

ANALISIS PERFORMANSI *HYBRID OPTICAL AMPLIFIER* PADA SISTEM *LONG HAUL ULTRA-DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING*

Performance Analysis of Hybrid Optical Amplifier in long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing System

Pugar Athma Prajai, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Afief Dias Pambudi, S.T.,M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Bandung

¹athmapraja@students.telkomuniversity.ac.id, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,

³afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

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

Optimasi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* membuat spektrum *gain* berada disekitar intensitas penguatan yang sama dengan menurunkan tingkat kerataan *gain* dari 4,3 dB ke 0,01 dB dengan rata-rata *gain* sekitar 25,7 dB yang memiliki rentang *bandwidth* 75 nm sepanjang *band* gelombang 1530-1605 nm. Dari hasil simulasi uji performansi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* pada sistem *long haul U-DWDM* dengan panjang *link* sejauh 205 km didapatkan *Q Factor* yang beragam yaitu pada kanal ke-1 (7,97197), 20 (7,24377), 40 (6,68281), 60 (7,01838), 80 (6,4435), 100 (6,58715) dan *Q Factor* terendah pada kanal ke-80 (6,4435). Nilai tersebut mengindikasikan bahwa sistem *long haul U-DWDM* dengan konfigurasi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* yang disusun secara seri (*cascade*) dengan spesifikasi yang tertera pada penelitian ini hanya efektif pada jarak maksimal 205 km.

Abstract

Hybrid amplifier is a promising technology and give a better performance because it can handle the network with a large load. Hybrid amplifier is used to optimize the increase in the gain bandwidth of WDM-based system. Increasing optical amplifier gain-bandwidth is the most effective way to optimal utilization of the fiber bandwidth efficiently to increase the channel number of WDM-based system.

Optimization hybrid amplifier (Raman-EDFA) gain spectrum being made around the same intensity reinforcement with lower levels of gain flatness of 4.3 dB to 0.01 dB with an average gain of about 25.7 dB with a bandwidth range of 75 nm las long as 1530-1605 nm. From the simulation results of test performance hybrid amplifier (Raman-EDFA) in long haul U-DWDM system configuration with a 205 km link length acquired Q Factor diverse ie on channel 1 (7.97197), 20 (7.24377), 40 (6.68281), 60 (7.01838), 80 (6.4435), 100 (6.58715) and the lowest Q-factor on channel 80 (6.4435). These values indicate that the long haul U-DWDM system configuration with hybrid amplifier (Raman-EDFA) which are arranged in cascade configuration with the specifications contained in this research is only effective at a maximum distance of 205 km.

1. Pendahuluan

Degradasi sinyal bersama dengan jarak transmisi dalam sistem komunikasi berbasis optik timbul karena berbagai faktor seperti efek *non linieritas* dan kesalahan lainnya. Jumlah pengguna dapat ditingkatkan dengan mengurangi rugi-rugi dalam jaringan menggunakan regenerator optoelektronik. Tetapi regenerator tersebut dapat menjadi cukup kompleks, memakan waktu, dan mahal untuk sistem berbasis WDM karena berbagai tingkat pengolahan, yaitu *demultiplexing*, konversi *optic-electro-optic (OEO)*, dan *multiplexing*. Hal tersebut akan mengurangi kehandalan sebuah sistem atau jaringan yang menggunakan regenerator sebagai perangkat aktif. Oleh karena itu, pembaharuan dari jaringan WDM multi kanal akan membutuhkan penguat optik yang secara langsung memperkuat daya sinyal optik tanpa melalui konversi *optic-electro-optic (OEO)*^[1]. Penguat optik sebagian besar digunakan pada aplikasi berbasis WDM karena semua saluran dengan panjang gelombang yang berbeda dapat diperkuat secara bersamaan. Sebuah penguat optik dapat meningkatkan level daya sinyal sebagai *pre-amplifier* (dengan menempatkannya setelah pemancar), sebagai *in-line amplifier* (dengan menempatkannya sepanjang *link* pada *intermediate point*), dan sebagai *post-amplifier* (dengan menempatkannya sebelum penerima). Terdapat berbagai efek non linieritas [seperti *self-phase modulation (SPM)*, *cross phase modulation (XPM)*, *gain saturation* dan yang lainnya]. Oleh karena itu timbul banyak permintaan untuk penguat optik dengan kinerja lebih baik dalam hal efek *non linieritas*, performansi transien, *power crosstalk*, *gain flatness*, *gain bandwidth* yang lebih besar dan sebagainya untuk sistem berbasis WDM^[2].

Dengan terus meningkatnya beban pada jaringan, maka *Hybrid Optical Amplifier (HOA)* diusulkan. penguat *hybrid* merupakan sebuah teknologi yang menjanjikan dan memberikan performansi yang lebih baik karena dapat menangani jaringan dengan beban yang besar. Penguat *hybrid* digunakan untuk mengoptimalkan peningkatan *gain-bandwidth* dari sistem berbasis WDM, untuk mengurangi kerugian karena induksi *non linieritas* dan untuk mencegah penggunaan biaya tinggi yang dibutuhkan untuk memperbaiki *gain flatness*. Hal ini juga menawarkan lebih banyak keuntungan dibanding regenerator elektronik, termasuk *data rate* sistem dapat diubah

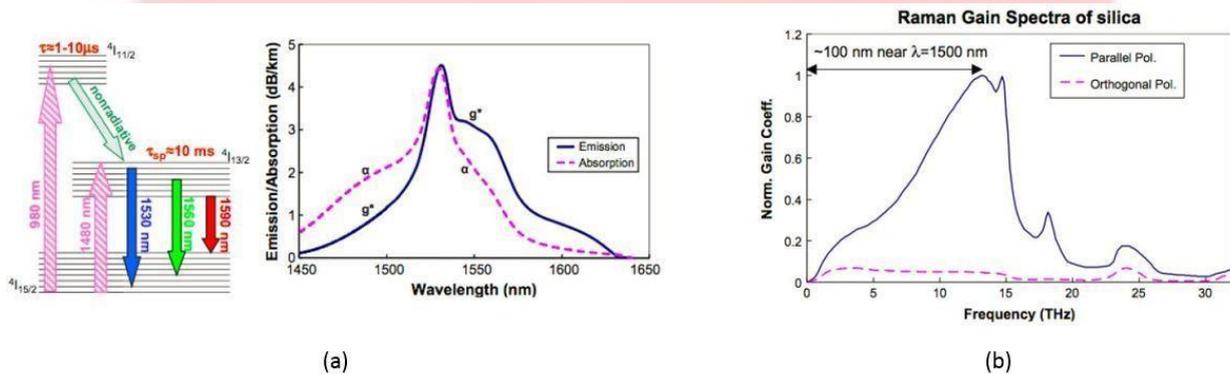
sesuai dengan kebutuhan, dapat dimungkinkan untuk mengirimkan data dalam banyak saluran (*multiple channles*), dan tidak perlu memodifikasi *in-line transmission link* atau komponen untuk mendapatkan keuntungan tersebut^[1].

Tugas Akhir ini membahas konfigurasi penguat *hybrid* yang optimal dan melakukan uji performansi beserta simulasi transmisi data pada sistem U-DWDM dengan menggunakan penguat optik *hybrid (Raman-EDFA)*. Dari hasil simulasi, dilakukan analisis dan penelusuran terkait spektrum amplifikasi dan spektrum *gain beserta nilai Q Factor, Bit Error Ratio (BER)* dan analisis *Eye diagram*.

2. Dasar Teori

2.1. Mekanisme EDFA dan FRA

EDFA merupakan penguat optik pertama yang digunakan secara luas dalam sistem komunikasi optik, dan hal ini mengakibatkan pertumbuhan pesat pada kapasitas transmisi dengan memanfaatkan keuntungan dari sistem berbasis WDM. Penguat EDFA sangat banyak digunakan dan merupakan dasar dari sebagian besar sistem penguat optik. EDFA merupakan serat *single mode*, dengan inti (*core*) yang di doping dengan ion Er^{3+} . Amplifikasi terjadi oleh interaksi resonansi dengan ion Er, skema level energi dari ion Er ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Fitur terpenting dari skema level energi adalah bahwa keadaan tereksitasi pertama sesuai dengan panjang gelombang foton (sekitar 1530–1560 nm) dimana pelemahan (*attenuation*) terendah pada serat silika. Amplifikasi dicapai dengan menciptakan inversi dengan memompa atom ke dalam keadaan tereksitasi pertama (*first excited state*), biasanya baik menggunakan laser dioda dengan daerah operasi kerja 980 nm atau 1480 nm. Lebar spektral dari koefisien emisi menentukan besar *bandwidth* optik dimana EDFA dapat memberikan keuntungan dan membuat transmisi berbasis WDM dengan banyak saluran dimungkinkan.^[3]



Gambar 1. (a) Skema Level Energi dari ion Er dan Absorpsi beserta Koefisien Emisi dan (b) Spektrum Koefisien Gain untuk Amplifikasi Raman pada Serat Silika.^[3]

Fiber Raman Amplifier (FRA) membutuhkan daya pompa jauh lebih tinggi dari EDFA. FRA didasarkan pada efek Raman terstimulasi, merupakan efek *non-resonant* yang terjadi di semua jenis serat dan tidak seperti EDFA, FRA tidak memerlukan dopan khusus untuk melakukan penguatan. Gambar 1 (b) menunjukkan spektrum koefisien *gain* untuk amplifikasi Raman pada serat *silica*. Karena didasarkan pada pergeseran Raman dan *non-resonant*, spektrum koefisien *gain* bukan fungsi dari panjang gelombang mutlak, tetapi perbedaan energi atau perbedaan frekuensi antara *pump light* dan sinyal.

Puncak koefisien *gain* Raman untuk rentang transmisi serat secara umum berkisar sekitar 0.35 m-1 W-1 untuk beberapa standar serat *single mode* sekitar 0.7mm-1W-1 untuk serat *single mode non-dispersion shifted fiber (NZDSF)*. Karena nilai-nilai yang kecil, amplifikasi Raman membutuhkan daya pompa yang besar, biasanya ratusan mW, untuk menghasilkan amplifikasi yang signifikan dan penyebaran dari FRA harus menunggu perkembangan laser pompa dengan daya yang memadai. Tidak seperti amplifikasi Raman, *gain* Raman dalam dB sebanding dengan daya pompa di unit linier (selama deplesi pompa karena sinyal amplifikasi dan interaksi di antara pompa dapat diabaikan). Karena amplifikasi pada konfigurasi *counter-propagating* terjadi terutama di dekat akhir *output* dari rentang dekat sumber pompa Raman dimana kekuatan sinyal rendah, biasanya ada sedikit saturasi *gain* yang terjadi. Konfigurasi *counter-propagating* lebih diusulkan karena dapat meminimalkan polarisasi yang bergantung pada hasil *gain* dari polarisasi tinggi berdasarkan koefisien penguatan Raman dan pengaruh dari pemindahan *relative intensity noise (RIN)* dari pompa ke sinyal.^[3]

2.2. Hybrid Optical Amplifier

Terdapat satu metode untuk pemanfaatan optimal dari *bandwidth* serat yang tersedia yaitu dengan cara menggunakan berbagai kombinasi dari penguat optik dalam rentang panjang gelombang yang berbeda. Penguat dapat dihubungkan baik secara paralel atau seri. Konfigurasi ini disebut sebagai *hybrid amplifier*. Dalam konfigurasi paralel, sinyal pada sistem berbasis WDM di cabangkan (*demultiplexed*) menjadi beberapa kelompok *band* panjang gelombang oleh *coupler*, kemudian sinyal dikuatkan oleh *amplifier* yang memiliki penguatan pada *band* panjang gelombang yang sesuai dengan sinyal tersebut dan kemudian dilakukan *multiplexing* kembali oleh *coupler*. Konfigurasi paralel sangat sederhana dan berlaku untuk semua *amplifier*. Namun, konfigurasi ini memiliki kelemahan juga seperti adanya daerah panjang gelombang yang tidak dapat digunakan antara setiap *gain*

band originated yang berasal dari *guard band* pada *coupler*. Juga, degradasi *noise figure* disebabkan oleh *loss* dari *coupler* yang terletak di depan masing-masing penguat. Namun sebaliknya, penguat yang dihubungkan secara seri memiliki keuntungan *band* yang relatif luas, karena konfigurasi ini tidak memerlukan *couplers*.^[1]

Penguat *hybrid* digunakan untuk mengoptimalkan peningkatan *gain-bandwidth* dari sistem berbasis WDM, untuk mengurangi kerugian karena induksi non linieritas dan untuk mencegah penggunaan biaya tinggi yang dibutuhkan untuk memperbaiki *gain flatness*. Meningkatkan *Gain-Bandwidth* penguat optik adalah cara yang paling efektif untuk pemanfaatan optimal *bandwidth* serat secara efisien dalam peningkatan jumlah saluran berbasis WDM.

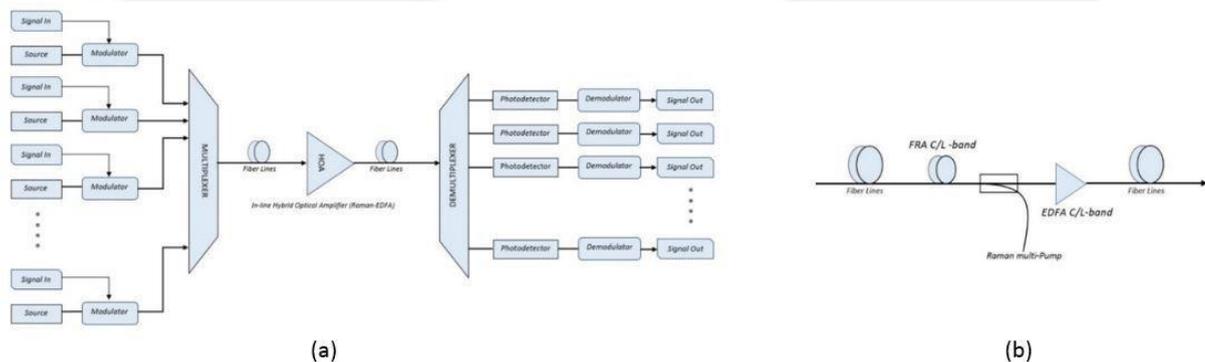
3. Konfigurasi Sistem

Pada bagian ini dijelaskan alur penelitian Tugar Akhir. Langkah pertama yang dilakukan adalah membuat permodelan diagram blok penguat *hybrid*. Pada bagian awal ini dibuat sebuah konfigurasi penguat *hybrid* (*Raman-EDFA*) untuk memanfaatkan keuntungan dan menghilangkan kerugian dari karakteristik kedua penguat tersebut. Penguat *hybrid* hanya terdiri dari penguat Raman dan EDFA yang disusun secara seri (*cascade*) pada sebuah sistem. Setelah dilakukan proses tersebut, kemudian dibuat pemodelan diagram blok sistem *long haul U-DWDM*. Untuk melakukan uji performansi penguat *hybrid* yang telah di rancang pada tahap sebelumnya diperlukan sebuah sistem yang menjadi media uji performansi penguat tersebut, maka sebuah sistem *long haul U-DWDM* dibuat. Sistem tersebut di buat dengan jarak (panjang *link*) lebih dari 100 km dengan spasi kanal yang sangat rapat yaitu 0.19 nm. Pada Tugas Akhir ini akan digunakan tiga parameter jarak yang berbeda pada sistem yang diujikan, jarak *link* yang digunakan adalah 0, 205, dan 255 km. Selama pengujian, semua parameter sistem tidak ada yang dirubah terkecuali parameter jarak (panjang *link*) seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Setelah dilakukan perancangan sistem U-DWDM dengan parameter jarak yang bervariasi, maka selanjutnya setiap konfigurasi akan disimulasikan yang kemudian akan didapat nilai *Q Factor* dan BER dari hasil simulasi tersebut. Tahap terakhir adalah analisa performansi penguat pada sistem yang diujikan.

Setelah dilakukan permodelan sistem dan mengubah parameter uji performansi, maka akan menghasilkan hasil akhir yang berbeda - beda pula. Hasil akhir yang bervariasi akan dilakukan analisis untuk membuktikan bahwa parameter uji tersebut mempengaruhi kinerja penguat pada sebuah sistem dengan melakukan analisis terhadap kualitas dari perubahan panjang *link* dari konfigurasi sistem *long haul U-DWDM* yang telah disimulasikan. Untuk menganalisis kualitas dari sistem yang diujikan dapat dilihat dari *Q Factor* yang digambarkan oleh bukaan 'mata' pada *eye diagram*. Dimana semakin kecil bukaan 'mata' pada *eye diagram* mengindikasikan semakin besarnya pelebaran pulsa, sedangkan semakin besarnya bukaan 'mata' pada *eye diagram* mengindikasikan semakin kecilnya pelebaran pulsa. Selanjutnya dari hasil ini dibuat kesimpulan dari analisis performansi penguat *hybrid* (*Raman-EDFA*) pada sistem *long haul U-DWDM* tersebut.

3.1. Diagram Blok Sistem

Secara umum diagram blok sistem *Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (U-DWDM)* terdiri dari empat blok penyusun utama yaitu blok pengirim, media transmisi, penguat optik dan blok penerima yang ditunjukkan pada Gambar 2 (a). Diagram blok sistem berbasis DWDM ini menggunakan kanal sebanyak 100 buah, dimana setiap kanal memiliki rapat spasi sebesar 0,19 nm dengan *bandwidth* 20 Ghz. Sistem *Long Haul U-DWDM* dibuat dengan konfigurasi *Cascade In-Line Hybrid Amplifier (Raman-EDFA)* yang ditunjukkan pada Gambar 2 (b).



Gambar 2. Diagram Blok (a) sistem Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing dan (b) Cascade In-Line Hybrid Amplifier (Raman-EDFA).

Uji performansi sistem pada penelitian ini berfokus pada penggunaan penguat *hybrid* (*Raman-EDFA*). Dimana penggunaan penguat *hybrid* tersebut bertujuan untuk mendapatkan spektrum *bandwidth* yang lebar dengan semua panjang gelombang berada pada intensitas penguatan yang sama. Kinerja dari sistem dengan konfigurasi penguat *hybrid* ini akan di lakukan analisis dan penelusuran terkait spektrum amplifikasi, spektrum penguatan, nilai *Q Factor*, *Bit Error Rate (BER)* beserta *Eye diagram*.

3.2. Parameter Penguat Optik

Parameter pada penguat optik EDFA dan FRA dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Penentuan nilai parameter pada kedua jenis penguat berdasarkan studi literatur dan hasil dari optimasi. RFA menggunakan lima buah laser pompa dengan daya pompa sebesar 130, 130, dan 400 mW, sedangkan penguat EDFA menggunakan konfigurasi *bidirectional pumping* dengan besar daya *forward pump power* sebesar 1.5 W dan *backward pump power* sebesar 1 W dengan *reference wavelength* 980nm.

Table 1. Parameter Penguat Fiber Raman Amplifier (FRA)

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Fiber Length	22	km
2	Attenuation	0.2	dB/km
3	Effective Interaction Area	72	μm^2
4	Pump Power	130 dan 400	mW
5	Pump Wavelength	1380, 1395, 1480, 1497, 1510	nm
6	Temperature	300	K
7	Reference Wavelength	1550	nm
8	Upper pump Reference	1510	nm
9	Number Of Amplifier	1	Quantity

Table 2. Parameter Penguat Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA).

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Core Radius	2.2	μm
2	Er Doping Radius	2.2	μm
3	Numerical Aperture	0.24	-
3	Loss at 1550	0.1	dB/km
4	Loss at 980	0.15	dB/km
5	Length	4	m
6	Pumping	Bidirectional Pump	Type
7	Forward Pump Power	1.5	W
8	Backward Pump Power	1	W
9	Forward Pump Wavelength	980	nm
10	Backward Pump Wavelength	980	Nm
11	Number of Amplifier	1	Quantity

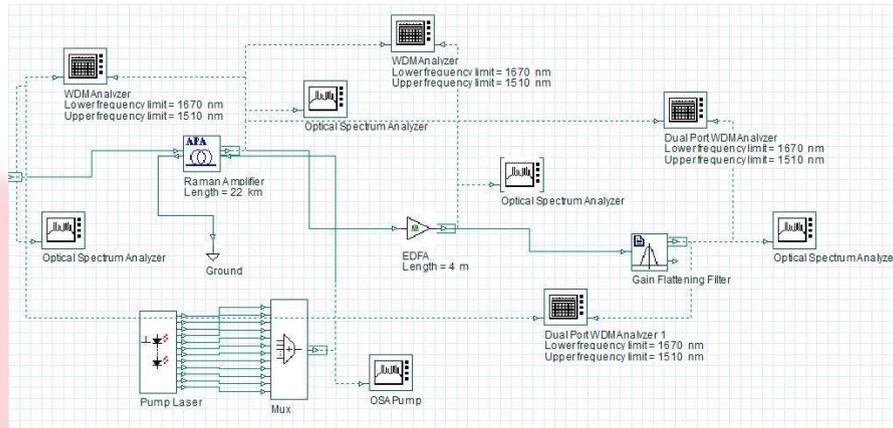
WDM Transmitter terdiri dari *Pseudo Random Bit Sequence Generator (PRBS)*, pada simulasi ini digunakan 100 buah PRBS, dimana bit-bit 0 dan 1 dihasilkan secara acak oleh *bit Sequence Generator*. *Optical source* yang digunakan dalam simulasi ini adalah LASER dengan *transmitter power* sebesar -13 dBm. *Optical Pulse Generator (OPS)* digunakan dengan 100 buah frekuensi optik yang dipakai dalam simulasi ini sebagai representasi dari kanal U-DWDM. Jenis modulasi yang dipakai adalah modulasi *Non-Return to Zero (NRZ)*, dimana degradasi total *transition time* dari suatu hubungan digital tidak boleh melebihi 70% periode bit pada pengkodean NRZ. WDM Multiplexer 100 : 1 digunakan untuk menggabungkan 100 sinyal optik agar bisa ditransmisikan melewati sebuah serat optik tunggal. Sebagai media transmisi, serat optik yang dipakai berjenis *Single Mode Fiber (SMF)* standar ITU-T G.655C *Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF)* dengan panjang 205 km dan 255 km dengan redaman serat sebesar 0.25 dBm.

WDM Receiver terdiri dari *photodetector*, sehingga dalam penelitian ini digunakan *photodetector* berjenis *Avalanche Photodiode (APD)* yang memiliki faktor multiplikasi sebesar 10 – 250 kali dan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dari PIN. Pada simulasi ini digunakan Filter berjenis *Low Pass Bessel Filter* yang memiliki frekuensi *cut off* sebesar 75% dari *bit rate* yang digunakan dan *regenerator* beserta *optical visualyzer* seperti *BER Analyzer*, *Optical Spectrum Analyzer (OSA)*, dan *WDM Analyzer* untuk memberikan hasil dari simulasi pada sebuah sistem yang diujikan.

4. Optimasi dan Analisa Sistem

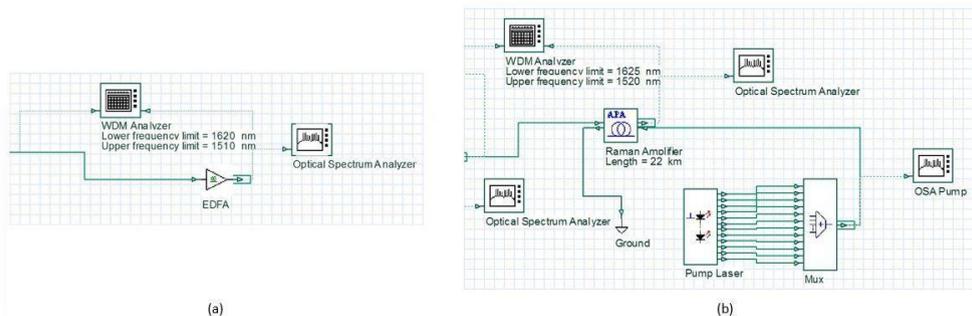
4.1. Optimasi

Untuk memanfaatkan keuntungan dari penguat Raman dan EDFA serta menghilangkan kerugian dari karakteristik kedua penguat yang telah dibahas, maka penguat *hybrid* diusulkan. Penguat *hybrid* terdiri dari penguat Raman dan EDFA yang disusun secara seri (*cascade*) pada sebuah sistem. Gambar 3 menunjukkan *layout* sistem untuk optimasi penguat *hybrid*.



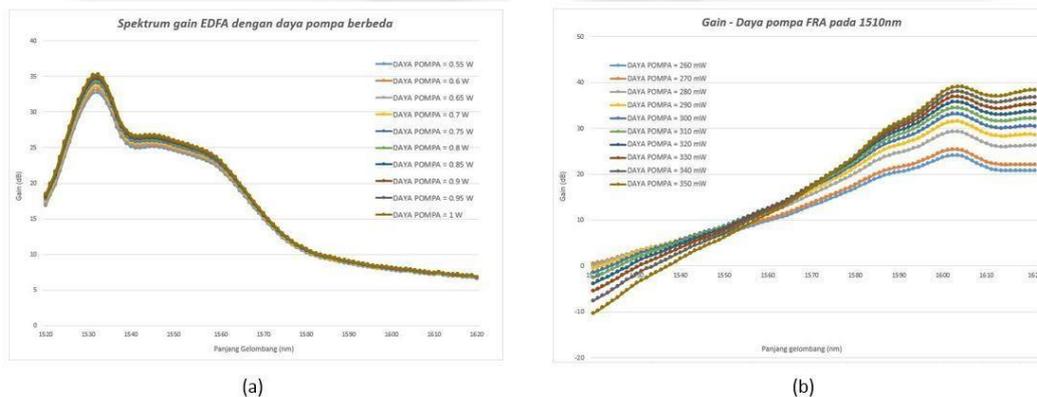
Gambar 3. Layout Konfigurasi Optimasi Hybrid Optical Amplifier

Sebelum melakukan optimasi untuk penguat *hybrid*, pisahkan penguat Raman dan EDFA menjadi dua buah *layout* konfigurasi yang berbeda seperti pada Gambar 4 untuk mengoptimalkan parameter pada setiap penguat agar mendapatkan *gain* relatif yang besar.



Gambar 4. Layout Konfigurasi Penguat (a) EDFA dan (b) FRA

Melalui grafik dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 5, dengan meningkatkan daya pompa pada penguat Raman dapat meningkatkan *gain* secara signifikan pada *range* panjang gelombang tinggi sekitar 1600nm yang di tunjukkan pada Gambar 5 (b). Namun berkebalikan dari grafik yang ditunjukkan untuk penguat EDFA, dimana meningkatkan daya pompa pada penguat EDFA akan meningkatkan *gain* secara signifikan pada *range* panjang gelombang rendah sekitar 1530 nm yang ditunjukkan pada Gambar 5 (a) yang komplementer dengan spektrum *gain* Raman. Dengan membandingkan Gambar 5 (a) dan (b) kedua spektrum *gain* dari penguat Raman dan EDFA melengkapi satu sama lain, oleh karena itu penyusunan kedua penguat secara serial (*cascade*) dapat menghasilkan spektrum *gain wideband* yang tinggi.



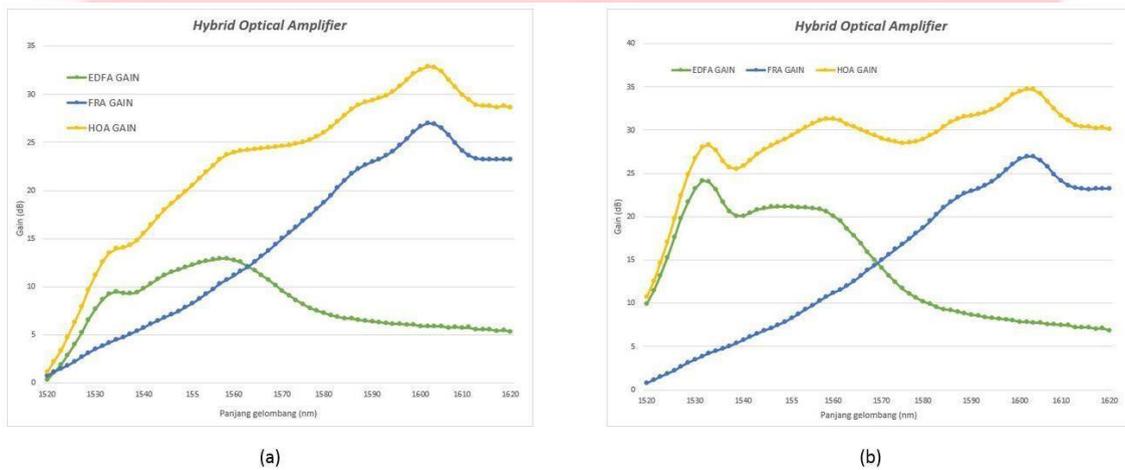
Gambar 5. Spektrum Gain Penguat (a) EDFA dan (b) FRA

Dari grafik hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 5, dipilih parameter yang digunakan untuk melakukan optimasi pada penguat *hybrid*, panjang EDF = 4 m dengan besar daya *backward pump power* = 1 W dengan parameter pompa ganda FRA yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Table 3. Daya Pompa FRA

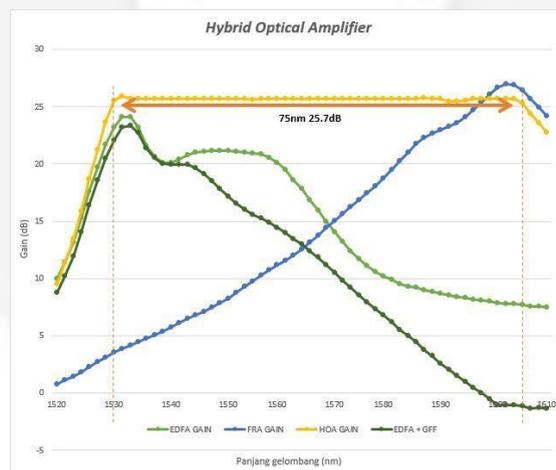
Panjang gelombang (nm)	Daya pompa (nW)
1380	130
1395	130
1480	400
1497	400
1510	400

Melalui optimasi MPO pada Optisystem, didapatkan spektrum *gain* dari EDF, FRA, dan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a).



Gambar 6. Spektrum Gain EDFA, FRA, dan HOA (a) Setelah Optimasi MPO dan (b) Setelah Peningkatan Daya Pompa pada EDFA

Membandingkan spektrum *gain* pada Gambar 6 (a) dengan Gambar 5 (a) dan (b), terlihat bahwa grafik spektrum *gain* dari FRA memiliki pola yang sama pada grafik spektrum *gain* HOA seperti pada Gambar 6 (a), namun hal ini tidak berlaku untuk grafik spektrum *gain* dari EDFA pada HOA seperti pada gambar 5 (a) dan *gain* menjadi lebih kecil. Penurunan spektrum *gain* pada EDFA terjadi karena sinyal optik yang melewati FRA cukup besar untuk mensaturasi media *gain* dari EDFA. Meningkatkan daya pompa pada penguat EDFA atau dengan menserialkan (*cascading*) dua buah penguat EDFA secara bersamaan untuk mendapatkan spektrum *gain* yang lebih tinggi merupakan solusi untuk mengatasi masalah tersebut. Meningkatkan daya pompa pada EDFA dipilih untuk membuat optimasi menjadi lebih sederhana. Parameter yang digunakan untuk mendapatkan hasil optimasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b) adalah panjang EDF = 4 m dengan besar daya *backward pump power* = 1 W dan *forward pump power* = 1,5 W

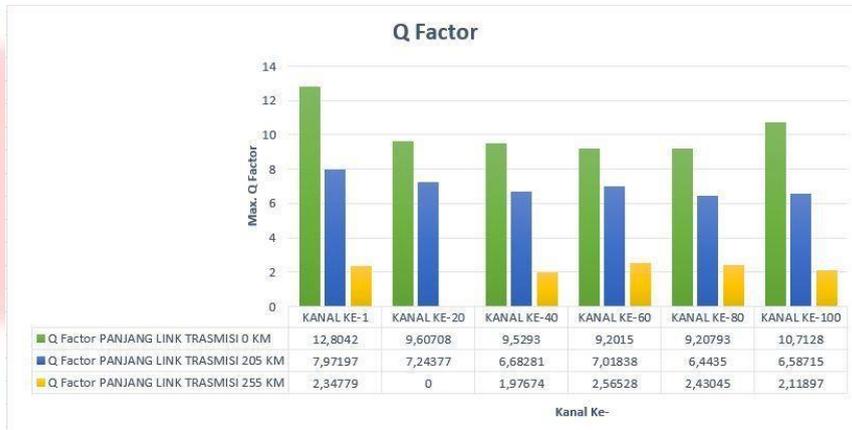


Gambar 7. Spektrum Gain EDFA, EDFA + GFF, FRA, dan HOA (Setelah Optimasi GFF)

Dengan melakukan optimasi GFF membuat spektrum *gain* berada disekitar intensitas penguatan yang sama dengan menurunkan tingkat kerataan *gain* dari 4.3dB ke 0.01 dB dengan rata-rata *gain* sekitar 25.7 dB dan dengan rentang *bandwidth* 75 nm sepanjang *band* gelombang 1530-1605 nm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

4.2. Analisa Sistem

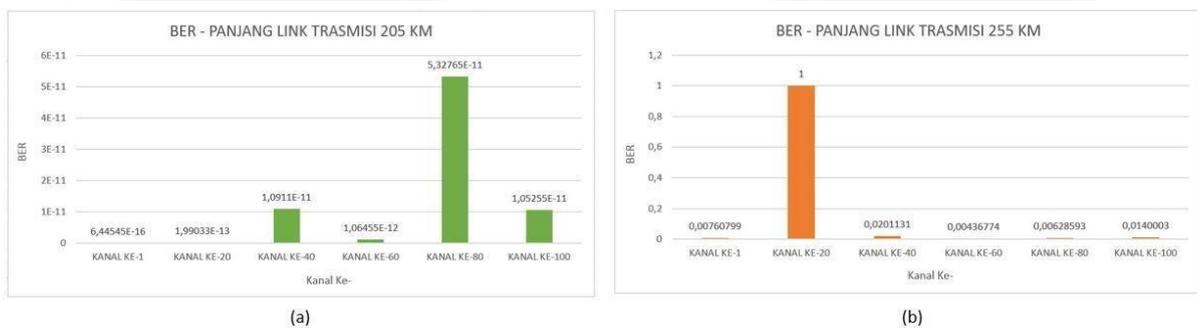
Dari hasil simulasi uji performansi dengan konfigurasi sistem pada *link* transmisi sejauh 0, 205, dan 255 km didapat nilai *Q Factor* sistem seperti pada diagram yang ditunjukkan pada gambar 8. Pada sistem dengan panjang *link* sejauh 205 km tersebut didapat nilai *Q Factor* yang beragam pada kanal ke-1 (7,97197), 20 (7,24377), 40 (6,68281), 60 (7,01838), 80 (6,4435), dan 100 (6,58715) yang dimana nilai *Q Factor* terendah pada kanal ke-80 (6,4435) mempunyai nilai Q lebih dari 6, hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi sistem dengan panjang *link* sejauh 205 km merupakan sistem yang optimal pada penelitian ini.



Gambar 8. Diagram Max. Q Factor pada Sistem U-DWDM

Dari hasil yang didapat, hal ini mengindikasikan bahwa sistem *long haul U-DWDM* dengan konfigurasi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* yang disusun secara seri dengan spesifikasi yang tertera pada penelitian ini hanya efektif pada jarak maksimal 205 km. Meskipun masih terdapat nilai *Q Factor* pada panjang *link* 255 km, akan tetapi nilai yang didapat sangatlah buruk seperti diagram batang yang ditunjukkan pada gambar 8. Menurunnya nilai *Q Factor* ini disebabkan salah satunya karena nilai dispersi serat optik yang terakumulasi saat *link* semakin jauh, dimana nilai dispersi positif yang dimiliki oleh serat optik SMF G655C sebesar 5,5 ps/(nm.km) terakumulasi linear positif seiring dengan bertambahnya panjang *link*. Semakin besar akumulasi dari nilai dispersi inilah yang mengakibatkan semakin kecilnya *delay* antar kanal sehingga menimbulkan *Inter Symbol Interference (ISI)* yang signifikan.

Demikian pula hasil uji performansi pada konfigurasi sistem dengan panjang *link* transmisi sejauh 205 km, didapatkan nilai BER pada setiap variasi kanal seperti pada diagram yang ditunjukkan pada Gambar 9 (a). Dari simulasi yang dilakukan, didapat nilai BER yang beragam, yaitu nilai BER pada kanal ke-1 (6,44545E-16), kanal ke-20 (1,99033E-13), kanal ke-40 (1,0911E-11), kanal ke-60 (1,06455E-12), kanal ke-80 (5,32765E-11), dan kanal ke-100 (1,05255E-11). Terlihat nilai BER yang masih ideal dengan nilai tertinggi pada kanal ke-100 sebesar 1,05255E-11 yang menandakan bahwa dari sekitar 10^{11} bit data yang dikirimkan hanya terdapat 1,05255 bit yang *error*.



Gambar 9. BER dengan Panjang Link Transmisi (a) 205 km dan (b) 255 km

Namun untuk simulasi dengan konfigurasi sistem pada panjang *link* transmisi sejauh 255 km didapatkan nilai BER yang sangat tinggi pada setiap variasi kanalnya seperti pada diagram yang ditunjukkan pada Gambar 9 (b). Dari simulasi yang dilakukan, didapat nilai BER yang beragam, yaitu nilai BER pada kanal ke-1 (0,00760799), kanal ke-20 (1), kanal ke-40 (0,0201131), kanal ke-60 (0,00436774), kanal ke-80 (0,00628593), dan kanal ke-100 (0,0140003). Terlihat nilai BER yang sangat buruk bernilai 1 pada kanal ke-20 sebagaimana hubungan antara *Q factor* dengan BER, maka korelasi dari buruknya nilai *Q factor* dengan BER akan saling terkait.

5. Penutup

Dari hasil simulasi dan analisis uji performansi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* pada sistem *long haul U-DWDM* didapat kesimpulan sebagai berikut:

5.1. Kesimpulan

- a. Dengan meningkatkan daya pompa pada penguat Raman dapat meningkatkan *gain* secara signifikan pada *range* panjang gelombang tinggi sekitar 1600 nm. Namun berkebalikan dari grafik yang ditunjukkan untuk penguat EDFA, dimana meningkatkan daya pompa pada penguat EDFA akan meningkatkan *gain* secara signifikan pada *range* panjang gelombang rendah sekitar 1530 nm, yang komplementer dengan spektrum *gain* Raman. Kedua spektrum *gain* dari penguat Raman dan EDFA melengkapi satu sama lain, oleh karena itu penyusunan kedua penguat secara seri (*cascade*) dapat menghasilkan spektrum *gain wideband* yang tinggi.
- b. Melakukan optimasi GFF membuat spektrum *gain* berada disekitar intensitas penguatan yang sama dengan menurunkan tingkat kerataan *gain* dari 4,3 dB ke 0,01 dB dengan rata – rata *gain* sekitar 25,7 dB pada rentang *bandwidth* 75 nm sepanjang *band* gelombang 1530-1605 nm.
- c. Dari hasil yang didapat, hal ini mengindikasikan bahwa sistem *long haul U-DWDM* dengan konfigurasi penguat *hybrid (Raman-EDFA)* yang disusun secara seri dengan spesifikasi yang tertera pada penelitian ini hanya efektif pada jarak maksimal 205 km. Meskipun masih terdapat *Q Factor* pada panjang *link* 255 km, akan tetapi nilai yang didapat sangatlah buruk yaitu satu.
- d. Menurunnya *Q Factor* disebabkan salah satunya karena nilai dispersi serat optik yang terakumulasi saat *link* semakin jauh, dimana nilai dispersi positif yang dimiliki oleh serat optik SMF G655C sebesar 5,5 ps/(nm.km) terakumulasi linear positif seiring dengan bertambahnya panjang *link*. Semakin besar akumulasi dari nilai dispersi inilah yang mengakibatkan semakin kecilnya *delay* antar kanal sehingga menimbulkan *Inter Symbol Interference (ISI)* yang signifikan.

5.2. Saran

Tugas akhir ini sangat memungkinkan untuk pengembangan selanjutnya dengan berfokus pada uji performansi penguat *hybrid* dengan jenis penguat dan konfigurasi yang berbeda. Adapun saran untuk pengembangan selanjutnya adalah:

- a. Melakukan uji performansi penguat *Hybrid (Raman-EDFA)*, dimana penguat EDFA menggunakan Konfigurasi Paralel.
- b. Melakukan uji performansi penguat *Hybrid* dengan konfigurasi *Cost Effective Raman-EDFA* dengan *Residual Pump*.
- c. Melakukan uji performansi penguat *Hybrid* dengan konfigurasi kombinasi (Raman-EDFA-SOA).

DAFTAR REFERENSI

- [1] Simranjit-Singh., & Rajinder. Singh-Kaler. (2009). *Review on recent developments in optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system*. Department of Electronics and Communication Engineering, Rajpura Road, Patiala, Punjab 147002, India.
- [2] Keiser, G. (2009). *Optical Fiber Communications* (3rd ed.). Boston: McGraw Hill.
- [3] John-Zyskind., & Atul-Srivastava. (2010). *Optical Amplified WDM Networks*. Academic Press, Boston.
- [4] A. Yina, L. Li, and X. Zhanga. (2010). *Analysis of modulation format in 40 Gbit/s optical communication system*. Optik Int. J. Light Electron Opt. 121(3), 1550–1557.
- [5] S, Shimada., & H.Ishio. (1992). *Optical Amplifier and Their Applications*. Tokyo, Japan: Ohmsha Ltd.
- [6] Inderpreet-Kaur., & Neena-Gupta. (2010). *Hybrid Fiber Amplifier*. Institute of Engineering, Mohali, 2PEC University of Technology (Formally Punjab Engineering College), Chandigarh India.
- [7] A, Selvarajan., Subrat-Kar., & T. Srinivas. (2002). *Optical Fiber Communication Principles and System* (Internasional ed.). Boston: McGraw Hill.
- [8] *Single Mode Optical Fiber*. (2016, Desember 19). Diambil kembali dari en.wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Single-mode_optical_fiber