

## ANALISIS KERATAAN GAIN PADA RAMAN OPTICAL AMPLIFIER (ROA) YANG DICASCADE UNTUK SISTEM KOMUNIKASI OPTIK JARAK JAUH UW-WDM

### ANALYSIS IMPROVEMENT THE FLATNESS GAIN OF CASCADE RAMAN OPTICAL AMPLIFIER (ROA) FOR LONG HAUL UW-WDM OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

M. LUTHFI<sup>1</sup>AKHMAD HAMBALI<sup>2</sup>AFIEF DIAS PAMBUDI<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom<sup>1</sup>[m.luthfievo@gmail.com](mailto:m.luthfievo@gmail.com) <sup>2</sup>[akhmadhambali@telkomuniversity.ac.id](mailto:akhmadhambali@telkomuniversity.ac.id)<sup>3</sup>[afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id](mailto:afiefdiaspambudi@telkomuniversity.ac.id)

#### Abstrak

---

Raman *Optical Amplifier* (ROA) adalah penguat optik yang memanfaatkan interaksi kenonlinieran antara sinyal dan laser yang dipompakan kedalam serat yang menyebabkan terjadinya penguatan pada sinyal informasi. Analisis penguatan sinyal optik dengan menggunakan sebuah ROA telah dilakukan, namun ada satu metode penggunaan *cascade* ROA yang berguna dalam pengembangan teknologi WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Metode *cascade* ROA yang dimaksud adalah penggunaan sejumlah ROA sekaligus pada satu serat optik dengan tujuan untuk mendapatkan penguatan yang rata dan meningkatkan *bandwidth* penguatan sinyal optik. Pada tugas akhir ini, peneliti menganalisis skema pompa pada penguatan Raman pada berbagai kasus, baik pada satu pompa maupun dengan *cascade* ROA. Tujuannya untuk mendapatkan hasil optimal, serta melihat pengaruh yang disebabkan oleh parameter-parameter yang ada terhadap perubahan spektrum penguat Raman. Pada penelitian ini didapatkan hasil simulasi saat 11 buah pompa diberikan kedalam serat, dihasilkan penguatan sebesar 12.08 dB dengan *ripple* sebesar 0.56 dB serta lebar *bandwidth* sebesar 83 nm. Saat 12 buah pompa diberikan kedalam serat, penguatan yang dihasilkan sebesar 10.94 dB dengan *ripple* sebesar 0.43 dB serta lebar *bandwidth* sebesar 78 nm.

Kata kunci: *Bandwidth, Cascade, Raman Optical Amplifier, ripple, WDM.*

#### Abstract

---

Raman Optical Amplifier (ROA) is an optical amplifier which is utilizing nonlinearity interaction between signal and laser in optical fiber. This amplifier pumps laser into optical fiber which is causes information signal amplify. Fiber optic amplify analysis using one pump ROA have been performed earlier. However, there is a cascade ROA application method which is useful for WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) development. Cascade ROA method is the method which is using the number of ROA in one optical fiber in order to get higher gain and wider bandwidth of the optical signal amplifier. In this final project, researcher analyze pump scheme of Raman amplifier in variaius cases, with one pump or with cascade ROA. The purpose is to obtain an optimal result and also to show the effect caused by existing parameters towards Raman gain spectrum changes. This research showed that given 11 pumps in to the fiber, Raman gain peak is 12.08 dB with ripple 0.56 dB and the total bandwidth is 83 nm. Given 12 pumps in to the fiber, Raman gain peak is 10.94 dB with riple 0.43 dB and the total bandwidth is 78 nm.

Keyword: *Bandwidth, Cascade, Raman Optical Amplifier, Ripple, WDM*

#### 1. Pendahuluan

---

Raman *Optical Amplifier* (ROA) adalah penguat optik yang memanfaatkan interaksi kenonlinieran antara sinyal dan laser yang dipompakan kedalam serat yang menyebabkan terjadinya penguatan pada sinyal informasi [1]. Analisis penguatan sinyal optik dengan menggunakan sebuah ROA telah dilakukan, namun ada satu metode penggunaan *cascade* ROA yang berguna dalam pengembangan teknologi WDM. Metode *cascade* ROA yang dimaksud adalah penggunaan sejumlah ROA sekaligus pada satu serat optik dengan tujuan untuk mendapatkan penguatan yang rata dan meningkatkan *bandwidth* dalam menguatkan sinyal optik [4]. Untuk mendapatkan penguatan yang rata dan *bandwidth* yang lebar dengan menggunakan metode *cascade* ROA merupakan suatu masalah yang patut untuk diteliti.

Oleh karena itu pada tugas akhir ini dilakukan simulasi dan analisis tentang distribusi penguatan Raman yang di *cascade*. Selain itu pengaruh parameter yang dijadikan masukan diantaranya daya pompa, posisi pompa, karakteristik serat (rendaman, perbedaan indeks bias relatif, dan luas daerah efektif) merupakan beberapa faktor yang penting untuk dianalisis dan dilihat bagaimana pengaruhnya terhadap spektrum penguat Raman yang dihasilkan.

**2. Dasar Teori**

**2.1 Mode Field of Radius (MFR)**

*Mode Field of Radius* atau yang selanjutnya disebut dengan MFR merupakan mode distribusi penjalaran amplitude medan listrik cahaya dalam serat optik *single mode*. Pada setiap jenis serat optik yang berbeda dihasilkan MFR yang berbeda, hal tersebut dikarenakan MFR dipengaruhi oleh panjang gelombang optik yang melewati serat serta perbedaan relatif antara nilai diameter *core* dan nilai diameter *cladding* yang berbeda-beda. Hubungan antara MFR dengan nilai panjang gelombang dan perbedaan indeks bias relatif serat dapat dilihat pada persamaan dibawah ini [4]:

$$w = \frac{0.21\lambda}{\sqrt{\Delta}} \tag{1}$$

**2.2 Area Efektif**

Area efektif adalah luasan maksimum penampang serat optik yang mampu digunakan oleh gelombang informasi ketika terjadi pemompaan pada serat. Luasan ini dipengaruhi oleh MFR yang dihasilkan terhadap gelombang informasi dan gelombang sinyal pompa. Hubungan antara Area efektif dengan MFR untuk masing-masing gelombang adalah [4]:

$$A_{eff} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{0.21\lambda_i}{\sqrt{\Delta}} + \frac{0.21\lambda_p}{\sqrt{\Delta}} \right)^2 \tag{2}$$

**2.3 Penguatan Akibat Hamburan Raman Terstimulasi**

Ketika sinyal informasi yang lemah dimasukkan kedalam serat akan dikuatkan dengan adanya penambahan pompa, medium non-linier biasanya mengkonversi sebagian kecil dari energi yang datang dari optik menjadi energi optik lainnya. Interaksi antara gelombang pompa dengan gelombang sinyal yang berkaitan dengan proses hamburan Raman terstimulasi dapat dijelaskan pada persamaan dibawah ini [2]:

$$\frac{dA_s}{dz} = -\alpha A_s - \beta A_s^2 - \beta A_s A_p \tag{3}$$

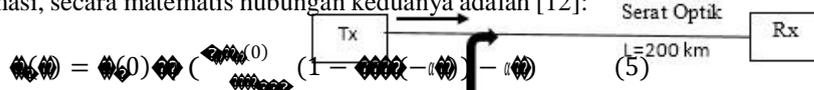
$$\frac{dA_p}{dz} = -\alpha A_p - \beta A_p^2 - \beta A_p A_s \tag{4}$$

**2.4 Skema Pemompaan Penguatan Raman**

Penempatan dan jumlah penguat Raman pada serat optik mempengaruhi kinerja penguat tersebut. Terdapat beberapa kemungkinan skema penempatan dan penambahan penguat Raman yang bisa dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan peformansi yang bagus. Adapun skema tersebut adalah:

**2.4.1 Pemompaan Arah Depan**

Pada skema ini letak penguat berada pada titik 0 serat optik dimana juga terdapat proses pengiriman sinyal. Ketika daya pompa diinjeksikan kedalam serat optik dan kemudian diikuti oleh pengiriman sinyal informasi, interaksi yang terjadi antara kedua gelombang tersebut adalah gelombang pompa akan menguatkan sinyal informasi, secara matematis hubungan keduanya adalah [12]:



$$A_s(z) = A_s(0) \exp\left(-\alpha z - \beta \int_0^z A_p^2(z') dz'\right) \tag{5}$$

$$P_s(z) = P_s(0) \exp(-\alpha z) \tag{6}$$

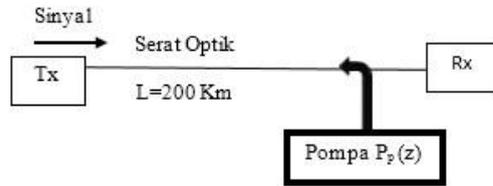
**Gambar 1** Penguat Raman dengan Pemompaan Arah Depan**2.4.2 Pemompaan Arah Belakang**

Pada skema ini letak penguat berada pada ujung titik L serat optik sementara pada titik nol terdapat proses pengiriman sinyal. Ketika daya pompa diinjeksikan kedalam serat optik dan kemudian diikuti oleh

pengiriman sinyal informasi, interaksi yang terjadi antara kedua gelombang tersebut adalah gelombang pompa akan menguatkan sinyal informasi yang sudah mengalami pelemahan karna redaman serat terlebih dahulu, secara matematis hubungan keduanya adalah [12]:

$$P_p(z) = P_p(0) \exp \left[ \frac{g_p(z)}{A} \left( P_s(z) - P_p(z) - 1 \right) - \alpha z \right] \quad (7)$$

$$P_p(z) = P_p(0) \exp \left[ \frac{g_p(z)}{A} \left( P_s(z) - P_p(z) - 1 \right) - \alpha z \right] \quad (8)$$



Gambar 2 Penguat Raman dengan Pemompaan Arah Belakang.

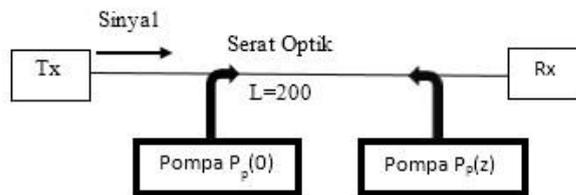
### 2.4.3 Pemompaan Depan dan Belakang

Pada skema ini letak penguat berada pada ujung titik L dan titik 0 serat optik sementara pada titik nol terdapat proses pengiriman sinyal. Ketika daya pompa diinjeksikan kedalam serat optik dan kemudian diikuti oleh pengiriman sinyal informasi, interaksi yang terjadi antara kedua gelombang tersebut adalah gelombang pompa akan menguatkan sinyal informasi yang sudah mengalami penguatan dititik nol kemudian dikuatkan lagi pada titik L, secara matematis hubungan keduanya adalah [12]:

$$P_p(z) = P_p(0) \exp \left\{ -\alpha z + \frac{g_p(z)}{A} \left( P_s(z) + P_p(z) \left( \frac{P_s(z)}{P_p(z)} - 1 \right) \right) \right\} \quad (9)$$

$$P_p(0) = P_p(0) \exp \left[ \frac{g_p(0)}{A} \left( P_s(0) - P_p(0) - 1 \right) - \alpha \cdot 0 \right] \quad (10)$$

$$P_p(L) = P_p(0) \exp \left[ \frac{g_p(L)}{A} \left( P_s(L) - P_p(L) - 1 \right) - \alpha L \right] \quad (11)$$



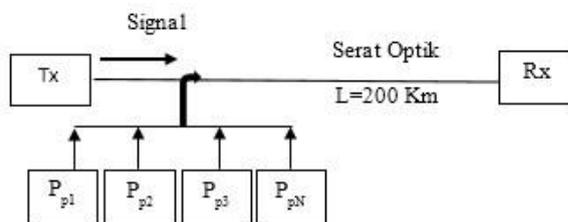
Gambar 3 Penguat Raman Arah depan dan belakang

### 2.4.4 Pemompaan Dengan Cascade ROA

Pada teknologi WDM menerapkan pengiriman informasi dengan jumlah sinyal yang banyak maka diperlukan juga penguat yang besar. Untuk mendapatkan peningkatan penguatan caranya dengan menggunakan metode cascade ROA. Metode cascade ROA menyebabkan nilai koefisien gain Raman meningkat. Pada skema ini cascade ROA ditempatkan pada titik 0 serat. Secara matematis penguatan terjadi akibat cascade ROA adalah [4]:

$$P_p(z) = P_p(0) \exp \left( \sum_{i=1}^N \frac{g_{pi}(z)}{A} \left( P_s(z) - P_{pi}(z) - 1 \right) - \alpha z \right) \quad (12)$$

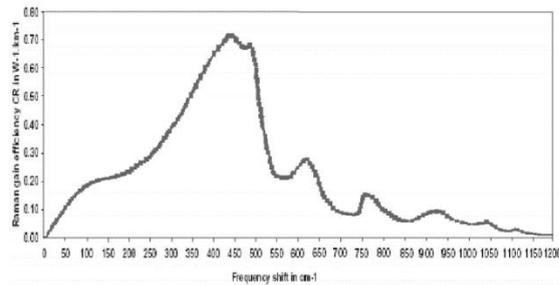
$$P_p(0) = P_p(0) \exp \left[ \frac{g_p(0)}{A} \left( P_s(0) - P_p(0) - 1 \right) - \alpha \cdot 0 \right] \quad (13)$$



Gambar 4 Penguatan dengan cascade Raman

**2.5 Koefisien Penguat Raman**

Pada gambar 3.5 menunjukkan bahwa besar koefisien penguat Raman tergantung pada pergeseran frekuensi terhadap laser pompa. Nilai koefisien penguat Raman yang paling maksimum dicapai pada saat perbedaan frekuensi 13.2 THz dengan nilai  $6.8 \times 10^{-14}$  m/W. Spektrum Raman tersebut adalah hasil pengukuran oleh para peneliti sebelumnya, spektrum akan berubah nilainya apabila diberikan panjang gelombang pompa dan panjang gelombang sinyal yang berbeda [2].



**Gambar 5** Nilai penguat Raman pada serat silika [2]

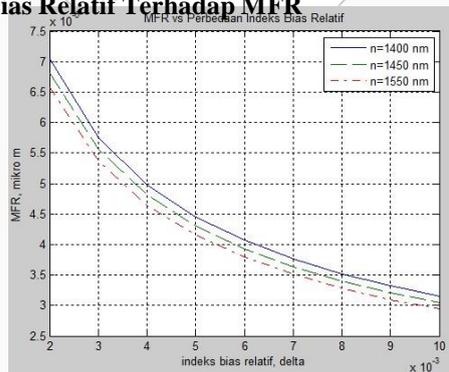
Nilai diatas dapat sewaktu-waktu berubah apabila diberikan nilai panjang gelombang yang baru atau indeks bias relatif yang baru. Persamaan yang menyatakan perubahan nilai koefisien penguat Raman adalah [4]:

$$g = 1.34 \frac{1 + 80\Delta}{\lambda_p} \tag{14}$$

Dengan  $g_0 = 6.8 \times 10^{-14}$  m/W,  $\lambda_p$  adalah panjang gelombang pompa.

**3. Pembahasan**

**3.1 Analisis Pengaruh Indeks Bias Relatif Terhadap MFR**



**Gambar 6** MFR vs Perubahan Nilai Indeks Bias.

Saat perbedaan indeks bias relatif sebesar 0.004 maka nilai MFR untuk panjang gelombang 1400 nm adalah  $4.981 \times 10^{-6}$ ; untuk panjang gelombang 1450 nm adalah  $4.815 \times 10^{-6}$ ; untuk panjang gelombang 1550 nm adalah  $4.649 \times 10^{-6}$ m; Pada tugas akhir ini peneliti menggunakan jenis serat optik G.655. Berdasarkan sumber yang ada, serat jenis tersebut memiliki nilai MFR saat panjang gelombang 1550 nm adalah sebesar  $5 \times 10^{-6}$  m. Oleh karena itu nilai ideks bias relatif dengan MFR sebesar  $5 \times 10^{-6}$  adalah  $3.5 \times 10^{-3}$  m. Nilai ini akan digunakan seterusnya pada analisis selanjutnya.

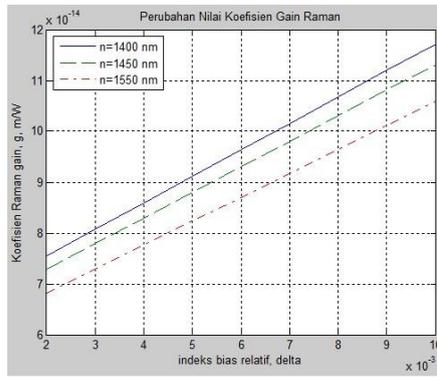
**3.2 Analisis Perubahan Nilai Koefisien Penguat Raman**

Saat perbedaan indeks bias relatif sebesar 0.004 maka nilai koefisien penguat Raman yang baru pada panjang gelombang 1400 nm adalah  $8.591 \times 10^{-14}$  m/Watt; untuk panjang gelombang 1450 nm adalah  $8.295 \times 10^{-14}$  m/Watt; untuk panjang gelombang 1550 nm adalah  $7.76 \times 10^{-14}$  m/Watt.

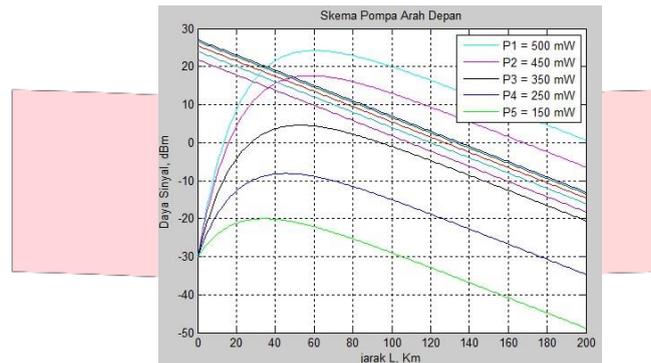
Pada penelitian ini digunakan perbedaan indeks bias relatif sebesar  $3 \times 10^{-3}$  oleh karena itu nilai koefisien penguat raman yang digunakan adalah  $3.5 \times 10^{-14}$  m/Watt.

**3.3 Analisis Penguatan Raman Arah Depan**

Analisis ini menggunakan parameter masukan daya sinyal ( $P_s$ ) sebesar 0.001 m/Watt, dengan rentang jarak  $L = 0$  km hingga  $L = 200$  km. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai daya masukan pompa ( $P_p$ ).



Gambar 7 Perubahan Nilai Koefisien Penguat Raman.

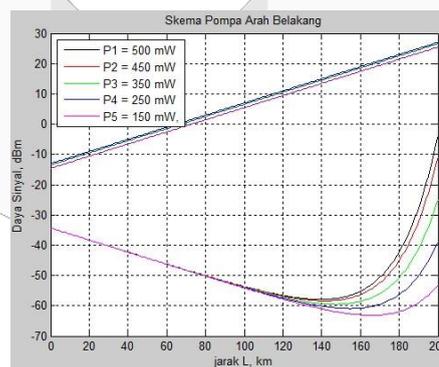


Gambar 8 Penguatan Raman Arah Depan.

Saat diberikan daya pompa sebesar 500 mWatt daya sinyal dikuatkan hingga mencapai titik maksimum dengan nilai daya sebesar 24.2 dBm pada jarak 61 Km namun menurun secara perlahan hingga mencapai ujung serat dengan nilai daya minimum sebesar 0.808 dBm pada jarak 200 Km. Dari hasil penguatan sinyal tersebut, pemompaan dengan nilai daya yang masih diterima untuk spesifikasi sensitifitas penerima optik yang digunakan adalah nilai daya pompa diatas 350 mWatt untuk jarak 200 Km.

**3.4 Analisis Penguatan Raman Arah Belakang**

Saat pemberian daya pompa sebesar 500 mWatt, daya sinyal yang awalnya mengalami penurunan daya hingga mencapai nilai -57.71 dBm mulai dikuatkan pada jarak 146 Km hingga ujung serat dengan nilai -3.73 dBm pada jarak 200 Km. Dari hasil penguatan sinyal tersebut, pemompaan dengan nilai daya yang masih diterima untuk spesifikasi sensitifitas penerima optik yang digunakan adalah nilai daya pompa diatas 350 mWatt untuk jarak 200 Km sama untuk kasus pemompaan Arah depan.

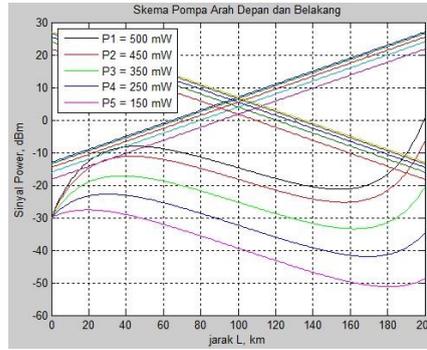


Gambar 9 Penguatan Raman Arah Belakang.

**3.5 Analisis Penguatan Raman Arah Depan dan Belakang**

Analisis ini menggunakan parameter masukan daya sinyal ( $P_s$ ) sebesar 0.001 mWatt, dengan rentang jarak  $L = 0$  km hingga  $L = 200$  km. Skema kali ini adalah sistem memberikan daya pompa dengan nilai yang sama untuk setiap perubahan nilai daya pompa dikedua ujung serat, atau dengan kata lain saat diberikan pompa sebesar 500 mWatt dititik  $z = 0$ , maka pada  $z = L$  juga diberikan daya pompa sebesar 500 mWatt.

Saat  $P_p = 500$  mWatt daya sinyal akan dikuatkan hingga -7.454 dBm pada jarak 43 Km karena transfer energi dari pompa arah depan, kemudian daya sinyal kembali melemah hingga jarak 157 Km dengan nilai minimum daya sinyal adalah -21.27 dBm tapi kemudian dikuatkan kembali hingga -0.6063 dBm pada jarak 200 Km karna transfer energi dari pompa arah belakang



Gambar 10 Skema Pompa Depan dan Belakang.

Dari kasus diatas diperoleh:

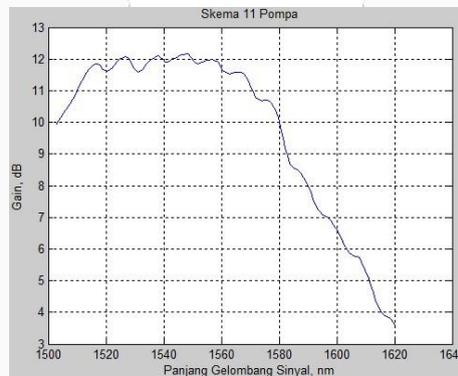
Tabel 1 Perbandingan Daya Tiap Skema Arah Pompa

P <sub>p</sub>	Pompa Depan		Pompa Belakang		Pompa Depan Dan Belakang	
	Daya Maks	Daya Min	Daya Maks	Daya Min	Daya Maks	Daya Min
150	-20.04	-48.65	-53.19	-63.01	-26.62	-51.23
250	-8.129	-34.52	-39.06	-60.79	-22.78	-41.94
350	4.544	-20.39	-24.93	-59.16	-17.16	-33.43
450	17.56	-6.059	-10.8	-58.19	-6.458	-25.28
500	24.19	1.101	-3.73	-57.64	-0.6063	-21.27

3.6 Analisis Pengaruh Penguat Cascade Raman

Faktor penting dalam analisis penguatan Raman adalah karakteristik serat karena hamburan Raman terjadi pada serat optik.

3.6.1 Penambahan 11 Buah Pompa Kedalam Serat

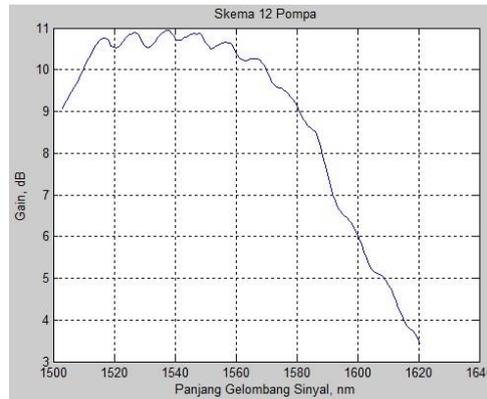


Gambar 11 Penambahan 11 Buah Pompa Kedalam Serat

Penguatan mulai terjadi saat panjang gelombang 1503 nm dengan nilai 9.956 dB. Penguatan terus meningkat pada panjang gelombang 1517 nm dengan nilai penguat 11.85 dB. Kemudian mengalami penurunan sementara pada panjang gelombang 1521 nm dengan nilai 11.63 dB kemudian dinaikkan lagi pada panjang gelombang 1527 nm dengan nilai 12.08 dB kemudian turun sementara pada panjang gelombang 1532 nm dengan nilai 11.59 dB. Kemudian dinaikkan kembali pada panjang gelombang 1537 nm dengan nilai 12.09 dB dan konstan hingga panjang gelombang 1557 nm yang akhirnya turun drastis menuju nol pada panjang gelombang 1583 nm.

3.6.2 Penambahan 12 Buah Pompa Kedalam Serat

Nilai parameter pada kasus ini diambil pada tabel 3.12. Pada gambar 4.16 menjelaskan saat diberikan 12 buah pompa kedalam serat optik. Penguatan mulai terjadi saat panjang gelombang 1503 nm dengan nilai 9.068 dB. Penguatan terus meningkat pada panjang gelombang 1517 nm dengan nilai penguat 10.76 dB. Kemudian mengalami penurunan sementara pada panjang gelombang 1521 nm dengan nilai 10.52 dB kemudian dinaikkan lagi pada panjang gelombang 1527 nm dengan nilai 10.9 dB kemudian turun sementara pada panjang gelombang 1532 nm dengan nilai 10.54 dB. Kemudian dinaikkan kembali pada panjang gelombang 1538 nm dengan nilai 10.94 dB dan konstan hingga panjang gelombang 1541 nm yang akhirnya turun drastis menuju nol pada panjang gelombang 1580 nm.



**Gambar 12** Penambahan 12 Buah Pompa Kedalam Serat

**Tabel 2** Perbandingan Ripple dan Bandwidth

No	Kasus	Penguatan (dB)	Ripple (dB)	Bandwidth (nm)
1	11 Pompa	12.08	0.56	83
2	12 Pompa	10.94	0.46	78

#### 4. Kesimpulan

1. Besarnya nilai perbedaan indeks bias reaktif sangat mempengaruhi terhadap MFR yang dihasilkan, semakin besar perbedaan indeks bias relatif maka nilai MFR yang dihasilkan akan semakin kecil. Berdasarkan hasil simulasi, penggunaan indeks bias relatif dengan nilai sebesar 0.0035 adalah nilai yang sesuai dengan karakteristik serat optik G.655 yang digunakan dengan nilai MFR 3.287  $\mu\text{m}$  untuk panjang gelombang sebesar 1550 nm.
2. Perubahan nilai koefisien penguat Raman sangat bergantung pada besarnya indeks bias relatif yang digunakan dan panjang gelombang pompa yang diberikan. Dengan mengacu pada kesimpulan satu, nilai maksimum koefisien penguat Raman untuk panjang gelombang pompa sebesar 1550 nm dan nilai perbedaan indeks bias relatif sebesar 0.0035 adalah  $7.5 \times 10^{-14}$  m/W.
3. Penguatan pada sinyal dipengaruhi terhadap skema dan daya pompa yang diberikan. Penggunaan pompa arah depan merupakan skema yang layak digunakan untuk mendapatkan penguatan maksimum. Pada hasil simulasi didapat nilai penguatan maksimum untuk pompa arah depan sebesar 24.2 dBm ketika diberikan daya sebesar 500 mW untuk jarak 200 km.
4. Salah satu teknik untuk meningkatkan *bandwidth* dan kerataan *gain* yang dihasilkan adalah dengan menambahkan beberapa panjang gelombang pompa kedalam serat. Pada analisis ini disimpulkan penambahan sebelas buah pompa dan dua belas pompa kedalam serat mampu memberikan kerataan yang maksimum dengan *ripple* sebesar 0.43 dB dan nilai penguatan sebesar 12.08 dB serta lebar *bandwidth* sebesar 83 nm.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agrawal, Govind P. Applications of Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, 2001
- [2] Agrawal, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [3] Dutton Harry J.R. Understanding Optical Communication. 1998.
- [4] F. M. Mustafa " Improvement the Flatness, Gain and Bandwidth of Cascaded Raman Amplifiers for Long- Haul UW-WDM Optical Communications Systems " Bulletin of Journal of Al Azher University Engineering Sector, Nasr City 11371, Cairo, Egypt, 2011.
- [5] <https://paper-jso-kel6.pdf> diunduh pada tanggal 11 Januari 2012.
- [6] PT TELEKOMUNIKASI INDONESIA, Tbk "Dasar-dasar SKSO" edisi 1.0, 2004.
- [7] Saputro, Ihsan Budi. "Analisis *Gain* Raman *Optical Amplifier* (ROA) Dengan Filter *Fiber Bragg Grating* (FBG) Sebagai Perata Derau *Amplified Spontaneous Emission* (ASE)," Skripsi S.T., Fak. Elektro dan Komunikasi, Inst. Teknologi Telkom, Bandung, 2014.
- [8] Sitepu, Leo Kharismanta. "Analisis Penguat Raman Pada Serat Optik *Single-Mode* G.652 Dan G.655," Skripsi S.T.,Jurusan Teknik Elektro, STT Telkom, Bandung, 2006.
- [9] Wilman, Aldo. "Simulasi dan Analisis Raman *Optical Amplifier* (ROA) untuk Sistem Komunikasi Jarak Jauh pada Link Soliton," Skripsi S.T., Fak. Elektro dan Komunikasi, Inst. Teknologi Telkom, Bandung, 2010.
- [10] Yanthoni Darius. "Analisis Perbandingan Dan Kinerja Sistem Komunikasi Kabel Laut SEA-ME-WE 3 Dan 4," Skripsi S.T., Fak. Teknik, Universitas Indonesia, 2009.
- [11] Z.Kumar denish and srinivas Talabatulla" Bidirectional optical fiber transmission scheme through Raman amplification: Effect of pump depletion" Department of Electrical Communication Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India