

ANALISIS EFEK NON LINIER *FOUR WAVE MIXING* (FWM) PADA SISTEM *LONG HAUL ULTRA DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING* (U-DWDM)

ANALYSIS OF NON LINIER *FOUR WAVE MIXING* (FWM) ON THE *LONG HAUL ULTRA DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING* (U-DWDM) SYSTEM

Rahmadianti Nelson¹, 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
rahmadiantinelson@student.telkomuniversity.ac.id, ahambali@telkomuniversity.ac.id,
brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan sistem komunikasi optik yang pesat mengakibatkan perkembangan pada teknologi berbasis WDM juga meningkat. *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) yang merupakan pengembangan dari teknologi berbasis WDM memiliki banyak kelebihan dibanding teknologi pendahulunya. Namun sistem DWDM memiliki beberapa kelemahan, salah satunya efek non linieritas yang dapat mempengaruhi performansi Jaringan optik.

Tugas Akhir ini akan membahas pengaruh efek non linier *Four Wave Mixing* (FWM) terhadap performansi sistem Long Haul *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing* (U-DWDM). Penelitian ini terdiri dari 4 skenario. Skenario pertama, melakukan perhitungan matematis dan simulasi pada sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa penguat dan tanpa efek non linier. Skenario kedua, melakukan perhitungan matematis dan simulasi pada sistem *Long Haul* U-DWDM dengan penguat *Hybrid Optical Amplifier* FRA-EDFA dan tanpa efek non linier. Skenario ketiga, melakukan simulasi pada sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa penguat dan dengan efek non linier. Skenario keempat, melakukan simulasi pada sistem *Long Haul* U-DWDM dengan penguat *Hybrid Optical Amplifier* FRA-EDFA dan dengan efek non linier.

Hasil penelitian akhir yaitu efek non linier *Four wave Mixing* (FWM) pada sistem Long Haul U-DWDM dapat menurunkan kualitas performansi pada sistem hingga lebih dari 10%. namun dengan penambahan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) FRA-EDFA pada sistem dapat meminimalisir efek non linieritas tersebut. Sehingga kualitas performansi sistem akan tetap baik walaupun terkena efek non linieritas tersebut.

Kata kunci : U-DWDM, FWM, *Hybrid Optical Amplifier*

Abstract

The development of the Optical Communication System has resulted in increased demand for bandwidth in broadband application. The use of WDM-based systems in order to be able to utilize bandwidth efficiently. However, the WDM-based system has several weaknesses, which one is the non-linearity effect that can affect the performance of optical network.

This final assignment will discuss about the non-linear Four Wave Mixing (FWM) effect on the performance of the Long Haul Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing (U-DWDM) system. There are 4 scenarios. The first scenario, doing mathematical calculations and simulations on the Long Haul U-DWDM system without Optical Amplifier and without non-linear effects. The second scenario, doing mathematical calculation and simulation on the Long Haul U-DWDM system with FRA-EDFA Hybrid Optical Amplifier amplifier and without non-linear effects. The third scenario, simulates a Long Haul U-DWDM system without Optical Amplifier and with non-linear effects. The fourth scenario, simulates a Long Haul U-DWDM system with a FRA-EDFA Hybrid Optical Amplifier amplifier and with non-linear effects.

The results of the non-linear effect of Four Wave Mixing (FWM) on the Long Haul U-DWDM system can reduce the quality of performance on the system by more than 10% but with the FRA-EDFA Hybrid Optical Amplifier (HOA) on the system it can minimize the non-linearity effect. So that the quality of the performance system will still be affected by non-linearity effects.

Keywords: U-DWDM, FWM, *Hybrid Optical Amplifier*

1. Pendahuluan

Wavelength Division Multiplexing (WDM) merupakan teknologi multiplexing yang digunakan pada komunikasi serat optik yang bekerja dengan cara menggabungkan beberapa panjang gelombang pembawa informasi yang ditransmisikan pada suatu serat yang sama. *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM) yang merupakan pengembangan dari WDM dapat memanfaatkan bandwidth secara efisien dimana pada saat ini kebutuhan akan bandwidth sangat tinggi. Pada ITU-T G.692 DWDM memiliki spasi kanal atau spasi antar panjang gelombang yang digunakan memiliki jarak yang rapat [1].

Namun DWDM juga memiliki beberapa kekurangan. Salah satunya ada pengaruh dari efek non-linearitas pada serat optiknya. Efek non linier ini berdampak pada penurunan kualitas dari data informasi yang ditransmisikan. Efek non linier dapat menimbulkan beberapa efek seperti *Self Phase Modulation* (SPM), *Cross Phase Modulation* (XPM) dan *Four Wave Mixing* (FWM) [2].

Penelitian mengenai efek non linier pada CWDM yang dilakukan oleh Paundra Aldila pada tahun 2015 [8]. Hasil pada penelitian tersebut menunjukkan pengaruh efek non linear terhadap jaringan berbasis CWDM yang mana jaringan tanpa efek non linear lebih bagus dari pada jaringan dengan efek non linear. Sedangkan penelitian yang telah dilakukan tentang efek non linear pada DWDM menggunakan pulsa soliton oleh Brian Pamukti pada tahun 2014 [9]. Pulsa soliton dalam jaringan DWDM 80 lamda dengan link 200 km hanya mampu mempertahankan 75 lamda yang memiliki nilai BER di bawah 10^{-9} .

Penggunaan *Hybrid Optical Amplifier* FRA-EDFA sebagai penguat optiknya bertujuan untuk mengoptimalkan *Bandwidth* pada sistem WDM dan mengurangi kerugian karena non linearitas. Selain itu *hybrid amplifier* memberikan kinerja yang baik dalam menangani jaringan dengan trafik yang tinggi [2]. Seperti pada penelitian [3] yang melakukan uji performansi pada penggunaan HOA FRA-EDFA pada sistem Long Haul U-DWDM, hasilnya konfigurasi tersebut efektif digunakan hingga jarak 205 km. untuk mengoptimalkan *Bandwidth* pada sistem WDM dan mengurangi kerugian karena non linearitas [2].

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dan analisis tentang dampak *Four Wave Mixing* (FWM) pada jaringan *Long Haul Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing* (U-DWDM). Pengamatan dilakukan pada efek non linier *Four Wave mixing* (FWM) melalui *BER* dan *Q Factor*.

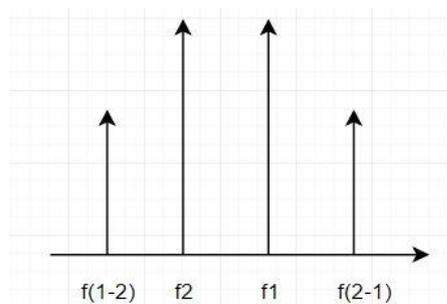
2. Dasar Teori

2.1 Efek Non Linieritas Fiber

Efek *Non-Linearitas* terjadi ketika *indeks bias* dalam medium serat optik berinteraksi dengan cahaya *transmisi*. Interaksi cahaya *transmisi* pada indeks bias medium optik berhubungan dengan *kerr effect*. Perubahan indeks bias berbanding lurus dengan intensitas sehingga menyebabkan munculnya modulasi sinyal pada *fasa*. Perubahan fasa tersebut disebabkan oleh material inti serat optik yang memiliki nilai *non-linier susceptibility*. Jika nilai *non-linier susceptibility* semakin besar maka gangguan dari efek non-linier terhadap fasa pulsa optik juga akan besar terpolarisasikan. *Kerr-effect* pada non linear memiliki tiga bentuk modulasi yaitu *Self-Phase Modulation* (SPM), *Cross-Phase Modulation* (XPM) dan *Four-Wave Mixing* (FWM) [7].

2.2 Four Wave Mixing

Four Wave Mixing (FWM) merupakan fenomena non-linier yang juga dihasilkan oleh efek *kerr*. FWM merupakan fenomena non-linier yang juga dihasilkan oleh efek *kerr*. Efek non-linier ini mengakibatkan munculnya beberapa sinyal baru yang tidak diinginkan dan ikut ditransmisikan. Sinyal baru tersebut muncul akibat adanya indeks bias nonlinier pada serat optik sehingga mengakibatkan termodulasinya sinyal baru yang memiliki nilai *spektrum frekuensi* yang hampir sama dengan spektrum frekuensi informasi [10].



Gambar 2.1 Spektrum Frekuensi Akibat FWM

Four Wave Mixing (FWM) biasanya terjadi pada tiga panjang gelombang yang berbeda dan ditransmisikan secara bersama-sama melalui satu serat optik. Pada proses inilah terbentuknya spektrum frekuensi baru. Proses tersebut dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$\lambda_D = \lambda_A \pm \lambda_B \pm \lambda_C \text{ dimana } A \neq B \neq C \tag{2.1}$$

Tiga lamda berbeda tersebut berinteraksi akan menghasilkan sebuah sinyal yang identik dengan sinyal informasi (λ_D). Sinyal tersebut juga memiliki panjang gelombang berdekatan dengan sinyal informasi. Sehingga sangat sulit untuk mem-filter sinyal tersebut agar terpisah dengan sinyal informasi. Secara umum, untuk panjang gelombang N input maka akan ada K cross mixing products. Berikut persamaan tersebut [8]:

$$K = \frac{1}{2} N^2(N - 1) \tag{2.2}$$

2.3 Dense Wavelength Division Multiplexing

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) merupakan teknologi hasil pengembangan dari teknologi Wavelength Division Multiplexing. WDM merupakan teknologi multiplexing yang digunakan pada komunikasi serat optik yang bekerja dengan cara menggabungkan beberapa panjang gelombang pembawa informasi yang ditransmisikan pada suatu serat yang sama. Namun penggunaan WDM menimbulkan masalah seperti ke non linieran serat optik dan efek dispersi [1].

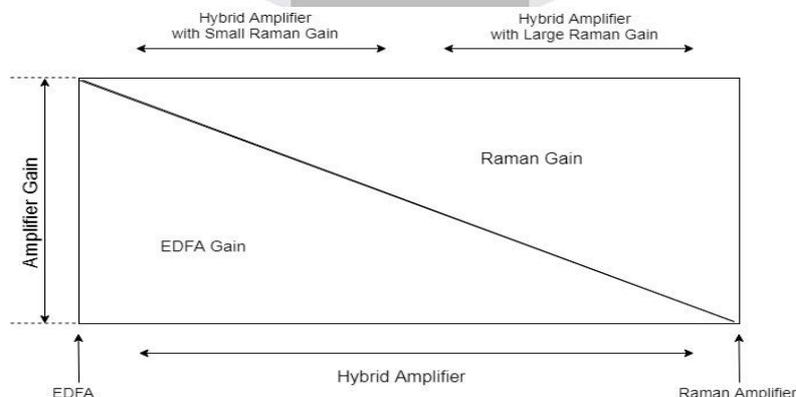
Pada ITU-T G.692, DWDM mengacu pada pemisahan panjang gelombang menggunakan nilai spasi yang kecil [1]. DWDM dikenal sebagai sistem yang memiliki jarak atau spasi antar kanal yang rapat. Spasi antar kanal berfungsi untuk menghindari terjadinya interferensi antar kanal yang digunakan sehingga performansi kinerja sistem DWDM tidak terpengaruhi. Spasi kanal yang umumnya digunakan berkisar antara 0.4-0.6 nm (50 – 200 GHz). Namun dengan semakin berkembangnya teknologi, saat ini dikembangkan spasi kanal yang lebih rapat yaitu sebesar 0.2 dan 0.1 nm. Spasi kanal inilah yang disebut dengan Ultra-DWDM [4].

2.4 Hybrid Optical Amplifier

Hybrid Optical Amplifier (HOA) secara umum merupakan kombinasi dari beberapa penguat optik. Pada DWDM berkapasitas tinggi, penggunaan HOA diusulkan karena memiliki beberapa keuntungan, yaitu: (1) dapat meningkatkan gain bandwidth pada sistem WDM jika dibandingkan dengan penggunaan Amplifier biasa, (2) mengurangi kerugian karena induksi non linier, (3) menghindari tingginya biaya Gain Flattening Filters (GFF) dan multi pump untuk kerataan gain yang besar [2].

Secara umum, kombinasi lebih dari satu penguat optik di konfigurasi disebut hybrid amplifier optik (HOA). Mohammed N. Islam menjelaskan bahwa gain dari FRA-EDFA HOA (GHybrid) adalah gabungan dari dua gain individu FRA dan EDFA, masing-masing. Gain partisi di penguat hibrida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7. Oleh karena itu, dalam kasus FRA-EDFA HOA gain-nya adalah [5]:

$$G_{Hybrid} = G_{EDFA} + G_{Raman} \tag{2.3}$$

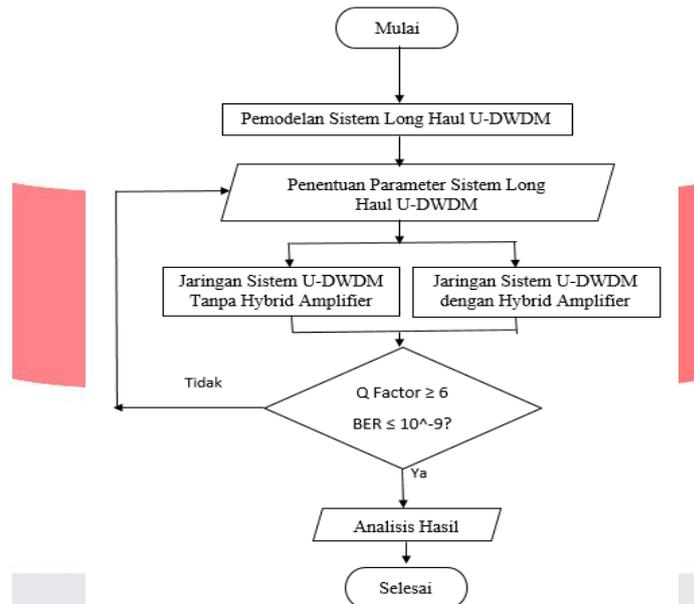


Gambar 2.2 Keuntungan Partisi di amplifier Hybrid [5]

HOA dirancang untuk meminimalisir gangguan yang disebabkan oleh non linieritas fiber dan untuk meningkatkan gain bandwidth serta untuk mendapatkan kerataan *gain* pada sistem DWDM. Hal tersebut dikarenakan penguat HOA FRA-EDFA dapat memberikan *broad-gain-band* di setiap daerah panjang gelombang yang dibutuhkan dengan mengatur panjang gelombang pompa yang tepat [6]. Sehingga kebutuhan akan *gain bandwidth* yang besar dapat dipenuhi dengan menggunakan HOA.

3. Pembahasan

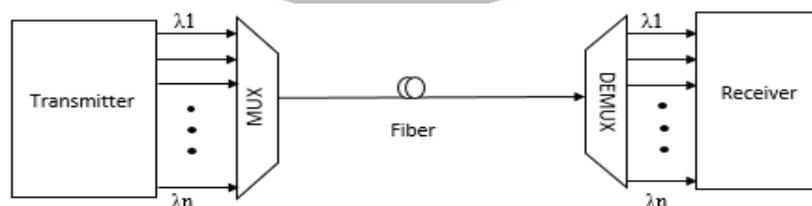
3.1 Diagram Alir Proses Analisis



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Analisis

Perancangan penelitian ini menggunakan *software*. Diawali dengan menentukan parameter yang kan digunakan pada sistem long haul U-DWDM yang meliputi parameter *transmitter*, parameter media *transmitter* dan parameter *receiver*. Berikutnya dilakukan simulasi pada jaringan sistem *long haul* U-DWDM biasa tanpa menggunakan penguat, simulasi ini bertujuan untuk melihat seberapa jauh jaringan memiliki performansi yang baik jika tidak menggunakan penguat. Selanjutnya akan dilakukan simulasi dengan menambahkan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) FRA-EDFA pada jaringan sistem *long haul* U-DWDM tersebut. Parameter kualitas akan ditentukan oleh hasil nilai *Q Factor* dan *BER* yang mana jaringan akan memiliki performansi yang baik jika *Q Factor* bernilai ≥ 6 dan *BER* bernilai $\leq 10^{-9}$. Selanjutnya akan dilakukan simulasi pada masing-masing jaringan tersebut ketika jaringan tanpa menggunakan parameter non linier dan ketika jaringan menggunakan parameter non linier. Selanjutnya akan dilakukan analisis berdasarkan hasil yang didapatkan.

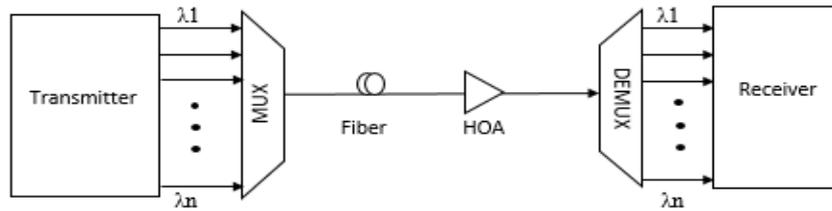
3.2 Model Sistem Jaringan Long Haul Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing



Gambar 3.2 Pemodelan Jaringan Long Haul U-DWDM Tanpa penguat

Gambar 4.1 menampilkan pemodelan jaringan *long haul* U-DWDM tanpa penguat. Komponen yang digunakan meliputi WDM *Transmitter*, *Multiplexer*, *Optical Fiber*, *Demultiplexer* dan WDM

Receiver. Pemodelan jaringan ini akan dilakukan 2 skenario simulasi yaitu simulasi tanpa menambahkan parameter efek non linier dan simulasi dengan menambahkan parameter efek non linier.



Gambar 3.3 Pemodelan Jaringan Long haul U-DWDM dengan Hybrid Optical Amplifier (HOA)

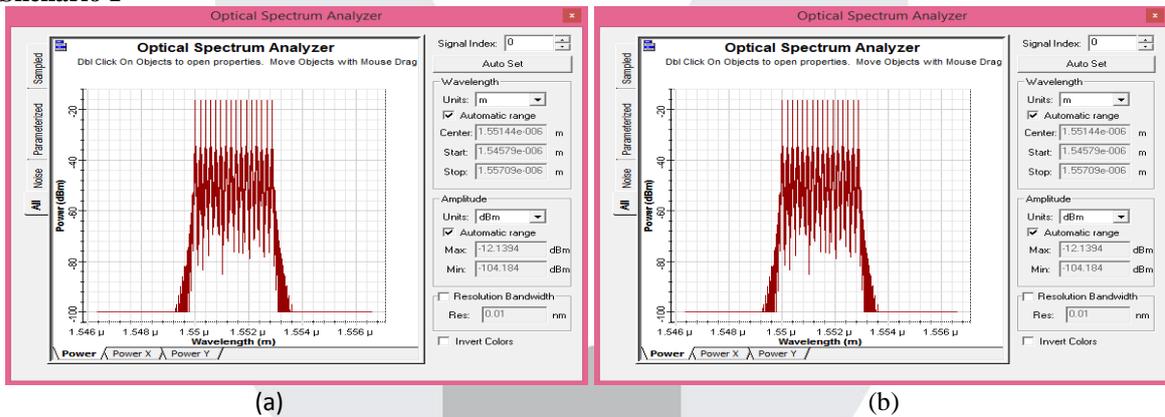
Gambar 3.3 menampilkan pemodelan jaringan long haul U-DWDM dengan menggunakan Hybrid Optical Amplifier (HOA). Pemodelan jaringan ini juga akan digunakan untuk melakukan simulasi dengan 2 skenario yaitu simulasi tanpa menggunakan parameter efek non linier dan simulasi dengan menggunakan parameter efek non linier.

3.3 Simulasi Sistem

Simulasi dilakukan jika pemodelan sistem U-DWDM tanpa penguat dan pemodelan sistem U-DWDM dengan penguat telah selesai. Simulasi dilakukan untuk melihat baik atau buruknya performansi dari masing-masing jaringan sistem. Jika performansi yang dihasilkan sistem buruk, maka akan kembali dilakukan perancangan ulang sistem hingga hasil performansi simulasi baik. Apabila hasil simulasi sudah baik, maka akan dilanjutkan ke proses berikutnya yaitu melakukan simulasi tanpa parameter efek non linier dan dengan parameter efek non linier pada masing-masing jaringan sistem. Sistem dikatakan baik jika memiliki nilai Q Factor ≥ 6 dan BER $\leq 10^{-9}$. Simulasi akan dilakukan dengan bantuan software.

4. Analisis

4.1 Skenario 1



Gambar 4.1 (a) Spektrum Sinyal Keluaran Multiplexer (b) Spektrum Sinyal Keluaran Serat Optik

Gambar 4.1 memperlihatkan spektrum sinyal keluaran multiplexer dan serat optik. Terlihat tidak ada perbedaan antara kedua spektrum sinyal tersebut. Hal ini dikarenakan efek non linier pada serat optik ditiadakan. Sehingga tak terlihat adanya crossing product atau sinyal tambahan akibat efek non linier four wave mixing.

Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Q Factor dan BER Skenario I

L (km)	Perhitungan Matematis		Hasil Simulasi	
	Q Factor	BER	Q factor	BER
10	6,408485	$7,30216 \times 10^{-11}$	8,81433	$5,9243 \times 10^{-19}$
20	4,53686	$2,84565 \times 10^{-06}$	8,32781	$4,06566 \times 10^{-17}$
30	3,211851	0,000658302	6,94828	$1,70681 \times 10^{-14}$
40	2,273816	0,011478197	5,31223	$1,3206 \times 10^{-8}$

Tabel 4.1 memperlihatkan perbandingan nilai Q factor dan BER yang didapatkan dari hasil perhitungan matematis dan dari hasil simulasi pada skenario I. Untuk nilai Q factor dan BER yang digunakan pada simulasi, digunakan nilai minimum pada variasi jumlah lamda 16. Pada perhitungan matematis hanya sistem dengan panjang link transmisi 10 km yang memiliki performansi yang baik sedangkan untuk panjang link transmisi 20 km – 40 km memiliki performansi yang buruk karena nilai Q factor sistem tersebut < 6. Sedangkan hasil yang diperoleh dengan simulasi menggunakan software, sistem dengan panjang link transmisi 10 km – 30 km memiliki performansi yang baik dengan semua nilai Q factor pada sistem ≥ 6 dan sistem dengan panjang link transmisi 40 km memiliki peerformansi yang buruk dengan nilai Q factor < 6.

Perbedaan hasil antara perhitungan matematis dan simulasi dikarenakan pada perhitungan matematis, parameter yang digunakan hanya terbatas di parameter pada persamaan yang digunakan saja. Sedangkan pada simulasi, parameter yang yang digunakan lebih beragam dan lengkap dibandingkan pada perhitungan matematis. Sehingga hasil simulasi lebih lengkap dan bervariasi.

4.2 Skenario 2

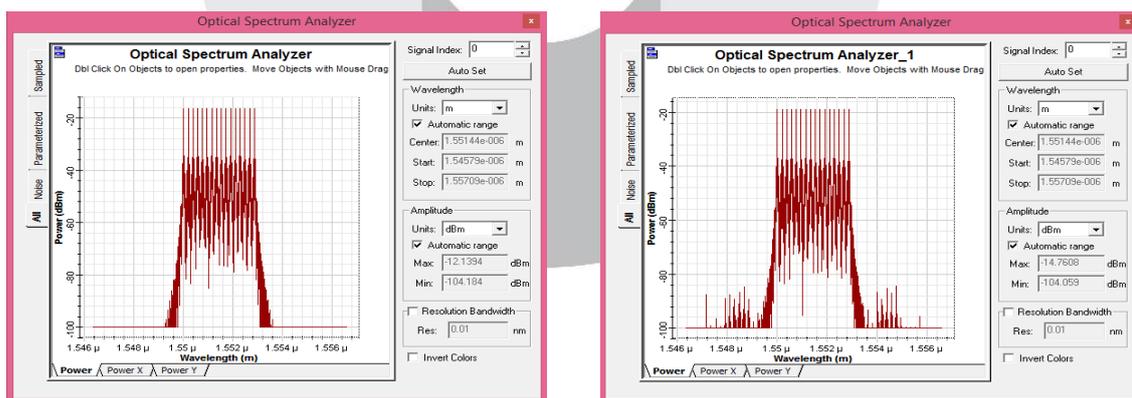
Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Q Factor dan BER Skenario II

L (km)	Perhitungan Matematis		Hasil Simulasi	
	Q Factor	BER	Q factor	BER
50	29,292426	$5,69 \times 10^{-189}$	6,62353	$1,55493 \times 10^{-11}$
100	6,2090118	$9,452 \times 10^{-9}$	6,45195	$5,18458 \times 10^{-11}$
150	15,022954	$2,51 \times 10^{-51}$	6,45041	$5,28284 \times 10^{-11}$
200	43,326673	0	6,09608	$5,1154 \times 10^{-10}$

Tabel 4.2 memperlihatkan perbandingan nilai Q factor dan BER yang didapatkan dari hasil perhitungan matematis dan dari hasil simulasi. Untuk nilai Q factor dan BER yang digunakan pada simulasi, digunakan nilai minimum pada variasi jumlah lamda 16. Dari tabel di atas menunjukkan bahwa hasil perhitungan maupun hasil simulasi sama-sama menghasilkan nilai Q factor ≥ 6 yang menandakan sistem memiliki performansi yang cukup bagus.

Perbedaan hasil antara perhitungan matematis dan simulasi dikarenakan pada perhitungan matematis, parameter yang digunakan hanya terbatas di parameter pada persamaan yang digunakan saja. Sedangkan pada simulasi, parameter yang yang digunakan lebih beragam dan lengkap dibandingkan pada perhitungan matematis. Sehingga hasil simulasi lebih lengkap dan bervariasi.

4.3 Skenario 3



Gambar 4.2 (a) Spektrum Sinyal Keluaran *Multiplexer* (b) Spektrum Sinyal Keluaran Serat Optik

Terlihat perbedaan antara spektrum sinyal keluaran *multiplexer* dengan spektrum sinyal keluaran serat optik seperti yang terlihat pada gambar 4.2. pada gambar (b) terlihat adanya *crossing product* atau sinyal tambahan akibat *four wave mixing*. Sinyal tambahan ini mengakibatkan penurunan performansi pada sistem. Jumlah *crossing product* ini akan meningkat berbanding lurus dengan meningkatnya jumlah lamda yang digunakan pada sistem.

Tabel 4.3 Perbandingan nilai Q factor Simulasi I dan Simulasi III

Q Factor Tanpa NL								
Jumlah Lamda	10 km		20 km		30 km		40 km	
	Average	Min	Average	Min	Average	Min	Average	Min
16	9,95	8,81	9,45	8,33	8,39	7,58	6,21	5,56
32	9,73	8,92	9,95	8,32	8,77	6,95	6,26	5,52
64	9,47	6,94	9,28	7,44	8,02	6,95	6,27	5,43
80	9,49	6,97	9,27	7,31	8,05	6,95	6,23	5,31
Q Factor dengan NL								
Jumlah Lamda	10 km		20 km		30 km		40 km	
	Average	Min	Average	Min	Average	Min	Average	Min
16	8,76	6,94	8,36	7,31	7,30	6,53	5,14	4,54
32	9,02	7,79	8,43	7,46	8,06	6,45	5,26	4,43
64	8,13	6,08	8,24	6,36	7,59	6,09	6,07	5,03
80	8,51	6,17	8,24	6,22	7,03	6,26	5,23	5,01

Perbandingan antara sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa efek non linier dengan sistem *Long Haul* U-DWDM dengan efek non linier dapat dilihat pada tabel 4.3. Kedua sistem tidak menggunakan penguat optik. Terjadi penurunan kualitas performansi sistem yang cukup signifikan antara kedua sistem. Sistem *Long haul* U-DWDM tanpa efek non linier memiliki kualitas performansi yang lebih bagus dibanding sistem *Long Haul* U-DWDM dengan efek non linier. Terjadinya penurunan kualitas sebanyak 20% pada sistem dengan efek non linier. Maka dapat disimpulkan bahwa efek non linier pada sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa penguat dapat menurunkan kualitas performansi sistem.

4.2 Skenario 4

Tabel 4.4 Perbandingan nilai Q factor Simulasi II dan Simulasi IV

Q Factor Tanpa NL								
Jumlah Lamda	50 km		100 km		150 km		200 km	
	Average	Min	Average	Min	Average	Min	Average	Min
16	7,70	6,59	7,30	6,29	6,88	6,12	7,01	6,26
32	7,48	6,32	7,43	6,53	6,70	6,08	6,94	6,35
64	7,41	6,54	7,44	6,62	6,89	6,13	7,07	6,37
80	7,35	6,06	7,33	6,13	7,07	6,24	7,08	6,24
Q Factor dengan NL								
Jumlah Lamda	50 km		100 km		150 km		200 km	
	Average	Min	Average	Min	Average	Min	Average	Min
16	7,69	6,62	7,53	6,45	7,25	6,45	7,07	6,09
32	7,49	6,32	7,57	6,61	7,39	6,42	6,87	6,28
64	7,46	6,34	7,46	6,58	6,88	6,11	6,91	6,14
80	7,36	6,32	7,42	6,35	6,93	6,13	6,92	6,10

Perbandingan antara sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa efek non linier dengan sistem *Long Haul* U-DWDM dengan efek non linier dapat dilihat pada tabel 4.14. Kedua sistem menggunakan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) FRA-EDFA sebagai penguat optik. Hasil yang didapatkan dari simulasi skenario ke-4 yaitu nilai Q factor yang dihasilkan hampir sama dengan skenario ke II, yaitu simulasi sistem *Long Haul* U-DWDM dengan HOA dan tanpa efek non linier.

Jadi berdasarkan tabel 4.4 dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) FRA-EDFA pada sistem *Long Haul* U-DWDM dapat meminimalisir efek non linier yang dihasilkan oleh sistem. sehingga kualitas performansi sistem tidak mengalami penurunan walaupun terkena efek non linieritas.

5. Kesimpulan

Penelitian dan analisis yang dilakukan pada sistem *Long Haul Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing* (U-DWDM) dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem *Long Haul* U-DWDM hanya memiliki peformansi yang baik pada jarak maksimal 30 km. Sehingga dibutuhkan *optical amplifier* agar sistem bisa digunakan untuk jarak yang lebih jauh.
2. Dengan penambahan *Hybrid Optical Amplifier* (HOA) FRA-EDFA dapat meningkatkan panjang link transmisi hingga 200 km.
3. Performansi pada sistem *Long Haul* U-DWDM tanpa HOA mengalami penurunan yang hingga 20 % ketika efek non linieritas dibangkitkan pada sistem.
4. Dengan penambahan HOA FRA-EDFA pada sistem *Long Haul* U-DWDM dapat meminimalisir efek dari non linieritas. Sehingga kualitas sistem hampir sama dengan sistem tanpa efek nonlinieritas.

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] P. Athma Praja, 2017. *Analisis Performansi Hybrid Optical Amplifier Pada Sistem Long Haul Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing*. Bandung, Indonesia: Telkom University
- [4] *Comparison of different optical amplifiers.* (2018, Januari 21). Diambil kembali dari <http://www.fiber-optic-tutorial.com/comparison-of-different-optical-amplifiers.html>
- [5] Singh, Simranjit. 2014. *Performance Optimization op Hybrid Optical Amplifier for Dense Wavelength Division Multiplexed System*. Thesis. Department of Electronic & communication engineering Thapar University, India.
- [6] Hanafie, Satria. 2013. *Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM Menggunakan Penguat SOA, EDFA, dan ROA Berbasis Soliton*. Universitas Telkom, Indonesia.
- [7] Singh, S. P. 2007. *Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications*. University of Allahad, India.
- [8] Aldila, Paundra. 2015. *Analisis Efek Nonlinier Di Jaringan CWDM Pada Sistem Komunikasi Serat Optik*. Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom, Indonesia.
- [9] Pamukti, Brian. 2014. *Simulasi dan Analisis Efek Non Linier Pada Link DWDM Dengan Multi Spasi dan Multi Lamda Menggunakan Transmisi Pulsa Soliton*. Telkom University, Indonesia.
- [10] ABD, Hafiz. 2007. *Four Wave Mixing Nonlinearity Effect In Wavelength Division Multiplexing Radio Over Fiber System*. University Teknologi Malaysia., Malaysia.