

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).

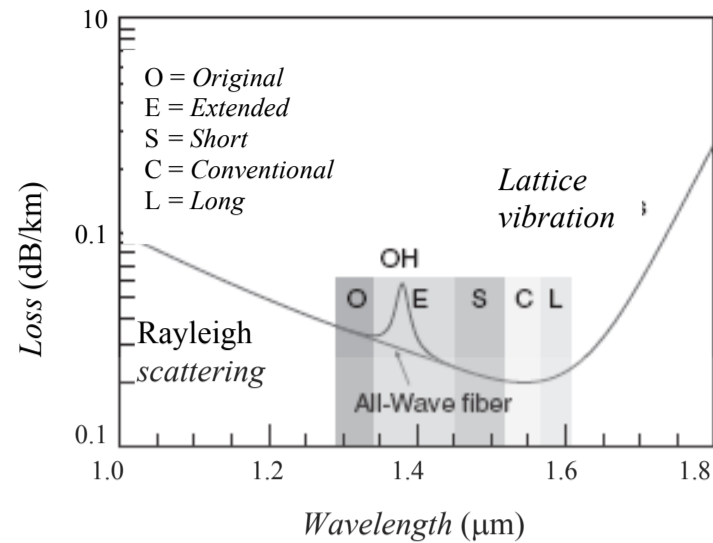
Pemancar optik atau sumber optik adalah piranti pembangkit gelombang elektromagnetik pada frekuensi optik, yaitu antara 0,3 THz sampai dengan 30.000 THz. Sumber optik yang sering digunakan dalam komunikasi serat optik adalah *laser diode (LD)* atau *light-emitting diode (LED)*. Fungsi pemancar optik 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

UNIVERSITAS INDONESIA

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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 multipleks yang ditempatkan pada sisi kirim (*power amplifier*), pada saluran (*in-line amplifier*), dan pada sisi penerima (*pre-amplifier*) [17].

UNIVERSITAS INDONESIA

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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.

UNIVERSITAS INDONESIA

Tabel 1.1. (sambungan)

No	Rentang panjang gelombang	Hasil	Keuntungan	Kerugian
2.	<i>L-band</i> dengan ASE <i>C-band</i> dimanfaatkan sebagai pompa [25].	$G=25\text{dB}$, variasi $G<4\text{dB}$ pada 1565–1607nm. <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 1570–1605nm. <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 1546,1-1557,3nm P_p 980nm=90mW P_s =-17,5 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 1526,5-1559,5nm. P_p =85mW.	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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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 <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 $L\text{-EDFA}$ 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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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].	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	Rentang panjang gelombang 65nm. <i>L-EDFA</i> pendek.	Disain kompleks Variasi $G>1$ dB P_p besar dan jumlahnya 3 buah <i>LD</i> $NF>5$ dB
		$G_{mak}=34$ 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	$G_{mak}>20$ dB. Rentang panjang gelombang 100nm. $NF<5$ dB.	Disain kompleks. Variasi $G>>1$ dB. P_p besar dan jumlahnya 3 buah <i>LD</i> . <i>L-EDFA</i> panjang.
2.	<i>C</i> dan <i>L band</i> [33].	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	$NF<5$ dB. Rentang panjang gelombang 40nm.	$G_{mak}<20$ dB Variasi $G>1$ dB
		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	$NF<5$ dB. Rentang panjang gelombang 58nm.	$G_{mak}<20$ dB Variasi $G>1$ dB

UNIVERSITAS INDONESIA

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>Variasi $G \gg 1$.</p> <p>P_p besar.</p> <p>Harga fiber amplifier mahal.</p>
4.	<i>S dan 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 dan C band</i> cukup kompleks.</p>

UNIVERSITAS INDONESIA

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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*.

UNIVERSITAS INDONESIA

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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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

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.

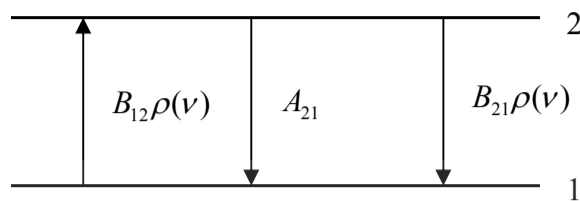
Absorpsi dan emisi cahaya dalam sistem dua *level* mempunyai dua *level* degenerasi, yaitu *level* 1 mempunyai degenerasi g_1 dan *level* 2 mempunyai degenerasi g_2 . Perubahan populasi *level* 1 dan 2 ditentukan oleh kekuatan transisi antara *sublevel* individu yang menyusun masing-masing *level*. Bilamana 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 excited 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

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

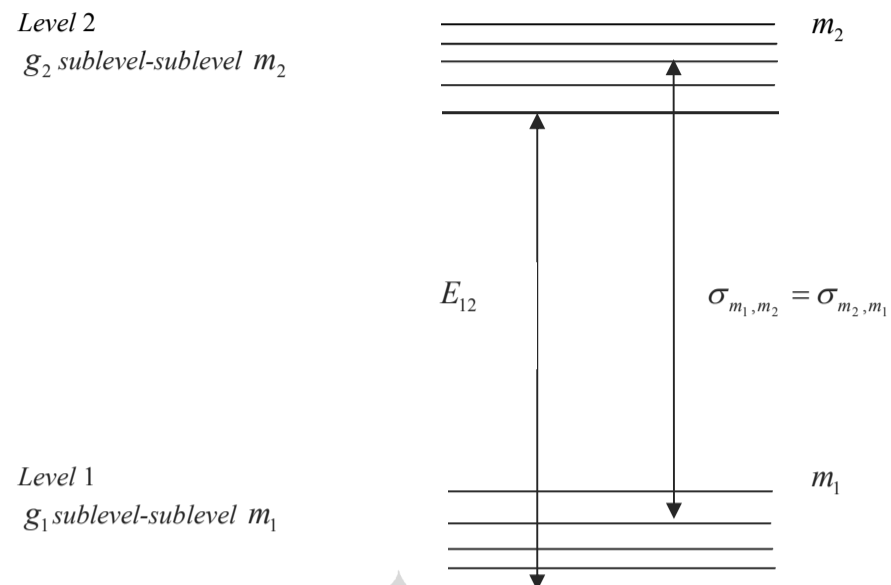
dimana $A(m_1, m_2)$ adalah kecepatan transisi *spontaneous* antara *sublevel* m_1 dan m_2 . Bilamana semua *sublevel* mempunyai populasi sama, dan masing-masing *sublevel* m_1 untuk *level 1* mempunyai $N m_1 = N_1 / g_1$ dan untuk *level 2* mempunyai $N m_2 = N_2 / g_2$, selanjutnya didapat hubungan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

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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

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].

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

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, $Z_i = \sum_{m_1, m_2} e^{-E_{m_i}/kT}$, $\sigma_{em}(\nu)$ 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*, $n = \Delta E/h\nu_m$ adalah jumlah *phonon* yang diperlukan untuk celah (*gap*) energi (ΔE adalah energi *gap* dan $h\nu_m$ 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].

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

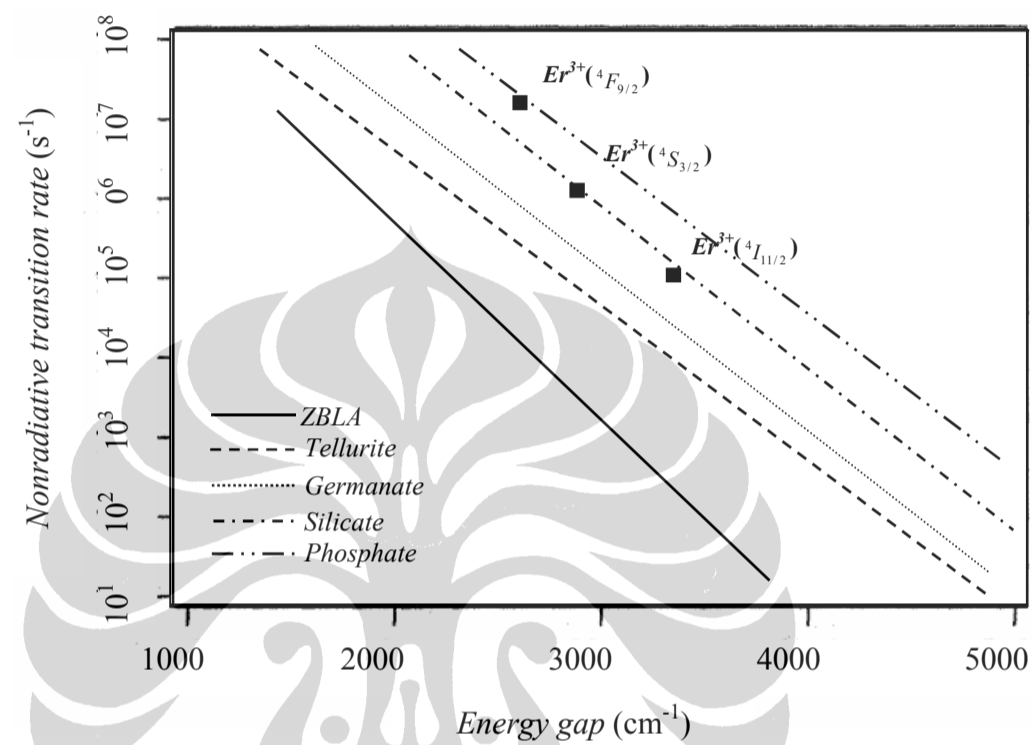
Nilai parameter B dan α yang berhubungan dengan energi *phonon* untuk proses *nonradiative* ditunjukkan Tabel 2.1.

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
Phospate	$5,4 \times 10^{12}$	$4,7 \times 10^{-3}$	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.

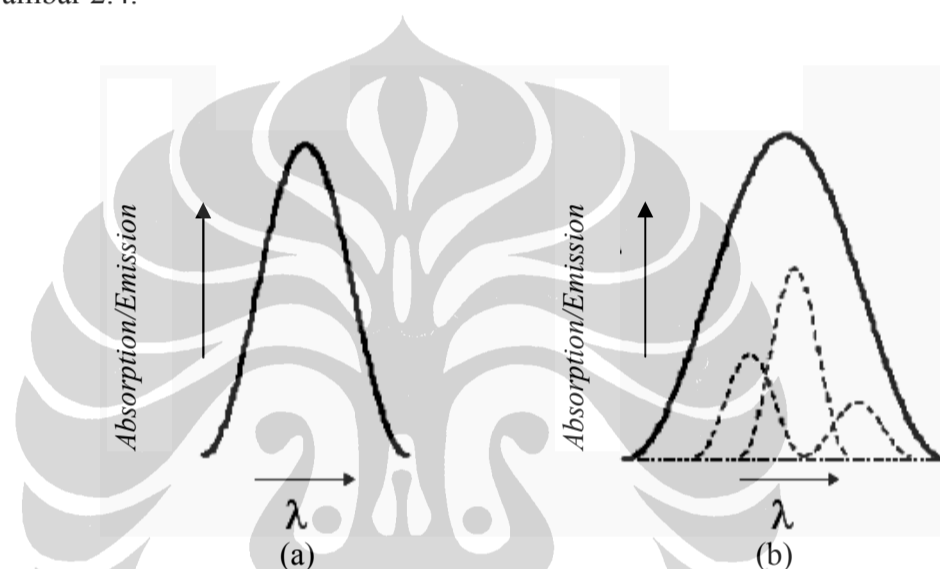
**Gambar 2.3.** Kecepatan Transisi *Nonradiative* Er^{3+} Dalam Berbagai Gelas Utama

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.



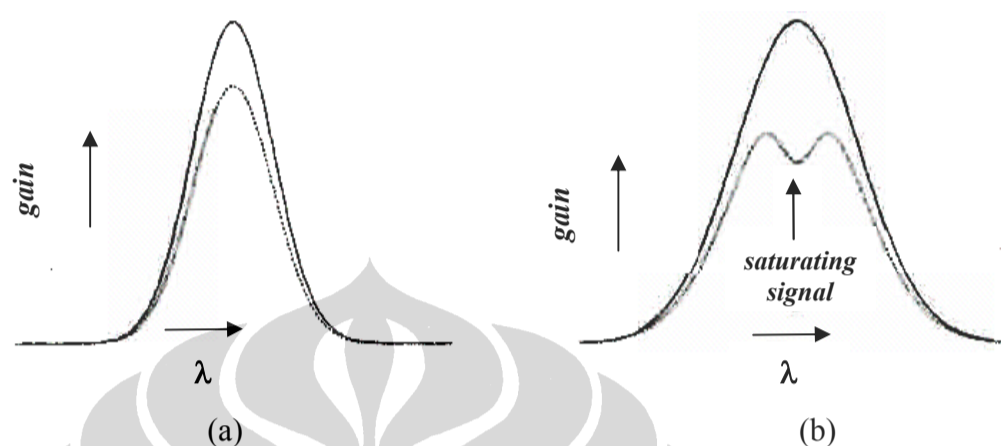
Gambar 2.4. (a) Garis Terlebarkan Secara Homogen, (b) Garis Yang Terlebarkan Secara Tidak Homogen

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

UNIVERSITAS INDONESIA

Gambar 2.4 (a) menunjukkan garis yang terlebarkan secara homogen untuk kumpulan *ion-ion* dengan panjang gelombang dan *lifetime* transisi yang identik. Gambar 2.4 (b) menunjukkan garis yang terlebarkan secara tidak homogen yang tersusun dari kumpulan garis yang terlebarkan 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 terlebarkan secara homogen dan tidak homogen.



Gambar 2.5. Saturasi *Gain* Untuk Garis Yang Terlebarkan 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.

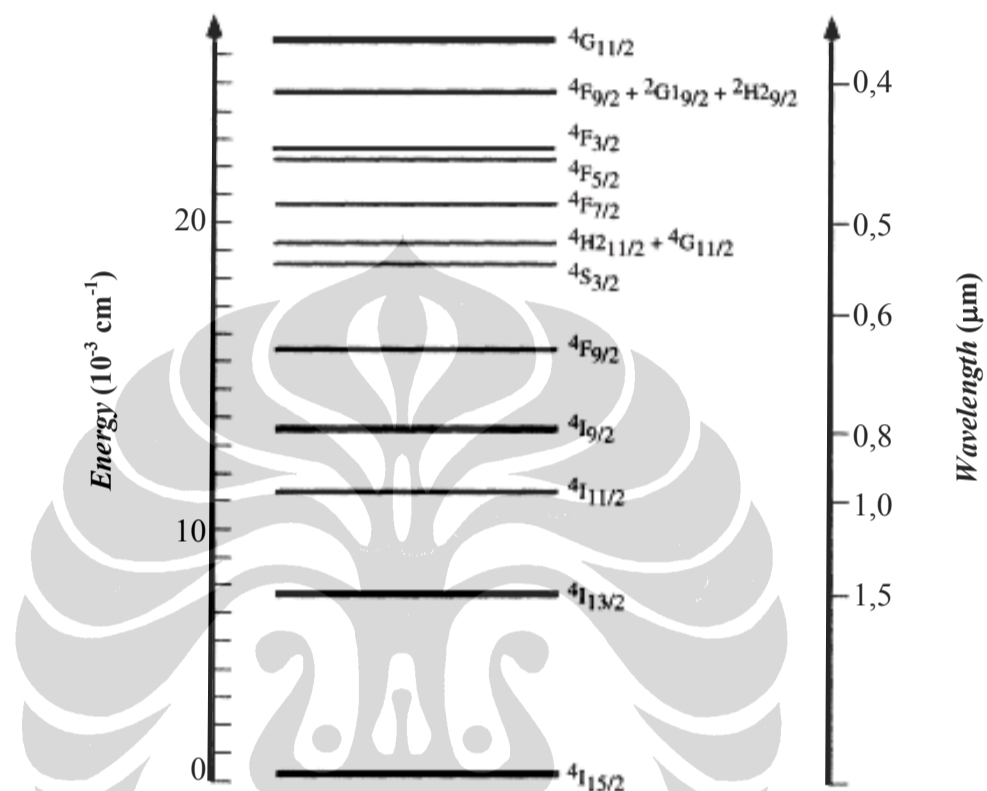
2.1.2 Spektroskopi *ion-ion* Er^{3+}

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.

UNIVERSITAS INDONESIA

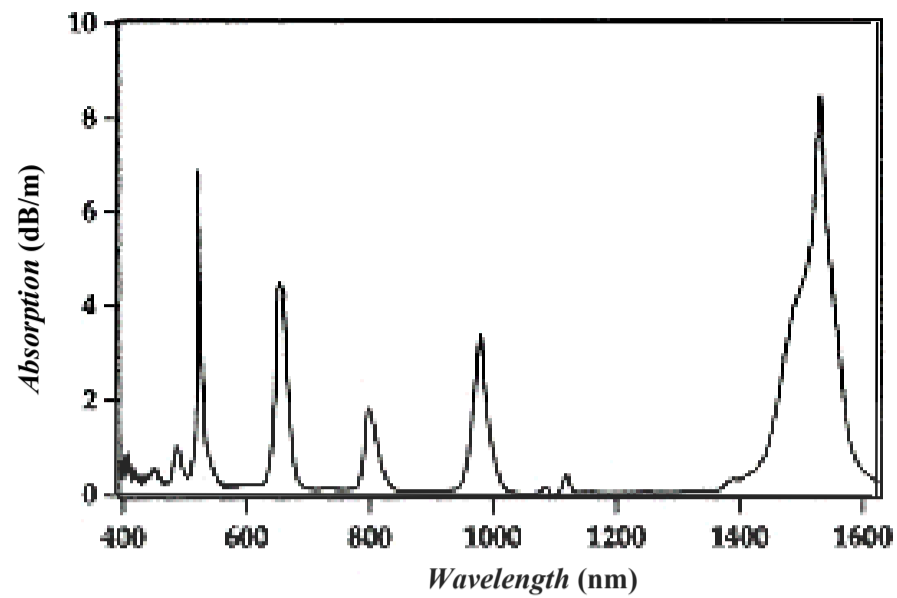
Skema *level energi* pada Er^{3+} dan spektrum yang dihasilkan ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Hasil pengukuran absorpsi *ion erbium* yang di-*doping* kedalam fiber dan terukur pada temperatur ruang ditunjukkan dalam Gambar 2.7. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sumber cahaya putih (*white light 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</i> (Gela Utama)	<i>Lifetime</i> (ms)
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

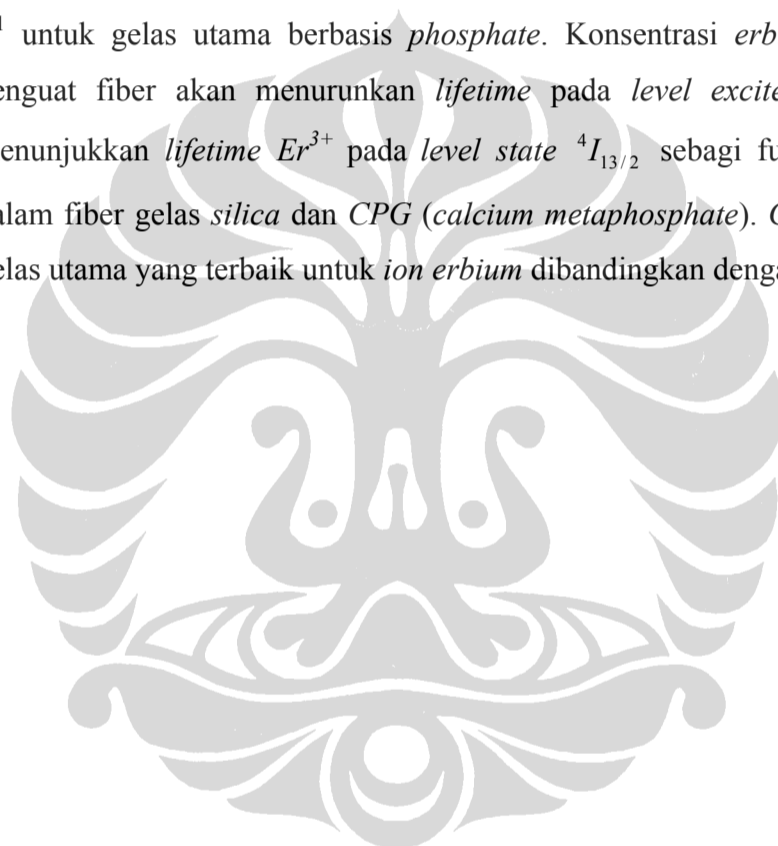
UNIVERSITAS INDONESIA

Tabel 2.2. (sambungan)

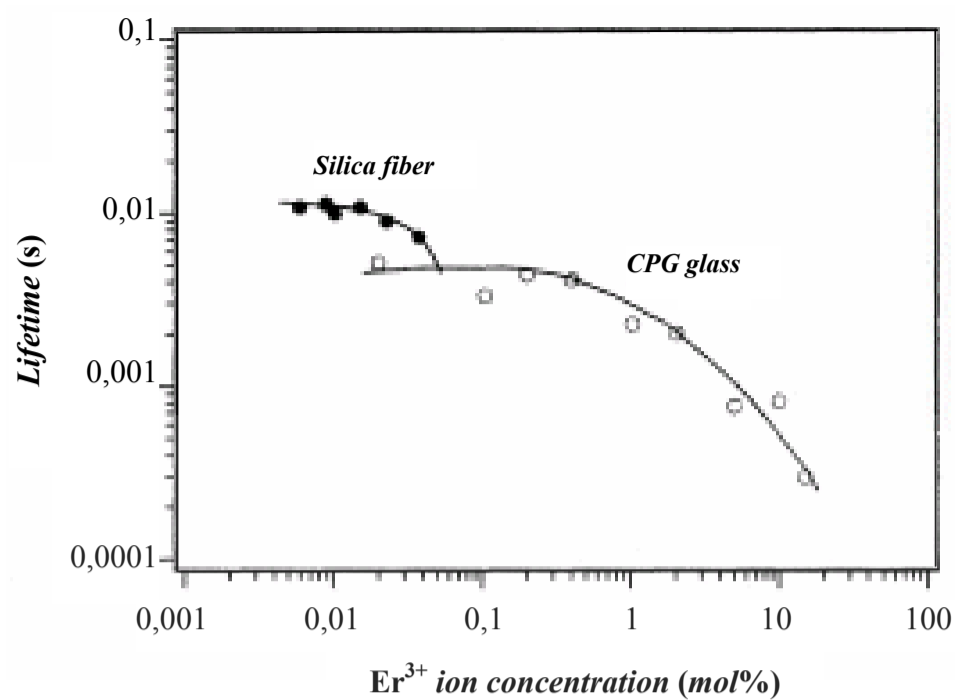
<i>Host Glass (Gela Utama)</i>	<i>Lifetime (ms)</i>
Na-Mg-phosphate	8,2
LGS-E (phosphate)	7,7
LGS-E7 (phosphate)	7,9
Phosphate	10,7
Phospate	8,5
Fluorophosphate	8,0
Fluorophosphate L11	8,25
Fluorophosphate L14	9,5
Ba-La-borate	8,0
Na-K-Ba-Al-germanate	6,5
Fluoride	10,3
Fluorozirconate F88	9,4
Tellurite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



UNIVERSITAS INDONESIA



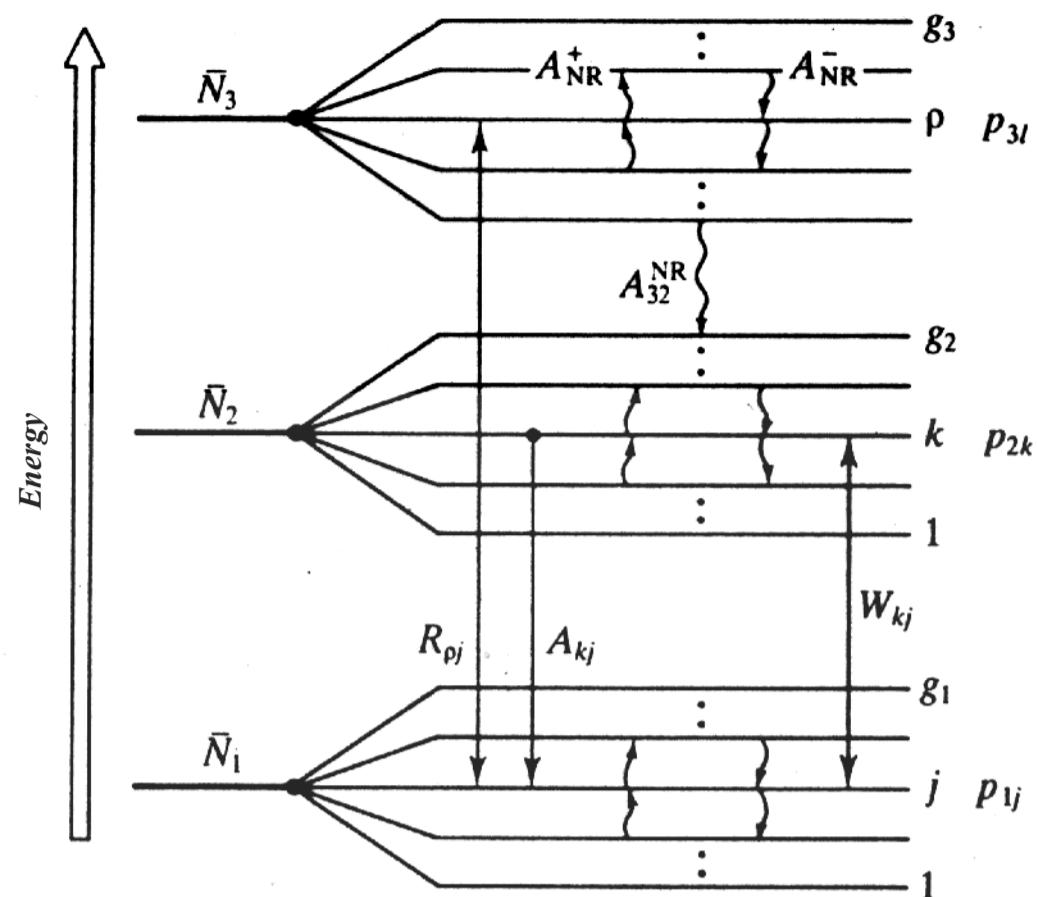
Gambar 2.8. Lifetime Fluorescence Er^{3+} Dalam Fiber Gelas Silica dan Gelas CPG (calcium metaphosphate).

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.

UNIVERSITAS INDONESIA



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

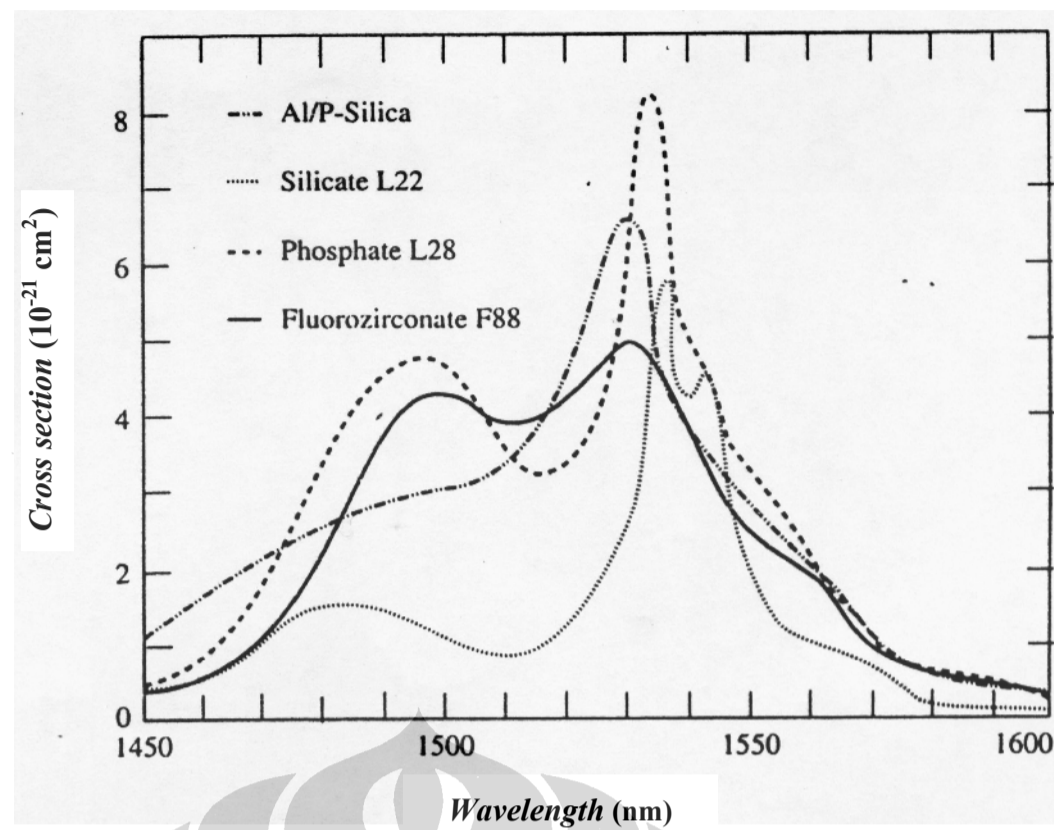
Sumber: Desurvire, Emmanuel. (1994). Erbium Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

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*

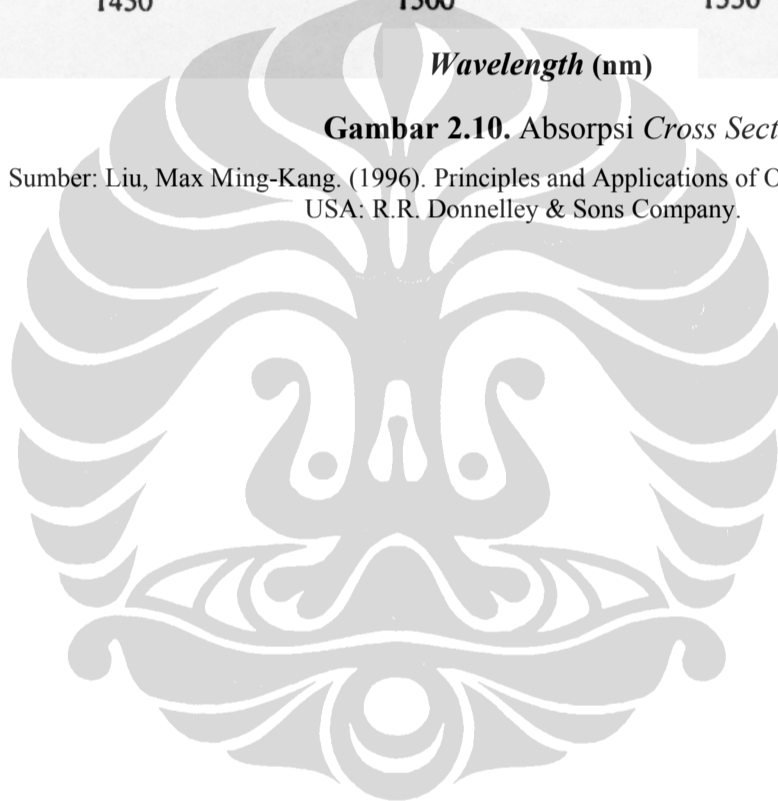
UNIVERSITAS INDONESIA

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+}).

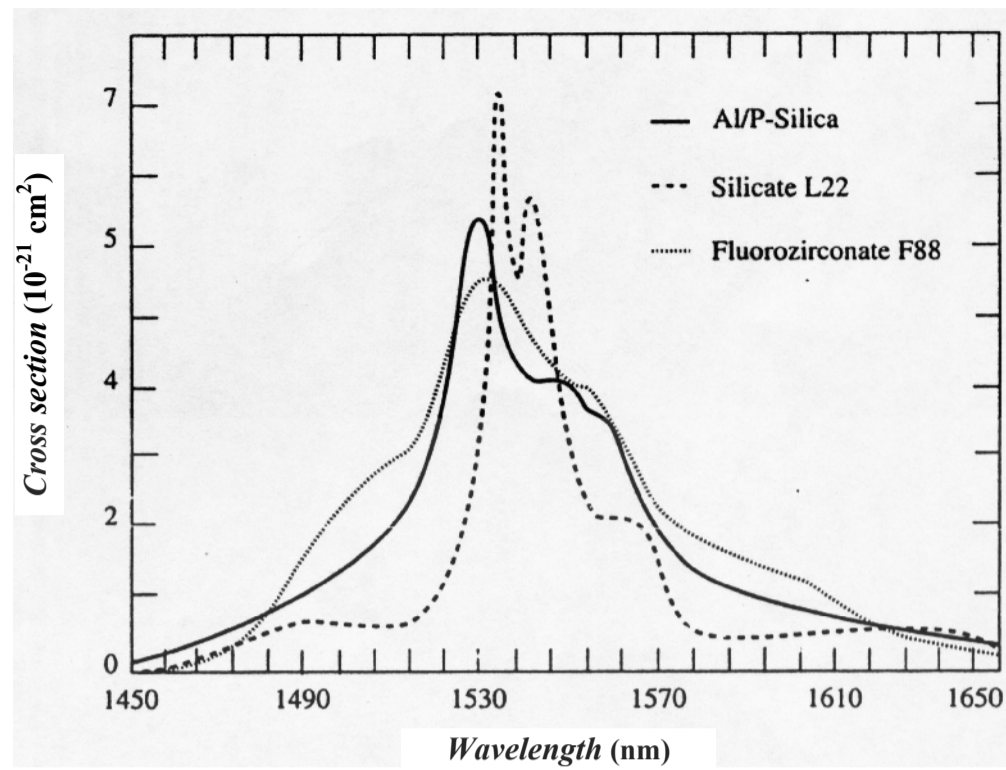


Gambar 2.10. Absorpsi Cross Section

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



UNIVERSITAS INDONESIA



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
GeO ₂ -SiO ₂	1530	7,9±0,3	6,7±0,3

UNIVERSITAS INDONESIA

Tabel 2.3. (sambungan)

<i>Host Glass</i> (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±0,6	4,4±0,6
$\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	1530	4,7±1,0	4,4±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.



UNIVERSITAS INDONESIA

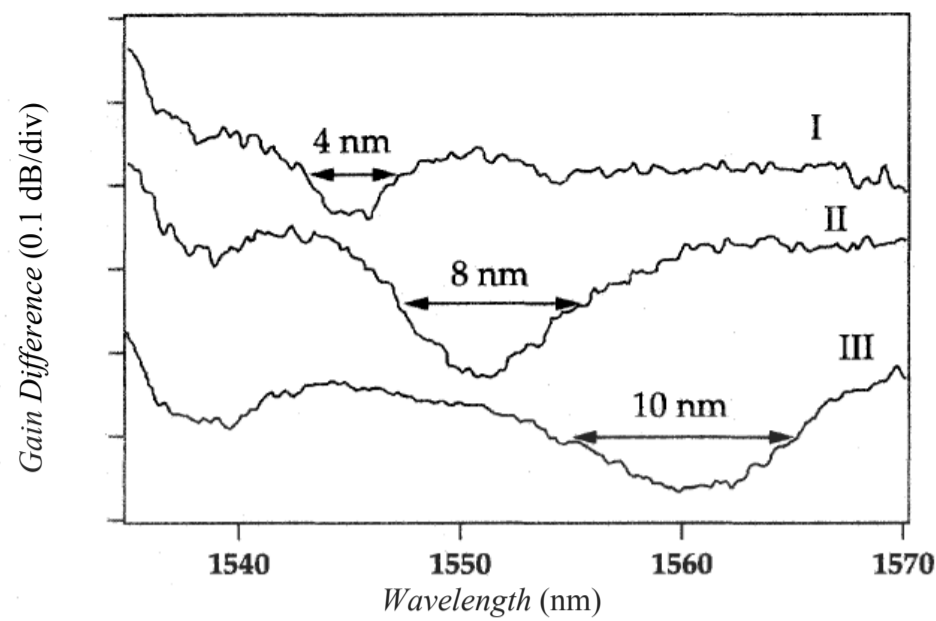
Tabel 2.4. Lebar Garis (*linewidth*) Homogen Untuk Transisi ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$ Er^{3+} Pada Panjang Gelombang Tertentu Dalam Berbagai Gelas Utama.

<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*.

UNIVERSITAS INDONESIA



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.

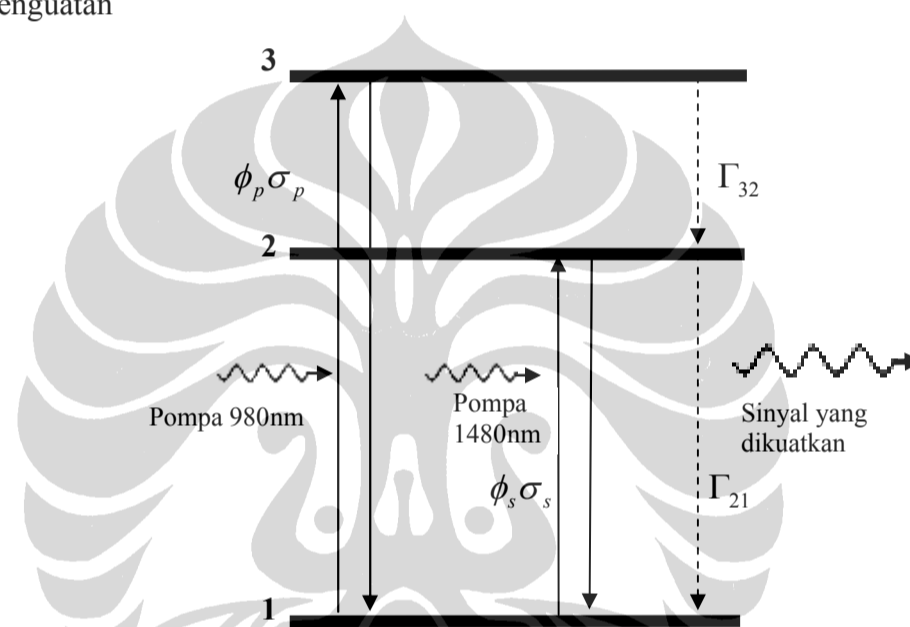
2.2 Teori Dasar Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)

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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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 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 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

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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

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

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).

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

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)

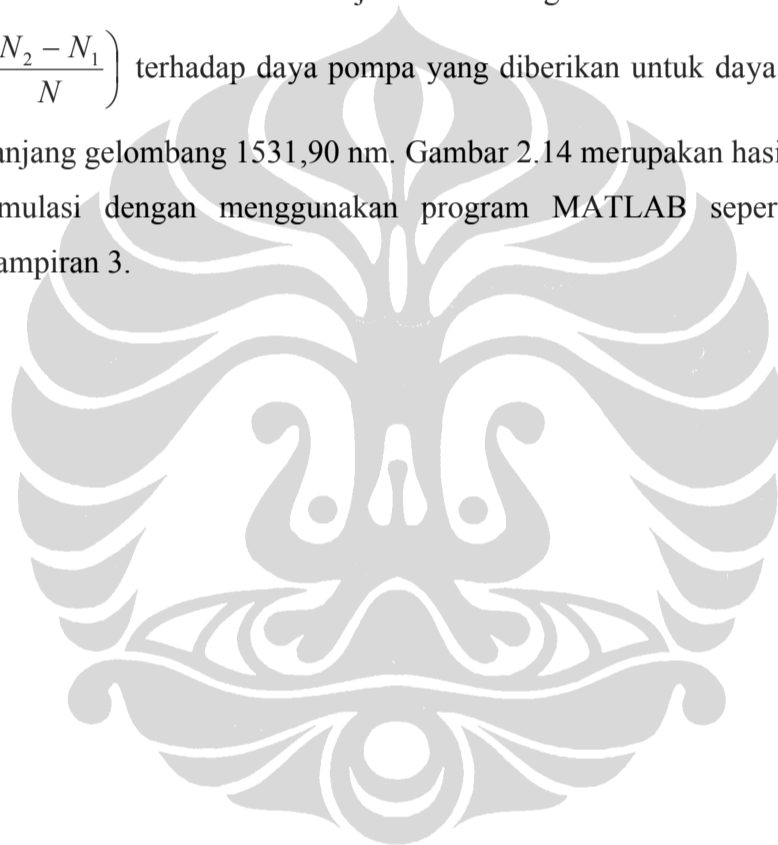
ν_p = frekuensi pemompaan (Hz)

P_{th} = daya pompa ambang (mW)

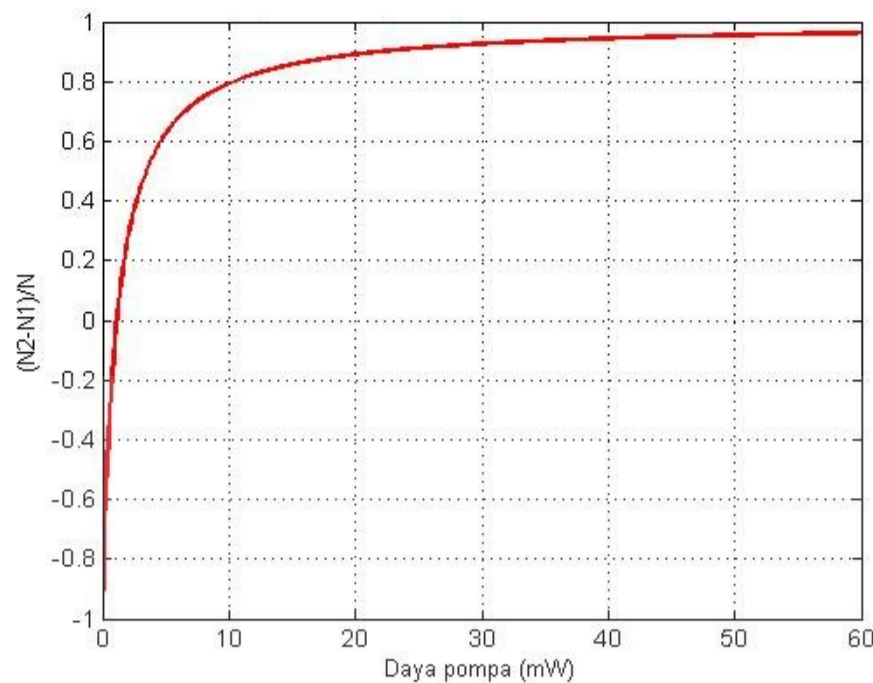
A_{eff} = luas penampang efektif inti fiber yang di-*doping* erbium (μm^2)

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.



UNIVERSITAS INDONESIA



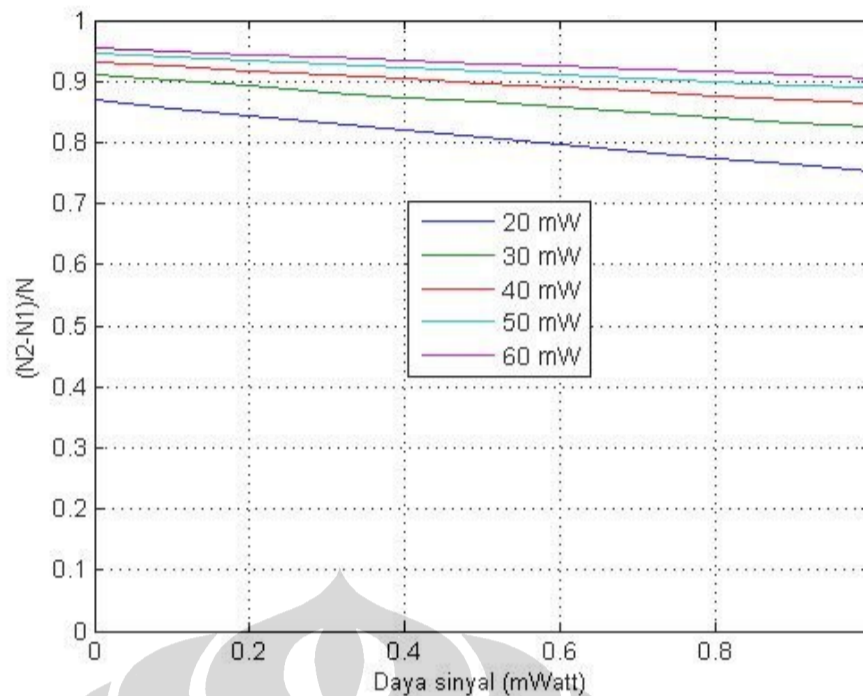
Gambar 2.14. Karakteristik Fraksional Inversi Populasi Terhadap Daya Pompa Untuk Daya Sinyal -22,7 dBm dan Panjang Gelombang 1531,90 nm.

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* berpindahkan 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 $N_2 = N$.

UNIVERSITAS INDONESIA

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

UNIVERSITAS INDONESIA

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,

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

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

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

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

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

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 dikuatkan sepanjang sumbu dz oleh adanya absorpsi *ion-ion* yang ada pada *ground state* (N_1) dan emisi terstimulasi oleh *ion-ion* yang ada pada *excited 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).

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

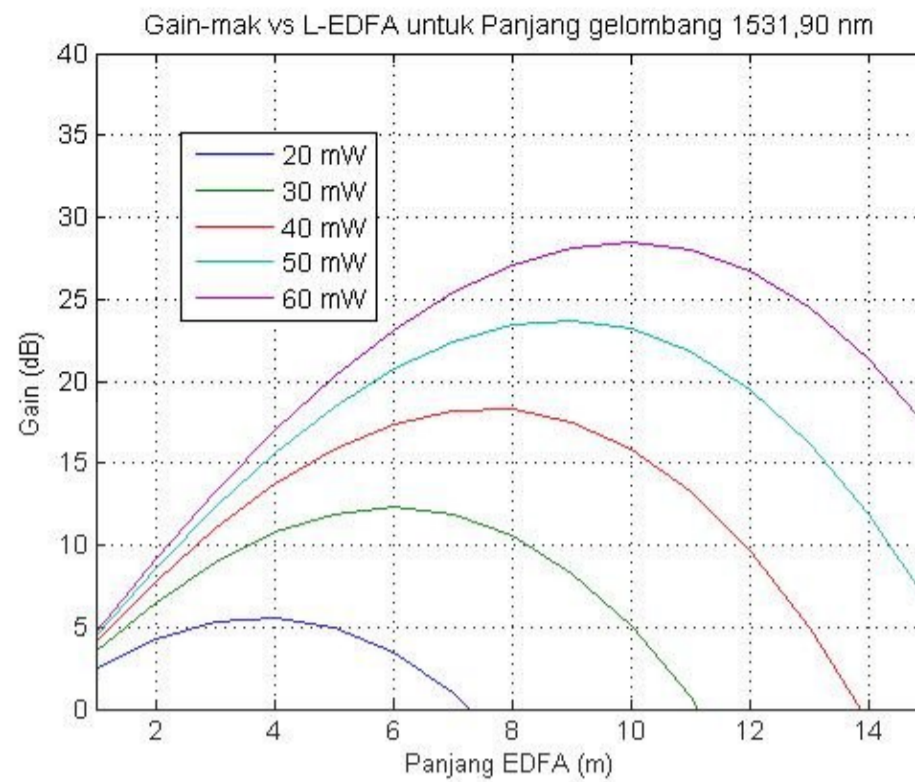
$$(N_2 - N_1)_{\text{mak}} = \frac{(1 - \beta) W_p \tau_2 - 1}{(1 + \beta) W_p \tau_2 + 1} N_{\text{mak}} \quad (2.60)$$

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

β (*Boltzmann population ratio*) = $e^{-(\Delta E/kT)} = 0,38$ 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.

UNIVERSITAS INDONESIA

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].

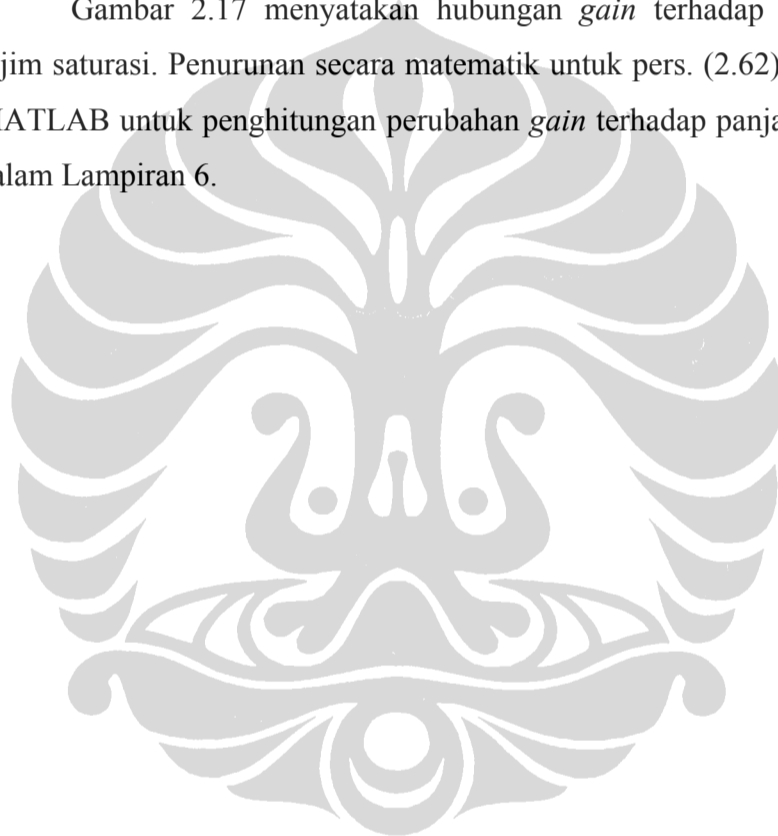
$$\frac{dI'_s(z)}{dz} = I_{sat}(z) \left(\frac{I'_p - 1}{I'_p + 1} \right) \sigma_s N \quad (2.62)$$

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

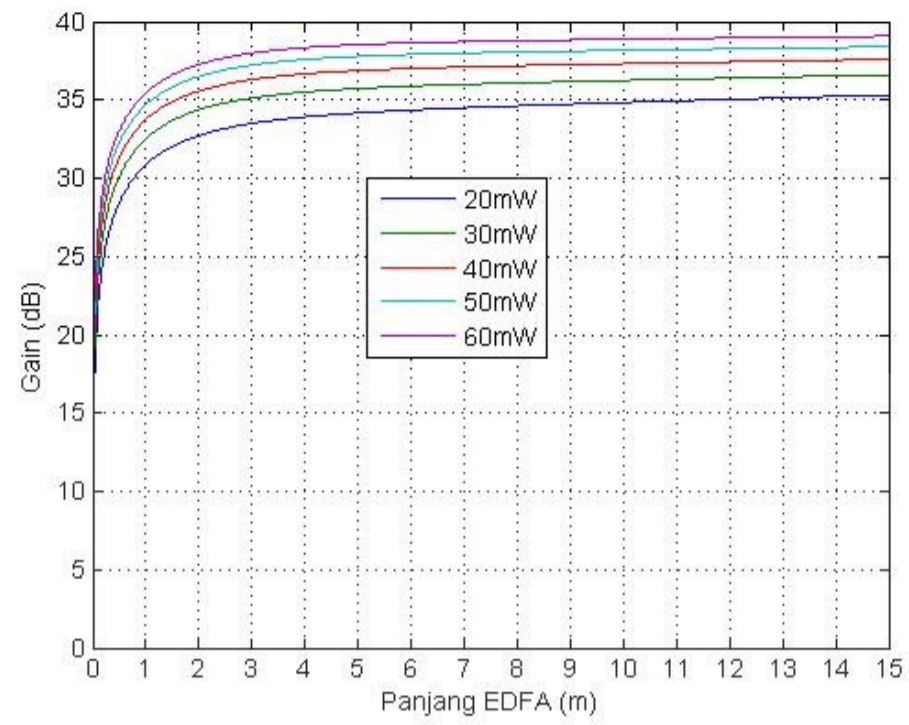
$$G = 10 \log \left(\frac{I'_s(z=L)}{I'_s(z=0)} \right) \quad (2.63)$$

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.

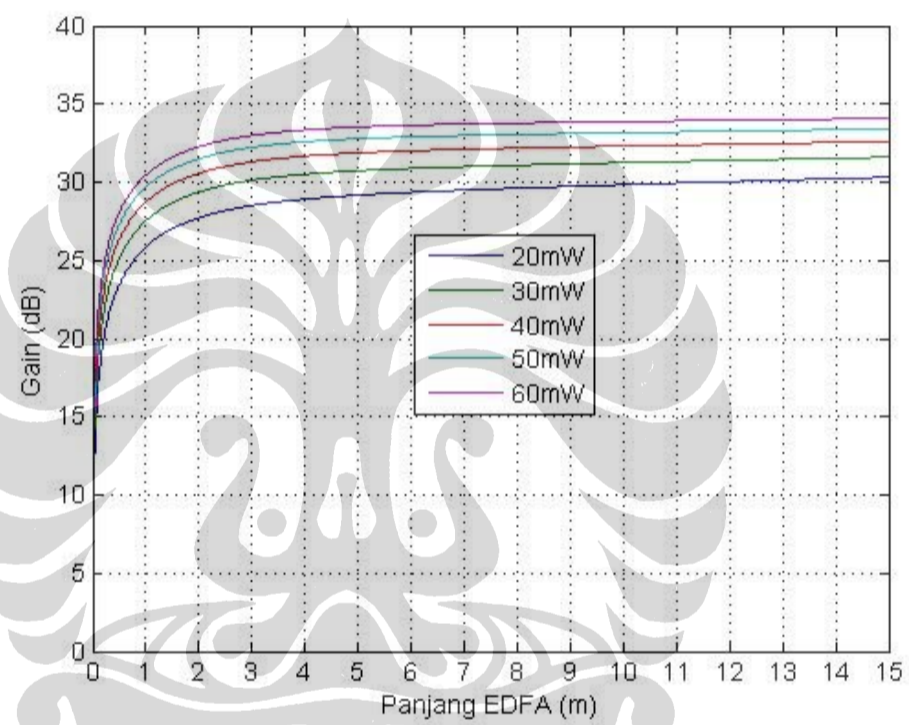
Gambar 2.17 menyatakan hubungan *gain* terhadap panjang *EDFA* untuk rejim saturasi. Penurunan secara matematik untuk pers. (2.62) dan program simulasi MATLAB untuk penghitungan perubahan *gain* terhadap panjang *EDFA* ditunjukkan dalam Lampiran 6.



UNIVERSITAS INDONESIA

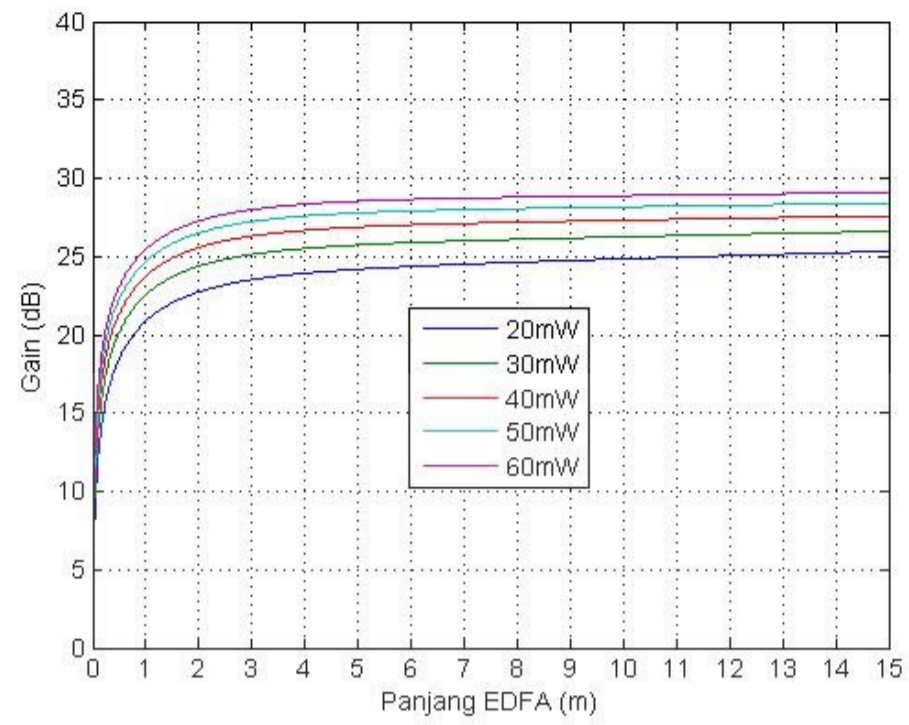


(a) Daya Sinyal -22,7 dBm

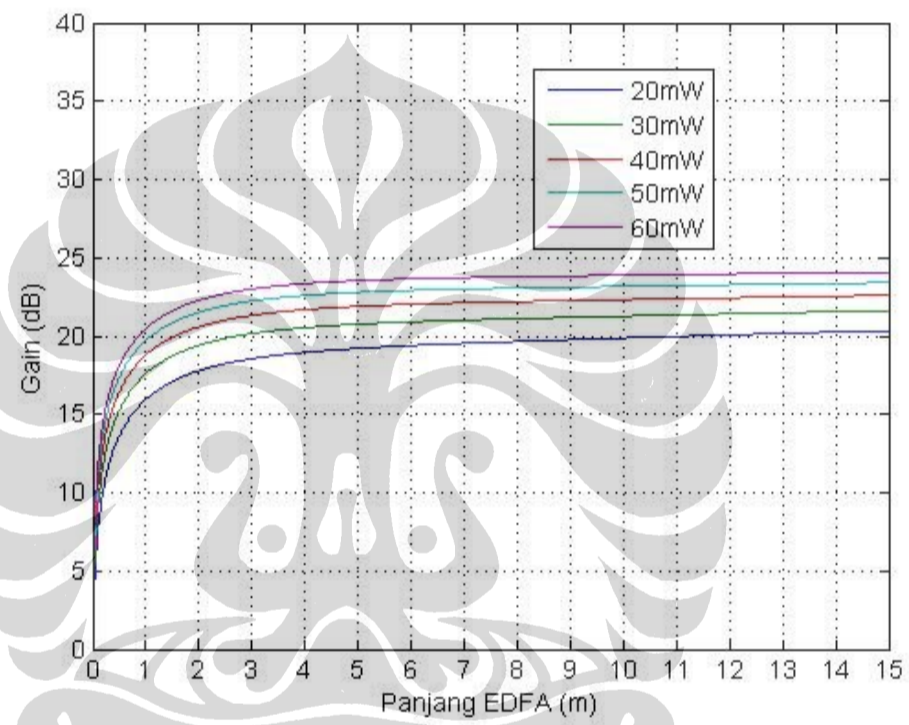


(b) Daya Sinyal -17,7 dBm

UNIVERSITAS INDONESIA

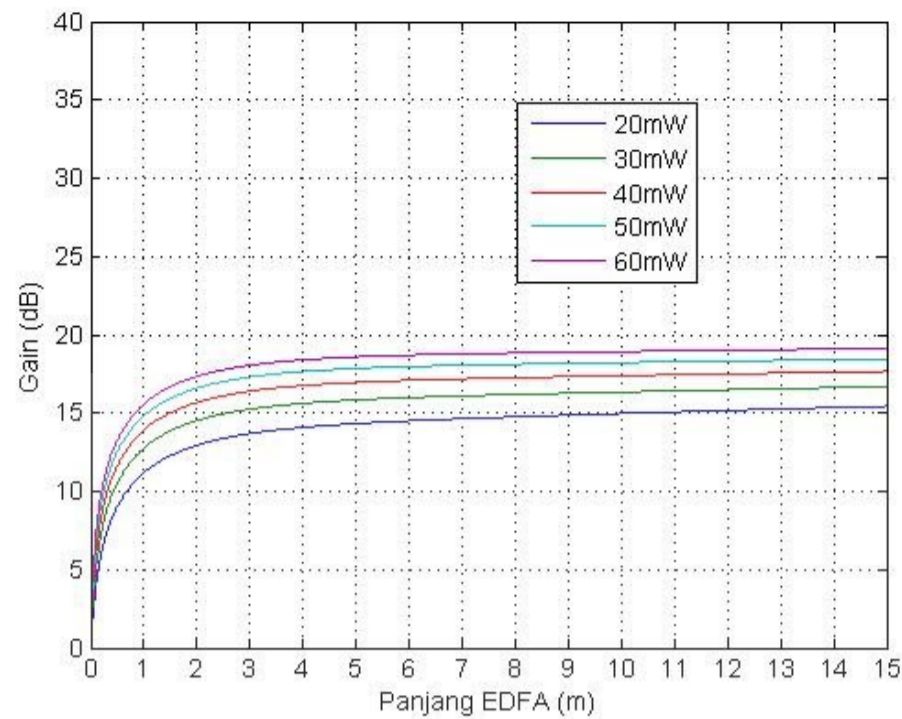


(c) Daya Sinyal -12,7 dBm



(d) Daya Sinyal -7,7 dBm

UNIVERSITAS INDONESIA



(e) Daya Sinyal -2,7 dBm

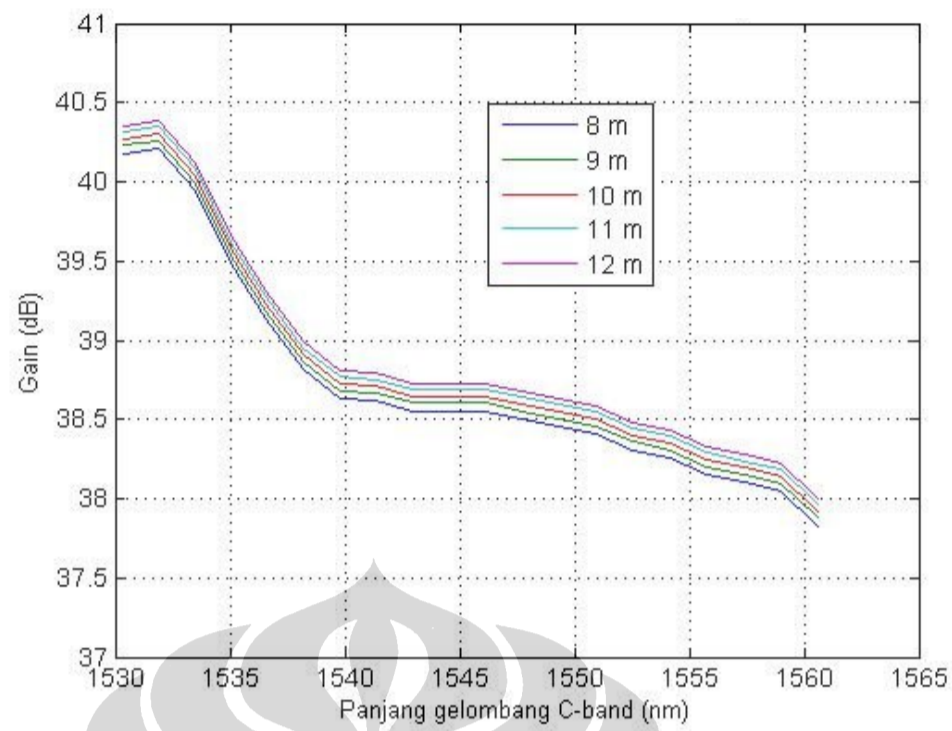
Gambar 2.17. Karakteristik *Gain* Terhadap Panjang *EDFA* Untuk Panjang Gelombang Sinyal 1550,92 nm.

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

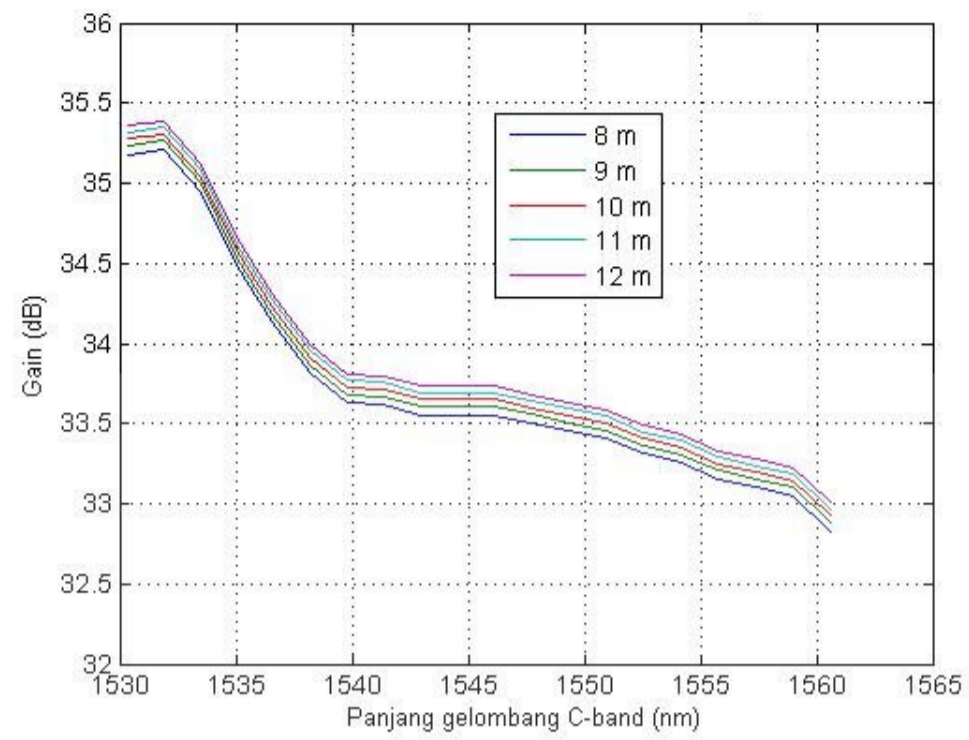
Gambar 2.17 menyatakan bahwa untuk daya pompa yang bertambah besar akan menghasilkan *gain* yang bertambah besar pula. Kenaikan *gain* terhadap panjang *EDFA* terjadi dengan perubahan nilai yang cukup besar untuk panjang *EDFA* kurang dari 3 m. Hal ini terjadi karena jumlah populasi *ion-ion erbium* 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.

UNIVERSITAS INDONESIA

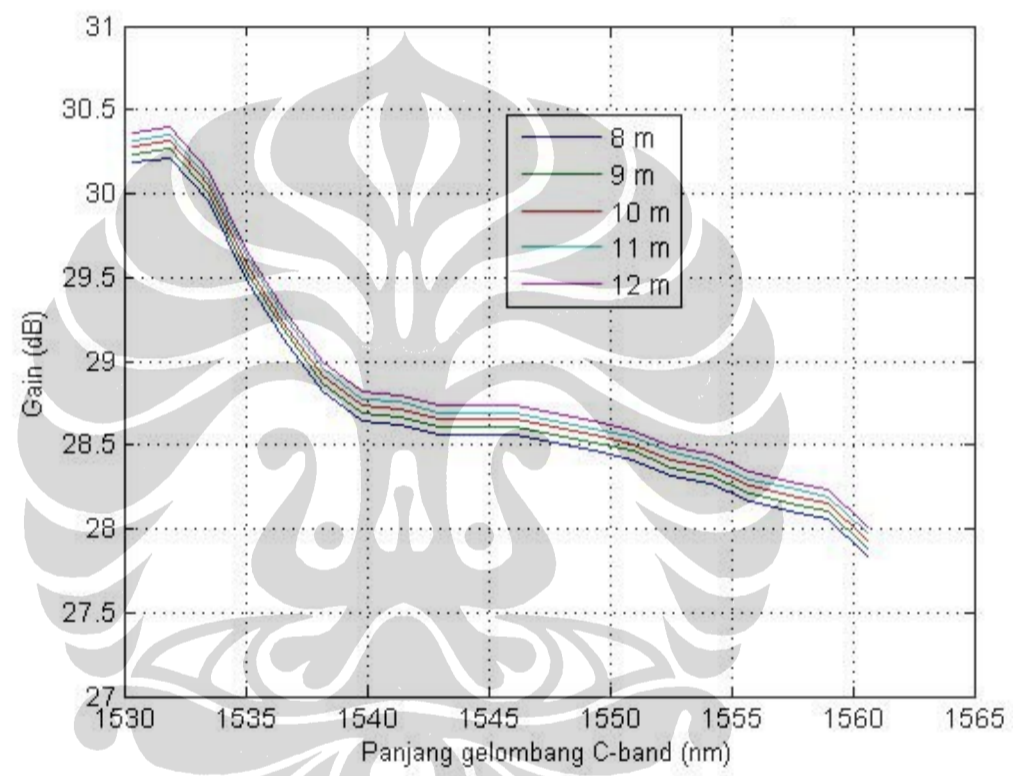
Gambar 2.18 menyatakan hubungan *gain* terhadap perubahan panjang gelombang sinyal untuk daya sinyal -22,7 dBm, -17,7 dBm, -12,7 dBm, -7,7 dBm, dan -2,7 dBm. Daya pompa yang dikenakan pada simulasi ini adalah 60 mW pada panjang *EDFA* 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, dan 12 m. Hasil penghitungan secara simulasi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



(a) Daya Sinyal -22,7 dBm

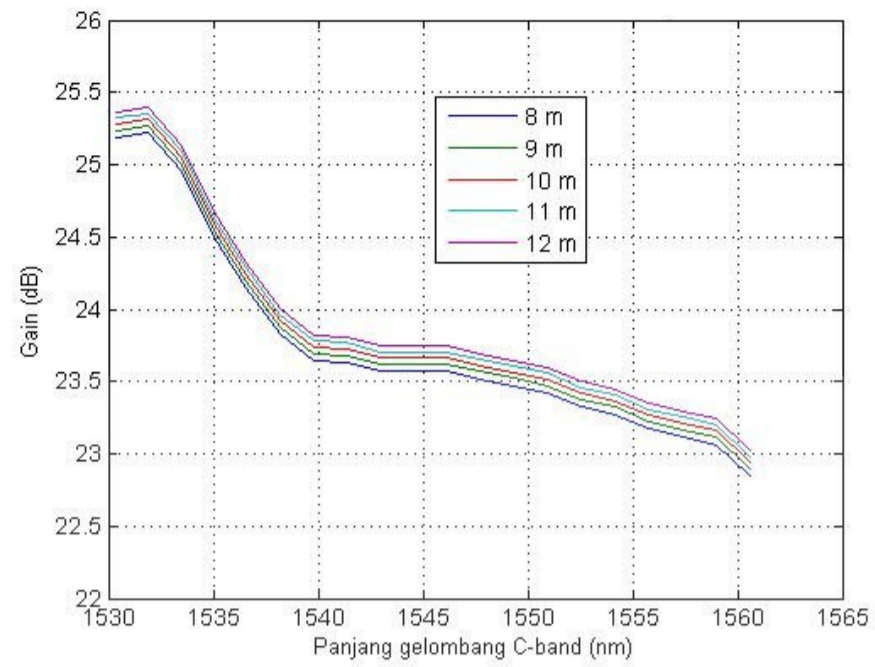


(b) Daya Sinyal -17,7 dBm

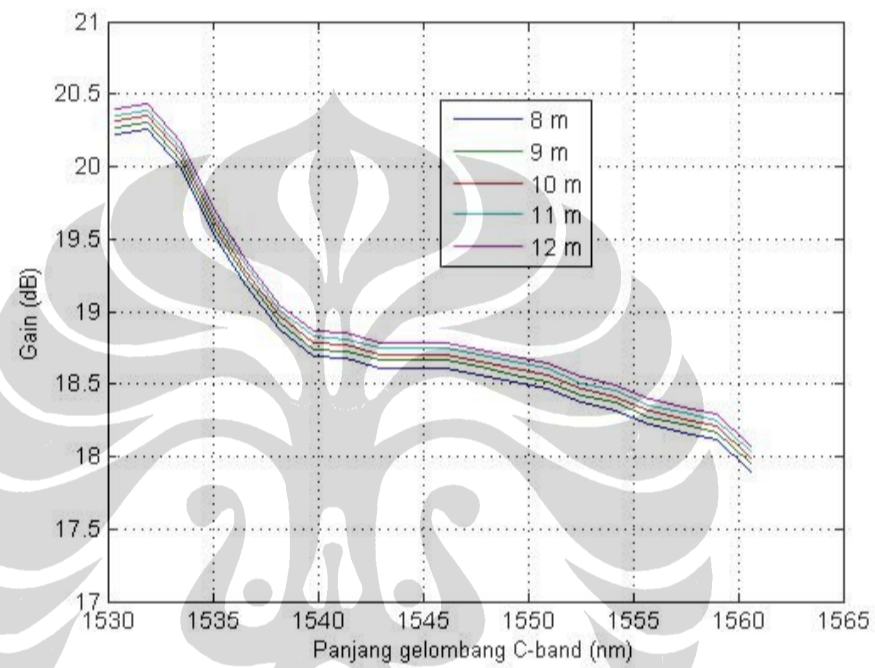


(c) Daya Sinyal -12,7 dBm

UNIVERSITAS INDONESIA



(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)

UNIVERSITAS INDONESIA

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.