

SIMULASI DAN ANALISIS EFEK NONLINIER PADA PERFORMANSI SISTEM VERY NARROW CHANNEL SPACING DWDM-ROF

SIMULATION AND ANALYSIS OF NONLINEAR EFFECT ON VERY NARROW CHANNEL SPACING DWDM-ROF PERFORMANCE SYSTEM

Hermawan Widiyanto¹, Akhmad Hambali², Afief Dias Pambudi³

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

¹herwidiyanto@outlook.com, ²ahambali@telkomuniversity.ac.id,

³afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pengembangan teknologi telekomunikasi dewasa ini telah memunculkan kebutuhan seperti memberikan jaminan QoS yang baik kepada pelanggan, rugi-rugi akibat interferensi yang rendah, peningkatan cakupan layanan, akses data berkecepatan tinggi, dan kebutuhan *bandwidth* yang besar. Teknik *Radio over Fiber* (RoF) dengan sistem termultipleksi DWDM dapat menjadi pilihan untuk mentransmisikan sejumlah besar data melalui sebuah serat optik. Akan tetapi dibalik semua kelebihan yang didapatkan, terdapat suatu fenomena yang membatasi performansi sistem komunikasi serat optik seperti efek nonlinier yang dapat disebabkan oleh *kerr effect*.

Pada tugas akhir ini, dirancang suatu pemodelan yang menggabungkan teknik RoF dengan teknik DWDM dengan *software* OptiSystem untuk mengetahui pengaruh dari *Cross Phase Modulation* (XPM) pada kondisi *very narrow channel spacing*. Lalu dilakukan perubahan variabel-variabel pengujian seperti spasi kanal antar panjang gelombang, dan menguji *link* dengan dua *optical amplifier* yang berbeda pada skenario jumlah kanal dengan 4,8,16, dan 32 kanal DWDM.

Dari hasil penelitian akhir ini, didapatkan bahwa skema yang paling optimal dalam meminimalisir efek non linier *Cross Phase Modulation* adalah dengan menggunakan penguat SOA pada *link* DWDM-RoF dengan 8 kanal pada spasi kanal 0.6 nm. Didapat nilai rata-rata *Q factor* tertinggi yaitu 5.8587275, dan tiga dari delapan kanalnya memiliki nilai *Q factor* diatas 6 atau BER dibawah 10^{-9} .

Kata kunci: DWDM-RoF, *Cross Phase Modulation*, Spasi Kanal, dan *Q factor*

Abstract

The development of today's telecommunications technology has led to the need for QoS guarantees to customers, loss due to low interferences, the increase in services coverage, high-speed data access, and huge bandwidth requirements. Radio over Fiber (ROF) with DWDM multiplexed system can be an option for transmitting large amounts of data through fiber optics. But behind all the advantages it brings, there is a phenomenon that limits the performance of fiber optics communication systems such as nonlinear effects that can be caused by kerr effect.

In this final project, a model that combines ROF is designed with DWDM technology using OptiSystem software to determine the effect of Cross Phase Modulation (XPM) under very narrow channel spacing conditions. Then, there are change in testing variables such as channel spacing between wavelengths, and test the link with two different optical amplifiers scenario with 4,8,16, and 32 number of DWDM channels. From the results of this final project, the most optimal scheme to reduce the effects of nonlinear Cross Phase Modulation is using SOA amplifier in DWDM-ROF link with 8 channels at 0.6 nm channel spacing. Highest average Q factor values obtained is 5.8587275, and three of the eight channel have Q factor values above 6 or BER below 10^{-9} .

Keywords: DWDM-RoF, *Cross Phase Modulation*, Channel Spacing, and *Q factor*

1. Pendahuluan

Melihat pesatnya kemajuan teknologi sekarang ini khususnya pada dunia telekomunikasi, memunculkan adanya kebutuhan-kebutuhan pada pengembangan jaringan generasi baru seperti memberikan QoS (*Quality of Service*) yang baik kepada *subscribers*, rugi-rugi yang rendah dalam pemanfaatannya, peningkatan cakupan layanan, transmisi data berkecepatan tinggi, dan *bandwidth* yang lebar. Mengacu pada beberapa kebutuhan akan layanan komunikasi yang lebih baik, dunia telekomunikasi sudah memanfaatkan teknologi serat optik dan mengimplementasikannya sebagai jaringan *backbone* ataupun sebagai jaringan *long-haul*.

Dalam beberapa tahun ini, sistem WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) terus mengalami perkembangan dalam pemanfaatannya. Dalam hal ini yang menjadi perhatian adalah bagaimana mengembangkan teknik multiplexing WDM ini agar dapat mentransmisikan panjang gelombang sebanyak-banyaknya dalam satu kabel optik, yang mana jika semakin banyak panjang gelombang yang ingin ditransmisikan, maka ada satu aspek yang harus mengalami penyesuaian. Adalah perubahan pada spasi kanal yang semakin sempit agar dapat mentransmisikan banyak kanal atau panjang gelombang dalam sebuah jaringan serat optik yang dikenal dengan nama DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Namun dibalik keuntungan dari DWDM, ada kekurangan yang membatasi performansi sistem dalam mentransmisikan sinyal, sehingga dapat menurunkan kinerja dari sistem. Kekurangan inilah yang salah satunya disebabkan oleh efek non linier sebagai akibat dari *Kerr Effect* maupun *Inelastic Scattering*. *Kerr effect* yang merupakan bagian dari *third-order nonlinearity* akan bermanifestasi dalam bentuk *Self-Phase Modulation* (SPM), *Cross-Phase Modulation* (XPM), dan *Four Wave Mixing* (FWM). Efek non linier ini dapat menurunkan kinerja sistem dengan merusak sinyal informasi sehingga mengurangi jumlah kanal yang dapat ditransmisikan.

Melalui beberapa pengertian diatas, pada penelitian ini dilakukan penggabungan dua konsep teknologi dalam sistem komunikasi serat optik, yaitu RoF (*Radio-over-Fiber*) dan DWDM (*Dense Wavelength Dense Multiplexing*). Penelitian ini khusus hanya membahas mengenai dampak efek non linier *Cross Phase Modulation* (XPM) pada performansi *link* dengan jarak sejauh 375 km dengan *bit rate* 40 Gbps untuk mencapai kondisi *ultra high capacity link* DWDM-RoF. Adapun variabel uji yang diubah adalah jenis amplifier, jumlah kanal, dan spasi kanal. Melalui penelitian pada tugas akhir ini, diharapkan didapat analisis pengaruh perubahan variabel uji terhadap efek non linier XPM terhadap sistem DWDM-RoF yang disimulasikan pada suatu *software*, dan diamati performansinya dari hasil nilai *Q factor* maupun BER yang ditetapkan untuk sistem komunikasi berbasis serat optik.

2. Dasar Teori

2.1 Sistem Komunikasi Serat Optik

Kebutuhan akan teknologi transmisi yang mumpuni semakin dibutuhkan di masa ini dimana kecepatan dan fleksibilitas menjadi permasalahan dalam pengembangannya. Komunikasi serat optik adalah komunikasi dengan menggunakan cahaya sebagai pembawa informasi yang dilewatkan pada saluran serat optik sebagai media transmisi. Sistem komunikasi dengan menggunakan serat optik dianggap dapat memenuhi kebutuhan akan bandwidth yang lebar, kecepatan transmisi yang baik dibanding kabel tembaga ataupun komunikasi radio, dan memberikan pengiriman informasi yang aman yaitu sulit untuk disadap [3]. Serat optik adalah suatu teknologi kabel yang terbuat dari bahan kaca yang terdiri dari silika maupun plastik untuk mentransferkan data dan dioperasikan pada frekuensi $10^{14} - 10^{15}$ Hz [3]. Serat optik juga merupakan salah satu media transmisi yang dapat digunakan untuk membawa informasi dengan kapasitas yang besar dan kehandalan yang tinggi. Adapun gelombang pembawa yang digunakan adalah cahaya LED ataupun sinar LD (Laser Diode). Kini Serat optik juga digunakan untuk menyalurkan data berupa teks, gambar, suara, dan video dengan *bit rate* yang tinggi.

Beberapa kelebihan dari implementasi serat optik sebagai media transmisi, diantaranya adalah [3] :

- a) *Bandwidth* yang lebar. Dengan frekuensi *carrier* sekitar 10^{14} Hz yang berarti beroperasi pada frekuensi tinggi, maka jumlah informasi yang dilewatkan dapat lebih banyak.
- b) Tidak menghantarkan arus listrik. Karena bahan penyusunnya yang merupakan isolator, maka serat optik tidak dapat dialiri arus listrik yang dapat menimbulkan sengatan, grounding, ataupun short circuit.
- c) *Loss* transmisi rendah. Dengan redaman yang berkisar 0,2 sampai 0,4 dB/Km untuk jenis serat *singlemode*, maka serat optik cocok digunakan untuk komunikasi jarak jauh.
- d) Tahan terhadap suhu tinggi. Karena bahan silika yang menjadi penyusunnya memiliki titik lebur berkisar 1900°C sehingga cocok diimplementasikan pada daerah yang rawan dengan temperatur tinggi

2.2 Radio over Fiber

Radio over Fiber merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio frekuensi menggunakan media serat optik. Teknologi *Radio-over-Fiber* pertama kali diperkenalkan dan didemonstrasikan pada tahun 1990 oleh Cooper et al untuk percobaan telepon *cordless* atau layanan telepon *mobile* [1]. RoF mengkombinasikan antara dua teknologi yaitu *radio frequency* dan gelombang cahaya optik. Dalam era telekomunikasi modern saat ini, peningkatan efisiensi, transmisi dengan *high data rate*, dan dukungan pelanggan dalam jumlah besar menjadi prioritas rancangan dalam jaringan generasi baru [9]. Namun peningkatan pelanggan dalam jumlah besar dapat menimbulkan keterbatasan dalam komunikasi data. Salah satu solusi yang dapat ditawarkan adalah mereduksi ukuran sel untuk mengakomodasi banyak pelanggan yang dinamakan konsep *micro-cells* [23]. Lalu dengan pereduksian ukuran sel, timbul permasalahan seperti dibutuhkan banyak *base station* untuk meningkatkan *coverage service area*. Untuk itu, dibutuhkan suatu *platform* yang kuat dalam perancangan jaringan generasi baru, dan pengembangan *Radio over Fiber* muncul untuk mengeliminasi permasalahan tersebut.

Jenis modulasi yang digunakan adalah modulasi eksternal dengan cara mempengaruhi langsung intensitas cahaya dengan intensitas langsung dari sinyal informasi [21]. Pengaplikasian *Radio over Fiber* diantaranya dapat digunakan untuk meningkatkan cakupan seluler *indoor* seperti kantor, pusat perbelanjaan, ataupun bandara melalui antenna yang dipasang pada atap-atap bangunan [8]. Selain itu *Radio over Fiber* juga dapat dimanfaatkan pada bangunan yang memanfaatkan serat optik sebagai *backbone* untuk *wireless system application* yang memanfaatkan layanan berbasis *triple play* (data, suara, dan video)[23].

2.3 DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)

DWDM adalah pengembangan teknologi dalam sistem komunikasi serat optik yaitu WDM. Teknologi DWDM adalah teknologi dengan memanfaatkan sistem SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) yang sudah ada dengan memultiplekskan sumber-sumber sinyal yang ada. DWDM merupakan sistem multipleksing bermacam-macam panjang gelombang yang setiap kanalnya dibedakan dengan menggunakan prinsip perbedaan panjang gelombang yang dikirimkan oleh sumber informasi melalui serat optik tunggal [3]. Tingginya permintaan akan jaringan dengan bandwidth lebar dan untuk memanfaatkan *bandwidth* yang lebih optimal pada jaringan serat optik, sistem termultipleksi menjadi pilihan untuk mentransmisikan sejumlah besar informasi melalui serat optik tunggal [1].

2.4 XPM (*Cross Phase Modulation*)

Cross-Phase Modulation adalah contoh efek nonlinear pada serat optik yang dapat membatasi jarak dan kapasitas transmisi pada sistem DWDM. Efek nonlinear ini memiliki kemiripan dengan *Self-Phase Modulation* dimana satu panjang gelombang pada cahaya dapat mempengaruhi panjang gelombang cahaya yang lain berdasarkan *Kerr effect* [13]. Jika pada *Self-Phase Modulation* terjadi perubahan fluktuasi daya optik pada gelombang cahaya menjadi fasa lain dalam gelombang yang sama pada sebuah kanal tunggal, XPM (*Cross-Phase Modulation*) menyebabkan fluktuasi daya antar beberapa kanal sehingga intensitas daya pada kanal yang saling berdekatan dapat terpengaruhi [12].

Persamaan (2.3) berikut menjelaskan pergeseran frekuensi yang diakibatkan oleh *Self-Phase Modulation* [12]:

$$\varphi(SPM) = \gamma L_{eff} P_{in} \quad (2.3)$$

Dimana φ adalah pergeseran frekuensi, γ adalah koefisien nonlinear optik, L_{eff} adalah panjang *link* efektif dan P_{in} adalah daya pancar sumber optik. Kemudian persamaan (2.4) berikut ini menggambarkan bahwa XPM dipengaruhi daya yang 2 kali lipat besarnya dibanding SPM :

$$\varphi(XPM) = \gamma L_{eff} (P_1 + 2P_2 \dots + P_n) \quad (2.4)$$

Cross-Phase Modulation menghasilkan sinyal yang bersifat asimetrik sehingga dapat merusak kanal-kanal yang mengandung informasi.

3. Perancangan dan Simulasi Sistem

3.1 Prosedur dan Parameter Simulasi

Pada bagian ini, dijelaskan tentang alur penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini sebagaimana tercantum pada gambar 3-1. Mula-mula setelah dilakukan penentuan spesifikasi sistem dan variabel uji, dilakukan perancangan sistem DWDM-RoF dengan panjang link transmisi sejauh 375 km. Lalu setelah dilakukan proses ini, maka dilakukan simulasi sistem dengan pemilihan penguat optik sebanyak dua kali dan dilakukan pengumpulan data yang didapat yang berupa nilai Q factor maupun BER.

Setelah itu, dilakukan analisis performansi sistem DWDM-RoF ditinjau dari kedua jenis penguat tersebut. Di mana nantinya didapatkan hasil pengujian yang dinilai mampu meminimalisir efek nonlinear seperti XPM yang dapat diterapkan pada kondisi *very narrow channel spacing*.

Tabel 3-1 Parameter Simulasi DWDM-RoF

Parameter	Nilai
Jenis Serat Optik	SMF28e
Attenuation	0.18 dB/Km
Panjang Serat	375 Km
Dispersion	16.75 ps/nm/km
Bit Rate	40 Gbps
Panjang Gelombang	1550 nm
Sumber Optik	CW Laser

Receiver Sensitivity	-7 dBm
Daya Kirim Laser	3 dBm

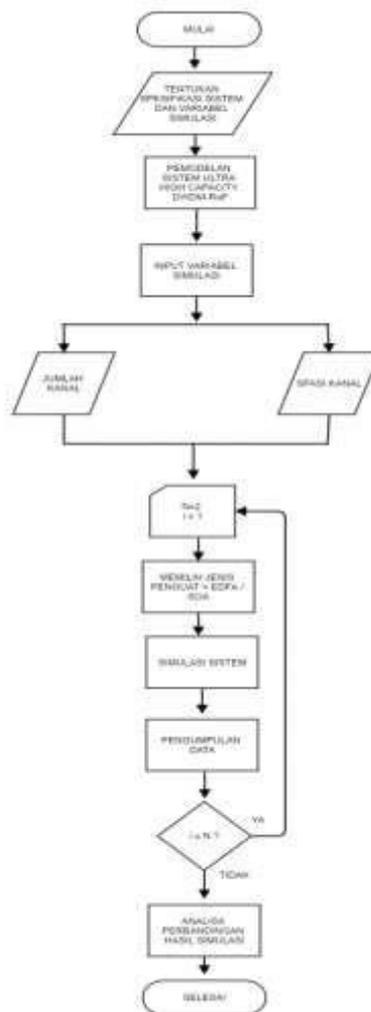
Seluruh skenario dilakukan dengan jumlah kanal 4, 8, 16, dan 32 kanal. Jumlah spasi kanal yang diujikan ada 5, yaitu 0.2 nm, 0.4 nm, 0.6 nm, 0.8 nm, dan 1 nm. Sedangkan jenis *amplifier* yang digunakan adalah EDFA dan SOA dengan *gain* sebesar 22 dB. Tren perubahan *Q factor* terhadap perubahan variabel uji dianalisa untuk mengetahui pengaruh dari efek *Cross Phase Modulation* pada link DWDM-ROF.

3.2 Diagram Alir Pengujian

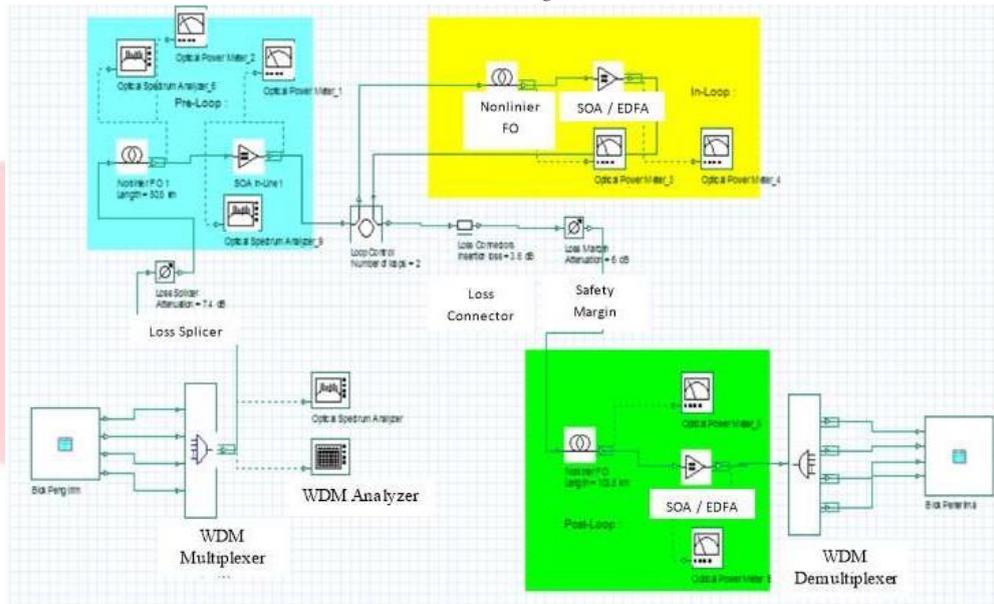
Dalam tugas akhir ini, dilakukan simulasi beserta analisis terjadinya salah satu efek nonlinier yaitu Cross Phase Modulation yang dirancang pada platform OptiSystem sesuai dengan blok diagram pada gambar 3-2. Diagram blok sistem terbagi menjadi tiga bagian, yaitu blok pengirim, blok transmisi, dan blok penerima.

Blok pengirim terdiri dari bit generator, NRZ *pulse generator*, CW laser, *sine generator*, dan multiplekser. Sedangkan pada blok transmisi terdiri dari, serat optik dan penguat EDFA atau SOA. Terakhir, pada blok penerima terdiri dari demultiplekser, fotodetektor APD, dan komponen BER *Analyzer* untuk melihat nilai *Q factor* dan BER. Simulasi ini terdiri dari beberapa perubahan variabel-variabel yang dapat mempengaruhi performansi link DWDM. Dimana pada penelitian ini dilakukan perubahan jumlah kanal, spasi kanal, dan penguat optik yang dibandingkan dengan *Q factor* dan BER. Adapun skenario-skenario yang dilakukan adalah simulasi link menggunakan penguat EDFA atau SOA dengan kondisi *very narrow channel spacing* dengan perubahan jumlah kanal yang meliputi 4, 8, 16, dan 32 kanal.

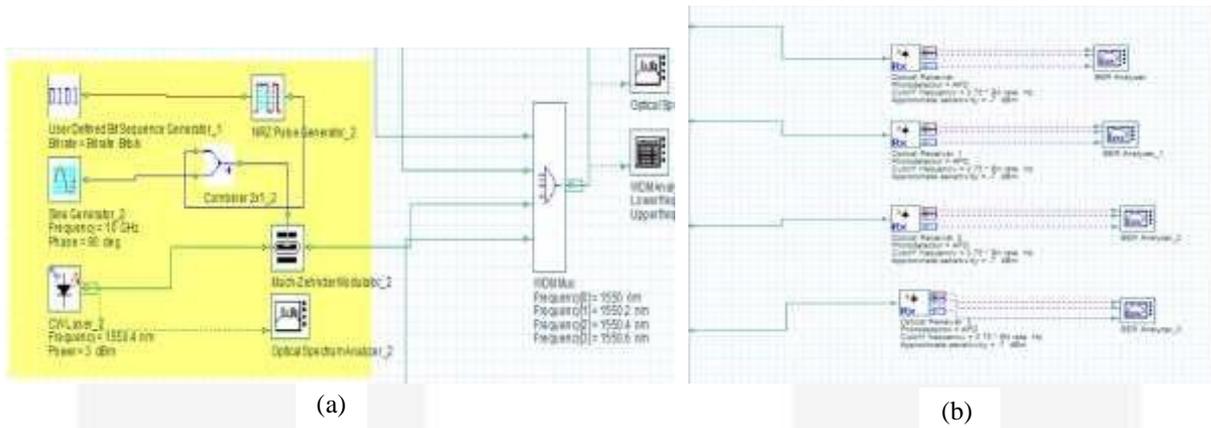
Spasi kanal yang digunakan adalah 0.2 nm, 0.4 nm, 0.6 nm, 0.8 nm, dan 1 nm. Sedangkan untuk daya laser yang digunakan sebesar 3 dBm, disesuaikan dengan spesifikasi perangkat untuk bitrate yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3-2 Perancangan Sistem Pada Simulator

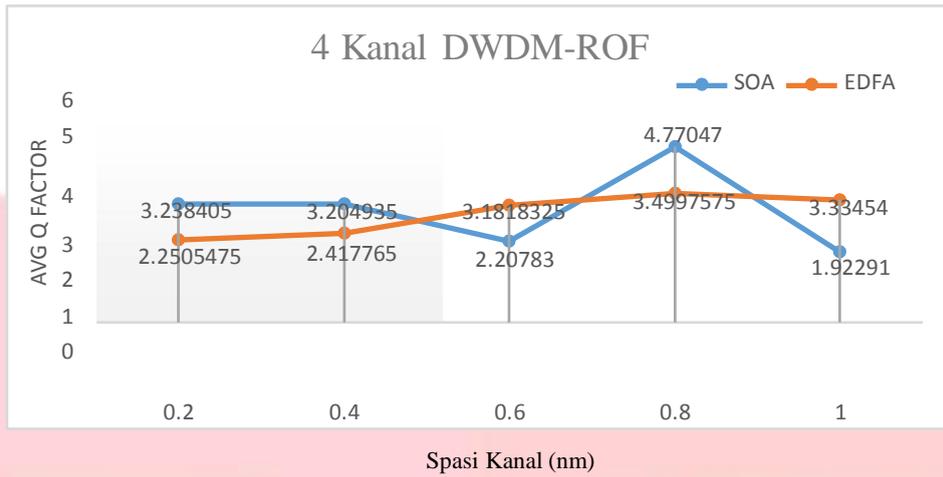


Gambar 3-3 Komponen Dalam Subsystem (a) Blok Pengirim (b) Blok Penerima

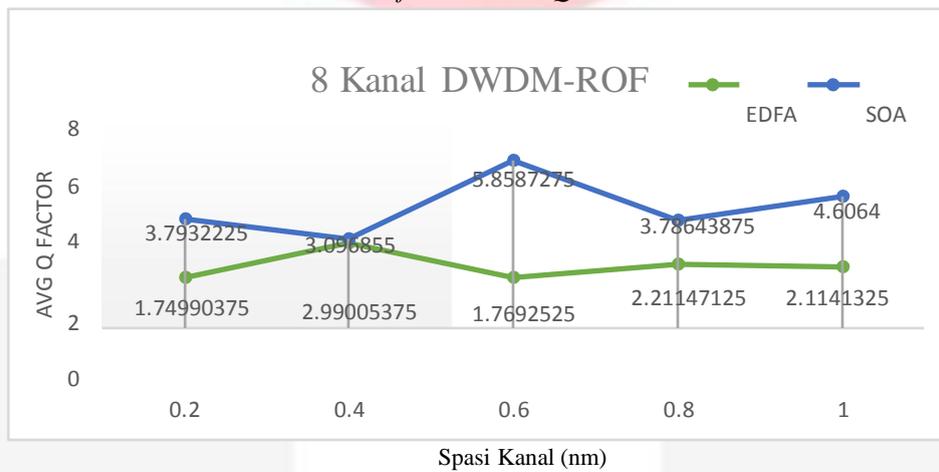
4. Analisis dan Hasil Simulasi

4.1 Analisis Perubahan Spasi Kanal dan Jumlah Kanal

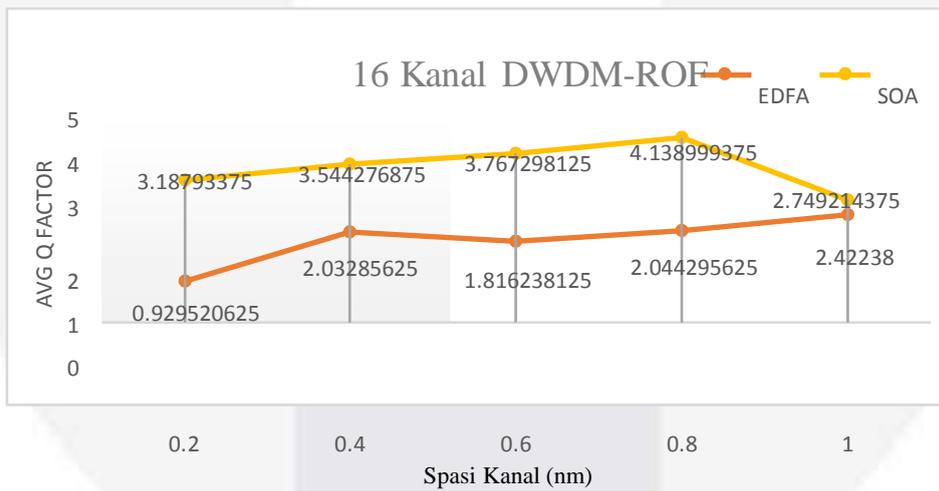
Pada grafik berikut ditampilkan perubahan nilai rata-rata *Q factor* terhadap perubahan spasi kanal dan jumlah kanal. Perubahan pada variabel uji tersebut menghasilkan nilai yang berbeda-beda pula dalam meminimalisir pengaruh efek non linear *cross phase modulation*. Penguat jenis SOA memberikan performa yang lebih baik dari penguat jenis EDFA pada kondisi *very narrow channel spacing*. Pada penguat SOA tidak didapatkan penguatan sebagai hasil *spontaneous emission* sebagai *noise* seperti pada penguat EDFA yang mana dapat mempengaruhi kualitas sinyal yang dikirimkan.



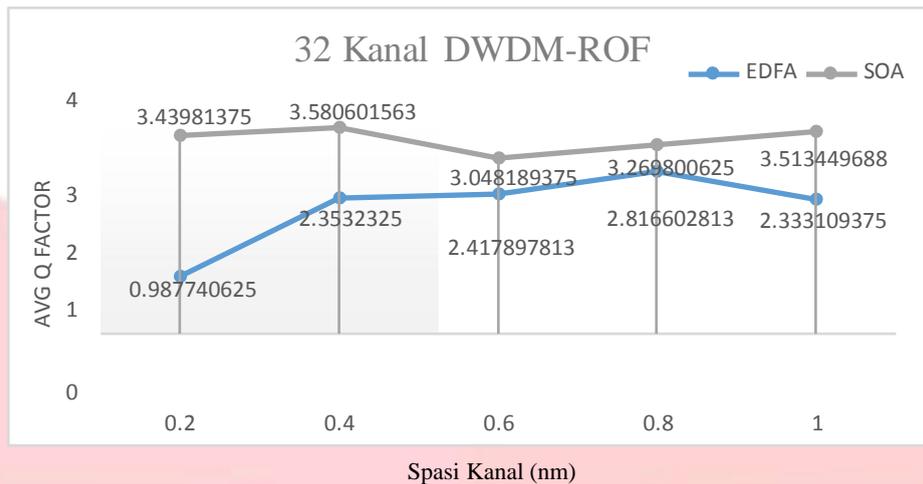
Gambar 4-1 Grafik Rata-Rata Q Factor 4 Kanal



Gambar 4-2 Grafik Rata-Rata Q Factor 8 Kanal



Gambar 4-3 Grafik Rata-Rata Q Factor 16 Kanal



Gambar 4-4 Grafik Rata-Rata Q Factor 32 Kanal

Sementara itu, semakin banyak jumlah kanal yang digunakan, semakin memperburuk performansi yang dihasilkan dalam meminimalisir efek non linear *cross phase modulation*. Karena penggunaan sejumlah banyak panjang gelombang dalam spasi yang sangat sempit dapat mengakibatkan kerusakan panjang gelombang akibat meningkatnya intensitas efek non linier yang mempengaruhi panjang gelombang yang berdekatan. Pada akhirnya didapatkan skema yang paling baik dalam meminimalisir efek *cross phase modulation* tersebut, yaitu dengan jumlah kanal sebanyak 8 pada spasi kanal 0.8 nm yang merupakan salah satu spasi kanal yang direkomendasikan ITU-T.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir ini adalah:

1. Efek non linier seperti *Cross Phase Modulation* membawa dampak yang merusak pada *link* DWDM-RoF yang disimulasikan. Karena walaupun beberapa kanal berhasil mendapatkan nilai *Q factor* diatas 6, akan tetapi semua nilai rata-rata *Q factor* yang dihasilkan untuk semua spasi kanal masih kurang dari 6.
2. Pada pengujian dengan peningkatan spasi kanal, jumlah kanal, dan menggunakan jenis *amplifier* yang berbeda, sangat berpengaruh pada kinerja sistem DWDM-RoF yang diujikan. Dimana variasi spasi kanal sebesar 0.6 nm mulai menunjukkan peningkatan performansi diatas *threshold*.
3. Sedangkan variasi jumlah kanal mulai menunjukkan performansi yang baik ketika ditingkatkan dari 4 kanal ke 8 kanal, dan mulai mengalami penurunan performansi ketika ditingkatkan dari 16 kanal ke 32 kanal.
4. Pada tugas akhir ini, penguat SOA dengan arus injeksi sebesar 0.05 mA untuk penguatan sebesar 22 dB memberikan performansi yang lebih baik dalam meminimalisir efek non linier XPM pada *link* sejauh 375 km dengan *bitrate* 40 Gbps. Karena dari beberapa skema pengujian yang menggunakan penguat SOA, beberapa kanalnya berhasil memperoleh nilai *Q factor* diatas 6 atau nilai BER dibawah 10^{-9} .
5. Untuk semua skema pengujian, penguat SOA mendapatkan nilai *Q factor* terbaik sebesar 12.8882 atau nilai BER 2.62×10^{-38} pada skema 16 kanal dengan spasi kanal 0.2 nm. Sedangkan penguat EDFA mendapatkan nilai *Q factor* terbaik sebesar 4.76127 atau nilai BER 9.61×10^{-7} pada skema 8 kanal dengan spasi kanal 0.4 nm.
6. Dari semua skema pengujian yang dilakukan, skema yang paling optimal dalam meminimalisir efek non linier XPM pada simulasi *link* DWDM-RoF adalah skema pengujian 8 kanal menggunakan penguat SOA pada spasi kanal 0.6 nm. Karena pada skema tersebut, didapatkan nilai rata-rata *Q factor* tertinggi dari semua pengujian, dan 3 dari 8 kanalnya mendapat nilai *Q factor* diatas 6 atau nilai BER lebih kecil dari 10^{-9} .

Daftar Pustaka

- [1] Sarup, Viyoma and Amit Gupta. "Performance Analysis Of An Ultra High Capacity 1 Tbps DWDM-RoF System For Very Narrow Channel Spacing." *IEEE* (2014). PDF.
- [2] Fadhian Budiman, Mohamad. *ANALISIS PERBANDINGAN PULSA GAUSSIAN DENGAN PULSA SECANT-HIPERBOLIK PADA TRANSMISI SOLITON*. Tugas Akhir. Bandung: Telkom University, 2015.
- [3] Keiser, Gerd. *Optical Fiber Communication*. New Delhi: McGraw-Hill, 1991.

- [4] Senjaya, Alvino. https://www.academia.edu/4692097/Ada_3_jenis_tipe_serat_optik_yang_sering_digunakan_Step_Indeks_Multimode_Grade_Indeks_Multimode_Step_Indeks_Singlemode. n.d. Diakses 11 Februari 2016.
- [5] Wijaya, A.H. <http://teknodaily.com/pengertian-kabel-jaringan-fiber-optik-beserta-kelebihan-kekurangannya/>. 11 Februari 2015. Diakses 11 Februari 2016.
- [6] Depdiknas, Pustekkom. http://idkf.bogor.net/yuesbi/e-DU.KU/edukasi.net/TIK/serat_optik/materi3.html. 2007. Diakses 12 Februari 2016.
- [7] Prasetya, Dwi. *Serat Optik - Sebagai Salah Satu Solusi Pembangunan Jaringan*. Modul . Palembang: Universitas Sriwijaya, 2009.
- [8] Lorente, Roberto and Maria Morant. "Radio-over-Fibre Network for 4G." Spain: Universidad Politecnica de Valencia. *IGI Global* (2010). PDF.
- [9] Dadrasnia, Ehsan and F.R Adikan. "DWDM Effects of Single Model Optical Fiber in Radio over Fiber System." *IEEE Electronic Computer Technology* (2010).
- [10] Joseph, Arun and Shanthi Prince. "Performance Analysis and Optimization of Radio over Fiber Link." *IEEE Communication and Signal Processing* (2014).
- [11] Channels, DWDM ITU. <https://www.flexoptix.net/en/dwdm-channels/>. 2016. Diakses 16 Februari 2016.
- [12] Ramadhan, Luthfi M. *SIMULASI DAN ANALISIS EFEK CROSS-PHASE MODULATION PADA PERFORMANSI LINK DWDM DENGAN CHROMATIC DISPERSION COMPENSATION*. Tugas Akhir. Bandung: Telkom University, 2015.
- [13] Aldilla, Paundra. *ANALISIS EFEK NONLINIER DI JARINGAN CWDM PADA SISTEM KOMUNIKASI SERAT OPTIK*. Tugas Akhir. Bandung: Telkom University, 2015.
- [14] Rasheed, Ifthikhar, et al. "Analyzing the Non-linear Effects at various Power Levels and Channel Counts on the Performance of DWDM Based Optical Fiber Communication System." *IEEE* (2012).
- [15] <http://budisma.net/2015/03/perbedaan-cahaya-koheren-dan-cahaya-monokromatis.html>. 23 Januari 2016. Diakses 17 Februari 2016.
- [16] Bergano, Neal S. http://photonicsociety.org/newsletters/oct07/margin_commentary.html. 2007. Diakses 17 Februari 2016.
- [17] Wibowo, Satrio Arief. *ANALISIS PENGUJIAN IMPLEMENTASI PERANGKAT FIBER TO THE HOME (FTTH) DENGAN OPTISYSTEM PADA LINK STO CIJAWURA KE BATUNUNGGAL REGENCY CLUSTER PERMAI*. Tugas Akhir. Bandung: Telkom University, 2015.
- [18] Hambali, Akhmad and Ari Syahriar. (2003). "Analisa Karakteristik Gain Serat Optik Erbium Doped Amplifier Mode Tunggal", Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Indonesia.
- [19] Zaman, Mubashir and Shahid Iqbal. "Performance Analysis of EDFA Amplifier for DWDM System." *IEEE* (2014).
- [20] Hanafie, Satria. *Analisis Perbandingan Performansi Sistem DWDM menggunakan Penguat SOA, EDFA dan ROA berbasis Soliton*. Tugas Akhir. Bandung: Telkom University, 2013.
- [21] Laksana, Gede Teguh. *Analisis Sistem Komunikasi RoF (Radio over Fiber) Berbasis WDM (Wavelength Division Multiplexing) Dengan OADM (Optical Add Drop Multiplexing) Untuk Jarak Jauh*. Bandung: Telkom University, 2016. Tugas Akhir.
- [22] Fikrianto, Ghufron. <https://muridguru.com/mengenal-apa-itu-fiber-optik/>. 26 September 2015. Diakses 23 Februari 2016.
- [23] Zin, A.M, et al. "An Overview of Radio-over-Fiber Network." *IEEE* (2010).
- [24] Firnadya, Ajeng R. *Analisis Efek Non Linieritas Fiber Pada Link Sistem Komunikasi Serat Optik*. Bandung: Telkom University, 2015. Tugas Akhir.
- [25] Nurdianto, Irfan. *Analisis Four Wave Mixing Dengan Penguat Semiconductor Optical Amplifier Pada Jaringan Dense Wavelength Division Multiplexing*. Bandung: Telkom University, 2014. Tugas Akhir.