ANALASIS PERFORMANSI BER PADA JARINGAN OPTIK DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING MENGGUNAKAN PENGUAT HYBRID RAMAN EDFA

BER PERFORMANCES ANALYSIS OF OPTICAL NETWORK DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING SYSTEM USING HYBRID RAMAN EDFA AMPLIFIER

Taufik Akbar [1], Ir. Akhmad Hambali, M.T[2], Brian Pamukti, S.T, M.T[3]
[1,2,3]Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Bandung
[1] taufikaakbar@student.telkomuniversity.ac.id, [2]ahambali@telkomuniversity.ac.id, [3] brianp@telkomuniversity.ac.id

1 Abstrak

Penguat *hybrid* merupakan sebuah teknologi yang menjanjikan dan memberikan performansi yang lebih baik karena dapat menangani jaringan dengan beban yang besar. Penguat *hybrid Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dan *Fiber Raman Amplifier* (FRA) digunakan untuk mengoptimalkan peningkatan *gain bandwidth* dari sistem berbasis *Wavelength Dense Multiplexing* (WDM). Meningkatkan Gain-Bandwidth penguat optik adalah cara yang paling efektif untuk pemanfaatan optimal bandwidth serat secara efisien dalam peningkatan jumlah saluran berbasis WDM.

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan sistem *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) pada jarak maksimum 250 km tanpa penguat, menggunakan penguat FRA, penguat EDFA, dan menggunakan penguat *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) yaitu penggabungan FRA dan EDFA. Kemudian melakukan perbandingan pada jarak berapa maksimal penguatan masih bisa dilakukan, simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak *Optisystem 7.0* dan membandingkan nilai *Bit Error Rate* (BER) yang paling baik yaitu BER < 10^{9}. Hasil yang diperoleh dari serangkaian simulasi sistem dengan konfigurasi paling optimal yaitu konfigurasi HOA FRA-EDFA secara *parallel in line* pada jarak 210 km dengan nilai *Q factor* terendah 6.10417 dan nilai BER sebesar 5.08 sehingga masih layak digunakan pada jarak tersebut.

Kata Kunci: EDFA, FRA, HOA,DWDM, *Optical amplifier*.

1.1 Abstract

It is a promising technology and provides better performance as it can handle a large load of network, which is very good. The Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) and Fiber Raman Amplifier (FRA) amplifier are used to optimize the increase in gain bandwidth from the Wavelength Dense Multipexing (WDM)-based system. Improving gain-bandwidth optical amplifier is the most effective way to efficiently utilization the optimal bandwidth fibers in an increase in the number of WDM-based channels.

In this research conducted a comparison of Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) system at a maximum distance of 250 km without amplifier, using FRA amplifier, EDFA amplifier, and use of Hybrid Optical Amplifier (HOA) amplifier of the FRA and EDFA merger. Then do a comparison of how much maximum gain can still be done, system simulation is done using the software Optisystem 7.0 and comparing the best value Bit Error Rate (BER) < 10^{9}. Result obtained from a series of simulation system with the most optimal configuration of HOA FRA EDFA in parallel in line at a distance 210 km with the lowest Q factor value of 6.10417 and the BER value 5.0810 so that is still worth to use at this distances.

Keyword : EDFA, FRA, HOA, U-DWDM, *Optical amplifier*.

1. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi optik berkembang dengan pesat pada masa sekarang ini, salah satunya adalah *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) merupakan suatu teknik yang menggunakan beberapa sumber yang beroperasi pada panjang gelombang berbeda untuk mentransmisikan informasi independen secara simultan pada serat yang sama. Informasi terbaru menyatakan bahwa multimedia dan jaringan *Wavelength Division Multiplexing* membutuhkan bandwidth yang tinggi. Untuk pemanfaatan bandwidth yang efisien, digunakan *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) yang merupakan pengembangan dari WDM [1].

Optical amplifier sebagian besar digunakan pada aplikasi WDM karena semua kanal dengan dengan panjang gelombang berbeda dapat dikuatkan secara bersamaan [2]. Terdapat tiga klasifikasi utama penguat optik yaitu *semiconductor optical amplifier* (SOA), *doped fiber amplifier* (DFA), dan *raman amplifier* [1]. Suatu teknologi yang menjanjikan dan banyak digunakan untuk aplikasi broadband berkecepatan tinggi yang dapat meningkatkan kerja sistem tanpa teknik yang mahal adalah *Hybrid Optical Amplifier* (HOA). Hal tersebut membatasi penggunaan penguat optik untuk berbagai aplikasi dalam memenuhi kebutuhan teknologi yang terus meningkat.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem komunikasi optik jarak jauh

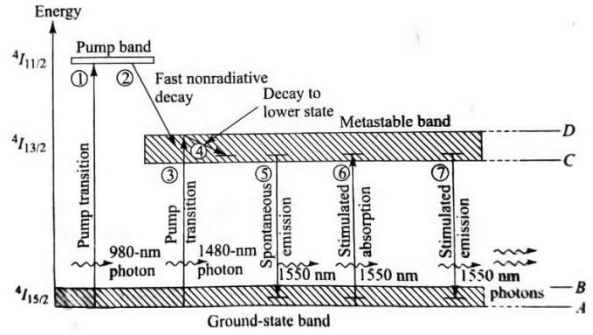
Dalam sistem komunikasi serat optik, jarak transmisi sangat berpengaruh terhadap losses pada serat. Untuk sistem komunikasi jarak jauh, pengurangan *losses* dapat diatasi dengan menggunakan *repeater* elektronik dimana sinyal optik dirubah menjadi arus listrik dan kemudian diregenerasi menggunakan sebuah *transmiter*. Penggunaan *repeater* ini akan sangat kompleks dan mahal untuk sistem komunikasi *Wavelength Division Multiplexed* (WDM). Salah satu solusi adalah menggunakan penguat optik, berfungsi memperkuat sinyal optik langsung tanpa membutuhkan perubahan sinyal elektrik terlebih dahulu [1]. Generasi kelima dari sistem komunikasi serat optik berkaitan dengan perluasan rentang panjang gelombang di mana sistem WDM dapat beroperasi secara bersamaan. Jendela Panjang gelombang yang dikenal sebagai C band, mencakup panjang gelombang kisaran 1,53-1,57 µm.

Teknologi DWDM merupakan suatu pengembangan dari jaringan sebelumnya yang telah ada yaitu *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). WDM merupakan suatu teknologi yang dapat menggabungkan sejumlah panjang gelombang pembawa informasi independen melalui suatu serat yang sama. Secara historis, istilah *Dense* WDM pada umumnya mengacu pada pemisahan panjang gelombang dengan nilai *spacing* yang kecil seperti yang dinyatakan pada ITU-T G.692. Pada tahun 2002, ITU-T merilis rekomendasi G.694.1 yang secara khusus membahas mengenai DWDM[1].

Pada implementasi sistem DWDM jarak jauh, memungkinkan penggunaan *amplifier* (penguat) untuk mencegah penurunan level daya sinyal optik yang dikirimkan. Oleh karena itu komponen *optical amplifier* yang digunakan untuk aplikasi jarak jauh harus memenuhi persyaratan performansi tinggi seperti, *optical amplifier* harus beroperasi pada pita spektral yang lebar dan memiliki laser pompa berdaya tinggi untuk memperkuat sejumlah besar saluran yang digunakan [1].

2.2 FRA dan EDFA

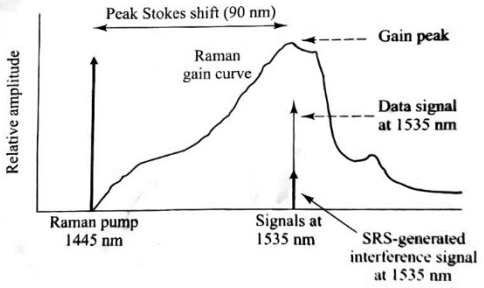
Dalam teknologi WDM-DWDM yang meningkatkan kapasitas jaringan optik dengan amplifikasi optik dan bekerja secara efektif dengan kecepatan tinggi tanpa mempengaruhi biaya apapun.



Gambar 1 Diagram level energi dan proses transisi dari ion erbium di silika [2]

Gambar I menunjukkan diagram *level energi* dan transisi level energi dari *ion* Er3+ pada silika. Pada operasi normal, pemompa laser mengemisi 980 nm *photon* untuk mengeksitasi ion dari *ground state* menuju *pump level*. Ion yang tereksitasi mengalami *decay (relax)* dengan sangat cepat sekitar 1s dari *pump band* menuju *metastable band*. Selama proses *decay* ini, energi yang berlebih dilepaskan sebagai *phonon* atau pada persamaannya sebagai *mechanical vibrations* pada fiber [2]. Panjang gelombang pompa lain yang mungkin adalah 1480 nm. Penyerapan foton pompa 1480 nm mengeksitasi elektron dari *ground state* langsung ke puncak tingkat *metastable*. Elektron ini kemudian cenderung bergerak ke bagian yang lebih rendah pada tingkat *metastable* tersebut. Beberapa ion yang berada di tingkat *metastable* dapat meluruh (decay) kembali ke ground state tanpa adanya fluks foton yang merangsang secara eksternal. Fenomena peluruhan *(decay)* ini dikenal sebagai emisi spontan seperti yang ditunjukkan proses nomor 5 pada Gambar I. Setelah proses tersebut, pada proses 6 menunjukkan adanya sinyal foton yang diserap oleh ion-ion, sehingga ion-ion tersebut naik ke *metastable band*. Kemudian sinyal foton memicu ion-ion terseksitasi yang berada di metastable band untuk kembali ke *ground state* secara bersamaan dengan menghasilkan *stimulated emission*.

Gambar 2 tersebut menunjukkan spektrum *gain* FRA untuk pompa laser yang beroperasi pada 1445 nm. Mekanisme gain FRA dapat dicapai melalui *lumped amplifier* (diskrit) atau *distributed amplifier*. Dalam konfigurasi *lumped amplifier*, sekitar 80 m serat inti kecil bersamaan dengan laser pompa yang sesuai dimasukkan ke dalam jalur transmisi sebagai unit kemasan yang berbeda. Untuk aplikasi *distributed amplifier*, daya optik dari satu atau lebih laser pompa FRA disisipkan ke *receiving end* serat transmisi ke arah *transmitting end*. Kata *distributed* digunakan karena *gain* terbentang lebih lebar. Karena gain FRA yang berada pada rentang spektral tertentu berasal dari transfer daya optik yang diinduksi SRS dari Panjang gelombang pompa yang lebih pendek ke panjang gelombang sinyal yang lebih panjang, sehingga *amplifier* ini dapat dirancang untuk digunakan pada pita panjang gelombang apapun [2].



Gambar 2 Diagram level emegri stimulated raman scattering(SRS) pada Raman amplifier [2].

2.3 *Hybrid Optical Amplifier (HOA)*

Secara umum Hybrid Optical Amplifier (HOA) adalah suatu kombinasi konfigurasi penguat optik. HOA sangat penting untuk amplifikasi band broadband, dan banyak digunakan dalam sistem DWDM berkapasitas tinggi. Tujuan dibalik pengusulan menggunakan HOA adalah untuk : (1) meningkatkan gain bandwidth sistem WDM dengan variasi gain melalui bandwidth yang efektif, (2) mengurangi kerugian karena induksi non linier, dan (3) menghindari kendala tingginya biaya Gain Flattening Filters (GFF) dan multi pump untuk kerataan gain yang besar [1]. Sistem DWDM memiliki jarak antar kanal yang cukup rapat. Jarak antar kanal atau *spacing* dibutuhkan untuk menghindari terjadinya interferensi antar kanal yang digunakan agar tidak mempengaruhi performansi kinerja sistem DWDM. Pada umumnya nilai *spacing* antara satu kanal dengan kanal yang lain berkisar antara 50 - 200 GHz (0.4 - 1.6 nm). Pada saat ini sedang dikembangkan untuk *spacing* yang lebih rapat yaitu sebesar 25 dan 12.5 GHz atau yang setara dengan 0.2 dan 0.1 nm (yang disebut sebagai Ultra-DWDM)[6].

2.4 Parameter Performansi

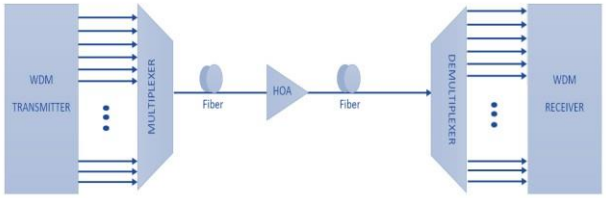
Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter performansi yang digunakan, yaitu *BER, Q-factor, Rise Time Budget, dan Link Power Budget*.

- ***Bit Error Rate* (BER)**, merupakan rasio perbandingan bit error dengan bit yang dikirimkan secara keseluruhan. Batas toleransi nilai BER yang umum digunakan untuk kualitas sistem komunikasi digital yaitu tidak melebihi 10^{-9} [2].
- ***Q-factor***, untuk dapat mengetahui kualitas dari suatu link yang digunakan memiliki kualitas yang baik atau tidak, dapat juga ditentukan dengan nilai Q Factor. Probabilitas error pada link komunikasi digital berhubungan dengan Q Factor. Nilai Q factor yang digunakan sebagai tolak ukur adalah ≥ 6.
- ***Signal to Ratio***, merupakan perbandingan daya sinyal terhadap daya noise pada satu titik yang sama. Semakin besar nilai SNR maka sistem akan menandakan sistem tersebut bekerja dengan baik,atau tidak**.**
- ***Link Power Budget,*** dihitung sebagai syarat agar *link* yang kita rancang daya nya melebihi batas ambang dari daya yang dibutuhkan [2].
- ***Rise time budget,*** merupakan metode untuk menentukan keterbatasan akibat pengaruh dispersi pada saluran transmisi [2].

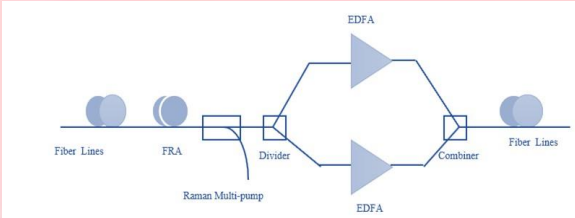
3. PERENCANAAN MODEL SISTEM DAN SIMULASI

3.1 Model Sistem *Long Haul* U-DWDM

Sistem *long haul* U-DWDM merupakan media uji performansi penguat FRA, EDFA dan *hybrid*. Pemodelan sistem *long haul* U-DWDM ini dirancang dengan menggunakan 80 kanal, spasi kanal 0.19 nm, panjang gelombang 1550 nm, dan *bandwidth* sebesar 20 Ghz. Secara umum diagram blok sistem *Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing* (U-DWDM) ditunjukan pada gambar 3 yang terdiri dari blok pengirim, media transmisi, penguat optik dan blok penerima. Pada blok pengirim terdiri dari WDM *transmitter* dan *multiplexer*, media transmisi terdiri dari *fiber* bersama suatu *in-line* HOA, dan pada blok penerima terdapat *demultiplexer* serta WDM *receiver*.



Gambar 3. Model sistem *long haul* U-DWDM



Gambar 4. Diagram Blok FRA-EDFA *Parallel In-line.*

Gambar 4 menunjukkan konfigurasi penguat *hybrid* (FRA-EDFA). Penguat *hybrid* terdiri dari FRA, Raman *multipump*, *divider*, *combiner*, dan EDFA yang disusun secara *parallel in-line* pada sebuah sistem. Tujuan dari konfigurasi penguat *hybrid* (FRA-EDFA) adalah mengetahui karakteristik masing-masing penguat FRA dan EDFA untuk kemudian memanfaatkan keuntungan dan menghilangkan kerugian yang dimiliki dari masing-masing penguat agar mendapatkan *gain bandwidth* yang lebar.

Pada simulasi ini terdiri dari karakteristik masing-masing penguat (FRA dan EDFA), optimasi konfigurasi *parallel in-line hybrid amplifier* (FRA-EDFA) seperti optimasi *Gain Flattening Filter*, dan uji performansi penguat pada sistem *long haul Ultra*-DWDM. Simulasi ini akan menggunakan empat parameter jarak yang berbeda pada sistem yang diujikan yaitu 0, 50, 100, 150, 210, dan 250 km. Dari parameter sistem yang digunakan, hanya parameter jarak (*link*) saja yang diubah selama pengujian performansi. Dari perancangan sistem *long haul Ultra*-DWDM tersebut, kemudian akan dilakukan simulasi untuk menguji konfigurasi penguat yang digunakan. Dari hasil simulasi tersebut kemudian akan dianalisis nilai BER dan Q *Factor* yang didapatkan. Fokus utama dari uji performansi sistem pada penelitian ini yaitu penggunaan konfigurasi penguat *hybrid* (FRA-EDFA) yang bertujuan untuk mendapatkan spektrum *gain bandwidth* yang lebar dengan nilai *gain* yang rata untuk semua panjang gelombang.

3.2 Parameter *Optical Amplifier*

Sistem *Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing* terdiri dari beberapa blok penyusun utama yaitu blok pengirim, media transmisi, penguat optik dan blok penerima. WDM *Transmitter* dan *multiplexer* merupakan bagian dari blok pengirim. Pada simulasi ini jenis modulasi yang digunakan adalah modulasi *Non-Return to Zero* (NRZ). ITU-T G.655 serat optik berjenis *Single Mode Fiber* (SMF) *Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber* (NZDSF) digunakan sebagai media transmisi pada sistem ini. ITU-T G.655 merupakan serat optik yang dioptimalkan untuk aplikasi DWDM. Penguat yang digunakan adalah FRA dan EDFA yang disusun secara *parallel in-line*. Pada blok penerima terdiri dari *demultiplexer* dan WDM *Receiver*. Parameter pada penguat optik EDFA dan FRA dapat dilihat pada tabel 1.

Parameter	Nilai	Satuan
Number of amplifier	2	*Quantity*
Core Radius	2.2	*µm*
Er Doping Radius	2.2	*µm*
Loss at 1550	0.1	*dB/km*
Loss at 980	0.15	*dB/km*
Length	4	*m*
Pumping	Bidirectional	*type*
Forward pump power	0.35	*W*
Backward pump power	1	*W*
Forward pump wavelength	980	*nm*
Backward pump wavelength	980	*nm*

Parameter	Nilai	Satuan
Number of Amplifier	1	*Quantity*
Attenuation	0.2	*dB/km*
Effective Interaction Area	72	*µm²*
Pump Power	130 dan 400	*mW*
Pump Wavelength	1380, 1395, 1480, 1497, 1510	*nm*
Fiber Length	22	*km*
Temperature	300	*K*
Reference Wavelength	1550	*nm*
Upper Pump Reference	1510	*nm*

Tabel 1 Parameter pada EDFA dan FRA

3.3 Simulasi

Pada bagian simulasi ini, dibagi menjadi 3 skenario,

1. skenario 1 adalah Pada skenario awal ini dibuat sebuah pemodelan sistem *Long haul* U-DWDM dengan spasi kanal yang sangat rapat yaitu 0,19 nm. Secara umum diagram blok sistem *Long haul* U-DWDM terdiri dari empat blok penyusun utama yaitu blok pengirim, media transmisi, penguat optik dan blok penerima pada skenario pertama ini dilakukan analisis sistem U-DWDM tanpa penguat.
2. Pada skenario ke 2 Pada skenario selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengetahui karakteristik FRA dan EDFA. Dengan menggunakan penguat, level daya sinyal yang melemah dapat diperkuat kembali, sehingga sinyal dapat sampai ke penerima dengan baik. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari penguat FRA dan EDFA.
3. Pada skenario ke 3Setelah mengetahui karakteristik dari masing-masing penguat, maka *Hybrid Optical Amplifier* diusulkan untuk memanfaatkan kelebihan dari FRA dan EDFA serta menghilangkan kerugian yang terdapat pada penguat tersebut..

4. HASIL PERANCANGAN DAN ANALISIS

4.1 Analisis Sistem U-DWDM Tanpa Penguat

Dengan menggunakan *software optisystem*, sistem tersebut disimulasikan dengan menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya untuk diketahui bagaimana performansi sistem. Sebagai langkah awal, *setup* blok simulasi sistem *long haul* U-DWDM tanpa penguat disimulasikan untuk mengetahui bagaimana performansi sistem tanpa menggunakan penguat. Dari hasil simulasi, didapatkan nilai Q Factor dan BER seperti pada Tabel dibawah. dari Tabel 2 terlihat bahwa nilai Q *Factor* mengalami penurunan dan nilai BER mengalami kenaikan untuk sistem *long haul* U-DWDM untuk panjang *link* yang semakin jauh. Pada jarak tanpa *link* transmisi atau pada jarak 0 km, meskipun nilai Q *factor* dan BER untuk masing-masing kanal berbeda, tetapi nilai tersebut masih memenuhi syarat

Tabel 2 Nilai BER dan Q factor

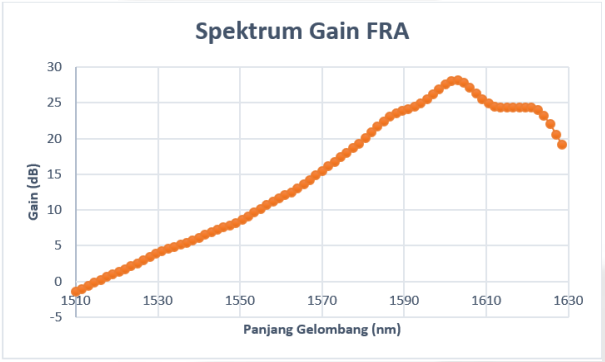
kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	6.07981	0	0	0	0	0
20	6.58696	0	0	0	0	0
30	6.5249	0	0	0	0	0
40	6.56892	0	0	0	0	0
50	6.99082	0	0	0	0	0
60	6.43706	0	0	0	0	0
70	6.46592	0	0	0	0	0
80	*7.45812*	0	0	0	0	0

kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	5.91E-10	1	1	1	1	1
20	2.24E-11	1	1	1	1	1
30	3.39E-11	1	1	1	1	1
40	2.53E-11	1	1	1	1	1
50	1.36E-12	1	1	1	1	1
60	6.08E-11	1	1	1	1	1
70	5.03E-11	1	1	1	1	1
80	4.38E-14	1	1	1	1	1

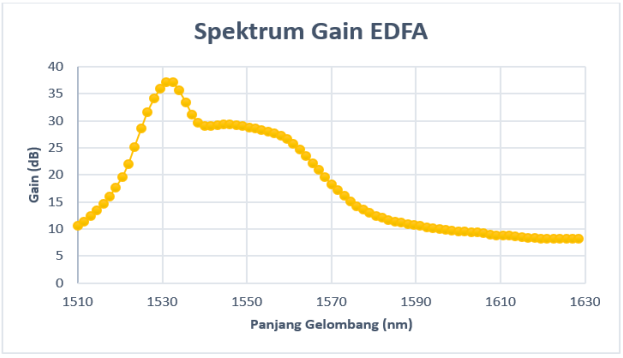
untuk batas nilai Q *factor* ≥ 6 dan BER kurang dari 10^{-9} hingga jarak maksimal 0.97 km. Namun, untuk jarak yang semakin jauh yaitu 150 km, 210 km, dan 250 km Q *factor* bernilai 0 dan BER bernilai 1, yang menandakan bahwa sistem tersebut tidak dapat memberikan performansi yang baik untuk jarak jauh.

4.2 Analisis Karakteristik *Optical Amplifier*

Pada simulasi selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengetahui karakteristik FRA dan EDFA. Konfigurasi FRA menggunakan satu buah penguat Raman yang terhubung dengan *ground*, *pump laser*, *multiplexer*, dan *visualizer* seperti *optical spectrum analyzer* dan WDM *analyzer*. Konfigurasi *multi-pumps* digunakan pada skenario ini untuk memanfaatkan FRA sebagai penguat optik *wideband* dan dapat meningkatkan *gain-bandwidth*. Daya pompa yang digunakan adalah 130 dan 400 mW. Untuk konfigurasi karakteristik EDFA, digunakan EDF dengan panjang 4 m dan *backward pump power* sebesar 1 W. Berdasarkan konfigurasi tersebut, spektrum *gain* FRA ditunjukkan pada gambar 5 dan EDFA pada gambar 6.



Gambar 5 .Spektun *gain* FRA.



Gambar 6. Spektrum *gain* EDFA.

Berdasarkan gambar 5 dan 6 diatas, FRA dan EDFA memiliki nilai *gain* yang tidak rata. Dimana nilai *gain* FRA pada panjang gelombang 1510 nm hingga 1603 nm mengalami peningkatan, lalu mengalami sedikit penurunan nilai hingga panjang gelombang 1630 nm. FRA dapat memberikan nilai *gain* yang cukup tinggi yaitu ≥ 20 dB pada panjang gelombang 1580 – 1627 nm. Hal tersebut menunjukkan bahwa, *optical amplifier* FRA memberikan penguatan yang cukup baik pada panjang gelombang yang berada pada sekitar daerah L-*Band* (1565 – 1625 nm). Berbeda dengan penguat Raman, EDFA memiliki puncak *gain* dengan nilai yang lebih tinggi yaitu sebesar 37.16 dB pada panjang gelombang 1531 nm. Berdasarkan grafik yang ditunjukkan oleh gambar 7, dapat dilihat bahwa penguatan EDFA memiliki nilai yang cukup baik pada rentang panjang gelombang 1522 – 1567 nm dengan nilai *gain* ≥ 20 dB pada rentang tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa, spektrum *gain* EDFA memiliki karakteristik yang berbeda dengan dengan *optical amplifier* FRA dimana EDFA memiliki penguatan dengan nilai yang lebih tinggi pada daerah C-*Band*.

4.3 Analisis Karakteristik *Optical Amplifier*

4.4 Analisis FRA dan EDFA pada Sistem *Long Haul* U-DWDM

Simulasi sistem *Long Haul* U-DWDM dengan menggunakan satu penguat FRA dan satu penguat EDFA dilakukan untuk mengetahui performansi masing-masing penguat pada sistem ini. Setup simulasi yang digunakan seperti pada gambar 8 dan 9. Pada simulasi tersebut, penguat diujikan pada sistem untuk panjang *link* transmisi yang berbeda yaitu 0, 50, 100, 150, 210, dan 250 km.

Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan nilai Q *Factor* dan BER untuk FRA pada sistem *long haul* U-DWDM pada tabel 5 dan 6. Dan hasil simulasi EDFA pada tabel 7 dan 8. Sistem *long haul* U-DWDM dengan menggunakan FRA memberikan performansi yang baik pada saat tanpa *link* transmisi. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai Q *factor* terendah sebesar 8.43784 dan BER 1.58E-17. Namun, berdasarkan nilai Q *factor* 0 dan BER 1 untuk jarak > 50 km, konfigurasi ini tidak mampu memberikan performansi yang baik dan hanya dapat mencapai jarak 41 km. Karena karakteristik FRA yang memiliki nilai penguatan yang rendah pada 1550 nm, sehingga tidak dapat mengatasi rugi-rugi serat yang semakin besar.

Tabel 4 Nilai Q factor terhadap jarak.

kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	12.9208	10.4572	0	0	0	0
20	8.74311	7.92996	0	0	0	0
30	9.55614	8.11853	0	0	0	0
40	9.21546	8.4078	0	0	0	0
50	9.05068	7.70643	0	0	0	0
60	8.43784	7.75948	0	0	0	0
70	9.43174	7.35428	0	0	0	0
80	9.84051	8.30652	0	0	0	0

Tabel 3 Nilai BER terhadap jarak.

kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	1.7E-38	1.48E-39	1	1	1	1
20	1.11E-18	4.63E-23	1	1	1	1
30	6.03E-22	3.93E-22	1	1	1	1
40	1.54E-20	1.09E-18	1	1	1	1
50	6.96E-20	5.62E-17	1	1	1	1
60	1.58E-17	4.79E-16	1	1	1	1
70	2E-21	3.24E-15	1	1	1	1
80	3.75E-23	3.66E-19	1	1	1	1

Hal yang berbeda terjadi pada simulasi sistem dengan menggunakan EDFA. Berdasarkan nilai Q *factor* dan BER pada tabel 5 dan 6, penggunaan penguat EDFA mampu memberikan performansi yang lebih baik dibandingkan FRA. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai terendah Q *factor* sebesar 3.52714 dan BER 2.09E-04. Nilai Q *factor* dan BER yang masih ideal, terdapat pada jarak hingga 201 km. Karena EDFA memiliki karakteristik dengan nilai penguatan yang tinggi pada panjang gelombang 1550 nm seperti yang ditunjukkan gambar sebelumnya, sehingga konfigurasi sistem dengan EDFA memberikan performansi yang lebih baik dari FRA.

Tabel 5. Qfactor terhadap jarak

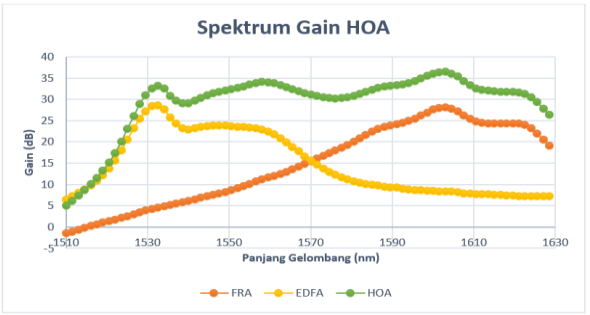
kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	8.95346	7.64029	7.579567	7.92996	6.5671	6.04986
20	9.61176	8.78964	8.61172	8.11853	6.91404	6.38551
30	9.43535	8.2224	8.13096	8.4078	7.02066	5.59586
40	9.6708	8.44779	7.11041	7.70643	6.74685	5.33583
50	9.17418	7.85097	7.06114	7.75948	6.46679	5.3896
60	9.41209	7.77829	6.97813	7.35428	6.49068	5.24402
70	9.50514	8.02808	6.93564	8.30652	5.97832	3.92247
80	12.2383	10.2979	8.74151	9.8302	6.86632	3.52714

Tabel 6. Nilai BER teradap jarak

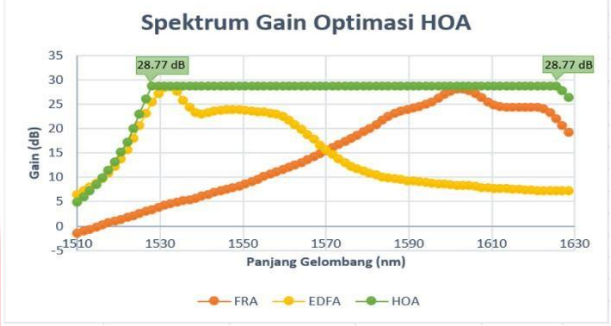
kanal	panjang link (km)					
	0 km	50 km	100 km	150 km	210 km	250 km
10	1.68E-19	9.89E-15	1.62E-14	6.72E-26	2.44E-11	7.10E-10
20	3.52E-22	7.11E-19	3.48E-18	1.06E-15	2.26E-12	8.49E-11
30	1.94E-21	9.43E-17	2.03E-16	2.06E-17	1.08E-12	1.09E-08
40	1.99E-22	1.38E-17	5.53E-13	635E-15	7.33E-12	4.61E-08
50	2.25E-20	1.93E-15	7.68E-13	4.15E-15	4.87E-11	3.50E-08
60	2.41E-21	3.44E-15	1.46E-12	9.25E-14	4.19E-11	7.74E-08
70	9.93E-22	4.64E-16	1.94E-12	4.83E-17	1.08E-09	4.35E-05
80	9.54E-35	3.25E-25	1.08E-18	4.08E-23	3.26E-12	2.09E-04

4.5 Analisis HOA pada Sistem *Long Haul* U-DWDM

Penguat *hybrid optical amplifier* FRA – EDFA dengan konfigurasi *parallel in-line* menggunakan FRA *multi- pumps,* dua buah penguat EDFA yang disusun secara *parallel in-line,* dan beberapa *visualizer* untuk mengetahui hasil simulasi yang telah dijalankan. Gambar 7 merupakan spektrum *gain* hasil simulasi yang telah dijalankan. HOA dengan konfigurasi FRA-EDFA yang disusun secara *cascade,* menyebabkan *gain* EDFA menurun. Hal tersebut terjadi karena sinyal optik yang melewati FRA cukup besar untuk mensaturasi media *gain* dari EDFA. Dengan menggunakan *bidirectional pumping* untuk EDFA yang disusun secara paralel dapat meningkatkan nilai *gain* EDFA, sehingga memiliki puncak *gain* dengan nilai yang hampir sama dengan FRA seperti pada gambar 8.

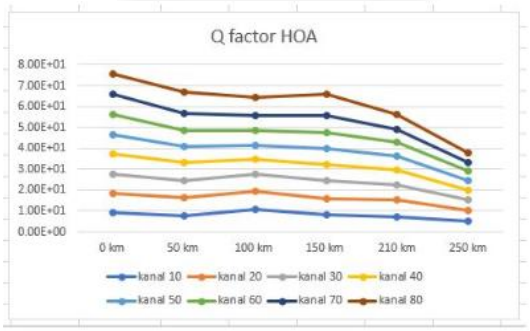


Gambar 7. Spektrum *gain* HOA

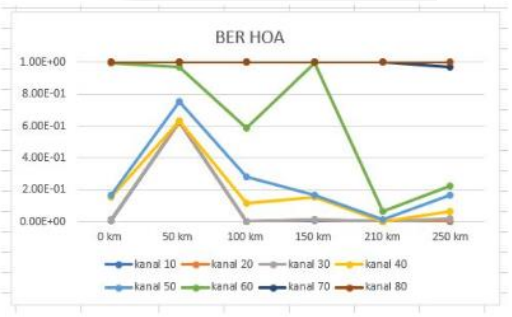


Gambar 8. Spektrum *gain* optimasi HOA

Dari hasil simulasi tersebut, menunjukkan bahwa konfigurasi HOA FRA-EDFA *parallel in-line* memberikan nilai penguatan lebih baik dan *gain bandwidth* yang jauh lebih lebar dibandingkan dengan konfigurasi menggunakan satu *fiber amplifier* (FRA atau EDFA). Hal tersebut dibuktikan dengan nilai *gain* yang lebih besar dari 29 dB dengan rentang *bandwidth* 96 nm pada panjang gelombang 1529.5 – 1625.5 nm. Namun, *gain* dengan *bandwidth* yang lebar tersebut, memiliki nilai yang berbeda-beda untuk setiap panjang gelombang sehingga belum dapat mencapai *gain flatness*. Oleh karena itu dilakukan optimasi untuk konfigurasi HOA tersebut. Perbedaan yang signifikan terjadi pada spektrum *gain* HOA setelah dioptimasi menggunakan *Gain Flattening Filter* (GFF) seperti yang digambarkan pada gambar 11, spektrum *gain* HOA memiliki *gain flatness* dengan nilai rata-rata sebesar 28.94 dB. Nilai *gain* yang rata tersebut berada pada rentang *bandwidth* sebesar 96 nm pada panjang gelombang 1529.5 – 1625.5 nm. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa karakteristik *hybrid optical amplifier* dengan menggunakan FRA dan EDFA yang disusun secara *parallel in-line*, memiliki kerataan nilai *gain* (*gain flatness*) atau intensitas penguatan yang sama dengan nilai *gain* sebesar 28.94 dB dan *gain bandwidth* yang cukup lebar sebesar 96 nm. Sehingga HOA merupakan kombinasi penguat yang optimal untuk simulasi ini.



Gambar 9. Nilai Q *Factor*



Gambar 10. Nilai BER

Setelah mendapatkan konfigurasi HOA yang optimal, konfigurasi tersebut juga diujikan pada sistem *long haul* U-DWDM. Panjang *link* transmisi yang akan diujikan adalah 0, 150, 210, dan 250 km. Panjang *link* transmisi yang berbeda digunakan untuk mengetahui berapa besaran jarak serat optik yang dapat digunakan secara optimal pada sistem ini. Nilai Q *factor* dan BER digunakan untuk melihat performansi dari hasil simulasi tersebut. Pada gambar 9 dan 10 terlihat lebih jelas grafik nilai Q *factor* dan BER hasil simulasi diatas.

Terjadi penurunan nilai Q *factor* dan peningkatan nilai BER pada kanal yang digunakan untuk jarak 0 km hingga 250 km. Ketika panjang *link* transmisi yang digunakan semakin jauh, maka nilai Q *factor* dan BER juga semakin jauh dari batas ideal. Penurunan nila dapat terjadi karena adanya pengaruh dari rugi-rugi yang terdapat pada serat optik. Salah satunya yaitu karena nilai dispersi serat optik yang terakumulasi ketika *link* bertambah jauh. Serat optik yang digunakan adalah SMF ITU-T G.665 dengan nilai dispersi positif sebesar 4 ps/(nm.km). Nilai tersebut terakumulasi linear positif seiring dengan bertambah panjangnya *link* yang digunakan, sehingga semakin kecilnya *delay* antar kanal, sehingga menimbulkan *Inter Symbol Interference* (ISI). Apabila dibandingkan dengan simulasi sistem menggunakan satu penguat FRA atau EDFA saja, konfigurasi HOA ini memberikan performansi yang lebih baik. Dimana pada jarak 210 km nilai Q *factor* dan nilai BER masih memenuhi syarat performansi yang baik. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai Q *factor* terendah pada jarak tersebut sebesar 6.10417 dan BER 5.08E-10 pada kanal ke-70 dari 80 kanal yang digunakan. Sehingga dari hasil yang didapatkan tersebut, sistem *long haul* U-DWDM konfigurasi *hybrid optical amplifier* FRA-EDFA *parallel in-line* dengan menggunakan spesifikasi yang terdapat pada penelitian ini memberikan performansi yang ideal pada jarak maksimal 210 km.

5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.3 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis terhadap skenario-skenario yang telah dilakukan dengan menggunakan *software Optisystem* 7.0 didapatkan kesimpulan yaitu,

5.3.1 Spektrum *gain* dari penguat FRA dan EDFA memiliki karakteristik yang berbeda, namun dapat melengkapi satu sama lain. Oleh karena itu dengan mengombinasikan kedua penguat menjadi suatu *hybrid optical amplifier* dapat memanfaatkan keuntungan yang dimiliki oleh kedua penguat dan saling menutupi kerugian masing-masing. Sehingga konfigurasi HOA dapat menghasilkan spektrum *gain wideband* yang tinggi.

5.3.2 Sistem Long Haul U-DWDM yang menggunakan penguat FRA tidak dapat memberikan performansi yang optimal pada jarak 150 km dan hanya mampu memberikan performansi yang baik pada jarak maksimal 41 km. hal tersebut terjadi karena FRA memiliki penguatan yang rendah pada daerah panjang gelombang yang digunakan sistem. Sementara itu, dengan menggunakan EDFA performansi sistem yang baik tidak dapat mencapai jarak 210 km, tetapi hanya mampu mencapai jarak 201 km.

5.3.3 HOA menggunakan konfigurasi FRA-EDFA *parallel in-line* dapat meningkatkan penguatan EDFA agar memiliki puncak gain yang tidak jauh berbeda dengan FRA. Optimasi GFF dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja penguat, sehingga didapatkan kerataan nilai gain (gain flatness) atau intensitas penguatan yang sama dengan nilai gain sebesar 28.94 dB dan gain bandwidth yang cukup lebar sebesar 96 nm pada rentang panajng gelombang 1529.5 – 1625.5 nm.

5.3.4 Sistem *long haul* U-DWDM dengan menggunakan konfigurasi HOA FRA-EDFA *parallel in-line* merupakan konfigurasi yang paling optimal pada penelitian ini. Setelah mendapat nilai Q *factor* dan BER yang beragam untuk hasil simulasi ini, didapatkan bahwa nilai Q *factor* dan BER yang ideal terdapat sampai jarak 210 km. Sehingga konfigurasi sistem *long haul* U-DWDM konfigurasi HOA FRA-EDFA *parallel in-line* tersebut dapat memberikan performansi yang baik maksimal pada jarak 210 km.

5.4 Saran

Penelitian ini sangat memungkinkan untuk pengembangan selanjutnya. Adapun saran untuk pengembangan selanjutnya yaitu :

5.4.1 Melakukan uji performansi dengan penguat *hybrid* (FRA-EDFA) konfigurasi *parallel in-line*dengan menggunakan pulsa soliton.

5.4.2 Melakukan uji performansi dengan penguat hybrid EDFA *C-band* and EDFA *L-band*..

Daftar Pustaka

[1] G. Keiser. *Optical Fiber Communication* (Fifth Edition). McGraw-Hill Higher Education. 2014

[2] Simranjit-Singh., & Rajindr. Singh-Kaler, "*Review on recent developments in hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system*", Opt. Eng. 54(10), 100901, Oct 06, 2015.

[3] A. Hambali and B. Pamukti, "Performance analysis of hybrid optical amplifier in long-haul ultra-dense wavelength division multiplexing system," in *International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications* (ICCREC), Yogyakarta, Indonesia, pp. 80-83, 2017.

[4] S. Singh and R. S. Kaler, "*Investigation of hybrid optical amplifiers for dense wavelength division multiplexed system with reduced spacings at higher bit rates*," Int. J. Fiber Integr. Opt., vol. 31, no. 3, pp. 208–220, 2012.

[5] P. Athma Praja, 2017. Analisis Performansi *Hybrid Optical Amplifier* Pada Sistem *Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing*. Tugas Akhir. Bandung : Jurusan Teknik Telekomunikasi Universitas Telkom.

[6] Hanafie, Satria. 2013. Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM Menggunakan Penguat SOA, EDFA, dan ROA Berbasis Soliton. Tugas Akhir. Bandung : Jurusan Teknik Telekomunikasi Universitas Telkom.

[7] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, and T. Kimura, "Direct frequency mo- dulation in AlGaAs semiconductor lasers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 4, pp. 428–441, 1982.

[8] K. Blow, N. Doran, and B. K. Nayar, "Experimental demonstration of opti- cal soliton switching in an all-fiber nonlinear sagnac interferometer," Optics letters, vol. 14, no. 14, pp. 754–756, 1989.

[9] S. Ogita, Y. Kotaki, M. Matsuda, Y. Kuwahara, H. Onaka, H. Miyata, and H. Ishikawa, "FM response of narrow-linewidth, multielectrode lambda/4 shift dfb laser," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 2, no. 3, pp. 165–166, 1990.

[10] L. Mollenauer, P. Mamyshev, J. Gripp, M. Neubelt, N. Mamysheva, L. Grüner- Nielsen, and T. Veng, "Demonstration of massive wavelength-division multi-plexing over transoceanic distances by use of dispersion-managed solitons," *Optics letters*, vol. 25, no. 10, pp. 704–706, 2000.

[11] B. Pamukti and D. Perdana, "Non-linear effects of high rate soliton transmis- sion on dwdm optical fiber communication system," in *Information Technolo- gy, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), International Conference on*. IEEE, 2016, pp. 26–30.

.