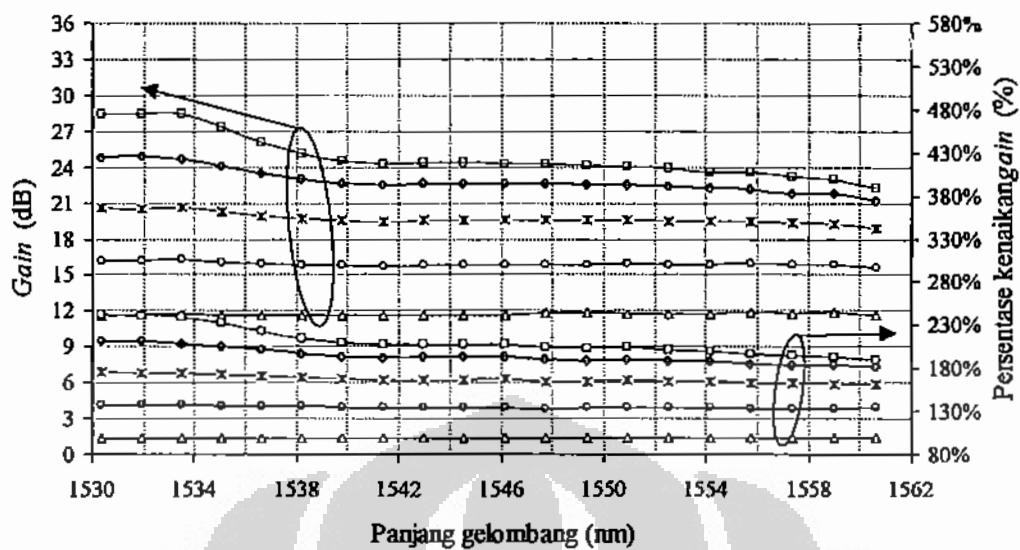
1. *EDFA* dengan panjang 8 m mempunyai variasi *gain* < 0,5-1 dB, dan *gain* yang dicapai < 17 dB untuk daya sinyal masukan -2,7 dBm dan daya pompa 20 mW hingga 60 mW. *Gain* ≥ 20 dB dengan kerataan < 1 dB tidak pernah dicapai untuk panjang 8 m. *NF* tertinggi 6,46 dB dan terendah 3,24 dB.
2. *EDFA* dengan panjang 9 m mempunyai variasi *gain* < 1 dB, dan *gain* yang dicapai ≤ 21 dB untuk daya sinyal masukan -7,7 dBm dengan daya pompa 50 mW. *NF* tertinggi 6,61 dB dan terendah 3,30 dB.
3. *EDFA* dengan panjang 10 m mempunyai variasi *gain* ≤ 1 dB, dan *gain* yang dicapai ≤ 23 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm dengan daya pompa 30 mW. *NF* tertinggi 6,90 dB dan terendah 3,39 dB.
4. *EDFA* dengan panjang 11 m mempunyai variasi *gain* < 1 dB, dan *gain* yang dicapai < 24 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm dengan daya pompa 30 mW. *NF* tertinggi 7,19 dB dan terendah 3,43 dB.

5. *EDFA* dengan panjang 12 m mempunyai variasi *gain* < 1 dB, dan *gain* yang dicapai ≤ 26 dB untuk daya sinyal masukan $-12,7$ dBm dengan daya pompa 60 mW. *NF* tertinggi 7,49 dB dan terendah 3,49 dB.

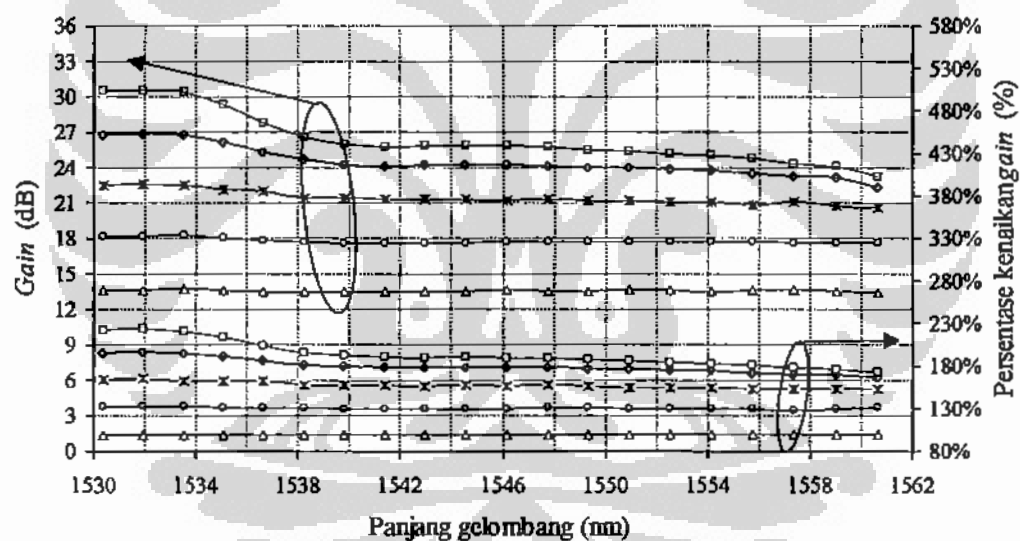
Pola karakteristik penguatan (*gain*) untuk daya sinyal masukan yang tinggi yaitu antara $-12,7$ dBm hingga $-2,7$ dBm memberikan hasil yang cenderung rata. Kenyataan ini tidak sesuai dengan pola *ASE*, pola *emission* dan *absorption cross section EDFA*. Kejadian ini akan memberikan konsekuensi bahwa hasil simulasi tidak akan sesuai dengan hasil pengukuran secara empiris (pengukuran di laboratorium). Hasil simulasi untuk daya sinyal antara $-12,7$ dBm hingga $-2,7$ dBm yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 mempunyai hasil tidak sama dengan hasil secara eksperimen. Hasil simulasi menyerupai hasil eksperimen untuk sinyal pada daya $-22,7$ dBm.

Hasil eksperimen menunjukkan sinyal daya besar cenderung rata penguatan yang dihasilkannya. Hal ini terjadi karena efek saturasi perpindahan *ion-ion erbium* dari *level ground state* ke *level excited state*. Pada sinyal daya besar nampak bahwa sinyal pada panjang gelombang sekitar 1531 nm mengalami saturasi yang sangat kuat dibandingkan dengan sinyal yang ada pada panjang gelombang sekitar 1550 nm. Akibat efek saturasi ini penguatan yang dihasilkan cenderung untuk rata, namun nilai penguatannya (*gain*-nya) rendah. Semakin rendahnya faktor inversi populasi akibat efek saturasi mengakibatkan nilai *NF* semakin tinggi.

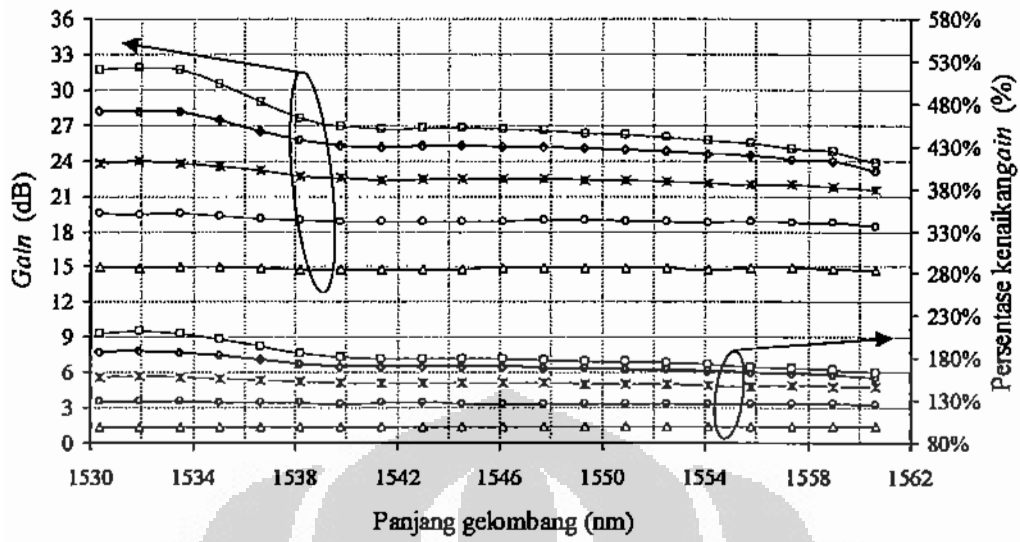
Gambar 5.15 hingga Gambar 5.19 menunjukkan persentase perubahan gain untuk sinyal $-7,7$ dBm, $-12,7$ dBm, $-17,7$ dBm, dan $-22,7$ dBm terhadap sinyal $-2,7$ dBm. Tujuan dibuatnya kurva karakteristik ini adalah untuk menunjukkan berapa persen perubahan *gain* karena pengaruh efek saturasi yang diakibatkan oleh sinyal yang besar terhadap sinyal yang lebih kecil untuk masing-masing panjang gelombang.



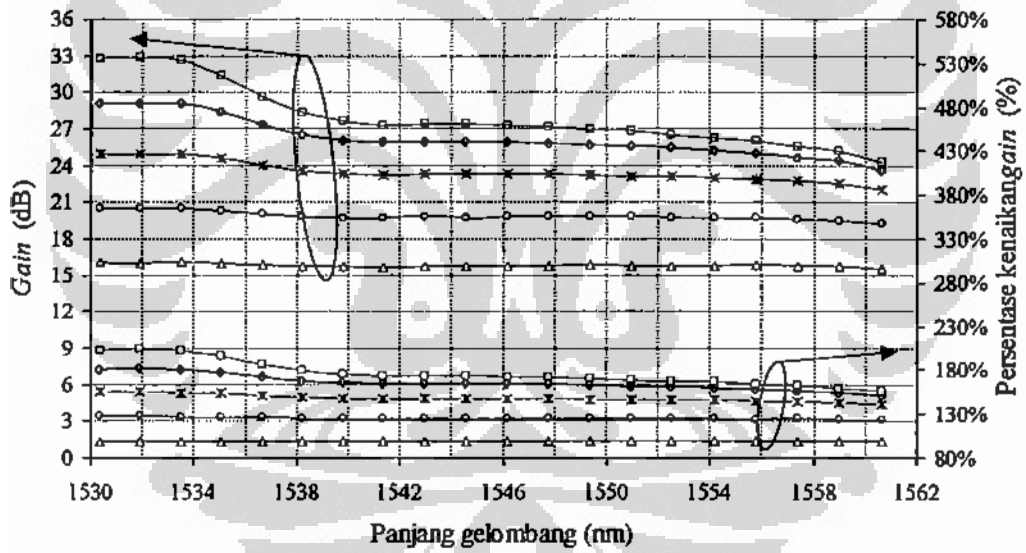
(a) Daya Pompa 20 mW



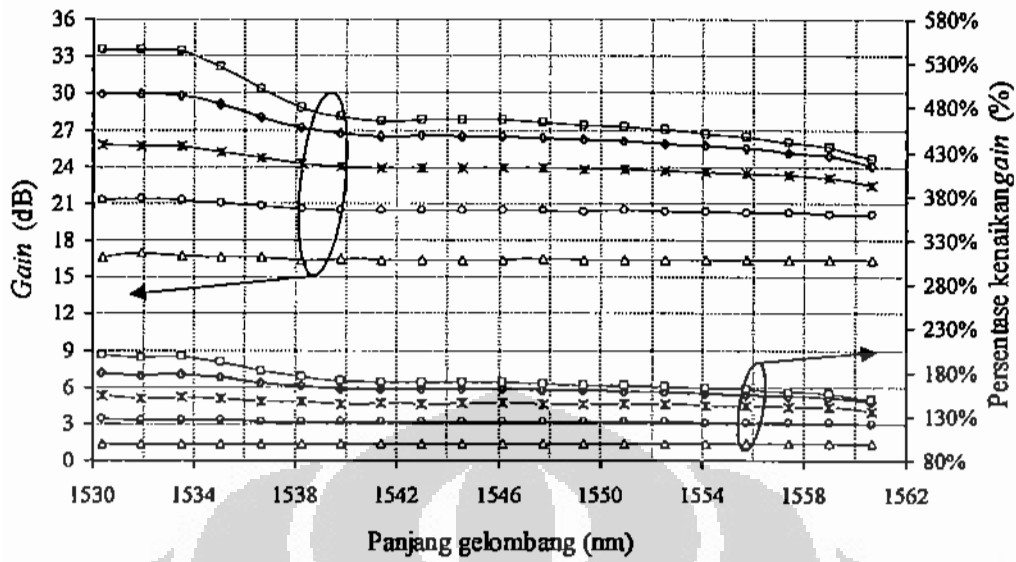
(b) Daya Pompa 30 mW



(c) Daya Pompa 40 mW



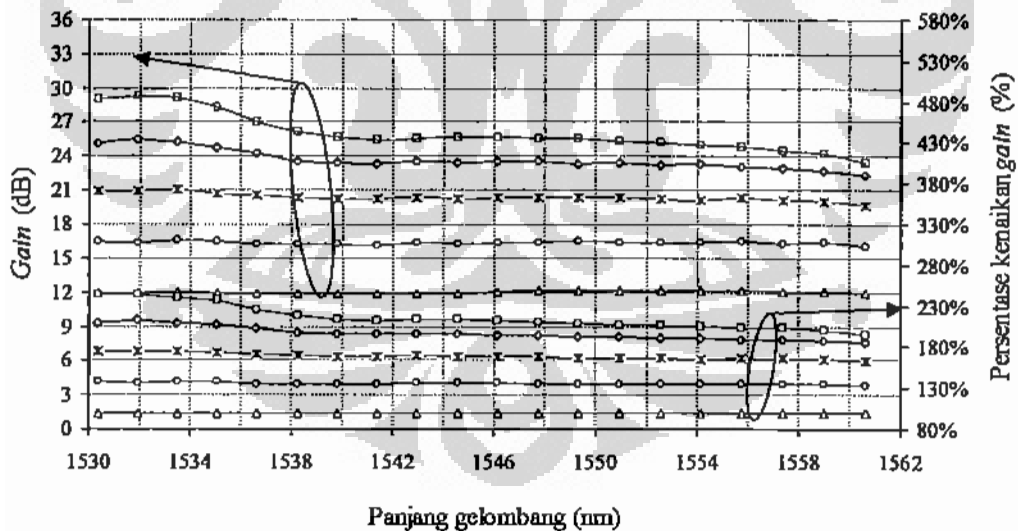
(d) Daya Pompa 50 mW



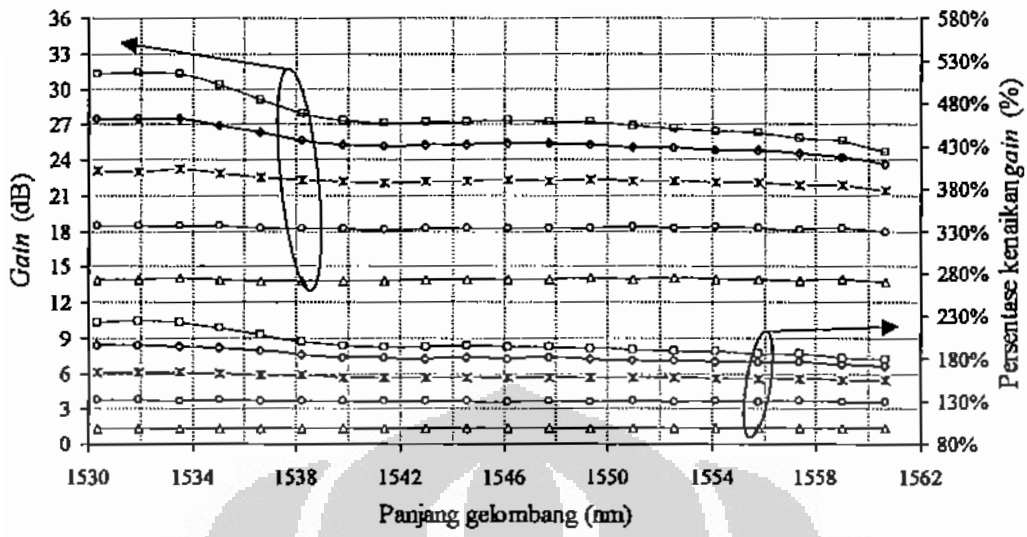
(e) Daya Pompa 60 mW

Gambar 5.15. Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 8m dan Daya Sinyal: Δ = -2,7 dBm, \circ = -7,7 dBm, $*$ = -12,7 dBm, \diamond = -17,7 dBm, dan \square = -22,7 dBm.

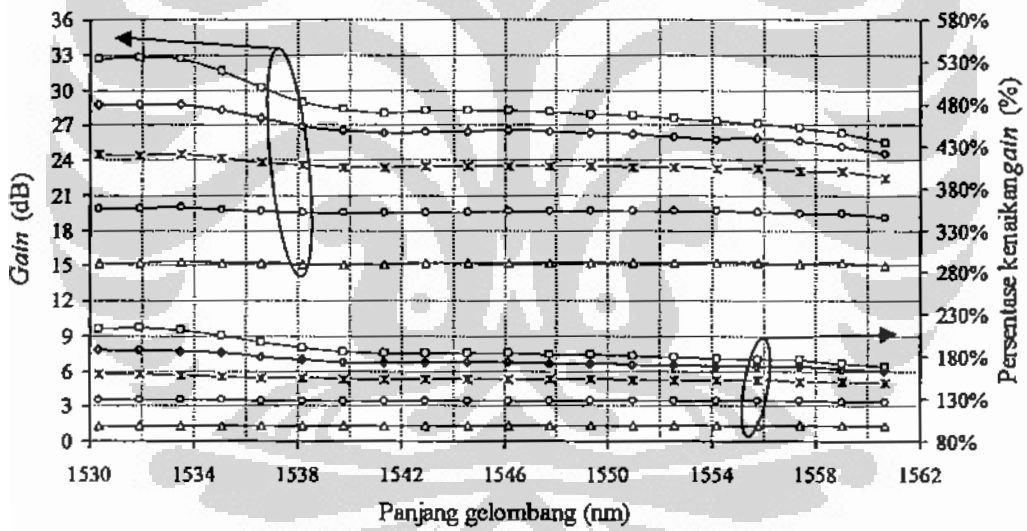
Sumber: Hasil eksperimen



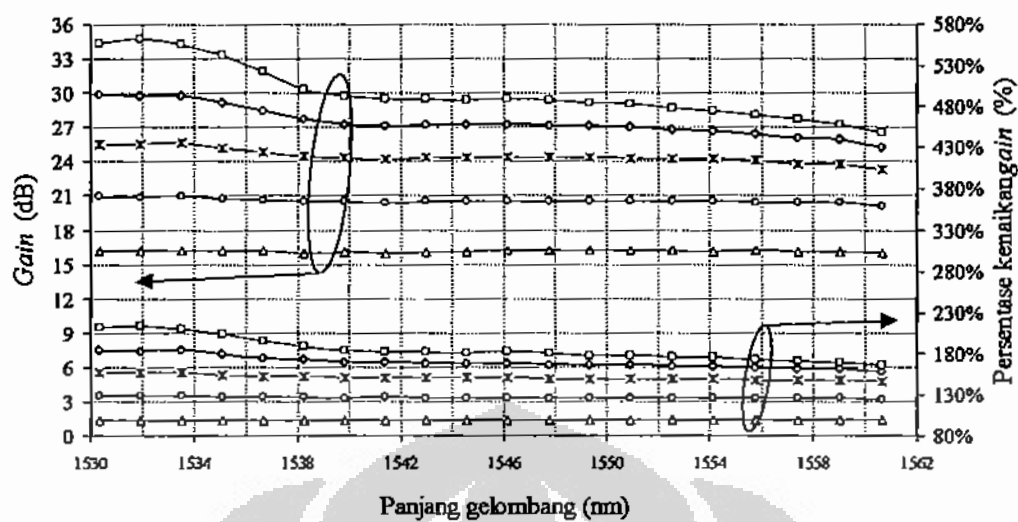
(a) Daya Pompa 20 mW



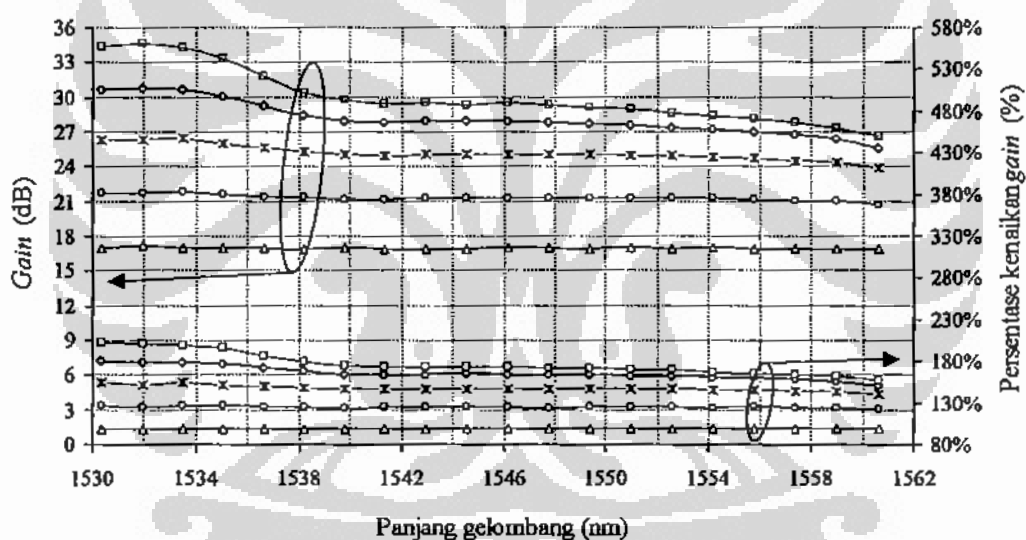
(b) Daya Pompa 30 mW



(c) Daya Pompa 40 mW



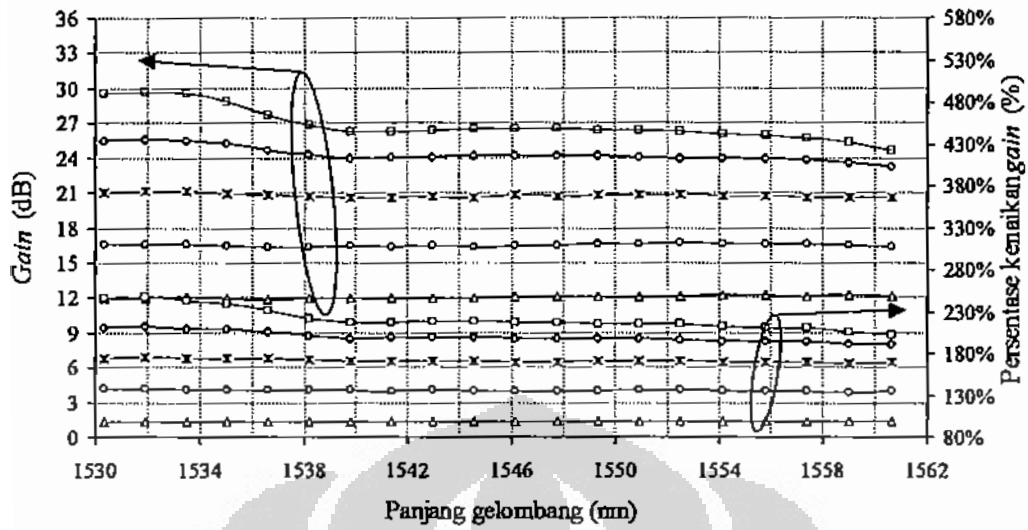
(d) Daya Pompa 50 mW



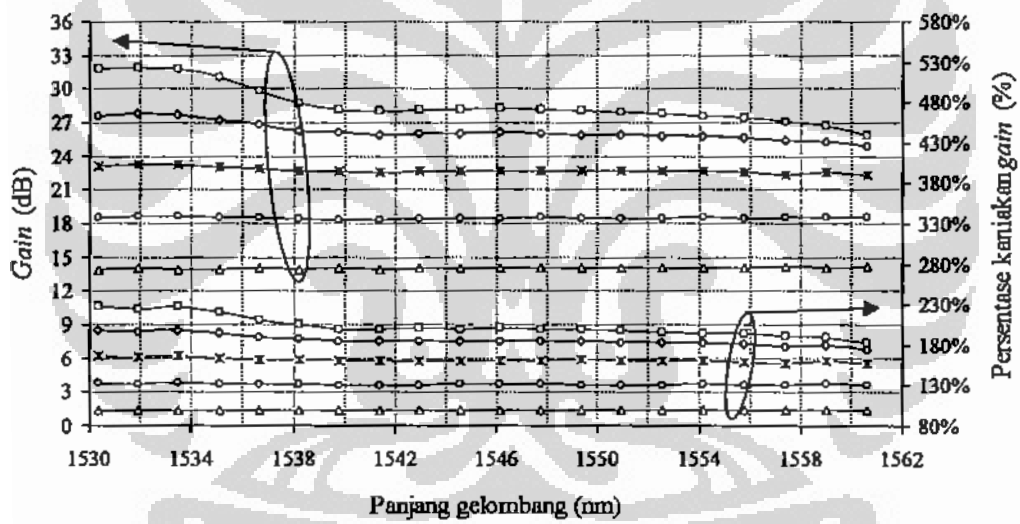
(e) Daya Pompa 60 mW

Gambar 5.16. Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang *EDFA* 9 m dan Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $\ast = -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm.

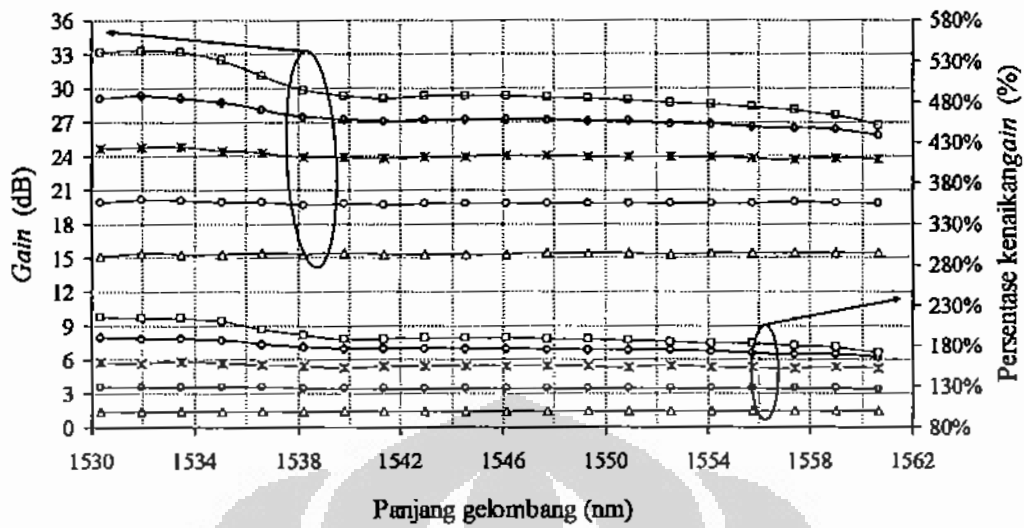
Sumber: Hasil eksperimen



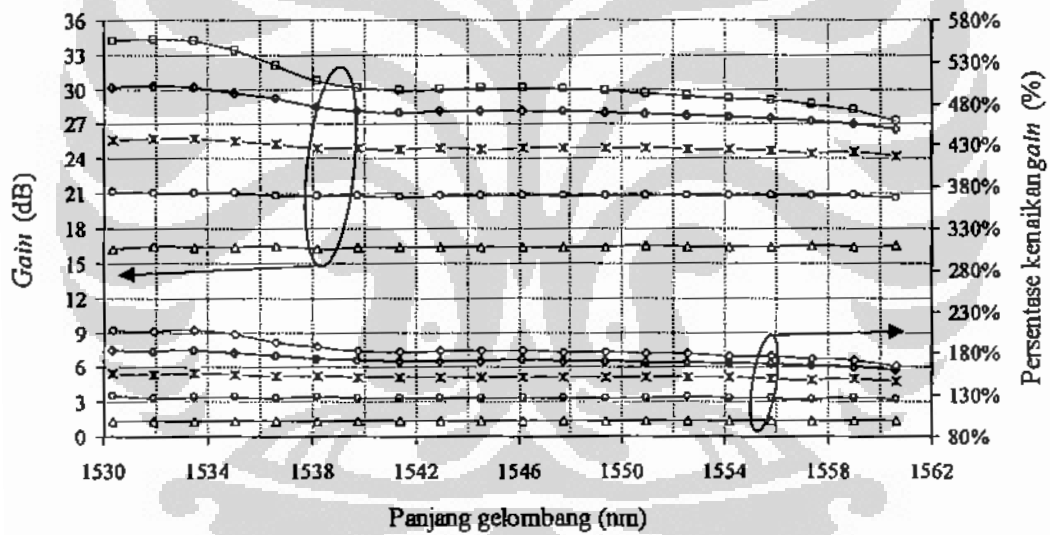
(a) Daya Pompa 20 mW



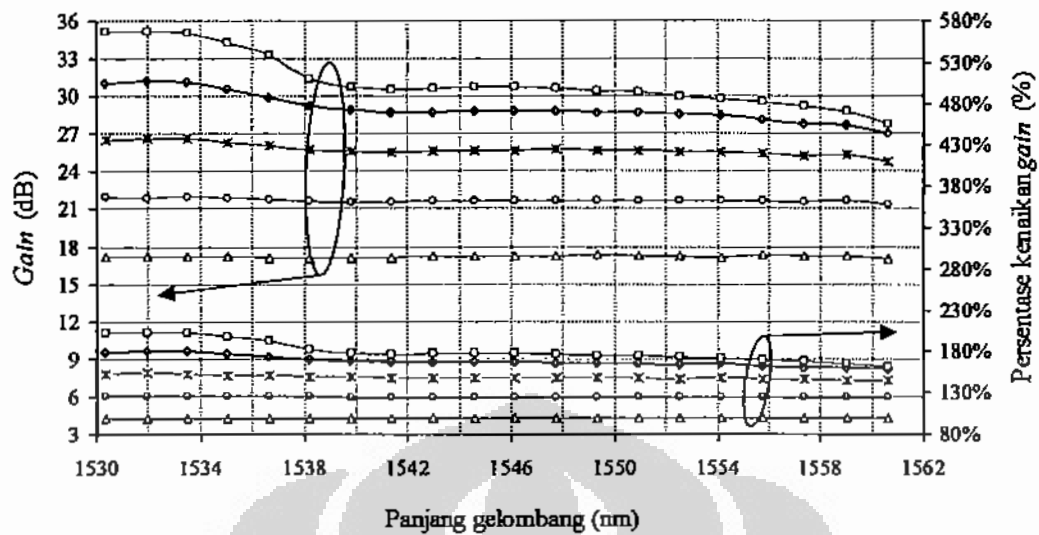
(b) Daya Pompa 30 mW



(c) Daya Pompa 40 mW



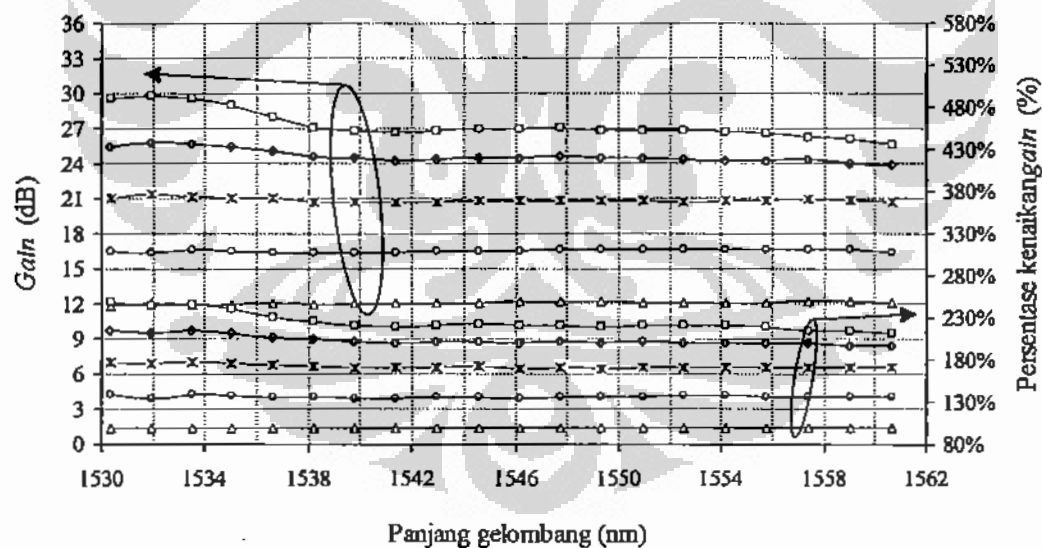
(d) Daya Pompa 50 mW



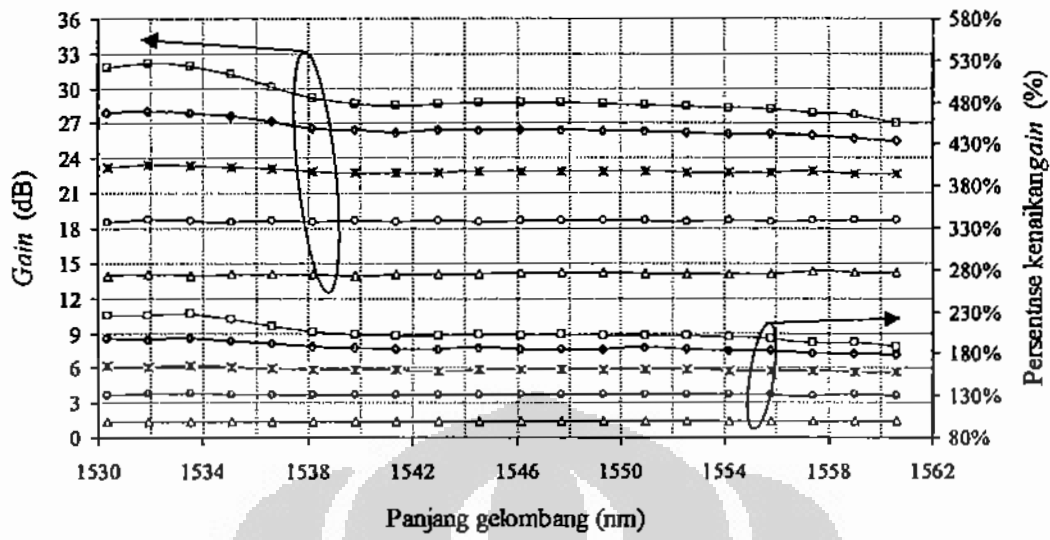
(e) Daya Pompa 60 mW

Gambar 5.17. Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang EDFA 10 m dan Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ = $-12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm.

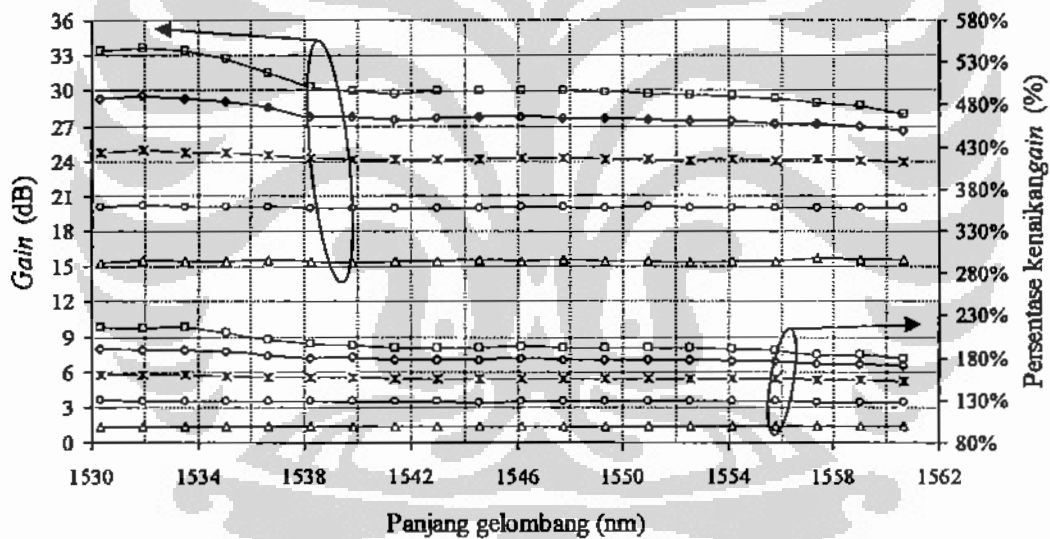
Sumber: Hasil eksperimen



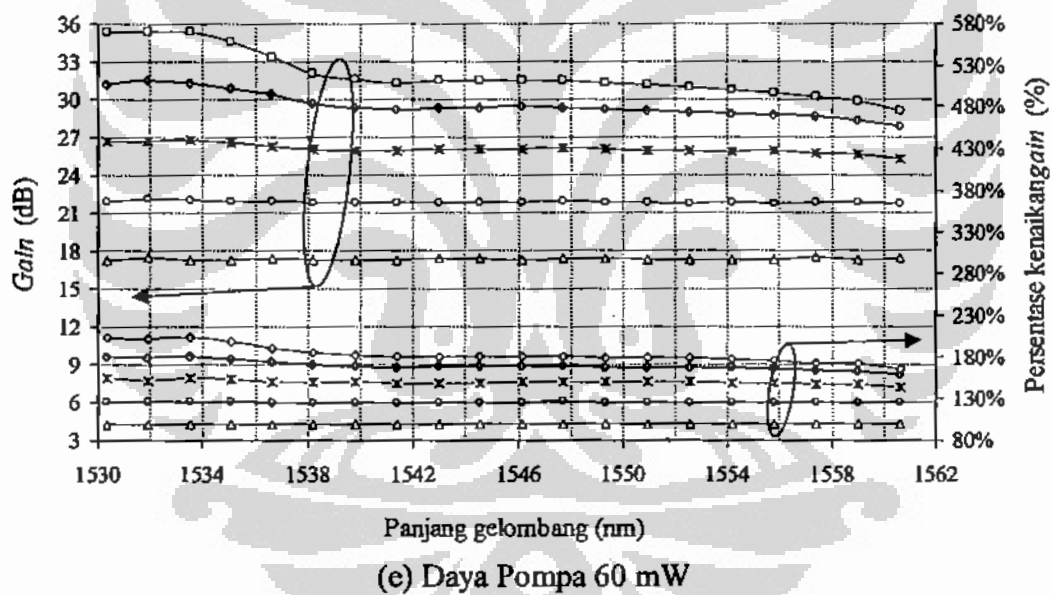
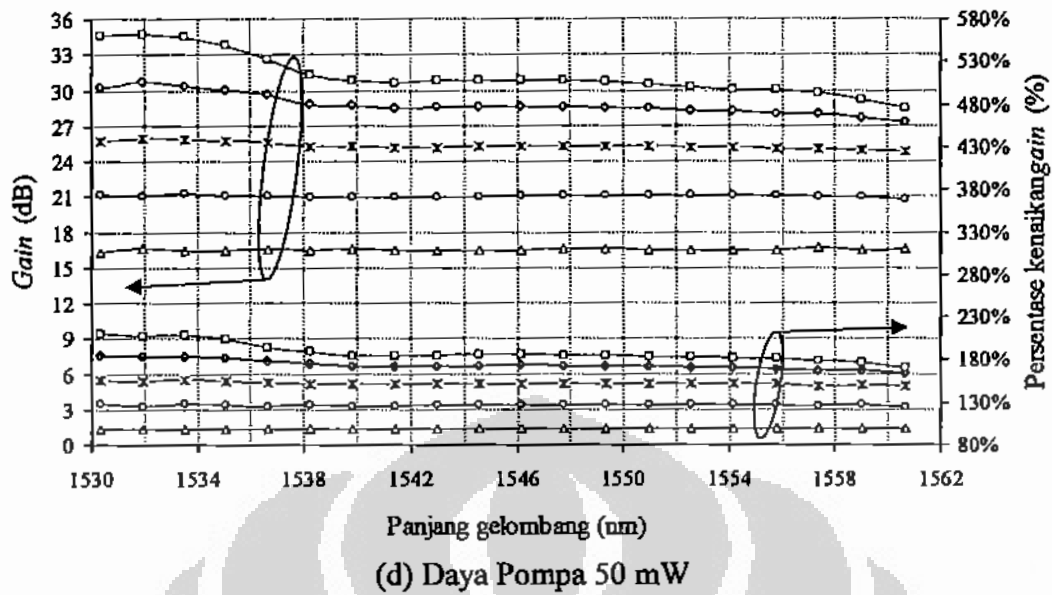
(a) Daya Pompa 20 mW



(b) Daya Pompa 30 mW

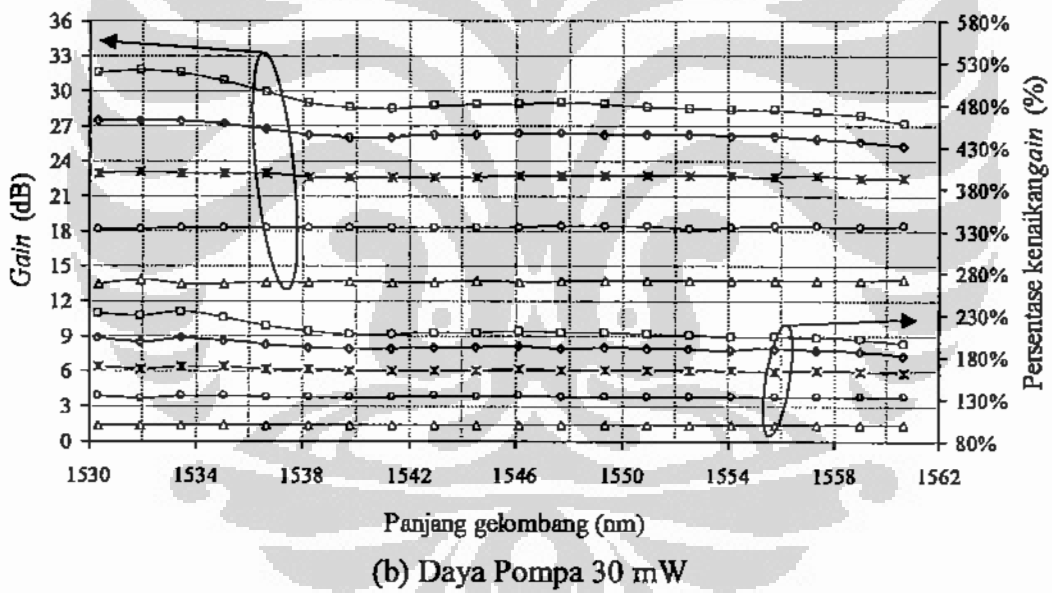
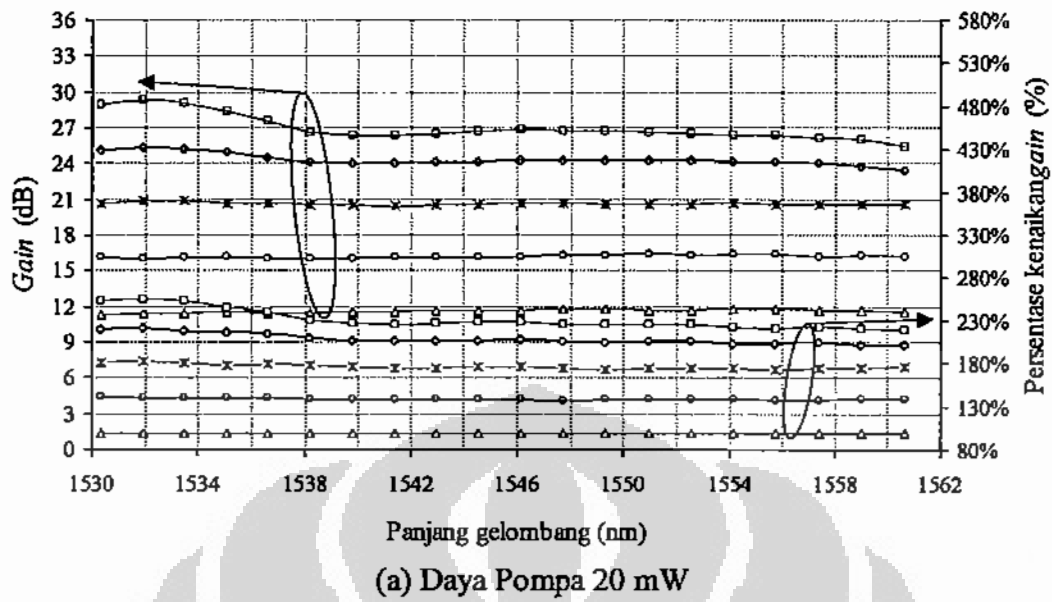


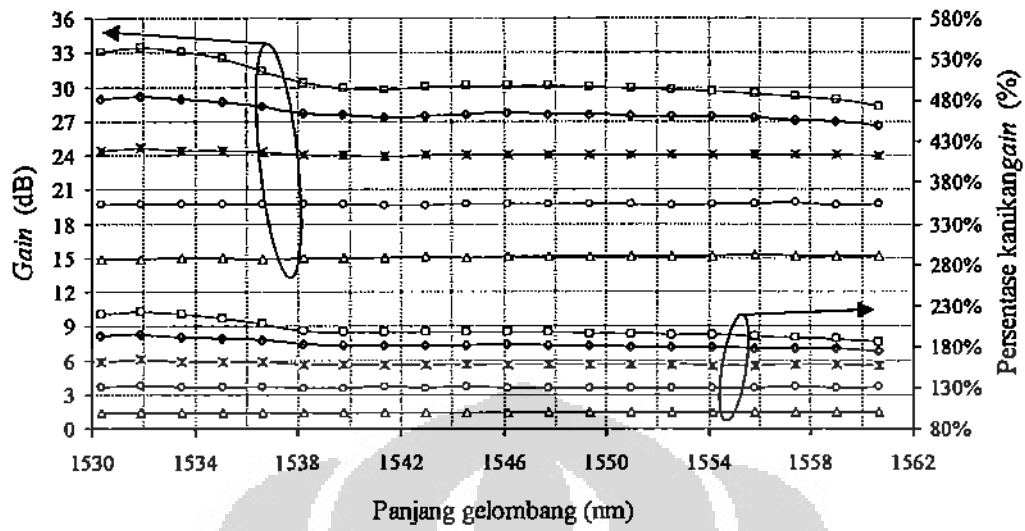
(c) Daya Pompa 40 mW



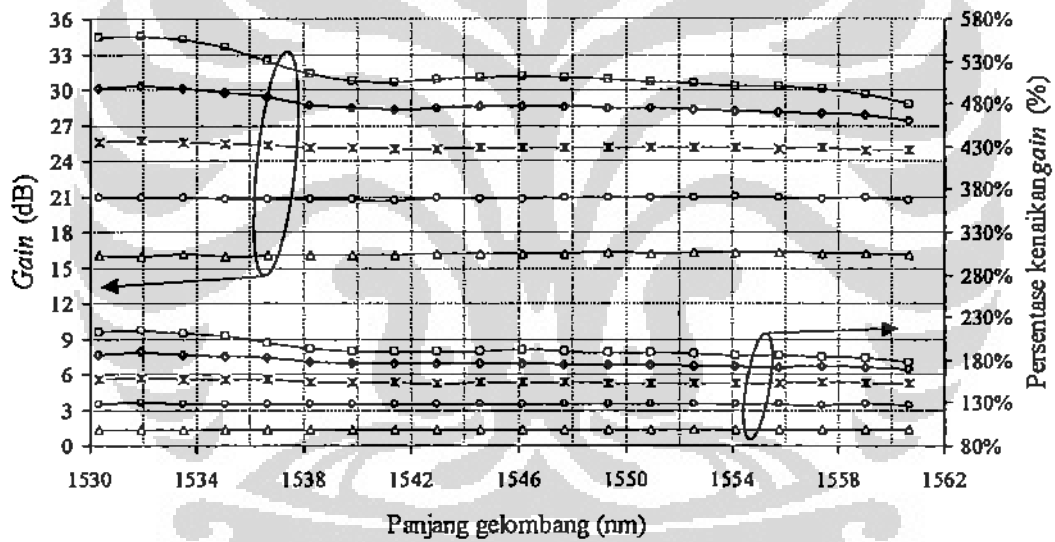
Gambar 5.18. Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang *EDFA* 11 m dan Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ $= -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm.

Sumber: Hasil eksperimen

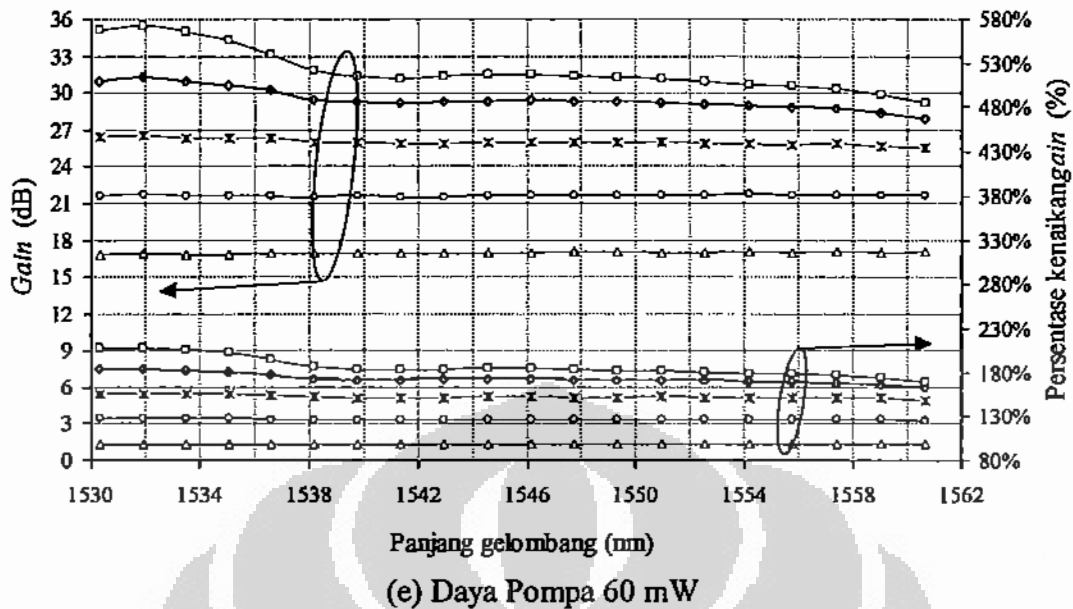




(c) Daya Pompa 40 mW



(d) Daya Pompa 50 mW



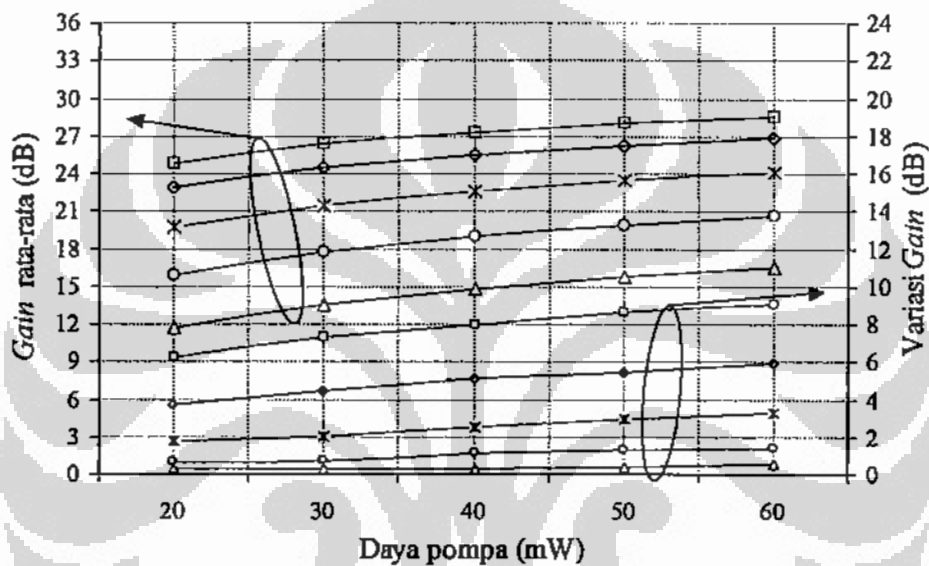
Gambar 5.19. Gain dan Persentase Kenaikan Gain Sebagai Fungsi Panjang Gelombang Untuk Panjang *EDFA* 12 m dan Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ $= -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm.

Sumber: Hasil eksperimen

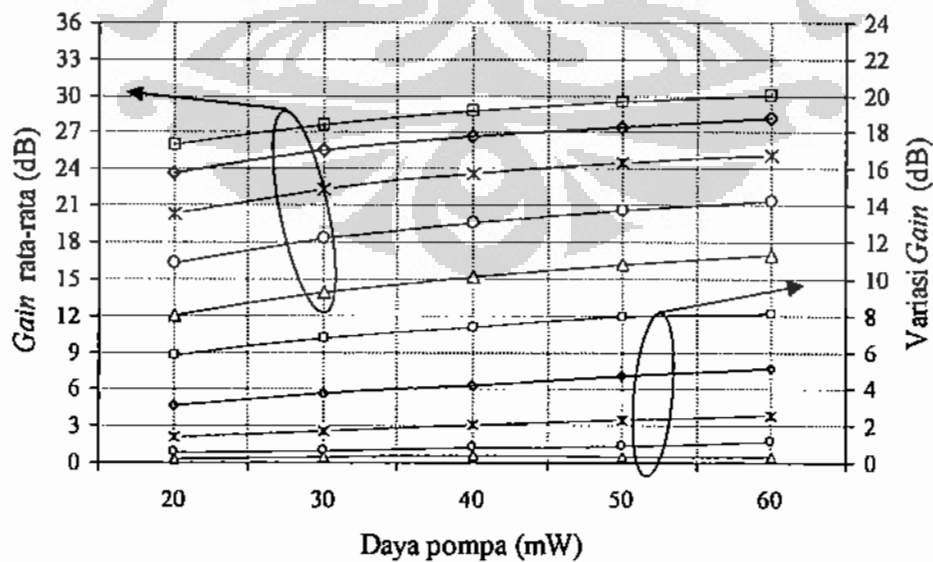
Gambar 5.15 hingga 5.19 menunjukkan bahwa daya sinyal yang semakin besar menimbulkan saturasi inversi populasi yang semakin besar. Hal ini mengakibatkan penurunan nilai *gain* yang dihasilkan. Penurunan nilai tidak merata sepanjang rentang panjang gelombang. Penurunan *gain* untuk sinyal $-22,7$ dBm pada rentang panjang gelombang 1530,33-1535,04 nm mempunyai penurunan 30% lebih besar dibandingkan dengan penurunan *gain* pada rentang panjang gelombang 1536,61-1560,61 nm. Hal ini menunjukkan bahwa *spectral hole burning* pada rentang panjang gelombang 1530,33-1535,04 nm lebih dalam 30% dibandingkan dengan pada rentang 1536,61-1560,61 nm. Penurunan *gain* untuk sinyal $-17,7$ dBm pada rentang panjang gelombang 1530,33-1535,04 nm mempunyai penurunan 15% lebih besar dibandingkan dengan penurunan *gain* pada rentang panjang gelombang 1536,61-1560,61 nm. Hal ini menunjukkan bahwa *spectral hole burning* pada rentang panjang gelombang 1530,33-1535,04 nm lebih dalam 15% dibandingkan dengan pada rentang 1536,61-1560,61 nm. Penurunan *gain* untuk sinyal $-12,7$ dBm dan $-7,7$ dBm mempunyai nilai penurunan yang hampir sama untuk seluruh rentang panjang gelombang *C-band*.

5.3 Karakteristik Gain dan Noise Figure (NF) Rata-rata Pada Rentang Panjang Gelombang C-band

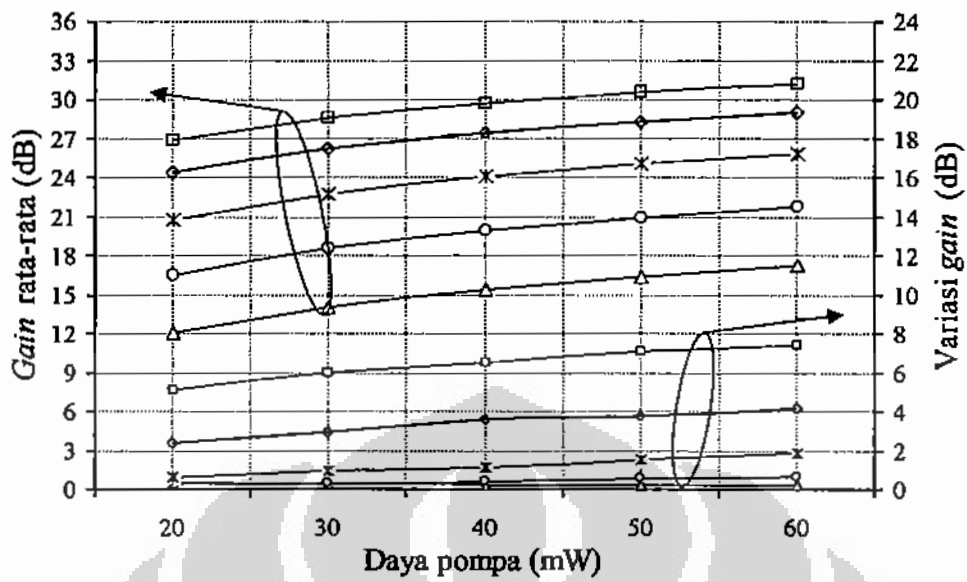
Karakteristik *Gain* dan *NF* rata-rata didapat dari hasil karakteristik *Gain* dan *NF* sebagai fungsi panjang gelombang yang ditunjukkan dalam subbab 5.2. Tujuan dibuat kurva karakteristik ini adalah untuk mengetahui berapa *gain*, *noise figure*, dan variasi *gain* rata-rata terhadap perubahan daya pompa, daya sinyal, dan panjang *EDFA*. Karakteristik *gain* rata-rata dan variasi *gain* terhadap daya pompa ditunjukkan dalam Gambar 5.20.



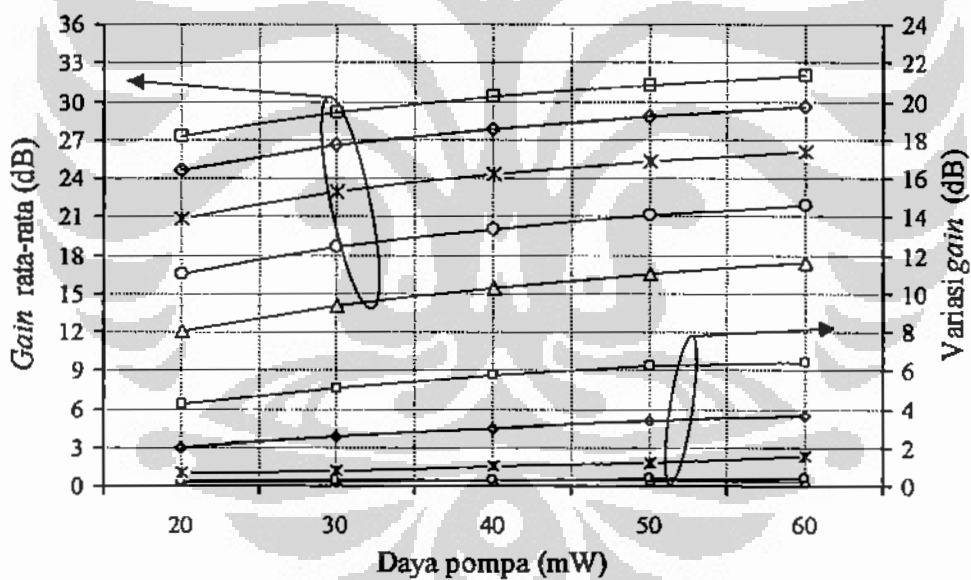
(a) Panjang *EDFA* 8m



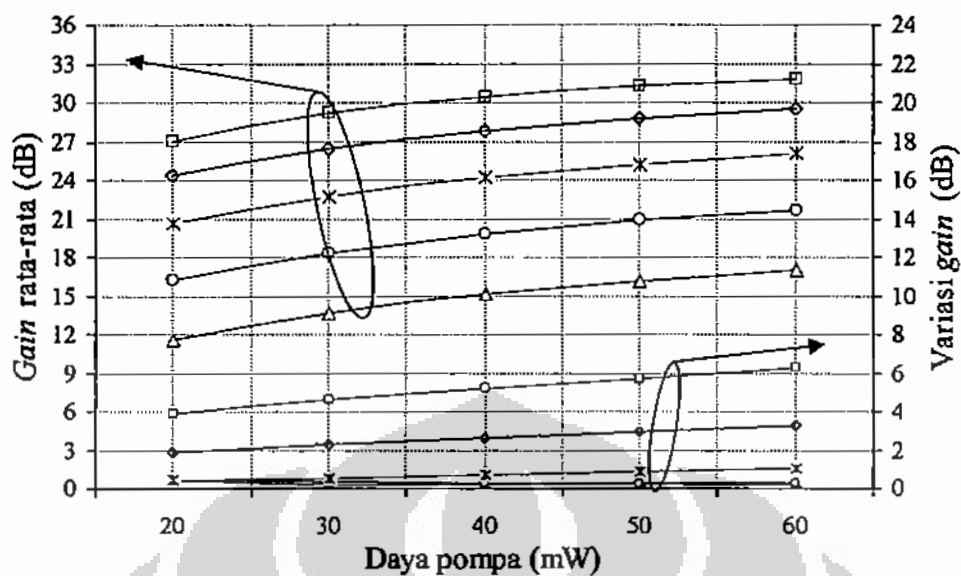
(b) Panjang *EDFA* 9 m



(c) Panjang EDFA 10 m



(d) Panjang EDFA 11 m



(e) Panjang EDFA 12 m

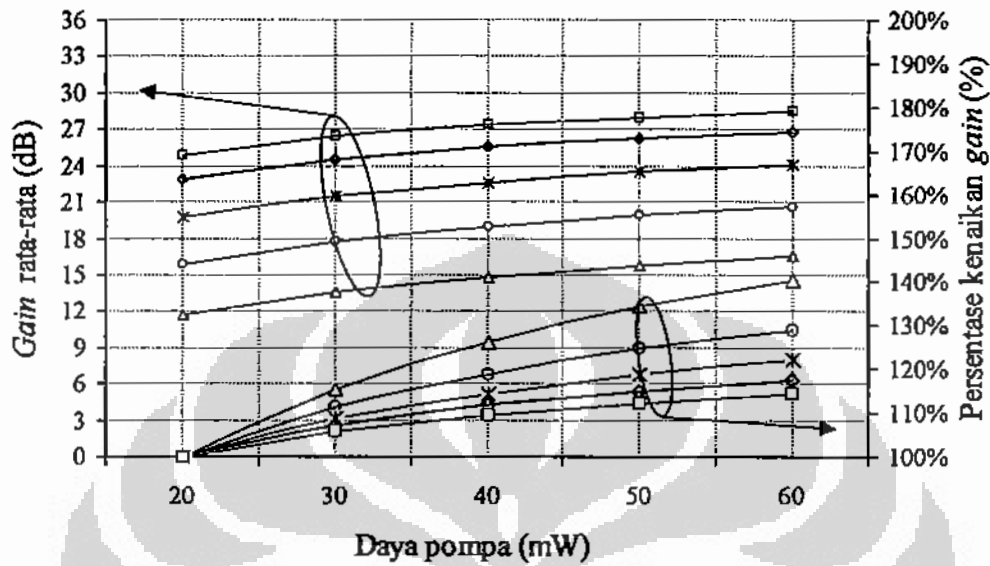
Gambar 5.20. Gain Rata-rata dan Variasi Gain Sebagai Fungsi Daya Pompa Untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $O = -7,7$ dBm, $* = -12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dBm, dan $\square = -22,7$ dBm.

Sumber: Hasil eksperimen

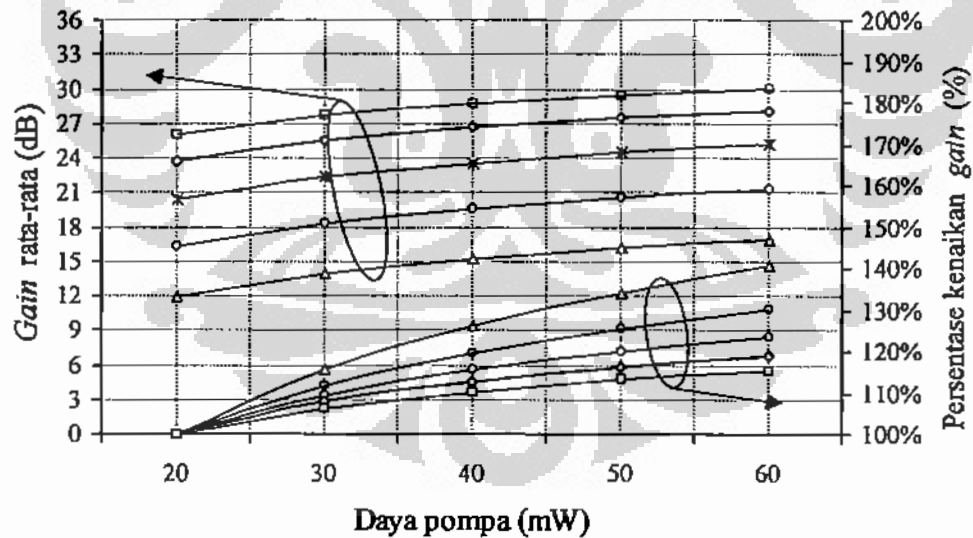
Gambar 5.20 menunjukkan perilaku bahwa *gain* rata-rata meningkat terhadap peningkatan daya pompa yang diberikan. Peningkatan terjadi untuk semua daya sinyal yang dikuatkan, dan pada semua panjang EDFA yang digunakan. Variasi *gain* semakin bertambah untuk peningkatan daya pompa yang diberikan. Variasi *gain* semakin bertambah besar untuk daya sinyal yang semakin kecil pada daya pompa dan panjang EDFA yang sama.

Variasi *gain* untuk daya sinyal besar (misal $-2,7$ dBm) adalah kecil dibandingkan dengan daya sinyal kecil (misal $-22,7$ dBm). Kenyataan ini terjadi karena efek saturasi transisi *ion-ion erbium* dari *level ground state* ke *level excited state*. Efek saturasi sinyal ini juga mengakibatkan munculnya *hole burning* pada spektrum penguatan. Semakin besar sinyal yang akan dikuatkan oleh penguat, semakin dalam dan lebar *hole* yang akan terjadi. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan umur *nonradiative* diantara *sublevel Stark* dari suatu *multiplet* yang ada pada *level energi*.

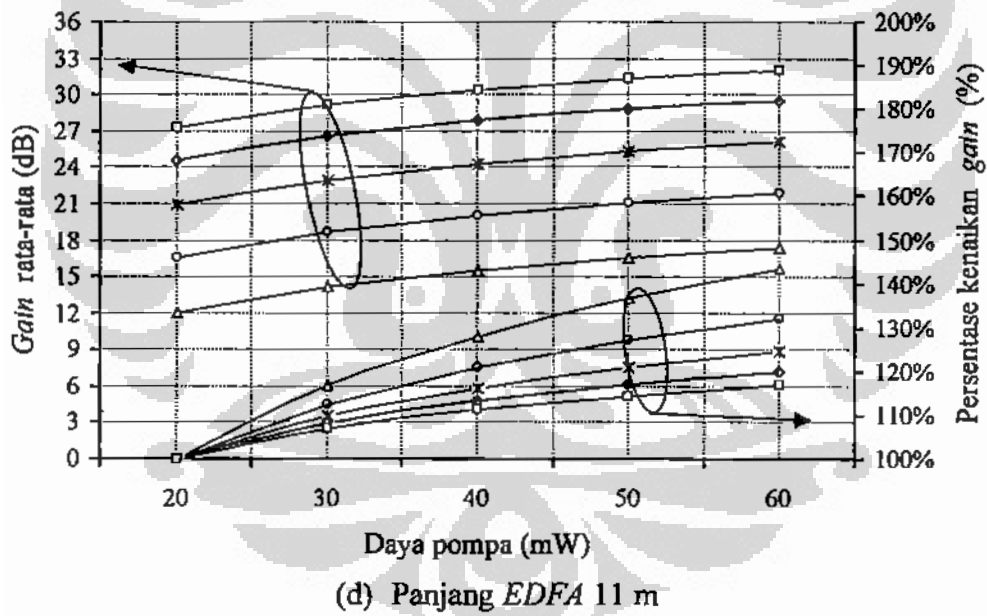
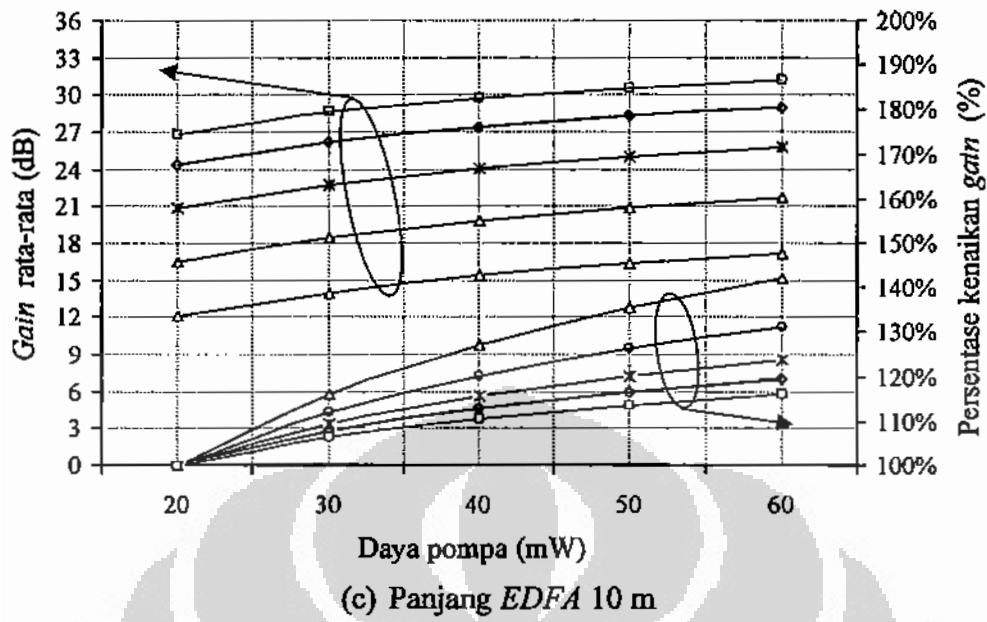
Hubungan *gain* rata-rata dan persentase kenaikan *gain* terhadap perubahan daya pompa ditunjukkan dalam Gambar 5.21.

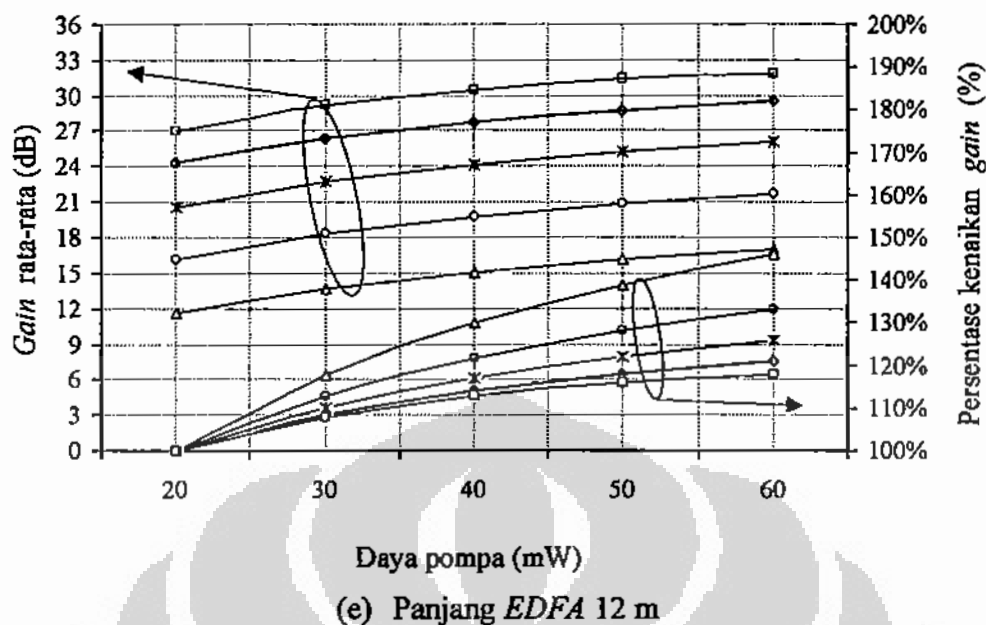


(a) Panjang *EDFA* 8 m



(b) Panjang *EDFA* 9 m



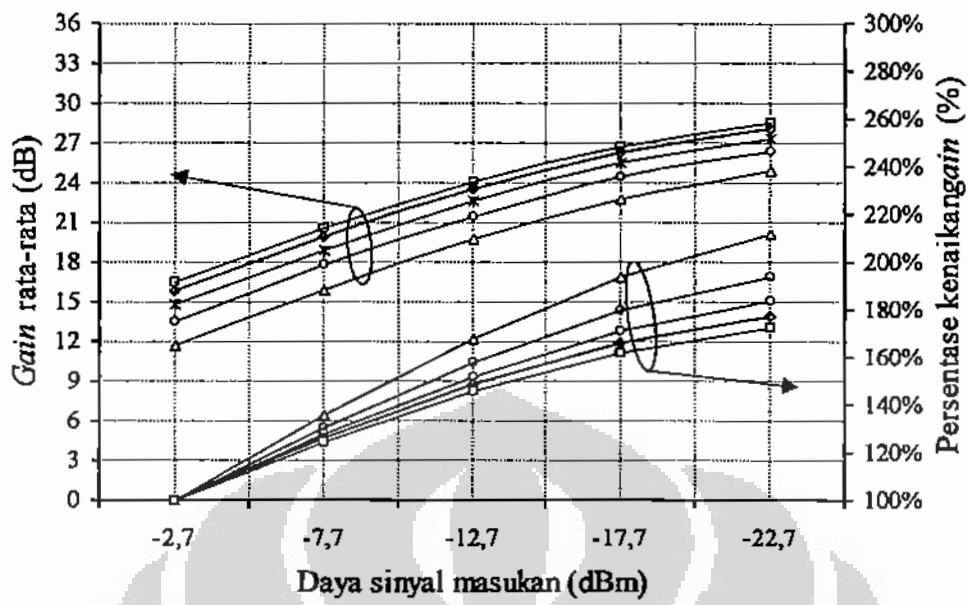


Gambar 5.21. *Gain* Rata-rata dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi Daya Pompa Untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ = $-12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dbm dan $\square = -22,7$ dBm.

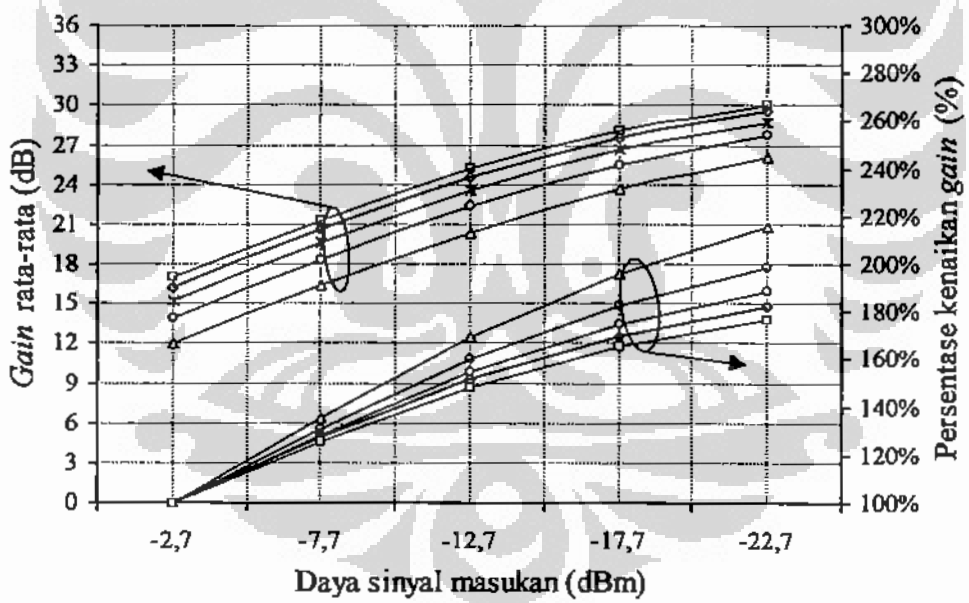
Sumber: Hasil eksperimen

Persentase kenaikan *gain* adalah perbandingan antara *gain* pada daya pompa yang lebih tinggi (30-60 mW) terhadap *gain* pada daya pompa terendah (20 mW). Gambar 5.21 menunjukkan perilaku bahwa persentase perubahan *gain* mempunyai nilai terbesar pada daya sinyal yang besar. Kenyataan ini terjadi karena ion-ion erbium mudah terinversi populasinya pada daya sinyal yang kecil dengan daya pompa yang rendah. Penambahan daya pompa pada sinyal yang kecil tidak banyak menambah nilai *gain* yang tinggi, namun *gain* yang dihasilkan nilainya jauh lebih tinggi dibanding dengan *gain* daya sinyal besar.

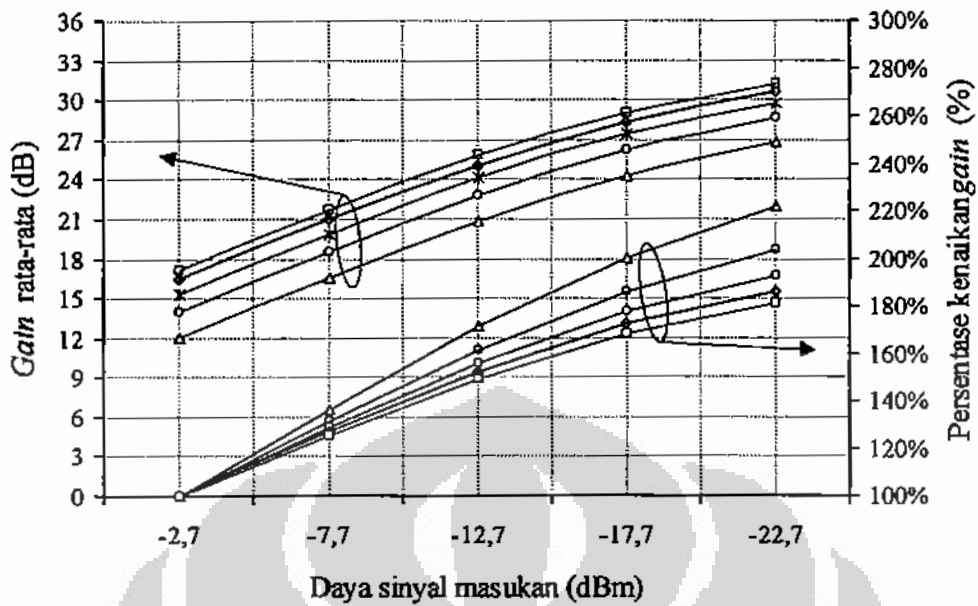
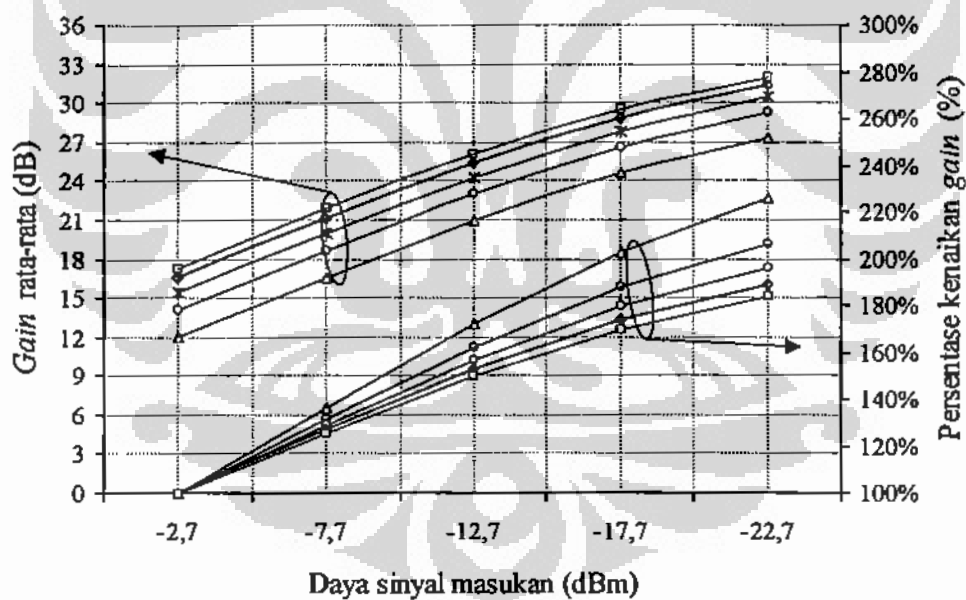
Gambar 5.22 menunjukkan *gain* rata-rata dan persentase kenaikan *gain* terhadap daya sinyal masukan. Tujuan dibuatnya grafik karakteristik ini adalah untuk menunjukkan tingkat persentase perubahan *gain* terhadap perubahan daya sinyal untuk daya pompa yang sama.

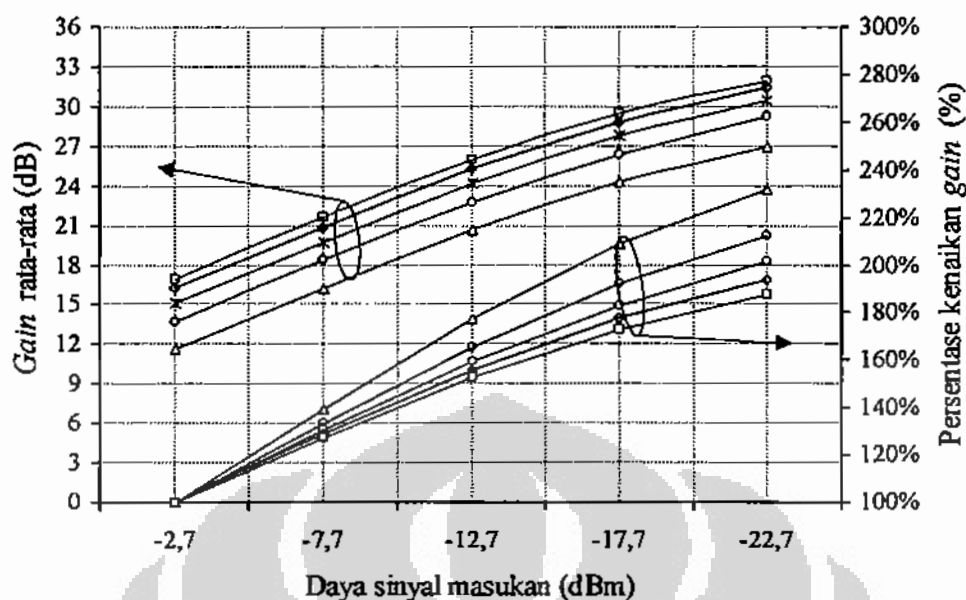


(a) Panjang EDFA 8 m



(b) Panjang EDFA 9 m

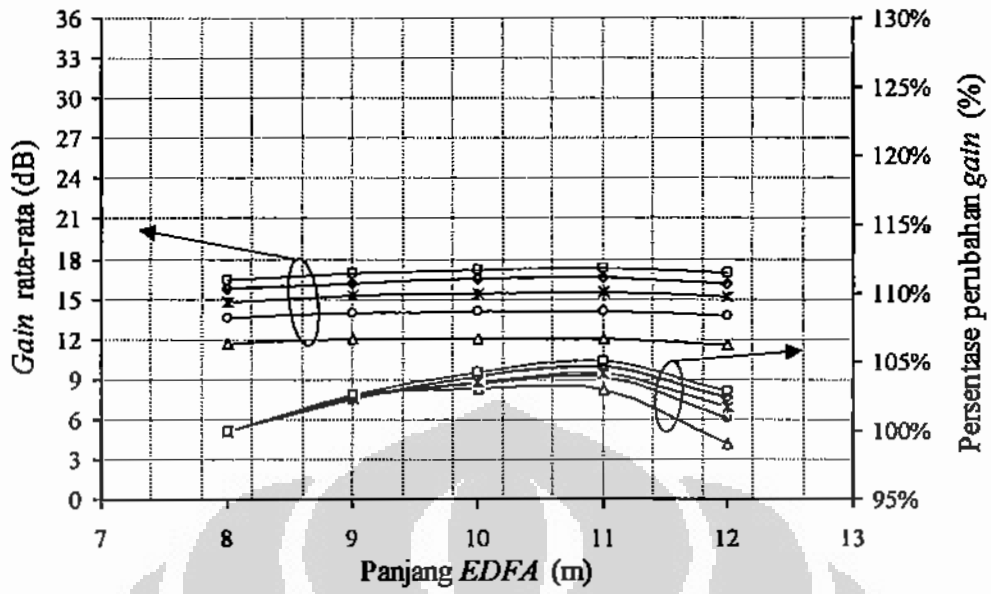
(c) Panjang *EDFA* 10(d) Panjang *EDFA* 11 m

(e) Panjang *EDFA* 12 m

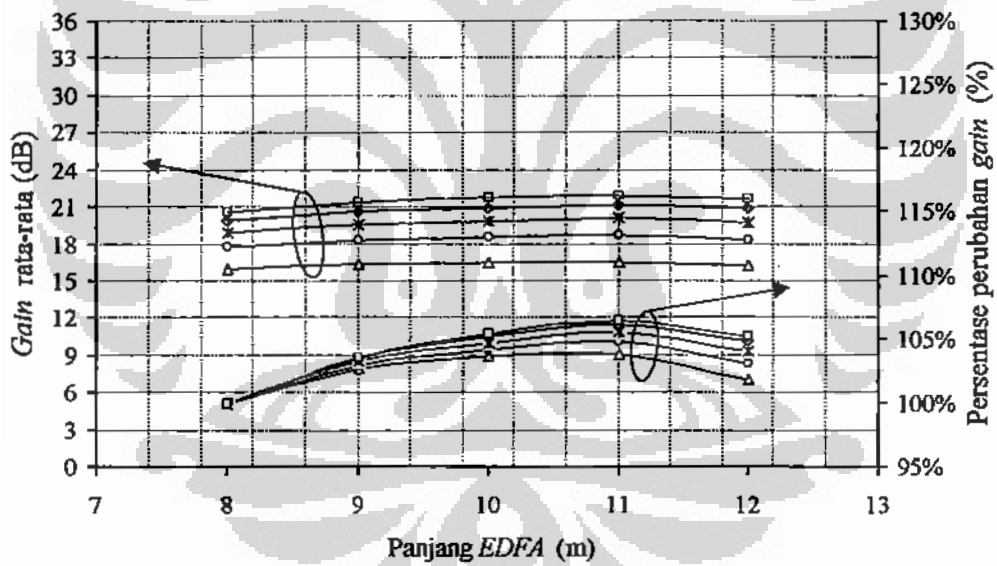
Gambar 5.22. *Gain* Rata-rata dan Persentase Kenaikan *Gain* Sebagai Fungsi Daya Sinyal Untuk Daya Pompa: Δ = 20 mW, \circ = 30 mW, * = 40 mW, \diamond = 50 mW dan \square = 60 mW.

Persentase kenaikan *gain* terhadap daya sinyal masukan adalah perbandingan antara *gain* rata-rata pada daya sinyal yang lebih kecil (-22,7 dBm hingga -7,7 dBm) terhadap *gain* rata-rata pada daya sinyal yang lebih besar (-2,7 dBm). Persentase kenaikan *gain* untuk sinyal yang semakin kecil menunjukkan kenaikan yang semakin besar. Kenyataan ini menunjukkan bahwa saturasi yang diakibatkan oleh daya sinyal akan berpengaruh terhadap *gain* yang dihasilkan. Daya sinyal yang kecil (misal -22,7 dBm) mempunyai nilai *gain* $\pm 210\%$ terhadap daya sinyal besar (-2,7 dBm) untuk panjang *EDFA* dan daya pompa yang sama. Kenyataan ini menyerupai model analisis secara simulasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.19.

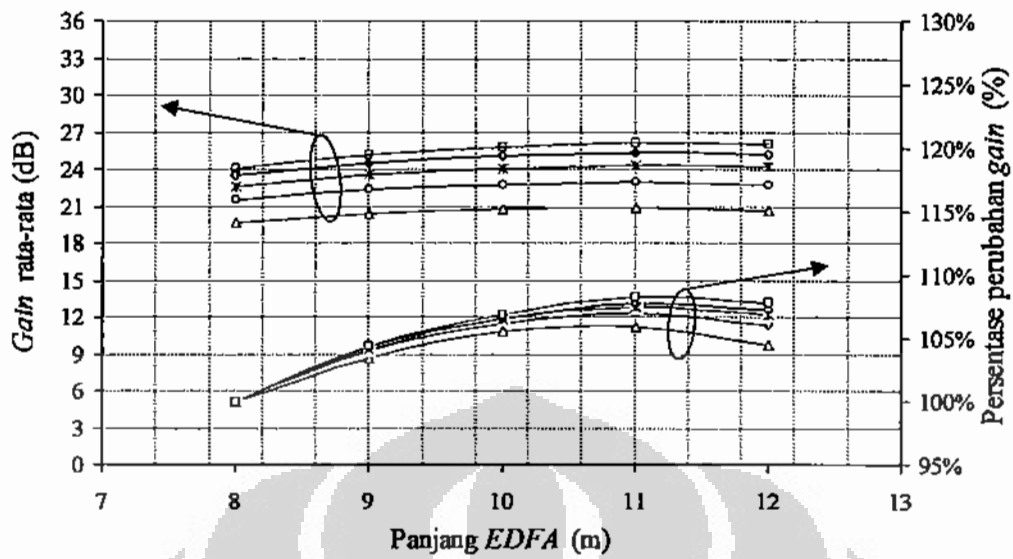
Gambar 5.23 menunjukkan *gain* rata-rata dan persentase perubahan *gain* terhadap panjang *EDFA*. Tujuan dibuatnya karakteristik ini adalah untuk menunjukkan berapa panjang *EDFA* yang dapat memberikan nilai *gain* rata-rata maksimum untuk daya pompa yang sama.



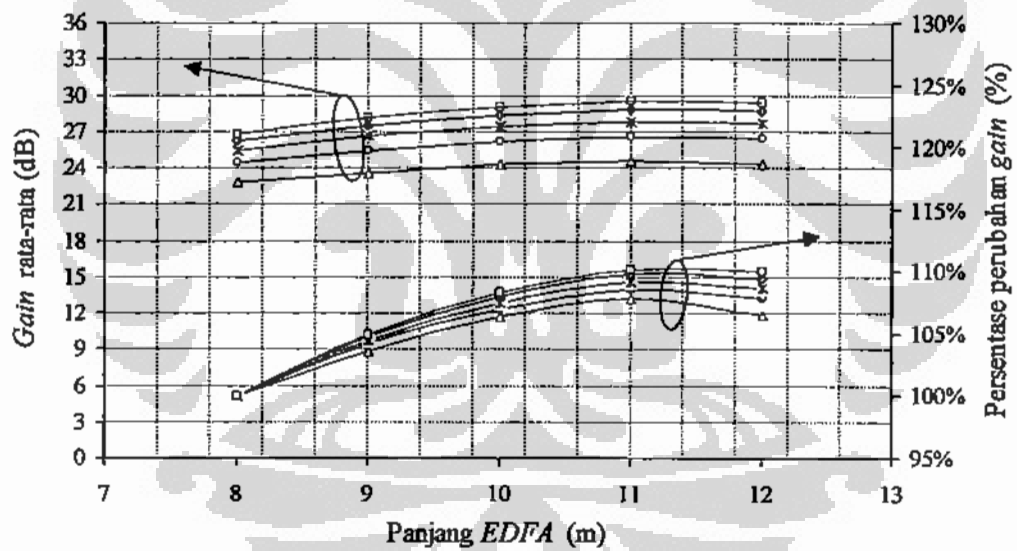
(a) Daya Sinyal Masukan -2,7 dBm



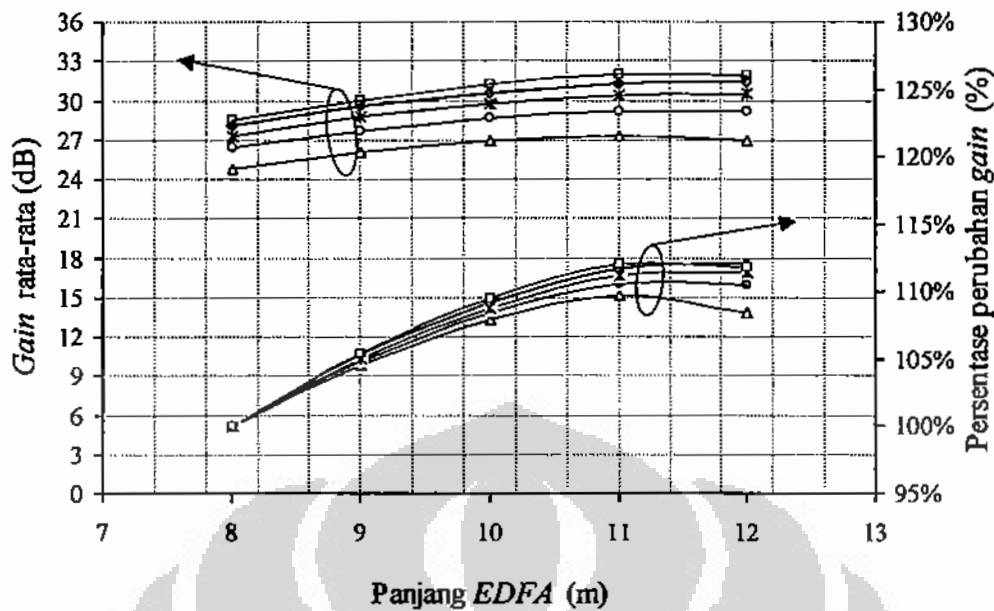
(b) Daya Sinyal Masukan -7,7dBm



(c) Daya Sinyal Masukan -12,7 dBm



(d) Daya Sinyal Masukan -17,7 dBm

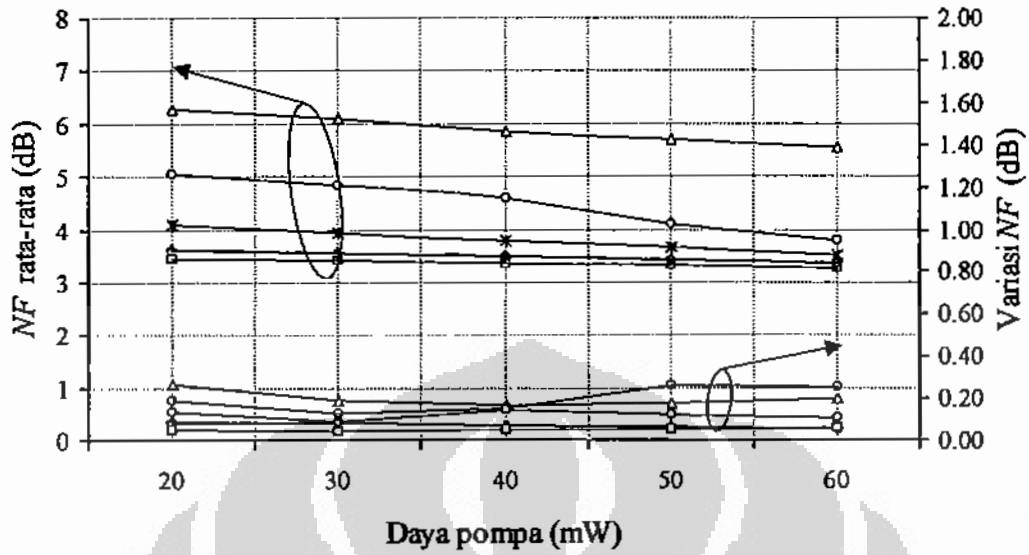
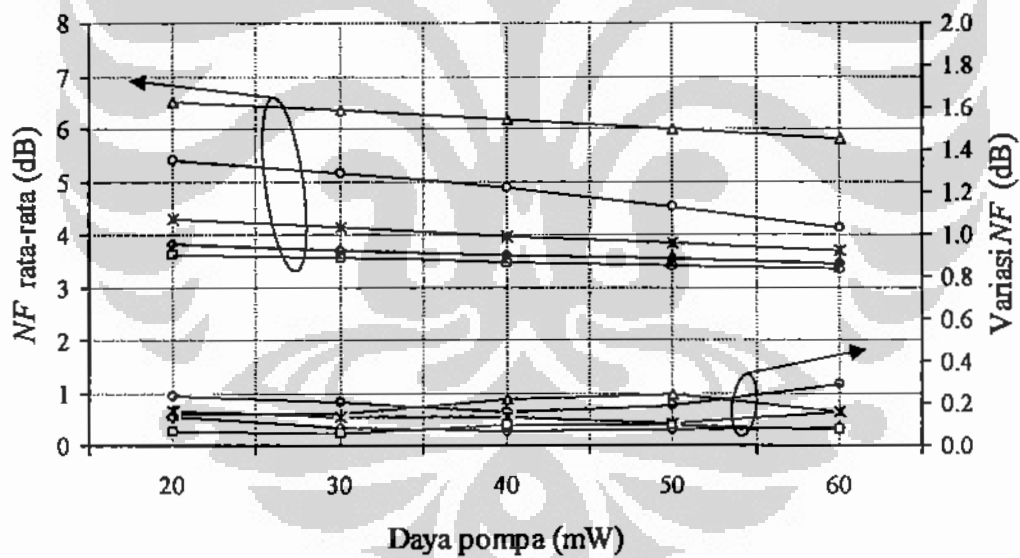


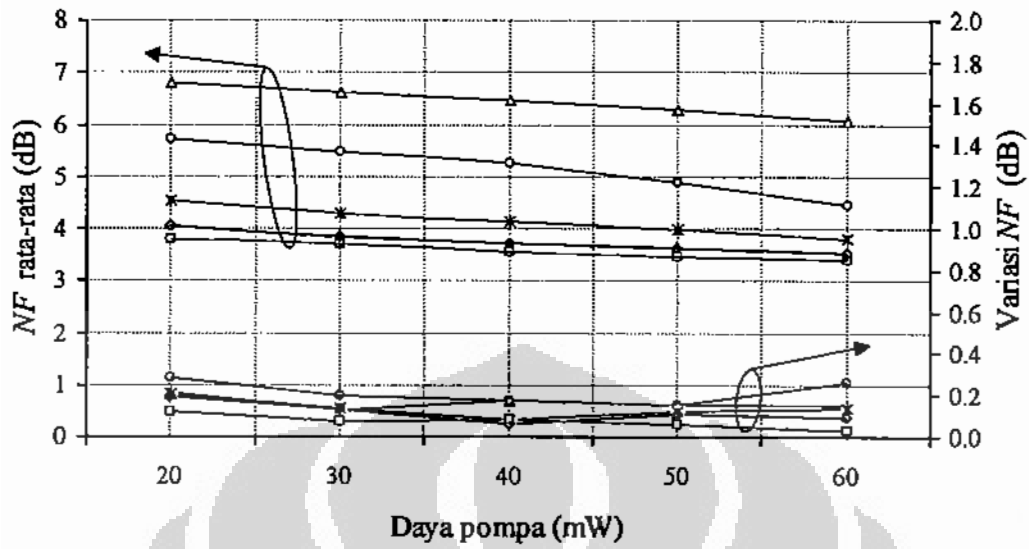
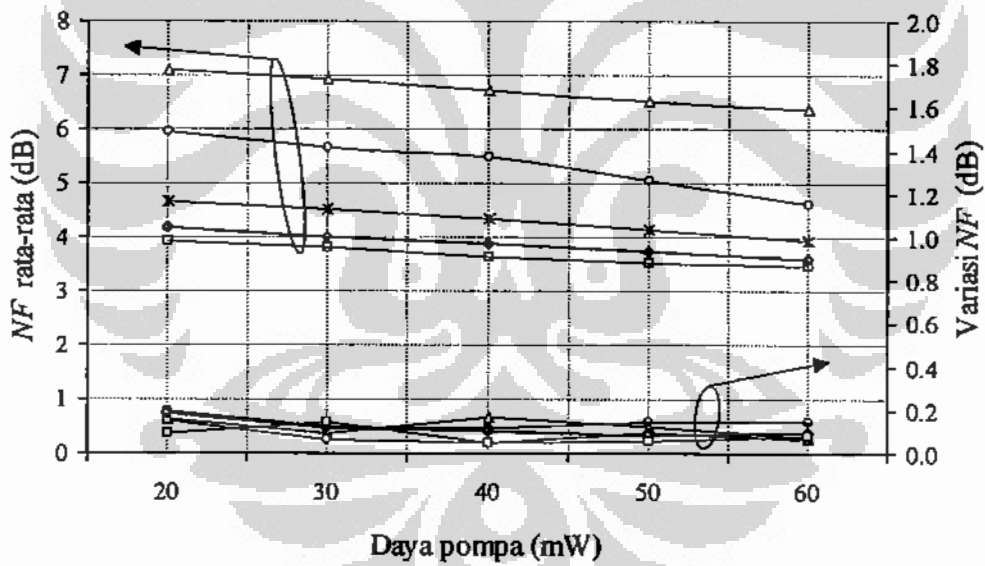
(e) Daya Sinyal Masukan -22,7 dBm

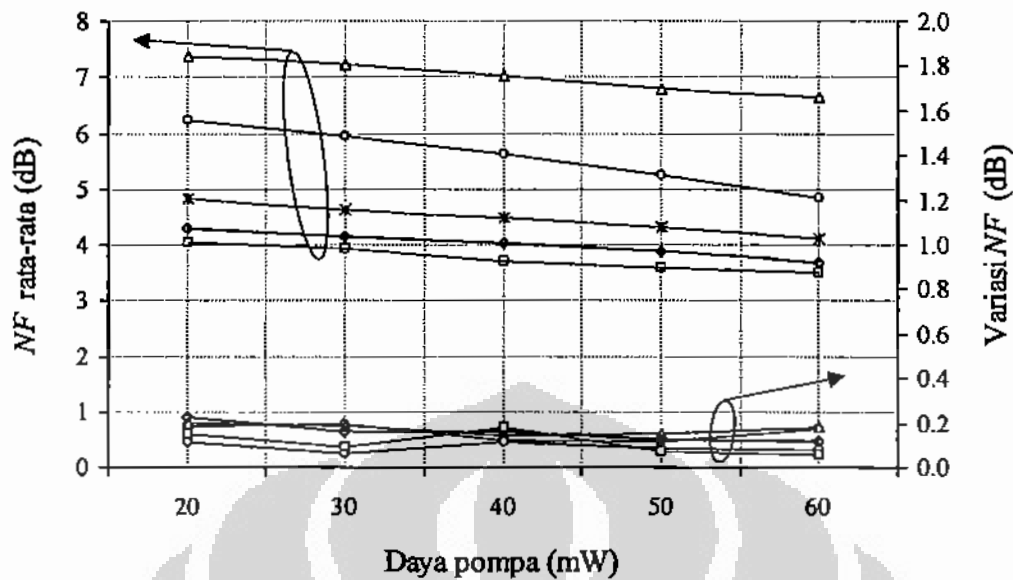
Gambar 5.23. Gain Rata-rata dan Persentase Perubahan Gain Sebagai Fungsi Panjang EDFA Untuk Daya Pompa : Δ = 20 mW, \circ = 30 mW, * = 40 mW, \diamond = 50 mW dan \square = 60 mW.

Persentase perubahan gain adalah perbandingan antara gain rata-rata pada panjang EDFA yang lebih panjang (8-12 m) terhadap gain rata-rata pada panjang EDFA terpendek (8 m). Gambar 5.23 menunjukkan perilaku bahwa EDFA dengan panjang 11 m mampu memberikan gain rata-rata maksimum untuk perubahan daya pompa 20-60 mW. Kenyataan ini terjadi karena daya pompa hanya sampai pada ± 1 m dan setelah itu daya pompa sudah tidak ada lagi. Ketidak adaan daya pompa akan menyebabkan daya sinyal yang dikuatkan diabsorpsi oleh EDFA sehingga menurunkan nilai daya sinyal yang dikuatkan. Penurunan gain paling besar pada panjang EDFA 11 m terjadi pada daya pompa 20 mW, dan penurunan gain yang sangat kecil terjadi pada daya pompa 60 mW.

Nilai NF rata-rata dan variasi NF terhadap daya pompa untuk panjang EDFA yang sama dan daya sinyal yang berubah-ubah ditunjukkan dalam Gambar 5.24. Karakteristik ini dibuat untuk menunjukkan perubahan NF rata-rata terhadap perubahan daya pompa, dan juga untuk mengetahui variasi NF nya.

(a) Panjang *EDFA* 8 m(b) Panjang *EDFA* 9 m

(c) Panjang *EDFA* 10 m(d) Panjang *EDFA* 11 m



(e) Panjang EDFA 12 m

Gambar 5.24. *NF* Rata-rata dan Variasi *NF* Sebagai Fungsi Daya Pompa Untuk Daya Sinyal: $\Delta = -2,7$ dBm, $\circ = -7,7$ dBm, $*$ = $-12,7$ dBm, $\diamond = -17,7$ dbm, dan $\square = -22,7$ dBm

Variasi *NF* adalah selisih antara *NF* tertinggi dan *NF* terendah pada daya pompa, daya sinyal, dan panjang EDFA yang sama. Gambar 5.24 menunjukkan perilaku bahwa semakin besar daya pompa yang diberikan pada sinyal dengan daya sinyal dan panjang EDFA yang sama akan menghasilkan *NF* yang semakin kecil. Nilai *NF* akan semakin besar untuk sinyal dengan daya sinyal yang semakin besar pada panjang EDFA dan daya pompa yang sama. Nilai *NF* pada panjang EDFA 11 m dan 12 m mempunyai nilai yang hampir sama. Kenyataan ini terjadi karena nilai faktor inversi populasinya hampir sama.

Perbandingan hasil perataan penguatan untuk metode yang telah dilakukan oleh peneliti lain (hanya diambil satu contoh hasil penelitian) dan metode pengaturan daya sinyal ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Perbandingan Hasil Perataan Penguatan Untuk Berbagai Metode Yang Pernah Dilakukan dan Metode Pengaturan Daya Sinyal Masukan

No	Metode Perataan	Panjang EDFA	Daya Sinyal	Daya Pompa	Gain rata-rata	Variasi Gain	NF	Variasi NF	Rentang Panjang Gelombang untuk Gain	Keterangan
1	Metode Intrinsik. C-Band dengan menggunakan dual core fiber dalam EDFA.	11 m	-	P_p 980nm = 50 mw	<20dB	<0,7 dB	4 dB	-	30 nm	Harga dual core fiber mahal Kemungkinan setup tidak stabil
2	Metode Equalizer. C-band dengan fiber Bragg grating.	13 m	-17,5 dBm	P_p 980nm = 90 mw	21 dB	<0,6 dB	-	-	11,2 nm	Rentang panjang gelombang untuk kerataan gain adalah rendah
3	Metode Hybrid. C-L Band, gabungan EDFA dan Raman.	L-EDFA(1) =25cm L-EDFA(2) =30cm	-20 dBm	P_p 980nm(1)= 250mW, P_p 980nm(2)= 210mW, P_p 980nm(3)= 110mW	20 dB	±6 dB	5-7,7 dB	-	65 nm	Disain sangat kompleks, dan daya pompa sangat besar
4	Metode Pengaturan Daya Sinyal.	12 m	-12,7 dBm	20-50 mW	20,66-25,23 dB	0,47-0,88 dB	Rata-rata adalah 4,31-4,85 dB	0,09-0,12 dB	28,71 nm	Disain setup kompak dan stabil

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan dalam subbab ini dibuat berdasarkan hasil eksperimen dan hasil pembahasan yang telah dilakukan. Beberapa kesimpulan dapat diuraikan sebagai berikut.

- Perataan penguatan untuk spektrum *C-band* dapat dicapai dengan cara mengatur daya sinyal masukan. Daya sinyal yang semakin bertambah besar (dari -22,7 dBm menjadi -2,7 dBm) akan menghasilkan *gain* yang semakin kecil dan *noise figure* yang semakin besar. Perubahan daya sinyal dari -22,7 dBm ke -2,7 dBm memberikan hasil variasi *gain* yang semakin kecil untuk daya pompa 20-60 mW dan panjang *EDFA* 8-12 m.
- *Gain* dengan variasi kurang dari 1 dB dan *noise figure* kurang dari 5 dB dapat dipenuhi untuk variasi hubungan panjang *EDFA*, daya sinyal, dan daya pompa sebagai berikut:
 - Panjang *EDFA* 8 m mampu memberikan *gain* rata-rata 17,82 dB, variasi *gain* 0,73 dB, *NF* rata-rata 4,84 dB, dan variasi *NF* 0,13 dB untuk daya sinyal masukan -7,7 dBm dan daya pompa 30 mW.
 - Panjang *EDFA* 9 m mampu memberikan *gain* rata-rata 20,61 dB, variasi *gain* 0,94 dB, *NF* rata-rata 4,52 dB, dan variasi *NF* 0,2 dB untuk daya sinyal masukan -7,7 dBm dan daya pompa 50 mW.
 - Panjang *EDFA* 10 m mampu memberikan *gain* rata-rata 21,74 dB, variasi *gain* 0,66 dB, *NF* rata-rata 4,46 dB, dan variasi *NF* 0,26 dB untuk daya sinyal masukan -7,7 dBm dan daya pompa 60 mW. Hasil lainnya menunjukkan *gain* rata-rata 20,85 dB, variasi *gain* 0,66 dB, *NF* rata-rata 4,57 dB, dan variasi *NF* 0,21 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm daya pompa 20 mW.

- Panjang *EDFA* 11 m mampu memberikan *gain* rata-rata 21,92 dB, variasi *gain* 0,44 dB, *NF* rata-rata 4,63 dB, dan variasi *NF* 0,15 dB untuk daya sinyal masukan -7,7 dBm dan daya pompa 60 mW. Hasil lainnya menunjukkan *gain* rata-rata 20,94 – 23 dB, variasi *gain* 0,78 – 0,81 dB, *NF* rata-rata 4,67 – 4,53 dB, dan variasi *NF* 0,21 – 0,07 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm dan daya pompa 20 – 30 mW.
- Panjang *EDFA* 12 m mampu memberikan *gain* rata-rata 20,66 – 25,23 dB, variasi *gain* 0,47 – 0,88 dB, *NF* rata-rata 4,31 – 4,85 dB, dan variasi *NF* 0,09 – 0,12 dB untuk daya sinyal masukan -12,7 dBm dan daya pompa 20-50 mW.
- Penurunan *gain* rata-rata untuk daya sinyal -22,7 dBm dan -17,7 dBm menjadi -2,7 dBm menunjukkan ketidaksamaan sepanjang spektrum C-band. Rentang 1530,33-1535,04 nm menunjukkan penurunan $\pm 21\%$ dan $\pm 10\%$ lebih besar dibanding dengan rentang 1530,33-1535,04 nm untuk daya sinyal -22,7 dBm dan -17,7 dBm. Kenyataan ini menunjukkan bahwa *spectral hole burning* mempunyai kedalaman yang lebih dalam untuk rentang panjang gelombang 1530,33-1535,04 nm dibandingkan dengan rentang 1536,61-1560,61 nm.
- Panjang *EDFA* 11 m mampu memberikan *gain* maksimum untuk daya sinyal antara -22,7 dBm hingga -2,7 dBm, dan daya pompa 20 mW hingga 60 mW.

6.2 Saran

Memperhatikan hasil eksperimen yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang perlu ditindaklanjuti dalam penelitian ini. Beberapa saran yang diberikan adalah sebagai berikut.

- Penelitian lanjutan yang disarankan adalah memberikan perilaku daya sinyal lebih kecil dari -22,7dBm. Pengaturan untuk penurunan daya sinyal disarankan menggunakan *attenuator* variabel. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil penguatan yang sama pada berbagai perubahan daya sinyal masukan, dan juga untuk mengetahui daya sinyal saturasi yang terjadi.

- Penelitian ini perlu diuji coba dengan menggunakan sumber sinyal lebih dari satu sumber. Jarak antar kanal standar *ITU* perlu diturun dari 200 GHz menjadi 100GHz, 50 GHz, dan 25 GHz. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kualitas sinyal dilihat dari ada dan tidak adanya *intersymbul interference (ISI)* yang terjadi akibat dispersi sinyal.
- Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan analisis numerik dan melakukan *fitting* terhadap hasil eksperimen dengan hasil analisis secara numerik. Penelitian ini bertujuan untuk mendapat model matematik yang tepat untuk hasil eksperimen yang dilakukan.



DAFTAR ACUAN

- [1] Keiser, Gerd. (2000). *Optical fiber communications*. Singapore: McGraw-Hill.
- [2] Chinlon Lin. (2006). *Broadband optical access networks and fiber-to-the home: systems technologies and deployment strategies*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Lam, Cedric F. (2007). *Passive optical networks: principles and practice*. USA: Academic Press publications.
- [4] Bass, Michael., Stryland, Eric W. Van. (2002). *Fiber optics handbook: fiber, devices, and system for optical communication*. New York: McGraw-Hill.
- [5] Senior, John. M. (1985). *Optical Fiber Communication: Principles and Practice*. UK: Prentice Hall Internasional Ltd.
- [6] Hoss, Robert. J. (1990). *Fiber optic communications design handbook*. New Jersey: Prentice-Hall.
- [7] Max Ming-Kang Liu. (1996). *Principles and applications of optical communications*. USA: R.R. Donnelley & Sons Company.
- [8] Agrawal, Govin. P. (1992). *Fiber-optic communication systems*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Agrawal, D.C. (2003). *Fiber optic communication*. India: S. Chan & Company Ltd.
- [10] Chapman, D.A. (1994). the latest revolution in optical communications. *Journal of Electronics & Communication Engineering*, 19, 59-67.
- [11] S.Y.Park, H.K. Kim, S.M. Kang, G.Y. Lyu, H.J. Lee, J.H. Lee, & S.Y. Shin. (1999). A gain-flattened two-stage EDFA for WDM optical networks with a fast link control channel. *Journal of Optics Communications*, 153, 23-26.
- [12] Mukherjee, Biswanath. (2000). WDM optical communication network: progress and challenges. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 18, 277-297.
- [13] Howerton, P. H. (1992). Diode-pumped amplifier/laser using leaky wave fiber coupling: an evaluation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 18, 277-297.

- [14] Kikushima, K. (1994). Distortion and noise properties of a praseodymium-doped fluoride fiber amplifier in 1.3 μm AM-SCM video transmission systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6, 440-442.
- [15] Whitley, T. (1993). High output power from an efficient praseodymium-doped fluoride Fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 5, 401-403.
- [16] Tingye Li. (1993). The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications. *Proceedings of The IEEE*, 81, 1568-1578.
- [17] Qinghe Mao, Jingsong Wang, Xiaohan Sun, & Mingde Zhang. (1999). A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber. *Journal of Optics Communications*, 159, 149-157.
- [18] Miniscalco, William J. (1991). Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 9, 234-250.
- [19] Singh, Rashmi., Sunanda., Sharma, & Enakshi K. (2004). Gain flattening by long period in erbium doped fiber. *Journal of Optics Communiations*, 240, 123-132.
- [20] Chien-Hung Yeh, Ming-Ching Lin, & Sien Chi. (2006). A gain-clamped S-band erbium-doped fiber amplifier using fiber Bragg grating. *Journal of Optics Communication*, 261, 266-268.
- [21] Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-doped fiber amplifiers fundamentals and technology*. USA: Academic Press.
- [22] M. Yamada, O. Hirotsuka, T. Kanamori, T. Sakamoto, Y. Ohishi, & S. Sudo. (1996). A low noise and gain- flattened amplifier composed of a silica-based and a fluoridebased Er^{3+} doped fiber amplifier in a cascade configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8, 620-622.
- [23] H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim, N. Park, & B. Y. Kim. (1998). Actively gain-flattened erbium-doped fiber amplifier over 35nm by using all-fiber acousto-optic tunable filters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10, 790-792.
- [24] Yi Bin Lu, & P. L. Chu. (2000). Gain flattening by using dual-core fiber in erbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12, 1616-1618.

- [25] Buxens, A., Poulsen, H.N., Clausen, A.T., & Jeppesen, P. (2000). Gain flattened L-band EDFA based on upgrade C-band EDFA using forward ASE pumping in an EDFA section. *Electronics Letters*, 36, 821-823.
- [26] Mahdi, M.A., Adikan, F.R. Mahamd., Poopalan, P., Selvakennedy, S., Chan, W.Y., & Ahmad, H. (2000). Gain-clamped fibre amplifier using an ASE end reflector. *Journal of Optics Communications*, 177, 195-199.
- [27] Shenping Li, K. S. Chiang, & W. A. Gambling. Gain flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a high-birefringence fiber loop mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13, 942-944.
- [28] Wysocki, Paul F., Judkins, Justin B., Espindola, Rolando P., Andrejco, Matthew., & Vengsarkar, Ashish M. (1997). Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9, 1343-1345.
- [29] Cheng-Ling Lee. (2006). Designing optimal long-period fiber gratings with the overlapped Gaussian-apodization method for flattening EDFA gain spectra. *Journal of Optics Communication*, 262, 170-174.
- [30] Chien-Hung Yeh, Ming-Ching Lin, & Sien Chi. (2006). A gain-clamped S-band erbium-doped fiber amplifier using fiber Bragg grating. *Journal of Optics Communication*, 261, 266-268.
- [31] N. Ni, C.C. Chan, K.M. Tan, S.C. Tjin, & X.Y. Dong. (2007). Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter. *Journal of Optics Communication*, 271-381.
- [32] Y. Akasaka, Y. Kubota, & S. Sakaguchi. (2003). 100 nm gain bandwidth amplifier based on 980nm pumped cerium codoped fluoride EDF. *Electronics Letters*, 39, 836-838.
- [33] Yi Bin Lu, P. L. Chu, A. Alphones, & P. Shum. (2004). A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining C- and L-band dual-core EDFAs in a parallel configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, 1640-1642.
- [34] T. Sakamoto, S. Aozasa, M. Yamada, & M. Shimizu. (2003). High-gain hybrid amplifier consisting of cascaded fluoride-based TDFA and silica-based EDFA in 1458-1540 nm wavelength region. *Electronics Letters*, 39, 597-599.

- [35] Chien-Hung Yeh, Chien-Chung Lee, & Sien Chi. (2004). S- plus C-band erbium-doped fiber amplifier in parallel structure. *Jurnal of Optics Communication*, 241, 443-447.
- [36] Saleh, B.E.A., & Teich, M.C. (1991). *Fundamentals of photonics*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [37] Demtroder, Wolfgang. (1992). *Laser spectroscopy: Basic concept and instrumentation*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [38] Desurvire, Emmanuel. (1994). *Erbium doped fiber amplifier: Principles and applications*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [39] Kaminow, Ivan P., & Koci, Thomas L. (1997). *Optical fiber telecommunications IIIA*. California: Academic Press.
- [40] Keigo Iizuka. (2002). *Elements of photonics volume II for Fiber and Integrated Optics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [41] Gistvik, Stefan Nilsson. (2002). *Optical fiber theory for communication networks*. Sweden: Ericsson Networks Technologies AB.
- [42] Harun, S.W., & Ahmad, H. (2006). Gain and noise figure improvements in double-pass S-band EDFA. *Jurnal of Optics & Laser Technology*, 1-4.
- [43] Pramono, Sholeh H., Syahriar, A., & Sardy, S. (2008). Gain and noise figure properties of erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with length and pump power variations. *International Joint Seminar in Engineering*, 83-86.
- [44] Dutton, Harry J.R. (1998). *Understanding optical communication*. New York: IBM Corporation International Technical Support Organization.
- [45] Wooler, John. (2008, May 8). Data sheet of EDFA type MetroGain M5/980/125. jwooler@sisco.com.

DAFTAR REFERENSI

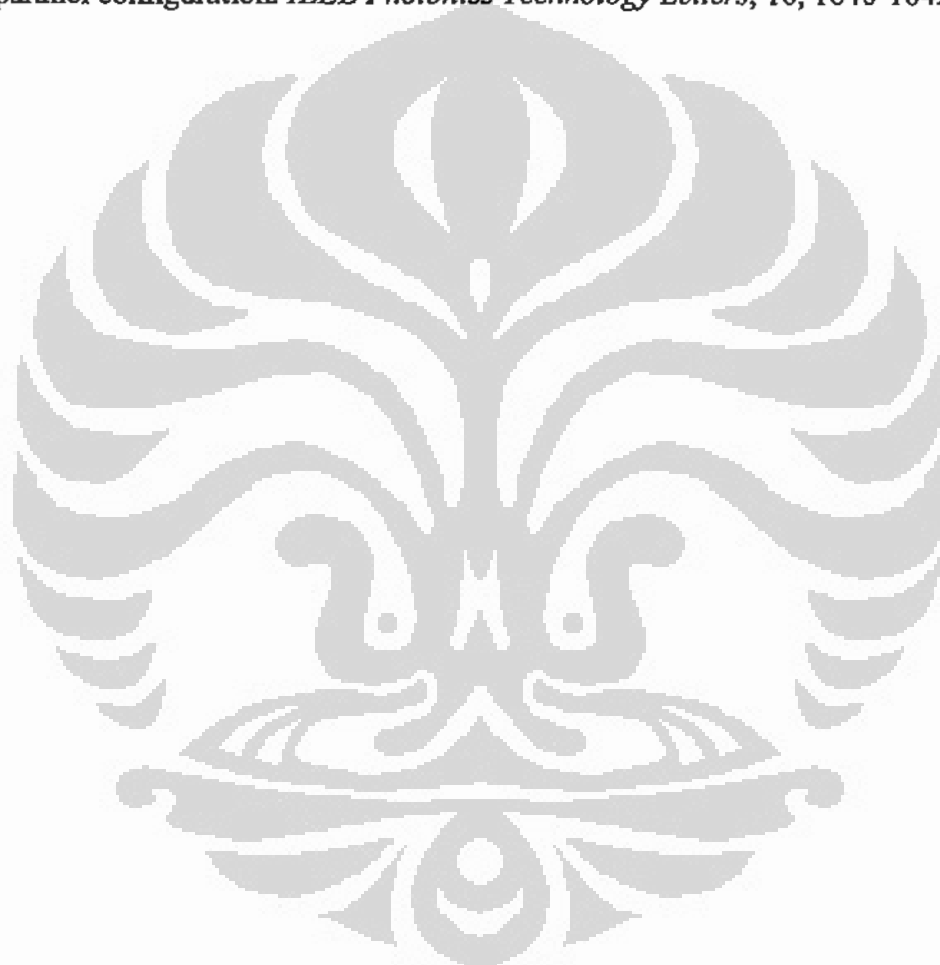
- Agrawal, Govin. P. (1992). *Fiber-optic communication systems*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Agrawal, D.C. (2003). *Fiber optic communication*. India: S. Chan & Company Ltd.
- Bass, Michael., Stryland, Eric W. Van. (2002). *Fiber optics handbook: fiber, devices, and system for optical communication*. New York: McGraw-Hill.
- Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-doped fiber amplifiers fundamentals and technology*. USA: Academic Press.
- Buxens, A., Poulsen, H.N., Clausen, A.T., & Jeppesen, P. Gain flattened L-band EDFA based on upgrade C-band EDFA using forward ASE pumping in an EDFA section. *Electronics Letters*, 36, 821-823.
- Chapman, D.A. (1994). the latest revolution in optical communications. *Journal of Electronics & Communication Engineering*, 19, 59-67.
- Cheng-Ling Lee. (2006). Designing optimal long-period fiber gratings with the overlapped Gaussian-apodization method for flattening EDFA gain spectra. *Journal of Optics Communication*, 262, 170-174.
- Chien-Hung Yeh, Ming-Ching Lin, & Sien Chi. (2006). A gain-clamped S-band erbium-doped fiber amplifier using fiber Bragg grating. *Journal of Optics Communication*, 261, 266-268.
- Chinlon Lin. (2006). *Broadband optical access networks and fiber-to-the home: systems technologies and deployment strategies*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Chien-Hung Yeh, Ming-Ching Lin, & Sien Chi. (2006). A gain-clamped S-band erbium-doped fiber amplifier using fiber Bragg grating. *Journal of Optics Communication*, 261, 266-268.
- Chien-Hung Yeh, Chien-Chung Lee, & Sien Chi. (2004). S- plus C-band erbium-doped fiber amplifier in parallel structure. *Journal of Optics Communication*, 241, 443-447.
- Demtroder, Wolfgang. (1992). *Laser spectroscopy: Basic concept and instrumentation*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Desurvire, Emmanuel. (1994). *Erbium doped fiber amplifier: Principles and applications*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Dutta, Achyut K., Dutta, Niloy K., & Fujiwara, Masahito. (2003). *WDM technologies: passive optical components*. USA: Academic Press.
- Dutton, Harry J.R. (1998). *Understanding optical communication*. New York: IBM Corporation International Technical Support Organization.
- Girard, Andre. (2000). *Guide to WDM techology and testing*. Canada: EXPO Electro-Optical Engineering Inc.
- Gistvik, Stefan Nilsson. (2002). *Optical fiber theory for communication networks*. Sweden: Ericsson Networks Technolgies AB.
- Gupta, Mool., & Ballato, John. (2007). *The handbook of photonics* (2nd ed.). USA: CRC Press.
- Harun, S.W., & Ahmad, H. (2006). Gain and noise figure improvements in double-pass S-band EDFA. *Jurnal of Optics & Laser Technology*, 1-4.
- Hoss, Robert. J. (1990). *Fiber optic communications design handbook*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Howerton, P. H. (1992). Diode-pumped amplifier/laser using leaky wave fiber coupling: an evaluation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 18, 277-297.
- H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim, N. Park, & B. Y. Kim. (1998). Actively gain-flattened erbium-doped fiber amplifier over 35nm by using all-fiber acousto-optic tunable filters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10, 790-792.
- Hunsperger, Robert G. (2009). *Integrated optics theory and technology* (6th ed.). New York: Sprinter Science+Business Media.
- Kaminov, Ivan P., Tingye Li, & Willner, Alan E. (2008). *Optical fiber telecommunications, A: Components and subsystems*. USA: Academic Press.
- Kaminov, Ivan P., Tingye Li, & Willner, Alan E. (2008). *Optical fiber telecommunications, B: Systems and networks*. USA: Academic Press.
- Kaminow, Ivan P., & Koci, Thomas L. (1997). *Optical fiber telecommunications IIIA*. California: Academic Press.
- Kartalopoulos, Stamatios V. (2000). *Introduction to DWDM technology*. USA: IEEE Press products.

- K. Kikushima. (1994). Distortion and noise properties of a praseodymium-doped fluoride fiber amplifier in 1.3 μm AM-SCM video transmission systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6, 440-442.
- Keiser, Gerd. (2000). *Optical fiber communications*. Singapore: McGraw-Hill.
- Keigo Iizuka. (2002). *Elements of photonics volume II for Fiber and Integrated Optics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lam, Cedric F. (2007). *Passive optical networks: principles and practice*. USA: Academic Press publications.
- Mahdi, M.A., Adikan, F.R. Mahamd., Poopalan, P., Selvakennedy, S., Chan, W.Y., & Ahmad, H. (2000). Gain-clamped fibre amplifier using an ASE end reflector. *Journal of Optics Communications*, 177, 195-199.
- Max Ming-Kang Liu. (1996). *Principles and applications of optical communications*. USA: R.R. Donnelley & Sons Company.
- McMahon, David. (2007). *MATLAB Demystified*. New York: McGraw-Hill eBook.
- Miniscalco, William J. (1991). Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 9, 234-250.
- Mukherjee, Biswanath. (2000). WDM optical communication network: progress and challenges. *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, 18, 277-297.
- M. Yamada, O. Hirotaka, T. Kanamori, T. Sakamoto, Y. Ohishi, & S. Sudo. (1996). A low noise and gain- flattened amplifier composed of a silica-based and a fluoridebased Er^{3+} doped fiber amplifier in a cascade configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8, 620-622.
- N. Ni, C.C. Chan, K.M. Tan, S.C. Tjin, & X.Y. Dong. (2007). Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter. *Journal of Optics Communication*, 271-381.
- Pramono, Sholeh H., Syahriar, A., & Sardy, S. (2008). Gain and noise figure properties of erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with length and pump power variations. *International Joint Seminar in Engineering*, 83-86.

- Qinghe Mao, Jingsong Wang, Xiaohan Sun, & Mingde Zhang. (1999). A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber. *Journal of Optics Communications*, 159, 149-157.
- Saleh, B.E.A., & Teich, M.C. (1991). *Fundamentals of photonics*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Senior, John. M. (1985). *Optical Fiber Communication: Principles and Practice*. UK: Prentice Hall Internasional Ltd.
- Shenping Li, K. S. Chiang, & W. A. Gambling. Gain flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a high-birefringence fiber loop mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13, 942-944.
- Singh, Rashmi., Sunanda., Sharma, & Enakshi K. (2004). Gain flattening by long period in erbium doped fiber. *Journal of Optics Communications*, 240, 123-132.
- S.Y.Park, H.K. Kim, S.M. Kang, G.Y. Lyu, H.J. Lee, J.H. Lee, & S.Y. Shin. (1999). A gain-flattened two-stage EDFA for WDM optical networks with a fast link control channel. *Journal of Optics Communications*, 153, 23-26.
- Tingye Li. (1993). The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications. *Proceedings of The IEEE*, 81, 1568-1578.
- T. Sakamoto, S. Aozasa, M. Yamada, & M. Shimizu. (2003). High-gain hybrid amplifier consisting of cascaded fluoride-based TDFA and silica-based EDFA in 1458-1540.nm wavelength region. *Electronics Letters*, 39, 597-599.
- Whitley, T. (1993). High output power from an efficient praseodymium-doped fluoride Fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*. 5, 401-403.
- Wooler, John. (2008, May 8). Data sheet of EDFA type MetroGain M5/980/125. jwooler@sisco.com.
- Wysocki, Paul F., Judkins, Justin B., Espindola, Rolando P., Andrejco, Matthew., & Vengsarkar, Ashish M. (1997). Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9, 1343-1345.
- Yablon, Andrew D. (2005). *Optical fiber fusion splicing*. Germany: Sprinter Science+Business Media.

- Y. Akasaka, Y. Kubota, & S. Sakaguchi. (2003). 100 nm gain bandwidth amplifier based on 980nm pumped cerium codoped fluoride EDF. *Electronics Letters*, 39, 836-838.
- Yi Bin Lu, & P. L. Chu. (2000). Gain flattening by using dual-core fiber in erbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12, 1616-1618.
- Yi Bin Lu, P. L. Chu, A. Alphones, & P. Shum. (2004). A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining C- and L-band dual-core EDFAs in a parallel configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, 1640-1642.



LAMPIRAN 1 PENGHITUNGAN NILAI *CONFINEMENT FACTOR* (Γ)

Data yang diketahui untuk menghitung nilai *confinement factor* (Γ) adalah [45]:

- Jari-jari inti *EDFA* (r atau a) = $1,55 \cdot 10^{-6}$ m
- Indeks bias inti *EDFA* pada panjang gelombang sinyal (n_{1s}) = 1,462
- Indeks bias *cladding* *EDFA* pada panjang gelombang sinyal sinyal (n_{2s}) = 1,444
- Indeks bias inti *EDFA* pada panjang gelombang pompa (n_{1p}) = 1,469
- Indeks bias *cladding* *EDFA* pada panjang gelombang pompa (n_{2p}) = 1,451
- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1550 nm
- Panjang gelombang pompa (λ_p) = 980 nm

Nilai *confinement factor* (Γ) dihitung dengan menggunakan pers.(2.39), pers.(2.40), pers.(2.41), dan pers.(2.42).

***Confinement factor* (Γ_s) untuk sinyal.**

$$\begin{aligned} NA &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \\ &= ((1,462)^2 - (1,444)^2)^{1/2} = 0,0523 \\ &= 0,2287 \approx 0,23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{2\pi a}{\lambda_s} NA \\ &= \frac{2\pi \cdot 1,55 \times 10^{-6}}{1550 \times 10^{-9}} \cdot 0,23 = 1,44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w &= \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{1,5}} + \frac{2,879}{V^6} \right) \\ &= \frac{1,55 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{1,445^{1,5}} + \frac{1,879}{1,445^6} \right) = 2,09 \times 10^{-6} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Gamma_s &= \left(1 - e^{-r^2/w^2}\right) \\ &= \left(1 - e^{-(1,55 \cdot 10^{-6})^2 / (2,0816 \cdot 10^{-6})^2}\right) \approx 0,43\end{aligned}$$

Confinement factor (Γ_p) untuk pompa.

$$\begin{aligned}NA &= \left(n_1^2 - n_2^2\right)^{1/2} \\ &= \left((1,469)^2 - (1,451)^2\right)^{1/2} \\ &= 0,2293 \approx 0,23\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V &= \frac{2\pi a}{\lambda_p} NA \\ &= \frac{2\pi \cdot 1,55 \cdot 10^{-6}}{974,6 \cdot 10^{-9}} \cdot 0,23 = 2,287\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w &= \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{1,5}} + \frac{2,879}{V^6}\right) \\ &= \frac{1,55 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{2}} \left(0,65 + \frac{1,619}{2,287^{1,5}} + \frac{1,879}{2,287^6}\right) = 1,2476 \cdot 10^{-6} \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Gamma_p &= \left(1 - e^{-r^2/w^2}\right) \\ &= \left(1 - e^{-(1,55 \cdot 10^{-6})^2 / (1,2476 \cdot 10^{-6})^2}\right) = 0,79\end{aligned}$$

LAMPIRAN 2
NILAI EMISI CROSS SECTION UNTUK SINYAL, DAN ABSORPSI CROSS SECTION UNTUK POMPA

Nilai emisi *cross section* ($\sigma_e = \sigma_s$) untuk sinyal didapat dari grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 5.8, dan secara lengkap dicantumkan dalam Tabel L2.1. Nilai absorpsi *cross section* untuk pompa adalah $1,7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$.

Tabel L 2.1. Nilai Absorpsi *Cross Section* untuk Sinyal

No	Panjang gelombang (m)	Emisi <i>cross section</i> (m ²)
1	1530,33	$3,97 \times 10^{-25}$
2	1531,9	$4,00 \times 10^{-25}$
3	1533,47	$3,76 \times 10^{-25}$
4	1535,04	$3,38 \times 10^{-25}$
5	1536,61	$3,12 \times 10^{-25}$
6	1538,19	$2,90 \times 10^{-25}$
7	1539,77	$2,78 \times 10^{-25}$
8	1541,35	$2,77 \times 10^{-25}$
9	1542,94	$2,73 \times 10^{-25}$
10	1544,53	$2,73 \times 10^{-25}$
11	1546,12	$2,73 \times 10^{-25}$
12	1547,72	$2,70 \times 10^{-25}$
13	1549,32	$2,67 \times 10^{-25}$
14	1550,92	$2,64 \times 10^{-25}$
15	1552,52	$2,58 \times 10^{-25}$
16	1554,13	$2,55 \times 10^{-25}$
17	1555,75	$2,49 \times 10^{-25}$
18	1557,36	$2,46 \times 10^{-25}$
19	1558,98	$2,43 \times 10^{-25}$
20	1560,61	$2,31 \times 10^{-25}$

Sumber: Beker, P.C., Olsson, N.A., & Simpson, J.R. (1999). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*. USA: Academic Press.

LAMPIRAN 3
PROGRAM PENGHITUNGAN FRAKTIONAL INVERSI POPULASI
TERHADAP PERUBAHAN DAYA POMPA UNTUK DAYA SINYAL
MASUKAN -22,7 dBm

Data yang diketahui untuk menghitung fraktional inversi populasi terhadap daya pompa untuk daya sinyal masukan -22,7 dBm adalah:

- Konstanta Planck (h) = 6,626 J.s
- Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
- Panjang gelombang pompa (λ_p) = 974,6 nm
- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1531,90 nm
- *Confinement factor* untuk pompa (Γ_p) = 0,79
- *Confinement factor* untuk sinyal (Γ_s) = 0,43
- Emisi *cross section* sinyal (σ_s) = $8.6e-25$ m²
- Absorpsi *cross section* pompa (σ_p) = $5.61e-25$ m²
- $\tau_{21} = \tau_2 = \textit{lifetime}$ = 10 ms = 0.01 s
- Daya sinyal (P_s) = -22,7 dBm = $5,37 \times 10^{-6}$ watt
- Daya pompa (P_p) = 0 – 100 mW = 0 – 0,1 watt

Perubahan nilai fraktional inversi populasi terhadap daya pompa dihitung dengan menggunakan pers. (2.31), pers.(2.37), pers. (2.38), dan pers.(2.39). Program MATLAB yang dibuat ditunjukkan seperti berikut.

```
h=6.626e-34;
c=3e+8;
lamda_p=974.6e-9;
lamda_s=1531.9e-9;
frek_p=c/lamda_p;
frek_s=c/lamda_s;
gama_s=0.43;
gama_p=0.79;
sigma_p=1.7e-25;
sigma_s=4e-25;
tau_21=0.01;
gama_21=1/tau_21;
```

```

r=1.55e-6;
Ps = 5.37e-6;
Pp=0:0.0001:0.1;
Pp_mW=Pp.*1000; %dikali 1000 agar dalam sumbu 0-100 mW
Aeff=pi*r^2;
Ip=(Pp./Aeff).*gama_p;
Is=(Ps./Aeff).*gama_s;
fluks_p=Ip./(h*frek_p);
fluks_s=Is./(h*frek_s);
k_1=fluks_p.*sigma_p;
k_2=2*fluks_s*sigma_s;
k_3=k_1-gama_21;
k_4=gama_21+k_2+k_1;
frakt=k_3./k_4;
plot(Pp_mW,frakt,'r','linewidth',1.5)
ylim([-1 1])
xlim([0 60])
grid on
xlabel('Daya pompa (mW)')
ylabel('(N2-N1)/N')
title('Frakt.inversi populasi vs Daya Pompa untuk Ps=-22,7 dBm dan 1531,9 nm')
set(gca,'fontname','time new roman','fontsize',10)

```

LAMPIRAN 4
PROGRAM PENGHITUNGAN FRAKTIONAL INVERSI POPULASI
TERHADAP PERUBAHAN DAYA SINYAL PADA PANJANG
GELOMBANG 1549,32 nm

Data yang diketahui untuk menghitung fraktional inversi populasi terhadap daya sinyal masukan pada panjang gelombang 1549,32 nm adalah:

- Konstanta Planck (h) = 6,626 J.s
 - Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
 - Panjang gelombang pompa (λ_p) = 974,6 nm
 - Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1549,32 nm
 - *Confinement factor* untuk pompa (Γ_p) = 0,79
 - *Confinement factor* untuk sinyal (Γ_s) = 0,43
 - Emisi *cross section* sinyal (σ_s) = $5.73e-25$ m²
 - Absorpsi *cross section* pompa (σ_p) = $5.61e-25$ m²
 - $\tau_{21} = \tau_2$ (*lifetime*) = 10 ms = 0.01 s
 - Jari-jari inti EDFA = 1,55 μ m = $1,55 \times 10^{-6}$ m
 - Daya sinyal (P_s) = 0 – 1 mW = 0 – 0,001 W
- Catatan: 1 mW = 0 dBm
- Daya pompa (P_p) = 20 -60 mW = 0,02 – 0,06 watt

Perubahan nilai fraktional inversi populasi terhadap daya pompa dihitung dengan menggunakan pers. (2.31), pers.(2.37), pers. (2.38), dan pers.(2.39). Program MATLAB yang dibuat ditunjukkan seperti berikut.

```
Ps = 0:0.0001:0.001;
h = 6.626e-34;
r = 1.55e-6;
Lambda_s = 1549.32e-9;
gama_s = 0.43;
gama_p = 0.79;
c = 3e+8;
vs = c/Lambda_s;
Aeff = pi*(r^2);
```

```

Fluks_s = (Ps./(h*vs*Aeff))*gama_s;
Ps_mW = Ps.*1000;
Tau_21 = 1.0e-2;
Gama_21 = 1/Tau_21;
Sigma_s = 2.6e-25;
Fluks_s_Sigma_s = (Fluks_s*2*Sigma_s);
Fluks_Gama_21 = Gama_21 + Fluks_s_Sigma_s;
Sigma_p = 1.71e-25;
Pp_1 = 0.02;
Pp_2 = 0.03;
Pp_3 = 0.04;
Pp_4 = 0.05;
Pp_5 = 0.06;
Lamda_p = 974.6e-9;
vp = c/Lamda_p;
Fluks_p_1 = (Pp_1./(h*vp*Aeff))*gama_p;
Fluks_p_Sigma_p_1 = (Fluks_p_1.*Sigma_p);
N2_N1_1 = Fluks_p_Sigma_p_1 - Gama_21;
N_1 = Fluks_Gama_21 + Fluks_p_Sigma_p_1;
Fract_Inv_populasi_1 = N2_N1_1./N_1;

Fluks_p_2 = (Pp_2./(h*vp*Aeff))*gama_p;
Fluks_p_Sigma_p_2 = (Fluks_p_2.*Sigma_p);
N2_N1_2 = Fluks_p_Sigma_p_2 - Gama_21;
N_2 = Fluks_Gama_21 + Fluks_p_Sigma_p_2;
Fract_Inv_populasi_2 = N2_N1_2./N_2;

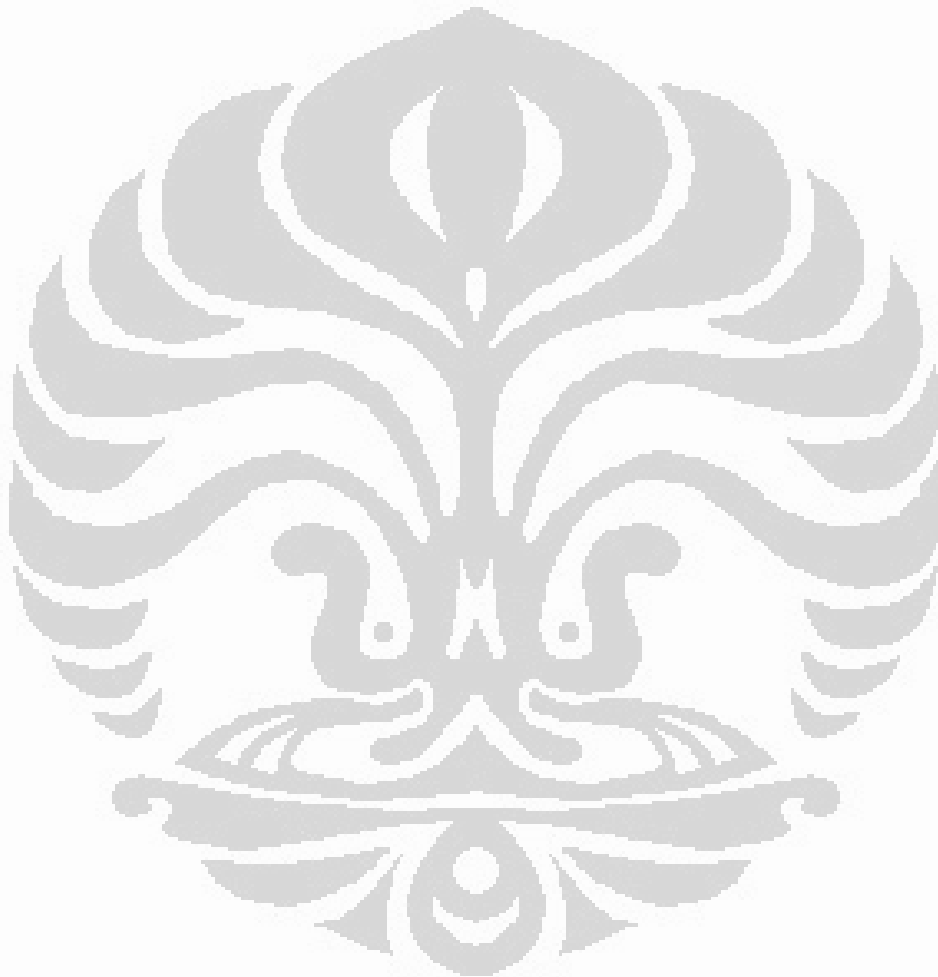
Fluks_p_3 = (Pp_3./(h*vp*Aeff))*gama_p;
Fluks_p_Sigma_p_3 = (Fluks_p_3.*Sigma_p);
N2_N1_3 = Fluks_p_Sigma_p_3 - Gama_21;
N_3 = Fluks_Gama_21 + Fluks_p_Sigma_p_3;
Fract_Inv_populasi_3 = N2_N1_3./N_3;

Fluks_p_4 = (Pp_4./(h*vp*Aeff))*gama_p;
Fluks_p_Sigma_p_4 = (Fluks_p_4.*Sigma_p);
N2_N1_4 = Fluks_p_Sigma_p_4 - Gama_21;
N_4 = Fluks_Gama_21 + Fluks_p_Sigma_p_4;
Fract_Inv_populasi_4 = N2_N1_4./N_4;

Fluks_p_5 = (Pp_5./(h*vp*Aeff))*gama_p;
Fluks_p_Sigma_p_5 = (Fluks_p_5.*Sigma_p);
N2_N1_5 = Fluks_p_Sigma_p_5 - Gama_21;
N_5 = Fluks_Gama_21 + Fluks_p_Sigma_p_5;
Fract_Inv_populasi_5 = N2_N1_5./N_5;

```

```
plot(Ps_mW,Fract_Inv_populasi_1,Ps_mW,Fract_Inv_populasi_2,Ps_mW,Fract_Inv_populasi_3,Ps_mW,Fract_Inv_populasi_4,Ps_mW,Fract_Inv_populasi_5,'linewidth',1.3)
title('Grafik Fractional Inv Populasi untuk Pp 20-60mW pada channal 1549,32nm')
ylim([0 1])
xlabel('Daya sinyal (mWatt)')
ylabel('(N2-N1)/N')
legend('20 mW','30 mW','40 mW','50 mW','60 mW')
grid
set(gca,'fontname','time new roman','fontsize',10)
```



LAMPIRAN 5
PROGRAM PENGHITUNGAN GAIN MAKSIMUM TERHADAP
PERUBAHAN PANJANG EDFA UNTUK DAYA POMPA 20-60 mW

Data yang diketahui untuk menghitung *Gain* atau $G(\text{dB})$ terhadap panjang *EDFA* adalah:

- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1531,90 nm
- Panjang gelombang pompa (λ_p) = 974,6 nm
- Konstanta Planck (h) = $6,626 \times 10^{-34}$ Js
- Lifetime (τ_2) = 10 ms = 0,01 s
- Absorpsi *cross section* untuk pompa (σ_p) = $7,10 \times 10^{-25}$ m²
- Emisi *cross section* untuk sinyal (σ_s) = $2,0 \times 10^{-24}$ m²
- Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
- Jari-jari inti *EDFA* (r) = $1,55 \mu\text{m} = 1,55 \times 10^{-6}$ m
- Frekuensi pompa (ν_p) = $3,08 \times 10^{14}$ s⁻¹
- Daya pompa ($P_p(0)$) = 20 – 60 mW = 0,02 – 0,06 W
- Rapat ion erbium ($N = N_{\text{mak}}$) = $7,85 \times 10^{24}$ m⁻³
- $\beta = e^{-(\Delta E/kT)} = 0,38$ pada temperatur ruang
- $z = L = 1 - 15$ m

Gain maksimum dihitung dengan menggunakan pers. (2.58), pers. (2.59), pers. (2.60), pers. (2.61), dan pers. (2.62). Program MATLAB yang dibuat ditunjukkan seperti berikut.

```
lamda_s=1531.9e-9;
lamda_p=974.6e-9;
beta=0.38; %benar
c=3e8;
r=1.55e-6;
h=6.626e-34;
N=7.85e24;
Aeff=pi*r^2;
frek_p=c/lamda_p;
```



```

sig_p=1.7e-25.*1;
sig_s=4.0e-25;
tau_2=0.01;
L_edfa=1:1:15;
k_1=(sig_p*N/2).*L_edfa; %dikali 0.09

P_p_20=0.02;
P_p_L_20=P_p_20.*exp(-k_1);%REVISI DIATASNYA
w_atas_20=sig_p.*P_p_L_20;
w_bawah_20=h*frek_p*Aeff;
w_p_20=w_atas_20./w_bawah_20;
N_atas_20=(((1-beta).*w_p_20.*tau_2)-1).*N;
N_bawah_20=(((1+beta).*w_p_20.*tau_2)+1);
N2_N1_20=N_atas_20./N_bawah_20;
g_mak_20=sig_s.*N2_N1_20;
G_20=exp(g_mak_20.*L_edfa);
G_20_dB=10*log10(G_20);

P_p_30=0.03;
P_p_L_30=P_p_30.*exp(-k_1);
w_atas_30=sig_p.*P_p_L_30;
w_bawah_30=h*frek_p*Aeff;
w_p_30=w_atas_30./w_bawah_30;
N_atas_30=(((1-beta).*w_p_30.*tau_2)-1).*N;
N_bawah_30=(((1+beta).*w_p_30.*tau_2)+1);
N2_N1_30=N_atas_30./N_bawah_30;
g_mak_30=sig_s.*N2_N1_30;
G_30=exp(g_mak_30.*L_edfa);
G_30_dB=10*log10(G_30);

P_p_40=0.04;
P_p_L_40=P_p_40.*exp(-k_1);
w_atas_40=sig_p.*P_p_L_40;
w_bawah_40=h*frek_p*Aeff;
w_p_40=w_atas_40./w_bawah_40;
N_atas_40=(((1-beta).*w_p_40.*tau_2)-1).*N;
N_bawah_40=(((1+beta).*w_p_40.*tau_2)+1);
N2_N1_40=N_atas_40./N_bawah_40;
g_mak_40=sig_s.*N2_N1_40;
G_40=exp(g_mak_40.*L_edfa);
G_40_dB=10*log10(G_40);

P_p_50=0.05;
P_p_L_50=P_p_50.*exp(-k_1);
w_atas_50=sig_p.*P_p_L_50;

```

```

w_bawah_50=h*frek_p*Aeff;
w_p_50=w_atas_50./w_bawah_50;
N_atas_50=((1-beta).*w_p_50.*tau_2)-1).*N;
N_bawah_50=((1+beta).*w_p_50.*tau_2)+1;
N2_N1_50=N_atas_50./N_bawah_50;
g_mak_50=sig_s.*N2_N1_50;
G_50=exp(g_mak_50.*L_edfa);
G_50_dB=10*log10(G_50);

P_p_60=0.06;
P_p_L_60=P_p_60.*exp(-k_1);
w_atas_60=sig_p.*P_p_L_60;
w_bawah_60=h*frek_p*Aeff;
w_p_60=w_atas_60./w_bawah_60;
N_atas_60=((1-beta).*w_p_60.*tau_2)-1).*N;
N_bawah_60=((1+beta).*w_p_60.*tau_2)+1;
N2_N1_60=N_atas_60./N_bawah_60;
g_mak_60=sig_s.*N2_N1_60;
G_60=exp(g_mak_60.*L_edfa);
G_60_dB=10*log10(G_60);

plot(L_edfa,G_20_dB, L_edfa,G_30_dB, L_edfa,G_40_dB, L_edfa,G_50_dB,
L_edfa,G_60_dB);
xlabel('Panjang EDFA (m)')
ylabel('Gain (dB)')
legend('20 mW','30 mW','40 mW','50 mW','60 mW')
grid on
xmin=1;
xmax=15;
ymin=0;
ymax=40;
axis([xmin xmax ymin ymax])
set(gca,'fontname','time new roman','fontsize',10,'linewidth',1.3)
title('Gain-mak vs L-EDFA untuk Panjang gelombang 1531,90 nm')

```

LAMPIRAN 6
PENURUNAN PERSAMAAN DIFFERENSIAL UNTUK PERUBAHAN
INTENSITAS SINYAL TERHADAP PERUBAHAN PANJANG EDFA, DAN
PROGRAM PENGHITUNGAN NILAI PENGUATANNYA UNTUK
PANJANG GELOMBANG 1550,92 nm

Perubahan daya pompa terhadap panjang *EDFA* seperti dinyatakan dalam pers. (2.58) adalah

$$P_p(z) = P_p(0)e^{-(\sigma_p N_s z)/2}$$

$$I_p(z) = \frac{P_p(z)}{A_{eff}} = \frac{P_p(0)}{A_{eff}} e^{-(\sigma_p N_s z)/2} \quad (\text{L 6.1})$$

$$I'_p(z) = \frac{I_p(z)}{I_{th}} = \frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N_s z)/2} \quad (\text{L 6.2})$$

dimana $I_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2}$

Intensitas saturasi seperti dinyatakan dalam pers. (2.52) adalah $I_{sat}(z) = \frac{1 + I'_p(z)}{2\eta}$,

dan perubahan intensitas sinyal terhadap panjang *EDFA* seperti dinyatakan dalam

pers. (2.63) adalah $\frac{dI'_s(z)}{dz} = I_{sat}(z) \left(\frac{I'_p(z) - 1}{I'_p(z) + 1} \right) \sigma_s N$. Substitusi $I_{sat}(z)$ kedalam persamaan

diferensial untuk perubahan intensitas sinyal terhadap jarak akan menghasilkan persamaan seperti berikut.

$$\begin{aligned} \frac{dI'_s(z)}{dz} &= I_{sat}(z) \left(\frac{I'_p(z) - 1}{I'_p(z) + 1} \right) \sigma_s N \\ &= \frac{1 + I'_p(z)}{2\eta} \left(\frac{I'_p(z) - 1}{I'_p(z) + 1} \right) \sigma_s N \\ &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} (I'_p(z) - 1) \\ &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \left(\frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N_s z)/2} - 1 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{dI'_s(z)}{dz} = \frac{\sigma_s N}{2\eta} \left(\frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - 1 \right) \quad (\text{L 6.3})$$

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

Pengintegrasian pers. (L 3.3) akan menghasilkan pers. (L 3.4).

$$\begin{aligned} I'_s(z) &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \int \left(\frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - 1 \right) dz \\ I'_s(z) &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \int \left(\frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - 1 \right) dz \\ &= \frac{\sigma_s N}{2\eta} \left(-\frac{2}{\sigma_p N} \right) \frac{P_p(0)}{I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z + C \\ &= -\frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z + C \end{aligned} \quad (\text{L 6.4})$$

Intensitas sinyal pada titik awal masuk *EDFA* adalah

$$I_s(0) = \frac{P_s(0)}{A_{eff}}, \text{ dan } I'_s(0) = \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}}$$

Mensubstitusikan persamaan $I'_s(0) = \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}}$ kedalam pers.(L 3.4) didapat.

$$\begin{aligned} I'_s(0) &= \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} = -\frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} + C \\ C &= \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} + \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} \end{aligned} \quad (\text{L 6.5})$$

Substitusi pers.(L 3.5) kedalam pers.(L 3.4) menghasilkan.

$$\begin{aligned} I'_s(z) &= -\frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z + \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} + \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} \\ &= \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} \left(1 - e^{-(\sigma_p N z)/2} \right) + \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z \\ &= \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} + \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} - \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N z)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} z \end{aligned} \quad (\text{L 6.6})$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{I_s(z=L)}{I_s(z=0)} \right)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{\frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} (1 - e^{-(\sigma_p N L)/2}) + \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} L}{\frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}}} \right)$$

atau

$$G(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{\frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} + \frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}} - \frac{\sigma_s P_p(0)}{\eta \sigma_p I_{th} A_{eff}} e^{-(\sigma_p N L)/2} - \frac{\sigma_s N}{2\eta} L}{\frac{P_s(0)}{A_{eff} I_{th}}} \right) \quad (\text{L 6.7})$$

Hasil program MATLAB untuk menghitung *Gain* sesuai dengan pers.(L 6.7) ditunjukkan seperti berikut.

Data yang diketahui untuk menghitung *Gain* atau $G(\text{dB})$ adalah:

- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = 1550,92 nm
- Panjang gelombang pompa (λ_p) = 974,6 nm
- Konstanta Planck (h) = $6,626 \times 10^{-34}$ Js
- Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
- Lifetime (τ_2) = 10 ms
- Luas penampang efektif (A_{eff}) = 7.54×10^{-12} m²
- Absorpsi *cross section* untuk pompa (σ_p) = $7,1 \times 10^{-25}$ m²
- Emisi *cross section* untuk sinyal (σ_s) = $1,32 \times 10^{-25}$ m²m²
- Rapat ion erbium ($N = N_{mak}$) = $7,85 \times 10^{24}$ m⁻³
- Daya pompa ($P_p(0)$) = 20 – 60 mW = 0,02 – 0,06 W
- Daya sinyal (P_s) = -22,7 dBm = $5,37 \times 10^{-6}$ W

Program MATLAB

```

P_s0=5.37e-6;
lamda_s=1550.92e-9;
lamda_p=974.6e-9;
c=3e8;
P_p0=0.02:0.01:0.06;
A_eff = 7.54e-12;
h = 6.626e-34;
v_p = c/lamda_p;
sig_p = 1.7e-25;
N = 7.85e24;
v_s = c/lamda_s;
sig_s = 2.64e-25;
tau_2 = 0.01;
I_th = h*v_p/(sig_p*tau_2);
n_ = (v_p*sig_s)/(v_s*sig_p);
k1 = (sig_s*P_p0/(n_*sig_p*I_th*A_eff));
k2 = sig_p*N/2;
k3 = P_s0/(A_eff*I_th);
k4 = sig_s*N/(2*n_);

for w=1:length(P_p0)
    k1_1 = k1(w);
    L = 0:0.01:20;
    Is = (k1_1+k3)-(k1_1*exp(-k2*L)-k4*L);
    gain = 10*log10(Is/Is(1));
    plot(L,gain,'linewidth',1.3)
    hold all
end
xmin = 0;
xmax = 15;
ymin = 0;
ymax = 40;
axis([xmin xmax ymin ymax])
set(gca,'XTick',xmin:1:xmax,'YTick',ymin:5:ymax, 'fontname','time new
roman','fontsize',10)
xlabel('Panjang EDFA (m)')
ylabel('Gain (dB)');
grid on
legend('20mW','30mW','40mW','50mW','60mW')
hold off

```

Program MATLAB untuk menampilkan grafik sinyal pada daya sinyal tertentu dapat dilakukan dengan mengganti nilai daya sinyal yang ditentukan dalam program MATLAB yang sudah dibuat.

LAMPIRAN 7
PROGRAM PERUBAHAN GAIN TERHADAP PERUBAHAN PANJANG
GELOMBANG RENTANG C-BAND UNTUK DAYA SINYAL -22,7 dBm
DAN DAYA POMPA 60 mW

Data yang diketahui untuk menghitung *Gain (dB)* sebagai fungsi panjang gelombang *C-band* adalah seperti berikut:

- Panjang gelombang sinyal (λ_s) = rentang C-band sesuai dengan yang ditunjukkan dalam Tabel L 2.1.
- Panjang gelombang pompa (λ_p) = 974,6 nm
- Daya pompa ($P_p(0)$) = 20 – 60 mW = 0,02 – 0,06 W
- Daya sinyal (P_s) = -22,7 dBm = $5,37 \times 10^{-6}$ W
- Luas penampang efektif (A_{eff}) = $7,54 \times 10^{-12}$ m²
- Konstanta Planck (h) = $6,626 \times 10^{-34}$ Js
- Kecepatan cahaya (c) = 3×10^8 m/s
- Lifetime (τ_2) = 10 ms
- Absorpsi *cross section* untuk pompa (σ_p) = $7,1 \times 10^{-25}$ m²
- Emisi *cross section* untuk sinyal (σ_s) = seperti yang ditunjukkan dalam Tabel L 2.1 yang nilainya dibagi dengan *confinement factor* sinyal (Γ_s)
- Rapat ion erbium ($N = N_{mak}$) = $7,85 \times 10^{24}$ m⁻³

Solusi secara matematik dengan menggunakan pers. (L6.7) untuk mendapatkan grafik karakteristik *gain* sebagai fungsi panjang gelombang. Solusi secara simulasi dilakukan dengan menggunakan program MATLAB. Hasil program MATLAB ditunjukkan seperti berikut.

```
P_s0=5.37e-6;
P_p0=0.06;
lamda_p=974.6e-9;
A_eff= 7.54e-12;
h= 6.626e-34;
c=3e8;
```

```

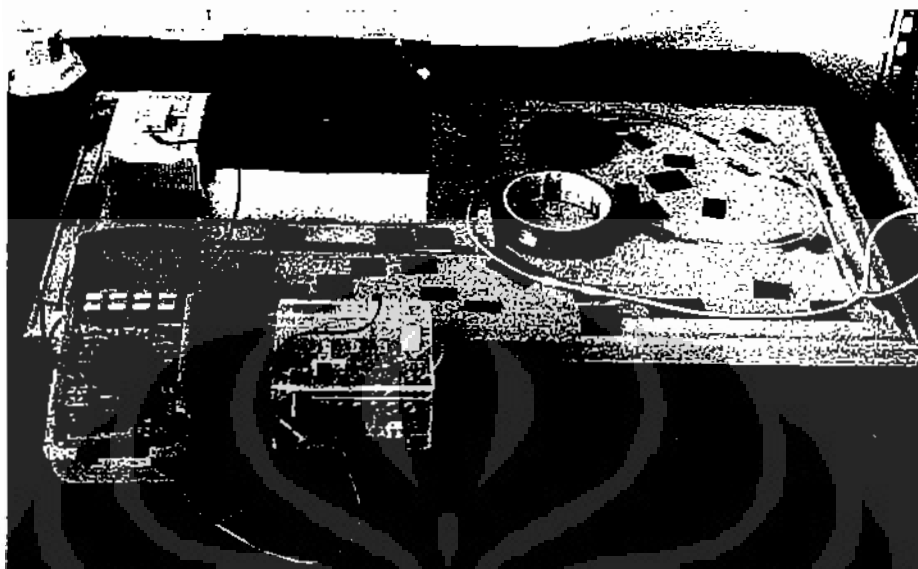
Lamda_CBand = [1530.33e-9 1531.90e-9 1533.47e-9 1535.04e-9 1536.61e-9
1538.19e-9 1539.77e-9 1541.35e-9 1542.94e-9 1544.53e-9 1546.12e-9 1547.72e-9
1549.32e-9 1550.92e-9 1552.52e-9 1554.13e-9 1555.75e-9 1557.36e-9 1558.98e-9
1560.61e-9];
sig_s = [3.97e-25 4e-25 3.76e-25 3.38e-25 3.12e-25 2.90e-25 2.78e-25 2.77e-25
2.73e-25 2.73e-25 2.73e-25 2.70e-25 2.67e-25 2.64e-25 2.58e-25 2.55e-25 2.49e-
25 2.46e-25 2.43e-25 2.31e-25];
Lamda_CBand_x= Lamda_CBand.*1e9;
v_p = c/lamda_p;
sig_p = 1.7e-25;
N = 7.85e24;
v_s = c./Lamda_CBand;
tau_2 = 0.01;
I_th = h*v_p/(sig_p*tau_2);
n_ = (v_p.*sig_s)/(v_s.*sig_p);
k1 = (sig_s.*P_p0/(n_.*sig_p*I_th*A_eff));
k2 = (sig_p*N/2);
k3 = P_s0/(A_eff*I_th);
k4 = sig_s.*N./(2*n_);

for L=(8:1:12)
    Is = (k1+k3)-(k1.*exp(-k2.*L)-k4.*L);
    gain = 10*log10(Is/k3);
    plot(Lamda_CBand_x,gain,'linewidth',1.1)
    hold all
end
grid on
legend('8 m','9 m','10 m','11 m','12 m')
xlabel('Panjang gelombang C-band (nm)')
ylabel('Gain (dB)')
title('Gain vs Lamda C-band untuk Ps=22,7 dBm dan Pp=60 mW')
ylim([37 41])
set(gca,'fontname','time new roman','fontsize',10)

```

Program MATLAB untuk menampilkan grafik sinyal pada daya sinyal tertentu dapat dilakukan dengan mengganti nilai daya sinyal yang ditentukan dalam program MATLAB yang sudah dibuat

LAMPIRAN 8
FOTO SET UP EKSPERIMEN

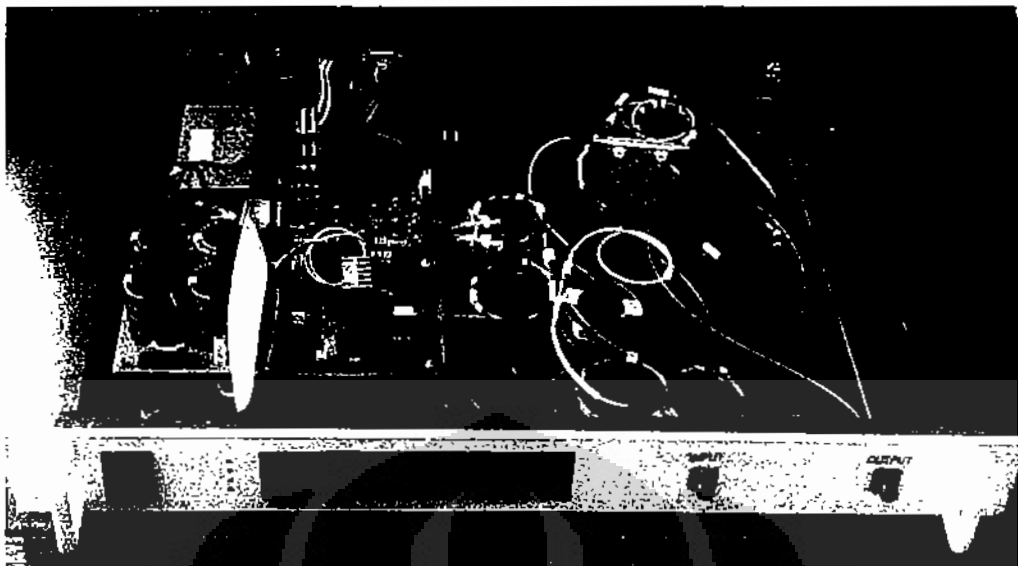


(a)



(b)

UNIVERSITAS INDONESIA



(c)

Gambar L 8.1. Foto *setup* eksperimen

Sumber: Hasil disain eksperimen

LAMPIRAN 9
TABEL PENGHITUNGAN HASIL EKSPERIMEN UNTUK GAIN DAN
NOISE FIGURE

Tabel L.9.1. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 8 m, daya sinyal (P_s) = -2.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU- Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	11,70	6,31	13,72	6,09	15,10	5,84	16,08	5,66	16,73	5,48
2	1531,90	11,75	6,33	13,65	6,16	14,98	5,87	16,00	5,67	16,99	5,46
3	1533,47	11,82	6,39	13,75	6,23	15,11	5,90	16,13	5,62	16,78	5,51
4	1535,04	11,73	6,35	13,67	6,16	15,00	5,86	15,97	5,70	16,67	5,50
5	1536,61	11,66	6,33	13,56	6,19	14,89	5,88	15,84	5,61	16,67	5,45
6	1538,19	11,64	6,42	13,56	6,23	14,83	5,96	15,76	5,78	16,49	5,55
7	1539,77	11,69	6,46	13,53	6,23	14,81	5,81	15,75	5,67	16,53	5,50
8	1541,35	11,67	6,39	13,51	6,12	14,77	5,84	15,71	5,71	16,44	5,58
9	1542,94	11,73	6,34	13,61	6,19	14,81	5,98	15,76	5,70	16,50	5,54
10	1544,53	11,70	6,32	13,58	6,11	14,83	5,90	15,75	5,76	16,48	5,64
11	1546,12	11,71	6,37	13,64	6,12	14,87	5,87	15,80	5,73	16,43	5,53
12	1547,72	11,86	6,35	13,56	6,09	14,87	5,90	15,74	5,74	16,52	5,60
13	1549,32	11,87	6,31	13,58	6,10	14,89	5,82	15,84	5,70	16,48	5,51
14	1550,92	11,79	6,26	13,64	6,13	14,88	5,86	15,82	5,68	16,50	5,53
15	1552,52	11,82	6,24	13,67	6,05	14,90	5,89	15,79	5,64	16,40	5,51
16	1554,13	11,80	6,27	13,62	6,04	14,84	5,87	15,76	5,70	16,47	5,54
17	1555,75	11,93	6,22	13,71	6,06	14,93	5,90	15,85	5,74	16,43	5,57
18	1557,36	11,85	6,24	13,68	6,12	14,87	5,88	15,77	5,74	16,51	5,62
19	1558,98	11,87	6,23	13,61	6,03	14,85	5,86	15,78	5,77	16,43	5,66
20	1560,61	11,64	6,19	13,43	6,00	14,68	5,84	15,57	5,73	16,45	5,63

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

UNIVERSITAS INDONESIA

Tabel L.9.2. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 8 m, daya sinyal (P_s) = -7.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	16,29	5,09	18,30	4,89	19,59	4,54	20,58	4,28	21,28	3,97
2	1531,90	16,22	5,09	18,19	4,85	19,54	4,61	20,54	4,34	21,49	3,88
3	1533,47	16,35	5,17	18,34	4,83	19,61	4,58	20,59	4,18	21,29	3,90
4	1535,04	16,15	5,17	18,09	4,85	19,39	4,52	20,33	4,16	21,07	3,78
5	1536,61	16,05	5,14	17,92	4,92	19,13	4,62	20,12	4,02	20,91	3,82
6	1538,19	15,92	5,13	17,80	4,88	19,02	4,61	19,89	4,22	20,60	3,82
7	1539,77	15,87	5,17	17,65	4,82	18,90	4,66	19,80	4,05	20,56	3,73
8	1541,35	15,81	5,13	17,67	4,79	18,87	4,60	19,74	4,30	20,47	3,65
9	1542,94	15,86	5,06	17,70	4,82	18,95	4,53	19,85	4,24	20,51	3,80
10	1544,53	15,85	5,01	17,68	4,80	18,93	4,60	19,81	4,16	20,52	3,76
11	1546,12	15,92	5,03	17,73	4,84	18,91	4,56	19,85	4,16	20,50	3,80
12	1547,72	15,87	5,01	17,75	4,83	18,97	4,52	19,86	4,11	20,52	3,89
13	1549,32	15,95	5,04	17,79	4,87	18,97	4,56	19,85	4,03	20,44	3,71
14	1550,92	15,96	5,05	17,77	4,89	18,94	4,66	19,83	4,04	20,45	3,77
15	1552,52	15,89	5,03	17,77	4,81	18,89	4,64	19,78	4,03	20,35	3,72
16	1554,13	15,90	5,00	17,72	4,80	18,83	4,58	19,71	4,02	20,35	3,75
17	1555,75	15,98	4,96	17,76	4,83	18,88	4,63	19,75	4,11	20,29	3,73
18	1557,36	15,84	5,02	17,61	4,86	18,82	4,64	19,66	4,08	20,27	3,74
19	1558,98	15,92	4,98	17,61	4,83	18,73	4,67	19,56	3,98	20,14	3,78
20	1560,61	15,67	5,04	17,61	4,84	18,42	4,61	19,23	3,96	20,09	3,74

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.3. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 8 m, daya sinyal (P_s) = -12.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	20,66	4,16	22,54	3,91	23,88	3,80	25,02	3,68	25,82	3,58
2	1531,90	20,58	4,12	22,72	3,91	24,11	3,83	24,96	3,71	25,73	3,56
3	1533,47	20,73	4,11	22,53	3,93	23,87	3,86	25,01	3,71	25,73	3,55
4	1535,04	20,33	4,17	22,22	3,93	23,58	3,84	24,61	3,71	25,33	3,57
5	1536,61	19,96	4,11	22,05	3,92	23,22	3,77	24,06	3,69	24,74	3,56
6	1538,19	19,78	4,15	21,51	4,00	22,74	3,80	23,59	3,66	24,31	3,52
7	1539,77	19,64	4,04	21,50	3,97	22,62	3,80	23,41	3,66	24,03	3,55
8	1541,35	19,52	4,09	21,34	3,91	22,42	3,82	23,29	3,62	23,91	3,51
9	1542,94	19,59	4,11	21,37	3,99	22,52	3,82	23,36	3,72	23,99	3,48
10	1544,53	19,63	4,04	21,41	3,96	22,54	3,82	23,40	3,69	23,98	3,52
11	1546,12	19,68	4,06	21,30	3,96	22,49	3,82	23,37	3,72	23,99	3,51
12	1547,72	19,66	4,07	21,39	3,96	22,48	3,88	23,33	3,64	23,97	3,57
13	1549,32	19,59	4,14	21,27	3,98	22,37	3,87	23,31	3,70	23,89	3,52
14	1550,92	19,66	4,03	21,25	3,94	22,36	3,83	23,12	3,76	23,80	3,57
15	1552,52	19,56	4,11	21,09	3,97	22,28	3,82	23,10	3,68	23,71	3,55
16	1554,13	19,54	4,09	21,11	3,96	22,16	3,86	23,02	3,69	23,55	3,57
17	1555,75	19,48	4,16	20,94	3,99	22,03	3,79	22,95	3,62	23,52	3,52
18	1557,36	19,35	4,15	21,07	3,97	22,05	3,76	22,74	3,61	23,38	3,54
19	1558,98	19,29	4,17	20,78	3,93	21,78	3,71	22,61	3,59	23,08	3,47
20	1560,61	18,93	4,04	20,62	3,92	21,57	3,72	22,05	3,59	22,53	3,46

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L. 9.4. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 8 m, daya sinyal (P_s) = -17.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	24,81	3,62	26,81	3,55	28,20	3,47	29,09	3,42	29,90	3,35
2	1531,90	24,87	3,60	26,83	3,54	28,19	3,46	29,14	3,42	29,93	3,35
3	1533,47	24,72	3,64	26,81	3,56	28,16	3,48	29,07	3,42	29,81	3,35
4	1535,04	24,13	3,62	26,14	3,55	27,44	3,48	28,35	3,42	29,06	3,37
5	1536,61	23,49	3,61	25,37	3,53	26,54	3,46	27,36	3,43	28,04	3,38
6	1538,19	22,96	3,66	24,68	3,53	25,76	3,46	26,50	3,40	27,13	3,35
7	1539,77	22,62	3,65	24,30	3,59	25,34	3,52	26,06	3,43	26,66	3,40
8	1541,35	22,47	3,62	24,13	3,57	25,18	3,52	25,90	3,47	26,44	3,36
9	1542,94	22,64	3,61	24,26	3,55	25,26	3,49	25,99	3,44	26,53	3,40
10	1544,53	22,66	3,66	24,26	3,55	25,28	3,47	25,97	3,43	26,52	3,36
11	1546,12	22,62	3,66	24,24	3,54	25,22	3,48	25,92	3,45	26,47	3,37
12	1547,72	22,58	3,61	24,18	3,53	25,15	3,48	25,84	3,44	26,36	3,38
13	1549,32	22,49	3,63	24,04	3,56	25,02	3,53	25,75	3,45	26,23	3,40
14	1550,92	22,50	3,60	23,99	3,53	24,97	3,48	25,60	3,43	26,09	3,36
15	1552,52	22,34	3,58	23,88	3,54	24,78	3,50	25,44	3,44	25,89	3,39
16	1554,13	22,23	3,59	23,73	3,54	24,62	3,49	25,24	3,41	25,71	3,36
17	1555,75	22,13	3,58	23,56	3,50	24,42	3,46	25,07	3,41	25,51	3,36
18	1557,36	21,84	3,59	23,25	3,51	24,06	3,47	24,67	3,42	25,14	3,36
19	1558,98	21,75	3,58	23,11	3,52	23,92	3,48	24,48	3,42	24,87	3,37
20	1560,61	21,14	3,60	22,35	3,50	23,07	3,47	23,66	3,41	24,03	3,34

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.5. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 8 m, daya sinyal (P_s) = -22.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	28,52	3,49	30,59	3,42	31,84	3,39	32,82	3,34	33,58	3,26
2	1531,90	28,51	3,49	30,62	3,42	31,91	3,39	32,92	3,30	33,67	3,27
3	1533,47	28,52	3,47	30,50	3,41	31,75	3,38	32,71	3,30	33,46	3,27
4	1535,04	27,43	3,48	29,39	3,44	30,59	3,40	31,47	3,34	32,20	3,28
5	1536,61	26,09	3,47	27,89	3,42	29,02	3,36	29,73	3,33	30,41	3,29
6	1538,19	25,12	3,46	26,66	3,41	27,74	3,35	28,38	3,31	28,91	3,29
7	1539,77	24,51	3,48	26,07	3,43	27,02	3,38	27,65	3,34	28,15	3,29
8	1541,35	24,33	3,47	25,82	3,44	26,72	3,38	27,37	3,32	27,83	3,27
9	1542,94	24,50	3,46	25,93	3,40	26,83	3,35	27,47	3,33	27,94	3,28
10	1544,53	24,40	3,49	25,95	3,42	26,82	3,38	27,44	3,34	27,91	3,28
11	1546,12	24,37	3,48	25,89	3,41	26,79	3,37	27,39	3,33	27,85	3,30
12	1547,72	24,35	3,46	25,78	3,41	26,62	3,38	27,24	3,33	27,71	3,28
13	1549,32	24,25	3,46	25,62	3,41	26,43	3,34	27,02	3,30	27,46	3,24
14	1550,92	24,13	3,48	25,45	3,40	26,30	3,34	26,87	3,32	27,30	3,26
15	1552,52	23,95	3,45	25,24	3,40	26,03	3,37	26,59	3,34	27,02	3,26
16	1554,13	23,66	3,47	25,04	3,41	25,77	3,38	26,33	3,35	26,73	3,31
17	1555,75	23,56	3,47	24,82	3,42	25,55	3,37	26,07	3,33	26,43	3,30
18	1557,36	23,19	3,45	24,37	3,39	25,08	3,37	25,59	3,35	25,96	3,30
19	1558,98	22,97	3,45	24,13	3,40	24,83	3,37	25,28	3,33	25,64	3,25
20	1560,61	22,22	3,43	23,26	3,41	23,90	3,37	24,29	3,34	24,62	3,28

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.6. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 9 m, daya sinyal (P_s) = -2.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	11,95	6,51	13,98	6,36	15,32	6,16	16,21	5,92	17,02	5,80
2	1531,90	11,97	6,60	13,95	6,35	15,24	6,10	16,22	5,92	17,25	5,78
3	1533,47	12,08	6,61	14,04	6,43	15,43	6,23	16,22	5,93	17,09	5,77
4	1535,04	11,94	6,56	13,93	6,35	15,31	6,16	16,26	5,96	17,01	5,85
5	1536,61	12,00	6,56	13,92	6,32	15,23	6,15	16,21	5,97	17,02	5,76
6	1538,19	11,97	6,61	13,84	6,47	15,20	6,30	16,07	6,12	16,91	5,88
7	1539,77	12,01	6,53	13,92	6,40	15,18	6,13	16,12	5,99	17,00	5,80
8	1541,35	11,95	6,60	13,86	6,47	15,16	6,16	16,06	6,06	16,93	5,74
9	1542,94	12,01	6,56	13,97	6,38	15,24	6,20	16,18	6,05	16,97	5,86
10	1544,53	11,98	6,55	13,94	6,32	15,24	6,16	16,20	6,05	16,96	5,83
11	1546,12	12,08	6,51	14,03	6,34	15,24	6,08	16,22	5,94	17,01	5,75
12	1547,72	12,15	6,46	14,00	6,34	15,31	6,17	16,27	6,00	17,05	5,72
13	1549,32	12,17	6,45	14,07	6,33	15,32	6,12	16,31	5,88	16,99	5,74
14	1550,92	12,22	6,51	14,01	6,40	15,31	6,14	16,26	5,94	17,00	5,80
15	1552,52	12,18	6,52	14,05	6,38	15,32	6,15	16,23	5,98	16,89	5,82
16	1554,13	12,20	6,46	13,99	6,35	15,27	6,16	16,14	5,99	17,00	5,82
17	1555,75	12,22	6,45	14,02	6,33	15,28	6,21	16,26	6,08	16,93	5,81
18	1557,36	12,08	6,51	13,88	6,39	15,19	6,17	16,19	6,01	16,92	5,83
19	1558,98	12,12	6,48	14,01	6,37	15,25	6,22	16,14	6,08	16,91	5,85
20	1560,61	12,02	6,50	13,70	6,35	15,02	6,22	16,00	6,08	16,94	5,84

Sumber: Hasil eksperimen dan penghitungan

Tabel L 9.7. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 9 m, daya sinyal (P_s) = -7.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	16,56	5,47	18,55	5,27	19,97	4,84	21,01	4,60	21,79	4,22
2	1531,90	16,43	5,41	18,55	5,18	19,88	4,95	20,98	4,64	21,78	4,14
3	1533,47	16,70	5,55	18,58	5,26	19,99	4,95	21,02	4,57	21,95	4,29
4	1535,04	16,51	5,46	18,50	5,16	19,82	4,93	20,87	4,58	21,65	4,20
5	1536,61	16,34	5,54	18,33	5,24	19,70	4,97	20,69	4,48	21,45	4,16
6	1538,19	16,27	5,43	18,26	5,23	19,63	4,95	20,63	4,55	21,38	4,10
7	1539,77	16,26	5,45	18,33	5,17	19,53	4,97	20,52	4,47	21,22	4,17
8	1541,35	16,21	5,41	18,19	5,12	19,53	4,88	20,46	4,65	21,22	4,19
9	1542,94	16,43	5,41	18,30	5,13	19,59	4,83	20,57	4,55	21,28	4,14
10	1544,53	16,34	5,41	18,35	5,19	19,60	4,94	20,55	4,48	21,30	4,13
11	1546,12	16,47	5,39	18,32	5,13	19,67	4,88	20,60	4,55	21,36	4,19
12	1547,72	16,39	5,39	18,35	5,17	19,67	4,84	20,58	4,48	21,32	4,14
13	1549,32	16,51	5,43	18,35	5,23	19,66	4,92	20,60	4,47	21,36	4,11
14	1550,92	16,44	5,41	18,43	5,21	19,69	4,90	20,62	4,47	21,33	4,06
15	1552,52	16,39	5,43	18,32	5,19	19,66	4,94	20,55	4,45	21,30	4,10
16	1554,13	16,44	5,34	18,39	5,13	19,66	4,96	20,52	4,49	21,28	4,03
17	1555,75	16,53	5,31	18,35	5,08	19,56	4,87	20,49	4,54	21,24	4,09
18	1557,36	16,32	5,34	18,19	5,06	19,44	4,80	20,44	4,50	21,05	3,99
19	1558,98	16,49	5,43	18,29	5,07	19,45	4,86	20,40	4,46	21,10	4,15
20	1560,61	16,08	5,41	17,93	5,15	19,15	4,87	20,08	4,49	20,77	4,10

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L.9.8. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 9 m, daya sinyal (P_s) = -12.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	20,97	4,24	23,19	4,12	24,54	3,97	25,56	3,85	26,36	3,74
2	1531,90	21,00	4,33	23,11	4,11	24,47	3,95	25,54	3,88	26,36	3,66
3	1533,47	21,14	4,30	23,28	4,16	24,64	3,99	25,69	3,84	26,50	3,63
4	1535,04	20,80	4,35	22,93	4,22	24,24	3,91	25,23	3,83	26,05	3,70
5	1536,61	20,60	4,27	22,58	4,08	23,87	3,99	24,89	3,87	25,65	3,66
6	1538,19	20,39	4,29	22,41	4,17	23,63	4,04	24,54	3,78	25,30	3,67
7	1539,77	20,29	4,27	22,21	4,18	23,47	3,97	24,40	3,84	25,12	3,67
8	1541,35	20,26	4,25	22,16	4,09	23,40	4,00	24,30	3,80	25,03	3,62
9	1542,94	20,40	4,22	22,29	4,13	23,53	3,99	24,42	3,89	25,11	3,62
10	1544,53	20,30	4,24	22,27	4,16	23,50	3,93	24,46	3,87	25,14	3,69
11	1546,12	20,44	4,31	22,35	4,19	23,57	3,97	24,46	3,78	25,15	3,69
12	1547,72	20,47	4,39	22,29	4,17	23,57	3,99	24,44	3,81	25,14	3,71
13	1549,32	20,36	4,32	22,33	4,14	23,55	4,02	24,43	3,84	25,11	3,66
14	1550,92	20,43	4,26	22,28	4,10	23,47	4,03	24,30	3,88	25,01	3,67
15	1552,52	20,35	4,35	22,27	4,13	23,44	3,96	24,26	3,83	24,95	3,74
16	1554,13	20,20	4,32	22,13	4,18	23,33	3,98	24,23	3,88	24,83	3,78
17	1555,75	20,36	4,37	22,14	4,19	23,32	4,00	24,12	3,85	24,77	3,75
18	1557,36	20,17	4,37	21,92	4,12	23,08	3,97	23,85	3,89	24,50	3,74
19	1558,98	20,11	4,35	21,95	4,10	23,02	3,93	23,85	3,85	24,44	3,71
20	1560,61	19,71	4,26	21,48	4,09	22,51	3,98	23,30	3,86	23,88	3,78

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.9. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 9 m, daya sinyal (P_s) = -17.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	25,09	3,81	27,49	3,70	28,81	3,60	29,90	3,51	30,72	3,44
2	1531,90	25,43	3,88	27,47	3,74	28,82	3,60	29,82	3,55	30,74	3,47
3	1533,47	25,21	3,82	27,44	3,69	28,75	3,58	29,84	3,54	30,62	3,41
4	1535,04	24,76	3,88	26,91	3,71	28,34	3,61	29,24	3,51	30,05	3,45
5	1536,61	24,33	3,82	26,38	3,68	27,59	3,57	28,45	3,51	29,21	3,45
6	1538,19	23,61	3,87	25,67	3,66	26,90	3,57	27,79	3,53	28,46	3,41
7	1539,77	23,46	3,82	25,33	3,71	26,51	3,64	27,32	3,57	28,00	3,49
8	1541,35	23,35	3,85	25,17	3,73	26,36	3,59	27,20	3,55	27,80	3,40
9	1542,94	23,51	3,86	25,29	3,73	26,44	3,62	27,26	3,55	27,91	3,45
10	1544,53	23,41	3,82	25,32	3,71	26,49	3,59	27,29	3,54	27,94	3,44
11	1546,12	23,55	3,80	25,37	3,67	26,52	3,62	27,28	3,56	27,93	3,41
12	1547,72	23,52	3,84	25,37	3,69	26,48	3,58	27,19	3,53	27,84	3,46
13	1549,32	23,36	3,81	25,27	3,70	26,37	3,60	27,12	3,55	27,75	3,47
14	1550,92	23,49	3,80	25,09	3,69	26,20	3,63	27,00	3,58	27,59	3,44
15	1552,52	23,25	3,85	25,00	3,70	26,03	3,62	26,84	3,56	27,41	3,48
16	1554,13	23,27	3,74	24,79	3,67	25,81	3,60	26,64	3,52	27,20	3,46
17	1555,75	23,06	3,77	24,79	3,68	25,84	3,58	26,47	3,55	27,06	3,46
18	1557,36	22,90	3,84	24,61	3,74	25,59	3,60	26,12	3,57	26,82	3,47
19	1558,98	22,73	3,83	24,25	3,70	25,20	3,60	25,95	3,55	26,42	3,43
20	1560,61	22,34	3,83	23,70	3,67	24,59	3,58	25,23	3,53	25,60	3,46

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.10. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 9 m, daya sinyal (P_s) = -22.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	29,13	3,67	31,35	3,55	32,79	3,46	33,69	3,41	34,48	3,32
2	1531,90	29,31	3,60	31,43	3,53	32,84	3,45	33,99	3,43	34,76	3,36
3	1533,47	29,19	3,63	31,34	3,58	32,71	3,42	33,64	3,39	34,33	3,30
4	1535,04	28,33	3,66	30,41	3,58	31,68	3,47	32,72	3,42	33,37	3,37
5	1536,61	27,10	3,65	29,07	3,58	30,29	3,47	31,28	3,43	31,89	3,37
6	1538,19	26,16	3,61	27,95	3,52	29,04	3,43	29,81	3,41	30,43	3,34
7	1539,77	25,71	3,67	27,34	3,55	28,42	3,47	29,14	3,45	29,83	3,36
8	1541,35	25,45	3,64	27,12	3,58	28,09	3,51	28,95	3,45	29,49	3,36
9	1542,94	25,66	3,65	27,27	3,54	28,32	3,49	29,04	3,42	29,60	3,36
10	1544,53	25,72	3,65	27,29	3,53	28,34	3,49	29,06	3,44	29,41	3,37
11	1546,12	25,74	3,64	27,33	3,56	28,30	3,50	29,02	3,42	29,57	3,37
12	1547,72	25,65	3,61	27,21	3,54	28,20	3,50	28,93	3,42	29,42	3,33
13	1549,32	25,56	3,61	27,26	3,56	28,02	3,50	28,73	3,44	29,14	3,33
14	1550,92	25,40	3,63	26,92	3,57	27,83	3,50	28,46	3,42	29,01	3,37
15	1552,52	25,24	3,66	26,70	3,58	27,57	3,52	28,22	3,47	28,69	3,30
16	1554,13	25,05	3,66	26,48	3,57	27,34	3,52	27,93	3,38	28,47	3,34
17	1555,75	24,91	3,61	26,30	3,57	27,18	3,50	27,79	3,43	28,14	3,38
18	1557,36	24,58	3,66	25,89	3,55	26,80	3,49	27,39	3,44	27,78	3,35
19	1558,98	24,32	3,63	25,60	3,55	26,37	3,50	26,90	3,45	27,32	3,33
20	1560,61	23,47	3,60	24,67	3,55	25,47	3,49	26,04	3,42	26,60	3,36

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.11. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 10 m, daya sinyal (P_s) = -2.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	12,01	6,83	13,94	6,72	15,29	6,55	16,35	6,27	17,29	6,10
2	1531,90	12,00	6,85	14,15	6,67	15,51	6,50	16,59	6,26	17,26	6,08
3	1533,47	12,16	6,90	13,98	6,68	15,40	6,49	16,42	6,34	17,28	6,05
4	1535,04	12,04	6,87	14,04	6,63	15,34	6,53	16,40	6,27	17,28	6,10
5	1536,61	11,97	6,88	14,12	6,63	15,44	6,54	16,53	6,24	17,20	6,02
6	1538,19	12,03	6,86	13,97	6,71	15,33	6,58	16,35	6,38	17,16	6,08
7	1539,77	12,07	6,84	14,09	6,63	15,45	6,49	16,43	6,26	17,18	6,05
8	1541,35	12,05	6,85	14,02	6,70	15,38	6,52	16,38	6,33	17,17	6,15
9	1542,94	12,09	6,86	14,07	6,59	15,41	6,40	16,43	6,29	17,24	6,07
10	1544,53	12,09	6,88	14,09	6,61	15,40	6,45	16,43	6,27	17,26	6,13
11	1546,12	12,20	6,75	14,09	6,64	15,36	6,46	16,39	6,39	17,25	6,05
12	1547,72	12,19	6,79	14,14	6,62	15,50	6,47	16,49	6,32	17,33	6,18
13	1549,32	12,20	6,88	14,07	6,60	15,45	6,42	16,45	6,24	17,35	6,06
14	1550,92	12,19	6,88	14,12	6,61	15,48	6,43	16,51	6,32	17,34	6,07
15	1552,52	12,18	6,93	14,09	6,64	15,41	6,44	16,38	6,35	17,33	6,10
16	1554,13	12,23	6,79	14,10	6,63	15,48	6,43	16,46	6,28	17,20	6,12
17	1555,75	12,26	6,79	14,12	6,66	15,45	6,43	16,45	6,30	17,36	6,03
18	1557,36	12,19	6,80	14,25	6,60	15,52	6,43	16,55	6,25	17,25	6,10
19	1558,98	12,31	6,71	14,11	6,61	15,45	6,49	16,46	6,32	17,32	6,04
20	1560,61	12,13	6,71	14,22	6,60	15,55	6,41	16,55	6,26	17,10	6,08

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.12. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 10 m, daya sinyal (P_s) = -7.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU- Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	16,60	5,82	18,66	5,55	20,04	5,36	21,21	4,96	22,04	4,49
2	1531,90	16,59	5,84	18,77	5,51	20,19	5,38	21,16	4,92	21,97	4,45
3	1533,47	16,67	5,85	18,73	5,57	20,08	5,33	21,18	4,93	22,03	4,53
4	1535,04	16,54	5,82	18,65	5,53	20,05	5,33	21,12	4,96	21,94	4,59
5	1536,61	16,46	5,87	18,63	5,50	20,00	5,31	20,95	4,93	21,78	4,55
6	1538,19	16,45	5,71	18,50	5,54	19,81	5,32	20,90	4,80	21,70	4,43
7	1539,77	16,49	5,69	18,42	5,52	19,83	5,25	20,85	4,86	21,64	4,48
8	1541,35	16,35	5,72	18,42	5,51	19,81	5,25	20,80	4,95	21,59	4,60
9	1542,94	16,52	5,71	18,50	5,54	19,88	5,26	20,89	4,84	21,68	4,49
10	1544,53	16,45	5,74	18,54	5,50	19,86	5,21	20,88	4,86	21,66	4,39
11	1546,12	16,52	5,77	18,54	5,51	19,86	5,32	20,93	4,90	21,71	4,36
12	1547,72	16,55	5,79	18,61	5,50	19,91	5,22	20,95	4,88	21,75	4,44
13	1549,32	16,64	5,74	18,50	5,53	19,84	5,32	20,96	4,83	21,76	4,50
14	1550,92	16,67	5,76	18,54	5,48	19,90	5,20	20,95	4,89	21,73	4,40
15	1552,52	16,73	5,76	18,47	5,54	19,82	5,35	20,96	4,82	21,73	4,47
16	1554,13	16,61	5,66	18,55	5,44	19,89	5,28	20,95	4,89	21,69	4,41
17	1555,75	16,65	5,68	18,52	5,43	19,84	5,24	20,95	4,93	21,74	4,42
18	1557,36	16,61	5,65	18,65	5,39	19,95	5,26	20,87	4,89	21,60	4,41
19	1558,98	16,52	5,69	18,59	5,42	19,83	5,26	20,86	4,87	21,66	4,40
20	1560,61	16,39	5,58	18,59	5,37	19,82	5,27	20,61	4,86	21,38	4,34

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.13. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 10 m, daya sinyal (P_s) = -12.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	21,11	4,64	23,29	4,36	24,69	4,17	25,73	4,01	26,59	3,83
2	1531,90	21,21	4,60	23,41	4,34	24,84	4,15	25,88	4,02	26,74	3,76
3	1533,47	21,27	4,67	23,41	4,37	24,83	4,16	25,82	4,01	26,72	3,78
4	1535,04	21,04	4,61	23,14	4,39	24,54	4,13	25,57	3,99	26,36	3,77
5	1536,61	20,88	4,57	22,99	4,32	24,36	4,20	25,34	3,96	26,14	3,80
6	1538,19	20,79	4,58	22,71	4,39	24,05	4,18	25,02	4,00	25,80	3,83
7	1539,77	20,71	4,54	22,69	4,38	23,96	4,15	24,97	4,02	25,74	3,79
8	1541,35	20,69	4,55	22,64	4,32	23,93	4,19	24,87	4,04	25,63	3,83
9	1542,94	20,80	4,47	22,78	4,32	24,03	4,19	25,03	4,01	25,72	3,83
10	1544,53	20,71	4,54	22,74	4,31	24,03	4,14	24,94	3,97	25,74	3,87
11	1546,12	20,84	4,56	22,79	4,36	24,10	4,12	25,02	3,93	25,74	3,84
12	1547,72	20,83	4,59	22,78	4,30	24,13	4,11	24,99	3,95	25,76	3,81
13	1549,32	20,88	4,68	22,79	4,32	24,04	4,17	24,96	3,97	25,73	3,82
14	1550,92	20,91	4,56	22,77	4,25	24,05	4,18	25,01	3,92	25,70	3,80
15	1552,52	20,84	4,59	22,74	4,31	24,02	4,14	24,93	3,99	25,63	3,90
16	1554,13	20,80	4,60	22,78	4,33	24,02	4,13	24,91	4,01	25,59	3,87
17	1555,75	20,83	4,49	22,61	4,31	23,84	4,12	24,78	3,94	25,49	3,84
18	1557,36	20,66	4,51	22,42	4,29	23,80	4,14	24,55	4,01	25,26	3,88
19	1558,98	20,71	4,56	22,64	4,25	23,83	4,13	24,67	3,98	25,32	3,84
20	1560,61	20,61	4,51	22,41	4,27	23,70	4,11	24,29	3,98	24,87	3,84

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.14. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 10 m, daya sinyal (P_s) = -17.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU- Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	25,44	4,14	27,59	3,85	29,10	3,71	30,19	3,59	31,00	3,50
2	1531,90	25,55	4,17	27,90	3,90	29,44	3,71	30,38	3,61	31,26	3,54
3	1533,47	25,51	4,10	27,70	3,88	29,14	3,70	30,24	3,61	31,09	3,49
4	1535,04	25,25	4,05	27,27	3,81	28,71	3,71	29,74	3,61	30,58	3,52
5	1536,61	24,70	4,14	26,87	3,81	28,17	3,69	29,20	3,61	29,94	3,53
6	1538,19	24,29	4,14	26,25	3,85	27,52	3,71	28,47	3,63	29,24	3,52
7	1539,77	23,99	4,02	26,11	3,88	27,31	3,73	28,20	3,67	28,93	3,54
8	1541,35	24,03	4,15	25,92	3,86	27,14	3,70	28,01	3,61	28,69	3,51
9	1542,94	24,13	3,98	26,02	3,89	27,23	3,70	28,11	3,60	28,72	3,54
10	1544,53	24,18	4,04	26,02	3,77	27,23	3,71	28,13	3,62	28,85	3,50
11	1546,12	24,22	3,98	26,11	3,79	27,27	3,70	28,17	3,63	28,84	3,51
12	1547,72	24,18	3,98	26,02	3,83	27,27	3,68	28,14	3,59	28,82	3,54
13	1549,32	24,20	4,00	25,91	3,80	27,10	3,71	28,02	3,60	28,70	3,51
14	1550,92	24,07	3,98	25,94	3,80	27,10	3,74	27,96	3,66	28,70	3,57
15	1552,52	24,01	4,03	25,74	3,83	26,92	3,73	27,78	3,62	28,55	3,55
16	1554,13	23,91	4,03	25,78	3,81	26,90	3,69	27,71	3,56	28,42	3,49
17	1555,75	23,96	3,98	25,64	3,81	26,64	3,71	27,51	3,63	28,17	3,55
18	1557,36	23,82	4,07	25,47	3,81	26,53	3,72	27,29	3,63	27,79	3,50
19	1558,98	23,64	4,09	25,26	3,80	26,36	3,72	27,09	3,63	27,73	3,49
20	1560,61	23,19	4,09	24,94	3,84	25,87	3,68	26,60	3,60	27,08	3,55

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.15. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 10 m, daya sinyal (P_s) = -22.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	29,67	3,91	31,90	3,68	33,28	3,53	34,29	3,47	35,22	3,39
2	1531,90	29,77	3,83	31,95	3,68	33,31	3,54	34,42	3,49	35,23	3,40
3	1533,47	29,66	3,90	31,90	3,70	33,30	3,58	34,33	3,49	35,15	3,42
4	1535,04	28,89	3,89	31,17	3,68	32,47	3,58	33,50	3,46	34,32	3,40
5	1536,61	27,77	3,82	29,88	3,72	31,15	3,56	32,11	3,46	33,32	3,42
6	1538,19	26,87	3,80	28,83	3,72	29,88	3,62	30,87	3,48	31,49	3,41
7	1539,77	26,36	3,79	28,21	3,72	29,38	3,61	30,17	3,50	30,84	3,42
8	1541,35	26,31	3,78	28,06	3,69	29,19	3,58	29,99	3,47	30,59	3,42
9	1542,94	26,43	3,79	28,25	3,70	29,38	3,59	30,13	3,46	30,73	3,41
10	1544,53	26,53	3,85	28,27	3,72	29,38	3,55	30,18	3,47	30,77	3,43
11	1546,12	26,54	3,81	28,31	3,69	29,43	3,53	30,19	3,44	30,77	3,41
12	1547,72	26,56	3,82	28,26	3,71	29,31	3,58	30,07	3,47	30,68	3,43
13	1549,32	26,38	3,80	28,13	3,70	29,16	3,55	29,94	3,48	30,49	3,41
14	1550,92	26,39	3,82	27,98	3,70	29,02	3,60	29,73	3,50	30,32	3,42
15	1552,52	26,27	3,81	27,80	3,73	28,78	3,56	29,49	3,49	30,05	3,41
16	1554,13	26,05	3,84	27,55	3,76	28,60	3,60	29,26	3,46	29,77	3,40
17	1555,75	25,91	3,81	27,48	3,73	28,43	3,59	29,13	3,51	29,62	3,40
18	1557,36	25,74	3,82	27,17	3,75	28,11	3,56	28,74	3,49	29,24	3,40
19	1558,98	25,35	3,81	26,77	3,73	27,65	3,58	28,28	3,49	28,76	3,41
20	1560,61	24,61	3,81	25,92	3,70	26,75	3,58	27,34	3,46	27,77	3,40

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.16. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 11 m, daya sinyal (P_s) = -2.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	11,87	7,18	14,03	6,90	15,38	6,75	16,41	6,51	17,29	6,38
2	1531,90	12,17	7,19	14,18	6,97	15,59	6,75	16,71	6,52	17,53	6,35
3	1533,47	11,96	7,12	14,00	6,96	15,47	6,68	16,51	6,54	17,35	6,37
4	1535,04	12,03	7,06	14,10	6,92	15,50	6,67	16,54	6,52	17,37	6,39
5	1536,61	12,12	7,09	14,14	7,00	15,59	6,74	16,64	6,51	17,48	6,39
6	1538,19	12,00	7,06	14,11	6,94	15,47	6,82	16,49	6,55	17,32	6,36
7	1539,77	12,16	7,07	14,07	6,99	15,38	6,75	16,60	6,45	17,36	6,34
8	1541,35	12,12	7,12	14,15	6,98	15,46	6,76	16,54	6,52	17,36	6,35
9	1542,94	12,13	7,13	14,19	6,95	15,51	6,72	16,56	6,52	17,40	6,32
10	1544,53	12,12	7,10	14,14	6,91	15,58	6,76	16,56	6,53	17,41	6,33
11	1546,12	12,20	7,04	14,22	6,95	15,53	6,73	16,54	6,56	17,38	6,37
12	1547,72	12,20	7,10	14,22	6,96	15,58	6,69	16,59	6,48	17,39	6,37
13	1549,32	12,23	7,08	14,20	6,99	15,55	6,74	16,61	6,47	17,44	6,34
14	1550,92	12,14	7,14	14,11	7,00	15,52	6,73	16,55	6,54	17,36	6,38
15	1552,52	12,12	7,17	14,08	6,94	15,38	6,73	16,53	6,58	17,31	6,40
16	1554,13	12,10	7,15	14,18	6,95	15,48	6,70	16,50	6,52	17,32	6,40
17	1555,75	12,15	7,12	14,18	6,97	15,47	6,72	16,50	6,54	17,33	6,40
18	1557,36	12,21	7,12	14,35	6,91	15,70	6,65	16,70	6,55	17,51	6,34
19	1558,98	12,19	7,15	14,26	6,96	15,57	6,70	16,56	6,50	17,37	6,39
20	1560,61	12,07	7,14	14,28	6,91	15,60	6,68	16,69	6,54	17,49	6,38

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.17. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 11 m, daya sinyal (P_s) = -7.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	16,56	5,96	18,58	5,74	20,10	5,51	21,19	5,01	21,99	4,67
2	1531,90	16,50	6,04	18,86	5,67	20,29	5,53	21,20	5,07	22,20	4,62
3	1533,47	16,70	5,95	18,72	5,62	20,13	5,51	21,22	5,03	22,08	4,66
4	1535,04	16,59	5,97	18,66	5,70	20,10	5,45	21,19	5,11	22,00	4,65
5	1536,61	16,50	6,08	18,71	5,66	20,15	5,46	21,11	5,05	22,03	4,63
6	1538,19	16,50	6,09	18,58	5,70	19,98	5,50	21,07	5,06	21,84	4,64
7	1539,77	16,48	5,92	18,69	5,71	20,07	5,42	21,04	5,10	21,90	4,69
8	1541,35	16,46	5,96	18,59	5,72	20,00	5,51	21,00	5,15	21,85	4,65
9	1542,94	16,57	5,96	18,67	5,65	20,05	5,47	21,08	5,09	21,90	4,62
10	1544,53	16,55	5,89	18,64	5,70	20,04	5,49	21,07	5,06	21,89	4,64
11	1546,12	16,56	5,90	18,69	5,66	20,09	5,46	21,16	5,03	21,94	4,60
12	1547,72	16,68	5,99	18,75	5,71	20,11	5,45	21,14	5,07	21,98	4,58
13	1549,32	16,64	6,04	18,67	5,71	20,08	5,49	21,17	5,05	21,94	4,63
14	1550,92	16,66	6,04	18,69	5,70	20,09	5,50	21,17	5,06	21,92	4,66
15	1552,52	16,67	5,94	18,66	5,64	20,00	5,50	21,15	5,05	21,82	4,63
16	1554,13	16,66	5,96	18,69	5,63	20,00	5,51	21,14	5,07	21,86	4,65
17	1555,75	16,70	5,94	18,61	5,62	19,99	5,54	21,18	5,04	21,83	4,54
18	1557,36	16,66	5,99	18,73	5,61	20,07	5,47	21,07	5,07	21,86	4,63
19	1558,98	16,66	6,00	18,75	5,61	20,03	5,52	21,06	5,09	21,89	4,61
20	1560,61	16,44	6,04	18,69	5,68	20,07	5,50	20,81	5,06	21,76	4,59

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.18. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 11 m, daya sinyal (P_s) = -12.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	21,08	4,73	23,35	4,56	24,76	4,35	25,80	4,21	26,79	3,96
2	1531,90	21,50	4,72	23,51	4,51	25,01	4,36	26,06	4,16	26,79	3,93
3	1533,47	21,25	4,69	23,39	4,54	24,80	4,35	25,90	4,13	26,89	3,94
4	1535,04	21,17	4,73	23,33	4,52	24,77	4,38	25,76	4,19	26,69	3,95
5	1536,61	21,16	4,71	23,23	4,53	24,59	4,37	25,68	4,18	26,38	3,98
6	1538,19	20,82	4,76	22,95	4,53	24,30	4,37	25,29	4,18	26,15	3,92
7	1539,77	20,81	4,68	22,84	4,55	24,24	4,35	25,29	4,20	26,03	3,96
8	1541,35	20,72	4,69	22,87	4,53	24,20	4,35	25,17	4,13	26,01	3,99
9	1542,94	20,77	4,65	22,88	4,54	24,26	4,35	25,23	4,18	26,06	3,95
10	1544,53	20,93	4,65	22,92	4,51	24,26	4,37	25,25	4,18	26,07	3,96
11	1546,12	20,84	4,61	23,01	4,53	24,33	4,36	25,33	4,11	26,14	3,95
12	1547,72	20,94	4,62	22,95	4,51	24,31	4,34	25,30	4,15	26,17	3,98
13	1549,32	20,88	4,69	22,96	4,51	24,25	4,37	25,28	4,19	26,14	3,98
14	1550,92	20,90	4,69	22,95	4,53	24,21	4,37	25,25	4,13	26,05	3,98
15	1552,52	20,74	4,66	22,84	4,56	24,11	4,38	25,17	4,12	26,02	3,97
16	1554,13	20,85	4,66	22,88	4,53	24,21	4,35	25,17	4,14	25,88	3,93
17	1555,75	20,84	4,64	22,81	4,51	24,08	4,34	25,06	4,16	25,95	3,92
18	1557,36	20,97	4,62	22,98	4,56	24,20	4,33	25,05	4,18	25,79	3,94
19	1558,98	20,84	4,66	22,76	4,49	24,03	4,32	24,99	4,16	25,65	3,95
20	1560,61	20,75	4,62	22,70	4,53	23,94	4,32	24,79	4,17	25,32	3,94

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.19. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 11 m, daya sinyal (P_s) = -17.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	25,47	4,23	27,87	4,03	29,28	3,92	30,34	3,76	31,24	3,57
2	1531,90	25,82	4,29	28,07	4,04	29,57	3,94	30,72	3,74	31,52	3,60
3	1533,47	25,65	4,23	27,90	4,02	29,31	3,91	30,41	3,76	31,32	3,56
4	1535,04	25,44	4,20	27,61	3,98	29,03	3,86	30,09	3,80	30,89	3,61
5	1536,61	25,13	4,22	27,21	3,99	28,56	3,89	29,66	3,75	30,42	3,59
6	1538,19	24,55	4,22	26,56	4,00	27,73	3,88	28,87	3,75	29,65	3,62
7	1539,77	24,43	4,20	26,41	4,07	27,73	3,85	28,73	3,76	29,33	3,61
8	1541,35	24,26	4,13	26,26	4,03	27,54	3,85	28,47	3,73	29,22	3,63
9	1542,94	24,40	4,11	26,40	4,00	27,67	3,83	28,58	3,73	29,31	3,60
10	1544,53	24,49	4,13	26,49	4,03	27,77	3,85	28,65	3,73	29,38	3,60
11	1546,12	24,45	4,18	26,44	3,99	27,75	3,88	28,69	3,75	29,40	3,59
12	1547,72	24,59	4,16	26,41	4,04	27,67	3,87	28,59	3,76	29,31	3,59
13	1549,32	24,46	4,15	26,39	4,07	27,63	3,88	28,51	3,76	29,23	3,54
14	1550,92	24,44	4,13	26,36	4,01	27,58	3,89	28,49	3,74	29,16	3,57
15	1552,52	24,31	4,18	26,21	3,98	27,37	3,87	28,30	3,74	28,97	3,57
16	1554,13	24,21	4,19	26,12	3,98	27,38	3,88	28,25	3,76	28,93	3,58
17	1555,75	24,26	4,16	26,09	4,02	27,21	3,86	28,04	3,73	28,73	3,59
18	1557,36	24,38	4,15	26,01	4,02	27,23	3,91	28,07	3,71	28,70	3,58
19	1558,98	24,02	4,12	25,72	3,97	26,94	3,91	27,67	3,73	28,29	3,61
20	1560,61	23,82	4,14	25,51	3,95	26,57	3,89	27,31	3,75	27,86	3,60

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.20. Gain dan NF untuk panjang EDFA = 11 m, daya sinyal (P_s) = -22.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	29,64	3,96	31,89	3,81	33,45	3,65	34,66	3,53	35,47	3,43
2	1531,90	29,91	3,90	32,20	3,81	33,74	3,62	34,79	3,52	35,48	3,44
3	1533,47	29,59	3,93	32,03	3,74	33,53	3,64	34,60	3,52	35,48	3,45
4	1535,04	29,01	3,93	31,28	3,81	32,73	3,66	33,89	3,52	34,63	3,51
5	1536,61	28,11	3,94	30,25	3,85	31,58	3,67	32,65	3,55	33,40	3,46
6	1538,19	27,15	3,92	29,21	3,85	30,44	3,62	31,41	3,50	32,14	3,43
7	1539,77	26,90	3,93	28,79	3,89	30,01	3,67	30,88	3,51	31,62	3,47
8	1541,35	26,75	3,94	28,62	3,82	29,83	3,66	30,71	3,54	31,36	3,44
9	1542,94	26,86	3,95	28,77	3,83	29,98	3,62	30,86	3,55	31,53	3,48
10	1544,53	27,02	3,90	28,84	3,88	30,03	3,64	30,93	3,50	31,58	3,45
11	1546,12	27,03	3,90	28,89	3,84	30,09	3,64	30,90	3,54	31,57	3,44
12	1547,72	27,07	3,88	28,91	3,83	30,03	3,62	30,90	3,55	31,51	3,47
13	1549,32	26,91	3,95	28,74	3,87	29,89	3,67	30,75	3,52	31,30	3,47
14	1550,92	26,84	3,93	28,65	3,82	29,80	3,67	30,53	3,55	31,22	3,46
15	1552,52	26,83	3,96	28,48	3,85	29,64	3,65	30,35	3,54	30,96	3,48
16	1554,13	26,73	3,97	28,42	3,83	29,51	3,65	30,12	3,54	30,80	3,46
17	1555,75	26,66	3,95	28,24	3,82	29,28	3,64	30,03	3,54	30,54	3,48
18	1557,36	26,32	3,91	27,96	3,87	28,97	3,61	29,81	3,52	30,19	3,44
19	1558,98	26,15	3,94	27,76	3,83	28,74	3,61	29,28	3,52	29,85	3,45
20	1560,61	25,64	3,91	27,08	3,82	27,97	3,62	28,57	3,49	29,08	3,48

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.21. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 12 m, daya sinyal (P_s) = -2.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ . Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	11,42	7,44	13,53	7,28	15,03	7,05	16,11	6,81	16,86	6,73
2	1531,90	11,43	7,38	13,92	7,31	14,95	7,10	16,04	6,84	17,02	6,69
3	1533,47	11,50	7,33	13,51	7,27	15,08	7,01	16,19	6,76	16,90	6,62
4	1535,04	11,55	7,44	13,58	7,12	15,04	6,97	16,05	6,87	16,90	6,63
5	1536,61	11,44	7,42	13,73	7,12	15,03	6,95	16,12	6,83	17,03	6,61
6	1538,19	11,54	7,35	13,69	7,20	15,12	7,01	16,16	6,80	16,97	6,70
7	1539,77	11,58	7,34	13,76	7,27	15,12	7,02	16,16	6,78	17,06	6,61
8	1541,35	11,63	7,43	13,69	7,28	15,07	7,00	16,15	6,87	16,99	6,61
9	1542,94	11,68	7,34	13,68	7,20	15,16	6,97	16,23	6,72	17,03	6,66
10	1544,53	11,68	7,28	13,76	7,26	15,15	7,09	16,19	6,87	17,02	6,65
11	1546,12	11,69	7,42	13,69	7,30	15,18	7,10	16,22	6,87	17,02	6,64
12	1547,72	11,81	7,40	13,84	7,31	15,24	7,10	16,29	6,75	17,10	6,63
13	1549,32	11,80	7,41	13,75	7,29	15,23	7,10	16,30	6,85	17,08	6,65
14	1550,92	11,76	7,35	13,79	7,24	15,26	6,98	16,29	6,75	17,05	6,60
15	1552,52	11,74	7,32	13,79	7,24	15,25	7,01	16,31	6,81	17,05	6,74
16	1554,13	11,83	7,40	13,85	7,18	15,24	7,08	16,30	6,81	17,13	6,66
17	1555,75	11,90	7,49	13,83	7,22	15,29	7,04	16,37	6,74	17,02	6,61
18	1557,36	11,73	7,34	13,82	7,24	15,22	7,03	16,25	6,81	17,13	6,57
19	1558,98	11,78	7,38	13,79	7,28	15,17	7,05	16,24	6,81	17,04	6,56
20	1560,61	11,62	7,35	13,92	7,24	15,16	7,03	16,15	6,81	17,17	6,68

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.22. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 12 m, daya sinyal (P_s) = -7.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	16,18	6,25	18,30	6,02	19,82	5,62	20,90	5,27	21,70	4,81
2	1531,90	16,10	6,31	18,30	6,00	19,80	5,66	20,91	5,27	21,84	4,82
3	1533,47	16,18	6,25	18,32	6,10	19,77	5,70	20,94	5,23	21,67	4,78
4	1535,04	16,18	6,25	18,33	6,01	19,78	5,68	20,83	5,28	21,67	4,82
5	1536,61	16,05	6,14	18,36	5,91	19,80	5,62	20,82	5,30	21,75	4,88
6	1538,19	16,12	6,30	18,32	5,97	19,76	5,69	20,78	5,23	21,63	4,90
7	1539,77	16,10	6,24	18,36	5,96	19,76	5,66	20,81	5,32	21,64	4,90
8	1541,35	16,18	6,12	18,31	5,90	19,72	5,69	20,75	5,30	21,62	4,85
9	1542,94	16,21	6,26	18,38	6,03	19,73	5,68	20,91	5,27	21,63	4,87
10	1544,53	16,27	6,18	18,35	5,97	19,81	5,70	20,81	5,29	21,66	4,83
11	1546,12	16,26	6,28	18,38	5,96	19,76	5,68	20,87	5,25	21,65	4,81
12	1547,72	16,32	6,24	18,44	5,93	19,82	5,60	20,94	5,29	21,70	4,80
13	1549,32	16,39	6,25	18,43	5,90	19,80	5,61	20,92	5,25	21,64	4,86
14	1550,92	16,44	6,28	18,44	5,90	19,79	5,62	20,95	5,21	21,71	4,87
15	1552,52	16,36	6,25	18,29	5,93	19,73	5,57	20,97	5,23	21,71	4,79
16	1554,13	16,50	6,29	18,38	5,94	19,76	5,64	21,02	5,27	21,76	4,89
17	1555,75	16,44	6,24	18,46	5,95	19,81	5,65	20,99	5,28	21,65	4,85
18	1557,36	16,23	6,28	18,54	5,93	19,94	5,62	20,83	5,26	21,70	4,84
19	1558,98	16,40	6,20	18,31	5,93	19,70	5,60	20,89	5,26	21,66	4,84
20	1560,61	16,27	6,26	18,47	5,91	19,85	5,63	20,79	5,22	21,68	4,72

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.23. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 12 m, daya sinyal (P_s) = -12.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	20,75	4,89	23,00	4,68	24,49	4,47	25,62	4,30	26,45	4,09
2	1531,90	20,93	4,83	23,15	4,66	24,72	4,49	25,78	4,31	26,63	4,12
3	1533,47	20,93	4,83	23,03	4,68	24,51	4,44	25,61	4,36	26,44	4,09
4	1535,04	20,70	4,86	22,99	4,65	24,44	4,42	25,49	4,29	26,34	4,15
5	1536,61	20,72	4,84	22,99	4,63	24,37	4,49	25,41	4,31	26,38	4,12
6	1538,19	20,55	4,88	22,73	4,68	24,11	4,50	25,20	4,32	26,02	4,12
7	1539,77	20,58	4,90	22,73	4,63	24,11	4,50	25,20	4,33	26,01	4,10
8	1541,35	20,46	4,81	22,63	4,63	24,02	4,52	25,05	4,32	25,89	4,10
9	1542,94	20,55	4,88	22,65	4,65	24,12	4,54	25,05	4,32	25,93	4,10
10	1544,53	20,65	4,82	22,73	4,62	24,14	4,54	25,17	4,32	26,01	4,14
11	1546,12	20,68	4,79	22,75	4,61	24,16	4,51	25,20	4,30	26,02	4,08
12	1547,72	20,69	4,80	22,79	4,64	24,17	4,51	25,17	4,32	26,00	4,12
13	1549,32	20,60	4,91	22,77	4,62	24,18	4,52	25,15	4,31	25,98	4,13
14	1550,92	20,63	4,89	22,80	4,65	24,18	4,52	25,14	4,35	26,01	4,16
15	1552,52	20,59	4,87	22,77	4,64	24,15	4,49	25,12	4,32	25,91	4,12
16	1554,13	20,68	4,80	22,77	4,64	24,10	4,45	25,13	4,30	25,94	4,14
17	1555,75	20,58	4,88	22,65	4,62	24,09	4,51	25,07	4,30	25,85	4,15
18	1557,36	20,66	4,86	22,79	4,66	24,12	4,44	25,13	4,30	25,87	4,14
19	1558,98	20,66	4,82	22,62	4,64	24,09	4,49	24,98	4,34	25,71	4,15
20	1560,61	20,66	4,83	22,59	4,64	23,96	4,48	24,90	4,27	25,60	4,08

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.24. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 12 m, daya sinyal (P_s) = -17.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ_s Sinyal (nm) ITU-Channel	$P_p = 20$ mW		$P_p = 30$ mW		$P_p = 40$ mW		$P_p = 50$ mW		$P_p = 60$ mW	
		Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)	Gain (dB)	<i>NF</i> (dB)
1	1530,33	25,14	4,44	27,45	4,27	28,95	4,04	30,06	3,95	30,97	3,71
2	1531,90	25,39	4,36	27,53	4,16	29,20	4,03	30,32	3,94	31,27	3,70
3	1533,47	25,17	4,35	27,51	4,20	28,94	4,01	30,07	3,93	30,94	3,69
4	1535,04	24,94	4,28	27,25	4,14	28,65	3,93	29,72	3,87	30,60	3,68
5	1536,61	24,53	4,30	26,75	4,15	28,28	4,01	29,41	3,87	30,25	3,71
6	1538,19	24,21	4,31	26,29	4,19	27,67	4,02	28,71	3,92	29,45	3,67
7	1539,77	23,99	4,33	26,09	4,17	27,54	4,00	28,51	3,88	29,28	3,67
8	1541,35	24,00	4,34	26,04	4,16	27,38	4,09	28,39	3,90	29,17	3,67
9	1542,94	24,11	4,21	26,23	4,12	27,49	3,98	28,52	3,93	29,30	3,66
10	1544,53	24,17	4,22	26,30	4,11	27,59	3,95	28,59	3,84	29,35	3,66
11	1546,12	24,26	4,27	26,36	4,17	27,68	4,04	28,62	3,87	29,39	3,65
12	1547,72	24,32	4,26	26,37	4,15	27,61	4,08	28,58	3,88	29,37	3,69
13	1549,32	24,24	4,30	26,32	4,16	27,60	4,05	28,52	3,85	29,28	3,74
14	1550,92	24,26	4,29	26,27	4,16	27,52	4,01	28,46	3,87	29,21	3,76
15	1552,52	24,26	4,30	26,23	4,13	27,48	4,00	28,35	3,85	29,08	3,65
16	1554,13	24,10	4,28	26,13	4,12	27,44	4,05	28,29	3,84	28,95	3,71
17	1555,75	24,19	4,31	26,17	4,18	27,28	4,06	28,16	3,86	28,82	3,64
18	1557,36	24,03	4,30	25,95	4,14	27,14	4,09	28,04	3,92	28,76	3,67
19	1558,98	23,85	4,33	25,72	4,11	27,01	4,06	27,84	3,85	28,44	3,68
20	1560,61	23,50	4,31	25,27	4,14	26,55	4,06	27,40	3,83	27,97	3,67

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen

Tabel L 9.25. Gain dan *NF* untuk panjang *EDFA* = 12 m, daya sinyal (P_s) = -22.7 dBm, dan daya pompa (P_p) = 20-60 mW

No	λ Sinyal (nm) ITU-Channel	Pp = 20 mW		Pp = 30 mW		Pp = 40 mW		Pp = 50 mW		Pp = 60 mW	
		Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)	Gain (dB)	NF (dB)
1	1530,33	29,07	4,16	31,65	3,92	33,16	3,77	34,42	3,58	35,14	3,51
2	1531,90	29,34	4,11	31,95	3,92	33,53	3,78	34,56	3,59	35,50	3,53
3	1533,47	29,17	4,11	31,70	3,90	33,18	3,74	34,33	3,58	35,05	3,52
4	1535,04	28,44	4,10	30,97	3,92	32,48	3,71	33,64	3,62	34,39	3,55
5	1536,61	27,62	4,08	30,01	3,96	31,40	3,80	32,45	3,59	33,23	3,54
6	1538,19	26,69	4,07	29,02	3,91	30,40	3,73	31,36	3,59	31,88	3,50
7	1539,77	26,43	4,08	28,73	3,96	29,99	3,82	30,82	3,57	31,48	3,50
8	1541,35	26,37	4,08	28,57	3,98	29,81	3,76	30,76	3,57	31,22	3,49
9	1542,94	26,55	4,03	28,78	3,97	30,06	3,69	30,93	3,60	31,38	3,50
10	1544,53	26,82	4,05	28,88	3,98	30,17	3,69	31,07	3,60	31,52	3,51
11	1546,12	26,83	4,07	28,90	3,98	30,24	3,69	31,14	3,61	31,56	3,49
12	1547,72	26,82	4,01	29,01	3,93	30,20	3,71	31,07	3,62	31,46	3,51
13	1549,32	26,74	4,03	28,88	3,92	30,03	3,69	30,93	3,57	31,31	3,53
14	1550,92	26,61	4,00	28,73	3,92	29,96	3,73	30,76	3,56	31,14	3,52
15	1552,52	26,52	4,06	28,59	3,92	29,77	3,74	30,63	3,56	30,95	3,53
16	1554,13	26,45	4,06	28,47	3,91	29,71	3,75	30,38	3,55	30,74	3,50
17	1555,75	26,38	4,06	28,44	3,94	29,49	3,66	30,36	3,61	30,56	3,53
18	1557,36	26,17	4,02	28,15	3,93	29,22	3,68	30,10	3,59	30,41	3,52
19	1558,98	26,05	4,05	27,90	3,89	28,94	3,63	29,61	3,56	29,87	3,51
20	1560,61	25,46	4,03	27,29	3,89	28,29	3,65	28,83	3,58	29,21	3,52

Sumber: Penghitungan hasil eksperimen