

ANALISIS *GAIN* RAMAN *OPTICAL AMPLIFIER* (ROA) DENGAN FILTER *FIBER BRAGG GRATING* (FBG) SEBAGAI PERATA DERAU *AMPLIFIED SPONTANEOUS EMISSION* (ASE)

Ihsan Budi Saputro¹, Akhmad Hambali, Ir., M.T.², M. Ramdhan Kirom, S.Si.,M.Si.³

Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi

Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom

ihsan.saputro@live.com

ABSTRAK

Raman *optical amplifier* (ROA) merupakan salah satu jenis penguat optik yang juga menghasilkan derau dalam proses penguatannya. Derau yang dimaksud salah satunya adalah *amplified spontaneous emission* (ASE), yang mana merupakan derau yang tidak bisa dihindari dan pasti muncul pada ROA. Karena itu, perlu adanya filter untuk meredam derau tersebut.

Pada tugas akhir ini, *fiber Bragg grating* (FBG) dipilih sebagai filter yang digunakan untuk meredam derau ASE pada ROA. Kemudian, analisis mengenai pengaruh yang disebabkan oleh parameter-parameter yang ada terhadap perubahan spektrum Raman *gain* serta perubahan spektrum daya derau ASE sebelum dan sesudah adanya filter FBG akan dilakukan.

Dengan $\lambda_p = 1450$ nm, puncak Raman *gain* ada di pergeseran Raman 437 cm^{-1} . Raman *gain* maksimum bernilai 43,3982 dB saat $x = 100$ mol%, bernilai 6,3433 dB saat $L = 100$ km, dan bernilai 30,5277 dB saat $P_p = 1000$ mW. P_{ASE} maksimum bernilai 0,098 mW di titik 429 cm^{-1} saat $P_p = 1000$ mW, bernilai 0,393 mW di titik 200 cm^{-1} saat $L = 25$ km, bernilai 0,2014 mW di titik 200 cm^{-1} saat $x = 12$ mol%. Kemudian, saat daya ASE yang muncul pada kondisi $L = 100$ km, $P_s = 1$ mW, $P_p = 600$ mW, dan $x = 8,3$ mol% diredam (diratakan) dengan filter FBG yang memiliki $n_g = 5 \times 10^{-3}$, $\lambda_B = 1545,9$ nm, dan $N = 180$; dihasilkan spektrum derau yang rata dengan lebar pita 8,3352 nm atau 1,0493 THz.

Kata Kunci : Raman *optical amplifier*, *amplified spontaneous emission*, *fiber Bragg grating*, Raman *gain*

ABSTRACT

Raman optical amplifier (ROA) is an optical amplifier that produces noise during the amplifying process. One of the noise is amplified spontaneous emission (ASE), which is a noise that cannot be prevented and is always present in ROA. Because of that reason, a filter is needed to reduce this noise.

In this final project, fiber Bragg grating is chosen to be the filter used to reduce ASE noise in ROA. Then, analysis of the effects caused by existing parameters to Raman gain spectrum change and ASE noise spectrum change before and after FBG filter is performed.

With $\lambda_p = 1450$ nm, Raman gain peak is on Raman shift 437 cm^{-1} . Maximum Raman gain is 43.3982 dB when $x = 100$ mol%, is 6.3433 dB when $L = 100$ km, and is 30.5277 dB when $P_p = 1000$ mW. Maximum P_{ASE} is 0.098 mW on 429 cm^{-1} when $P_p = 1000$ mW, is 0.393 mW on 200 cm^{-1} when $L = 25$ km, is 0.2014 mW on 200 cm^{-1} when $x = 12$ mol%. Then, when the arising ASE power in a condition of $L = 100$ km, $P_s = 1$ mW, $P_p = 600$ mW, and $x = 8.3$ mol% is reduced (flattened) with an FBG filter which has $n_g = 5 \times 10^{-3}$, $\lambda_B = 1545.9$ nm, and $N = 180$; a flat noise power spectrum is made with a bandwidth of 8.3352 nm or 1.0493 THz.

Keywords : Raman optical amplifier, amplified spontaneous emission, fiber Bragg grating, Raman gain

I.PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Serat optik merupakan salah satu media transmisi yang populer digunakan saat ini karena banyak sekali keuntungan yang dimilikinya jika dibandingkan dengan media transmisi lain seperti

kabel tembaga maupun udara; antara lain potensi bandwidth yang sangat besar, ukuran yang kecil, ringan, isolasi dari kelistrikan, ketahanan terhadap interferensi maupun *crossstalk*, keamanan sinyal yang tinggi, rugi-rugi transmisi yang rendah, sifat fisik yang keras namun lentur, kehandalan sistem

yang baik, kemudahan perawatan, serta potensi biaya yang rendah.^[1]

Salah satu masalah yang umum terjadi pada sistem komunikasi, tak terkecuali pada sistem komunikasi serat optik, adalah timbulnya rugi-rugi (*loss*) yang cukup besar saat melakukan transmisi jarak jauh. Oleh karena itu, sebuah penguat dibutuhkan agar sinyal dapat diterima di tujuan pada level daya yang cukup. Raman *optical amplifier* (ROA) merupakan salah satu jenis penguat optis yang dapat menguatkan pada panjang gelombang berapapun (dengan asumsi pump yang dibutuhkan tersedia)^[3], memiliki *noise figure* (NF) yang rendah, keleluasaan dalam pemilihan gain medium, serta *gain bandwidth* yang lebar^[4]. Sehingga, ia sangat berpotensi dan menarik untuk diaplikasikan ke dalam sistem komunikasi serat optik di masa depan sebagai alternatif dari *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA).

Pada tesis Yuhong Kang^[7], percobaan terhadap gain Raman telah dilakukan. Besarnya gain yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh antara lain bahan serat yang digunakan, frekuensi pump, dan frekuensi sinyal. Dalam proses penguatan pun, akan timbul derau *amplified spontaneous emission* (ASE) yang ikut menurunkan performansi sistem seperti yang dijabarkan oleh Deben Lamon^[9]. Sehingga, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis terhadap *distributed ROA* dengan bahan serat silika yang terkotori germanium termasuk pemasangan filter *fiber Bragg grating* (FBG) untuk meredam derau ASE.

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang akan dikupas dalam tugas akhir ini meliputi bagaimana parameter-parameter yang ada

mempengaruhi besar dan bentuk spektrum *gain* Raman *optical amplifier* (ROA) serta daya derau *amplified spontaneous emission* (ASE) sebelum

dan sesudah adanya filter *fiber Bragg grating* (FBG).

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh yang disebabkan oleh

II. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang ditempuh dalam penelitian ini meliputi studi literatur dan pembuatan simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab R2012b. Kemudian, hasil simulasi akan dianalisis menggunakan terori-teori maupun formula-formula yang ada pada buku dan juga jurnal.

III. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Pemodelan Sistem Secara Umum



Gambar 3.1 Model sistem

Gelombang sinyal bersama dengan *pump* masuk ke dalam serat optik agar terjadi penguatan Raman. Serat optik yang digunakan dalam analisis memiliki jumlah dopan germanium yang berbeda-beda. Kemudian, derau ASE juga ikut berpropagasi bersama dengan gelombang sinyal yang telah dikuatkan. Sebelum gelombang memasuki *photodetector*, gelombang akan melewati filter FBG terlebih dahulu agar derau ASE yang ada dapat diredam (diratakan) sehingga fluktuasi penguatan antar panjang gelombang dapat dibuat seminimal mungkin.

3.2 Pemodelan Raman Gain dan Raman Gain Coefficient

Sinyal Stokes lemah yang dimasukkan ke dalam serat dengan *pump* yang lebih kuat akan dikuatkan karena terjadi *stimulated Raman scattering* (SRS). Penguatan yang terjadi dapat dinyatakan oleh persamaan di bawah ini^[7]

$$P_s L = P_s \exp \left[\frac{g_R(v) P_p L_{\text{eff}}}{K A_{\text{eff}}} \right] - \alpha_s L \quad (3.1)$$

Luas efektif ditentukan oleh *mode size* dan *overlap* antara mode *pump* dan sinyal, dapat dinyatakan oleh

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \frac{\int \psi_p^2 r dr \int \psi_s^2 r dr}{\int \psi_p^2 \psi_s^2 r dr} \quad (3.2)$$

parameter-parameter yang ada terhadap perubahan spektrum *gain* Raman serta perubahan spektrum daya derau ASE sebelum dan sesudah adanya filter

FBG.

Untuk serat *step-index single-mode*, dapat menggunakan metode pendekatan Gaussian sehingga dapat dinyatakan sebagai^[18]

$$A_{\text{eff}} = \pi \frac{w_0^2}{2} \frac{w_0^2}{2} \quad (3.3)$$

Persamaan Marcuse menyatakan *mode field* radius sebagai berikut

(3.34)

$$G = \frac{P_{s_{on}}}{P_{s_{off}}} \quad (3.21)$$

Gain dalam satuan desibel dapat dinyatakan

sebagai :

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{s_{on}}}{P_{s_{off}}} = 10 \log_{10} \frac{4.343 g_R(v) L_{eff} P_p}{K A_{eff}} \quad (3.22)$$

3.3 Pemodelan Derau Amplified Spontaneous Emission

Bentuk spektral daya ASE dapat dinyatakan menggunakan persamaan berikut^[10]:

$$S_{ASE} = n_{sp} \cdot h \cdot \nu_s \cdot \int_{z=0}^L G(z) dz \quad (3.23)$$

di mana n_{sp} merupakan faktor hamburan spontan yang dinyatakan oleh^[17]:

$$n_{sp} = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-h(\mu - \nu)}{k_B T}\right)} \quad (3.24)$$

dengan δ merupakan parameter *detuning* dan κ merupakan parameter *coupling* yang dinyatakan sebagai :

$$\delta = \omega - \omega_0 = 2\pi \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (3.35)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{2} \quad (3.36)$$

Jika koefisien refleksi efektif diketahui sebagai

$$r = q = \frac{q - \delta}{\delta + i} \quad (3.42)$$

$$q = \pm \sqrt{\delta^2 - \kappa^2} \quad (3.41)$$

maka solusi umum dipandang dari segi koefisien refleksi efektif dapat ditulis sebagai

$$r(z) = r_1 \exp(iqz) + r_2 \exp(-iqz) \quad (3.43)$$

$$r(z) = r_1 \exp(iqz) + r_2 \exp(-iqz) \quad (3.44)$$

Koefisien refleksi dapat dinyatakan dengan :

$$r = \frac{E_0}{E_1} = \frac{E_0 + E_1}{E_0 + E_1} \quad (3.45)$$

Gunakan syarat batas $E_1 = 0$, didapat $E_0 = -E_1 \exp(i(2kL))$ (3.46)

Substitusi $r(q)$ dan B_2 ke persamaan 3.45 maka didapat

$$r = \frac{k \sin(qL)}{k \cos(qL) - i \sin(qL)} \quad (3.47)$$

Reflektansi dapat dinyatakan sebagai^[20]

$$R = |r|^2 = \frac{k^2 \sin^2(qL)}{k^2 \cos^2(qL) + \sin^2(qL)} \quad (3.48)$$

Sesuai dengan hukum kekekalan energi, maka transmitansi dinyatakan sebagai

$$T = 1 - R \quad (3.49)$$

IV. ANALISIS HASIL SIMULASI

4.1 Parameter Sistem

Parameter-parameter tetap yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 4.1.

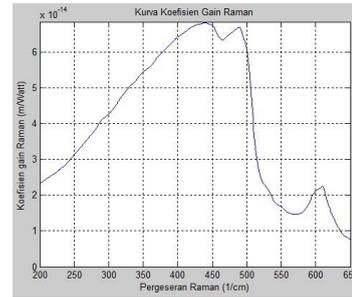
Tabel 4.1 Parameter tetap pada sistem

No.	Parameter	Nilai
1	Panjang gelombang pompa	1450 nm
2	Pergeseran Raman	200 cm ⁻¹ sampai 650 cm ⁻¹
3	Jari-jari core	4,1 μm
4	Indeks bias cladding	1,4434 sampai 1,4447

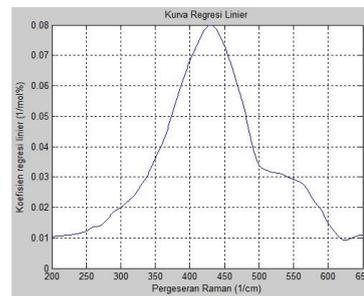
Pergeseran Raman sebesar 200 cm⁻¹ sampai 650 cm⁻¹ menyatakan bahwa panjang gelombang sinyal yang digunakan adalah sebesar 1493 nm sampai 1601 nm. Kemudian, indeks bias cladding berubah terhadap panjang gelombang dan besarnya dinyatakan menurut persamaan Sellmeier. Sedangkan indeks bias core mengacu pada indeks bias cladding namun nilainya akan lebih tinggi karena akan dikotori oleh germanium.

4.2 Analisis Gain Raman

Raman gain coefficient (g_R) yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.1. Puncak berada di titik 440 cm⁻¹ dengan nilai 6,8243x10⁻¹⁴ meter/Watt.Lalu, faktor regresi linier (C) yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.2 yang



Gambar 4.1 Koefisien gain Raman untuk kaca silika pada panjang gelombang pompa 1,45 μm^[21]



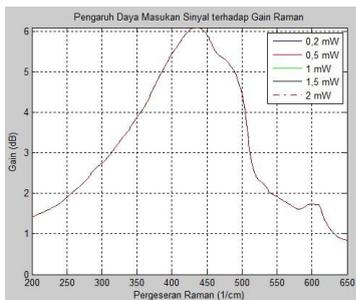
Gambar 4.2 Faktor regresi linier untuk kaca^[22]

memiliki puncak di titik 430 cm⁻¹ dengan nilai 0,08 (mol%)⁻¹.

germanosilikat

4.2.1 Analisis Pengaruh Daya Masukan Sinyal terhadap Raman *Gain*

Ditentukan bahwa daya masukan pompa (P_p) sebesar 200 mW, panjang serat (L) sebesar 20 km, dan jumlah dopan germanium (x) sebesar 3 mol%. Dilakukan percobaan dengan mengubah-ubah nilai daya masukan sinyal (P_s).



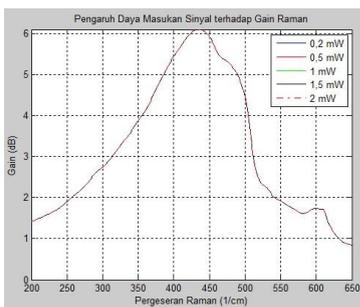
Gambar 4.6 Pengaruh daya masukan sinyal terhadap *gain*

Dari Gambar 4.6 dapat terlihat bahwa daya masukan sinyal tidak memiliki pengaruh apapun terhadap *gain*. Baik untuk daya masukan sinyal sebesar 0,2 mW, 0,5 mW, 1 mW, 1,5 mW, maupun 2 mW memiliki besar dan titik puncak *gain* yang sama yaitu 6,1055 dB pada titik 437 cm⁻¹ (1548,1 nm).

4.2.2 Analisis Pengaruh Daya Masukan Pompa terhadap Raman *Gain*

Parameter yang digunakan yaitu daya masukan sinyal (P_s) sebesar 1 mW, $L = 20$ km, dan $x = 3$ mol%. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai daya masukan pompa (P_p). Gambar 4.7 menunjukkan bahwa semakin besar daya masukan pompa, maka semakin besar pula *gain* yang dihasilkan. Saat $P_p = 100$ mW, titik puncak pada 437 cm^{-1} dengan nilai 3,0528 dB. Saat $P_p = 150$ mW, titik puncak pada 437 cm^{-1} dengan nilai 4,5792 dB. Saat $P_p = 200$ mW, titik puncak pada 437 cm^{-1} dengan nilai 6,1055 dB. Saat $P_p = 500$ mW, titik puncak pada 437 cm^{-1} dengan nilai 15,2639 dB. Saat $P_p = 1000$ mW, titik puncak pada 437 cm^{-1} dengan nilai 30,5277 dB.

Hal ini karena saat intensitas cahaya pompa besar, maka intensitas cahaya yang dihasilkan dari proses hamburan Raman juga akan besar karena cahaya pompa lah yang digunakan oleh elektron untuk mengeksitasi dirinya ke level energi yang lebih tinggi. Demikian juga sebaliknya. Sehingga, nilai *gain* pun akan semakin besar saat daya masukan pompa semakin besar.

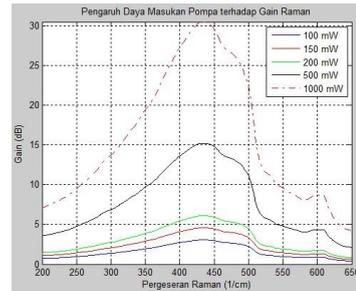


Gambar 4.6 Grafik pengaruh daya masukan sinyal terhadap *gain*

4.2.3 Analisis Pengaruh Panjang Serat terhadap Raman *Gain*

Parameter yang digunakan yaitu $P_s = 1$ mW, $P_p = 200$ mW, dan $x = 3$ mol%. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai panjang serat (L). Gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai *gain* akan meningkat saat nilai L meningkat, namun akan sampai pada suatu keadaan di mana nilai *gain* akan stagnan walaupun nilai L terus meningkat. Saat $L = 5$ km, titik puncak berada pada 433 cm^{-1} dengan nilai 3,5549 dB. Saat $L = 10$ km, titik puncak berada pada 434 cm^{-1} dengan nilai 5,1162 dB. Saat $L = 20$ km, titik puncak berada pada 437 cm^{-1} dengan nilai 6,1055 dB. Saat $L = 50$ km, titik puncak berada pada 437 cm^{-1} dengan nilai 6,3416 dB. Saat $L = 100$ km, titik puncak berada pada 437 cm^{-1} dengan nilai 6,3433 dB. Nilai puncak pada L

berbeda sangat kecil, begitupun dengan bentuk spektrum *gain* nya yang berhimpit satu sama lain. Hal ini tentunya berkaitan dengan panjang efektif serat yang telah dijelaskan oleh Gambar 4.5. Saat nilai panjang serat semakin meningkat, akan sampai pada kondisi di mana panjang efektif serat tidak lagi meningkat sehingga nilai *gain* yang dihasilkan akan sama. Karena itu, akan lebih tepat jika dikatakan bahwa nilai *gain* semakin meningkat saat nilai panjang efektif serat meningkat.



Gambar 4.7 Grafik pengaruh daya masukan pompa terhadap *gain*

4.2.4 Analisis Pengaruh Konsentrasi *Dopant* Germanium terhadap Raman *Gain*

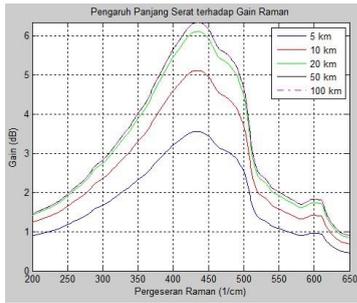
Parameter yang digunakan yaitu $L = 20$ km, $P_s = 1$ mW, dan $P_p = 200$ mW. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai jumlah *dopant* germanium (x). Gambar 4.9 menunjukkan bahwa nilai *gain* akan meningkat saat nilai x meningkat. Saat $x = 0,1$ mol%, titik puncak berada pada 429 cm^{-1} dengan nilai $2,8 \times 10^{-6}$ dB. Saat $x = 3$ mol%, titik puncak berada pada 437 cm^{-1} dengan nilai 6,1055 dB. Saat $x = 5$ mol%, titik puncak berada pada 434 cm^{-1} dengan nilai 10,332 dB. Saat $x = 10$ mol%, titik puncak berada pada 433 cm^{-1} dengan nilai 17,7476 dB. Saat $x = 20$ mol%, titik puncak

berada pada 432 cm^{-1} dengan nilai 26,3066 dB.

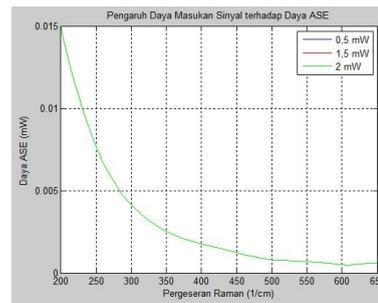
= 50 km dan $L = 100$ km menunjukkan nilai yang

Saat $x = 100$ mol%, titik puncak berada pada 432 cm^{-1} dengan nilai $43,3982 \text{ dB}$.

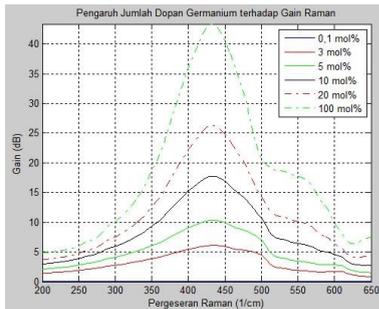
Hal ini karena penambahan konsentrasi *dopant* akan menyebabkan luas area tempat terjadinya proses hamburan (*cross-section*) menjadi bertambah, yang kemudian akan menyebabkan peningkatan nilai Raman *gaincoefficient*, yang pada akhirnya akan menyebabkan peningkatan nilai Raman *gain*.



Gambar 4.8 Grafik pengaruh panjang serat terhadap gain



Gambar 4.10 Pengaruh daya masukan sinyal terhadap daya derau ASE



Gambar 4.9 Grafik pengaruh konsentrasi dopan germanium terhadap gain

4.3 Analisis Daya Derau Amplified Spontaneous Emission

Pada bagian ini, akan dianalisis tentang besar dan bentuk spektral daya dari derau ASE (P_{ASE}). Lebar pita (B) diasumsikan sebesar 1 THz yang jika dikonversikan ke dalam lebar pita panjang gelombang menjadi sebesar 8 nm.

4.3.1 Analisis Pengaruh Daya Masukan Sinyal terhadap Daya Derau ASE

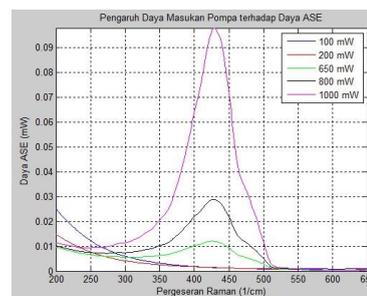
Parameter yang digunakan yaitu $P_p = 200$ mW, $L = 20$ km, dan $x = 3$ mol%. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai daya masukan sinyal (P_s). Gambar 4.10 menunjukkan bahwa daya masukan sinyal tidak memiliki pengaruh apapun terhadap P_{ASE} . Baik saat $P_s = 0,5$ mW; $P_s = 1,5$ mW; maupun $P_s = 2$ mW, P_{ASE} memiliki nilai maksimum sebesar 0,015 mW di titik 200 cm^{-1} dan memiliki nilai minimum $4,646 \times 10^{-4}$ mW di titik 610 cm^{-1} .

Hal ini karena daya sinyal tidak memiliki andil terhadap proses eksitasi elektron ke level daya yang lebih tinggi yang kemudian secara spontan turun ke level daya yang lebih rendah, yang mana merupakan proses timbulnya derau ASE. Sehingga, pada level daya sinyal berapapun, daya derau ASE yang dihasilkan akan memiliki nilai yang sama.

4.3.2 Analisis Pengaruh Daya Masukan Pompa terhadap Daya Derau ASE

Parameter yang digunakan yaitu $P_s = 1$ mW, $L = 20$ km, dan $x = 3$ mol%. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai daya masukan pompa (P_p). Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada daya masukan pompa 100 mW dan 200 mW, nilai maksimum P_{ASE} masih berada pada titik 200 cm^{-1} dengan besar masing-masing 0,0254 mW dan 0,015 mW. Nilai maksimum dengan besar 0,0121 mW mulai berpindah ke titik 426 cm^{-1} saat $P_p = 650$ mW, sebesar 0,0289 mW di titik 428 cm^{-1} saat $P_p = 800$ mW, dan sebesar 0,098 mW di titik 429 cm^{-1} saat $P_p = 1000$ mW. Setelah diamati, ditemukan bahwa daya pompa *threshol* ada di sekitar $P_p = 650$ mW yang nilainya dapat berubah jika parameter masukan lain juga diubah. Secara umum dapat dikatakan bahwa untuk daya masukan pompa di atas *threshol*, semakin besar daya masukan pompa maka semakin besar pula nilai P_{ASE} . Untuk daya pompa di bawah *threshol*, semakin besar daya masukan pompa maka nilai P_{ASE} akan semakin kecil.

Hal ini karena daya pompa merupakan faktor utama yang menyebabkan elektron dapat tereksitasi. Saat intensitas cahaya pompa besar, maka cahaya yang dihasilkan saat elektron secara spontan turun ke level daya yang lebih rendah juga akan memiliki intensitas yang besar.

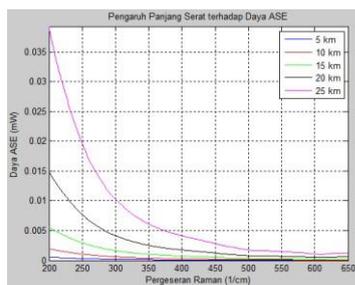


Gambar 4.11 Pengaruh daya masukan pompa terhadap daya derau ASE

4.3.3 Analisis Pengaruh Panjang Serat terhadap Daya Derau ASE

Parameter yang digunakan yaitu $P_s = 1$ mW, $P_p = 200$ mW, dan $x = 3$ mol%. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai panjang serat (L). Gambar 4.12 menunjukkan bahwa semakin panjang serat maka semakin besar pula P_{ASE} . Saat panjang serat 5 km, nilai maksimum P_{ASE} sebesar $5,5505 \times 10^{-4}$ mW. Saat panjang serat 10 km, nilai maksimum P_{ASE} sebesar 0,002 mW. Saat panjang serat 15 km, nilai maksimum P_{ASE} sebesar 0,0056 mW. Saat panjang serat 20 km, nilai maksimum P_{ASE} sebesar 0,015 mW. Saat panjang serat 25 km, nilai maksimum P_{ASE} sebesar 0,0393 mW. Seluruhnya berada pada titik yang sama yaitu 200 cm^{-1} .

Hal ini karena saat panjang serat meningkat, *gain* yang dihasilkan pun akan meningkat. Karena nilai daya derau ASE sangat bergantung kepada nilai *gain* dan berbanding lurus terhadap nilai *gain*, maka nilai daya derau ASE akan meningkat seiring dengan meningkatnya *gain* yang disebabkan oleh meningkatnya nilai panjang serat.

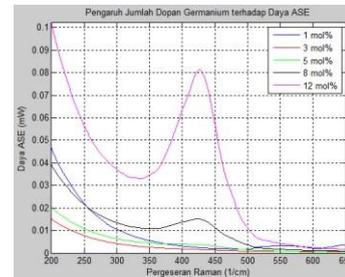


Gambar 4.12 Pengaruh panjang serat terhadap daya derau ASE

4.3.4 Analisis Pengaruh Konsentrasi Dopant Germanium terhadap Daya Derau ASE

Parameter yang digunakan yaitu $P_s = 1$ mW, $P_p = 200$ mW, dan $L = 20$ km. Percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah nilai konsentrasi *dopant* (x). Gambar 4.13 menunjukkan bahwa konsentrasi 3 mol% seolah menjadi ambang batas (*threshold*) perubahan kecenderungan daya ASE, di mana pada konsentrasi ini daya ASE menjadi yang paling rendah dengan nilai maksimum P_{ASE} sebesar 0,015 mW di titik 200 cm^{-1} . Untuk konsentrasi *dopant* di bawah 3 mol%, semakin besar jumlah *dopant* maka P_{ASE} akan semakin kecil. Saat $x = 1$ mol%, nilai maksimum adalah 0,0466 mW di titik 200 cm^{-1} . Untuk konsentrasi *dopant* di atas 3 mol%, semakin besar jumlah *dopant* maka P_{ASE} semakin besar. Saat $x = 5$ mol%, nilai maksimum adalah 0,0202

mW di titik 200 cm^{-1} . Sedangkan saat $x = 8$ mol%, mulai muncul puncak kedua di titik 423 cm^{-1} dengan nilai 0,0151 mW, dengan puncak pertama tetap di 200 cm^{-1} dengan nilai 0,0391 mW. Begitupun saat $x = 12$ mol%, mulai muncul puncak kedua di titik 426 cm^{-1} dengan nilai 0,0814 mW, dengan puncak pertama tetap di 200 cm^{-1} dengan nilai 0,2014 mW.



Gambar 4.13 Pengaruh konsentrasi *dopant* germanium terhadap daya derau ASE

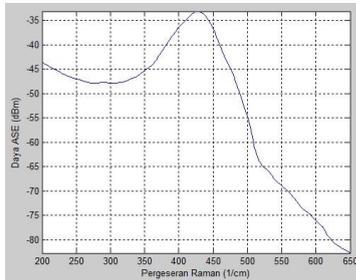
Hal ini karena saat konsentrasi *dopant* tinggi dan *gain* pun tinggi, jumlah elektron yang tereksitasi pun akan banyak dan kemudian jumlah elektron yang turun secara spontan akan banyak juga. Sehingga, daya derau ASE yang dihasilkan juga akan besar.

4.4 Analisis Peredaman Derau ASE Menggunakan Filter FBG

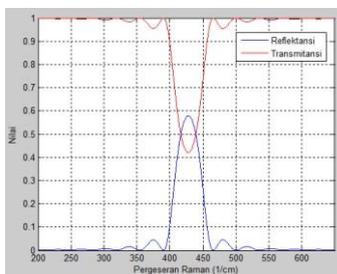
Parameter serat yang digunakan yaitu $L = 100$ km, $P_s = 1$ mW, $P_p = 600$ mW, dan $x = 8,3$ mol%. Daya ASE yang timbul ditunjukkan oleh Gambar 4.17. Kemudian, dirancanglah sebuah filter FBG dengan parameter $n_g = 5 \times 10^{-3}$ dan $N = 180$. Refleksi dan transmitansi dari filter FBG tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.18. Lalu, filter FBG tersebut digunakan untuk meredam (meratakan) derau ASE yang hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 4.19. Gambar 4.19 menunjukkan bahwa lebar pita untuk derau yang rata ada pada pergeseran Raman 399 cm^{-1} (1539 nm) sampai 434 cm^{-1} (1547,4 nm), dengan level daya pada kedua titik sebesar -37,0431 dBm. Sehingga dapat dikatakan bahwa lebar pita maksimum yang dapat digunakan untuk mendapatkan level derau yang rata adalah sebesar sekitar 8,3352 nm atau 1,0493 THz.

Saat kondisi serat berubah, yang mana membuat profil spektrum daya derau ASE juga berubah, maka filter dengan parameter yang berbeda akan dibutuhkan. Secara umum, untuk meningkatkan reflektivitas bisa dengan menaikkan jumlah kisi dan atau modulasi indeks bias, dan untuk

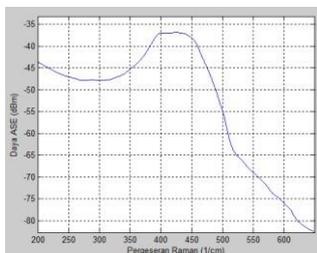
menaikkan lebar pita bisa dengan menurunkan nilai jumlah kisi dan atau menaikkan nilai modulasi indeks bias. Parameter filter harus disesuaikan dengan bentuk spektrum daya derau ASE yang timbul.



Gambar 4.17 Daya ASE saat $L = 100$ km, $P_s = 1$ mW, $P_p = 600$ mW, dan $x = 8,3$ mol%



Gambar 4.18 Reflektansi dan transmittansi dari filter FBG saat $n_g = 5 \times 10^{-3}$, $N = 180$, dan $\lambda_B = 1545,9$ nm



Gambar 4.19 Hasil peredaman (perataan) derau ASE dengan menggunakan filter FBG

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Puncak *gain* Raman berada di sekitar pergeseran Raman 437 cm^{-1} . Ia dapat bergeser hanya saat ada penambahan konsentrasi *dopant* karena saat $x = 100$ mol%, puncak *gain* berada di titik 432 cm^{-1} . Besar *gain* Raman akan meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi *dopant*, daya masukan pompa, dan panjang serat. *Gain* maksimum bernilai $43,3982 \text{ dB}$ saat $x = 100$ mol%, bernilai $6,3433 \text{ dB}$ saat $L = 100$ km, dan bernilai $30,5277 \text{ dB}$ saat $P_p = 1000$ mW. *Gain* Raman tidak mengalami peningkatan maupun penurunan saat ada perubahan

daya masukan sinyal, dengan *gain* sebesar $6,1055 \text{ dB}$ saat $P_s = 2$ mW.

2. Puncak daya derau ASE (dan begitupun bentuk spektral dayanya) bersifat fluktuatif. Namun, pada umumnya daya derau ASE memiliki dua puncak yaitu di 200 cm^{-1} dan di sekitar 425 cm^{-1} . Bentuk spektral dari daya ASE hanya dapat diubah oleh daya masukan pompa dan konsentrasi *dopant* germanium, tidak oleh panjang serat maupun daya masukan sinyal. Saat $P_p = 1000$ mW, titik puncak berada di 429 cm^{-1} . Saat $x = 12$ mol%, titik puncak berada di 200 cm^{-1} dan di 426 cm^{-1} . Saat $L = 25$ km, titik puncak berada di 200 cm^{-1} . Saat $P_s = 2$ mW, titik puncak berada di 200 cm^{-1} . Besar daya derau ASE juga cenderung bersifat fluktuatif. Namun, pada umumnya daya derau ASE akan semakin besar saat daya masukan pompa, konsentrasi *dopant*, dan panjang serat dinaikkan. Saat $P_p = 1000$ mW, nilai maksimum $P_{ASE} = 0,098$ mW. Saat $L = 25$ km, nilai maksimum $P_{ASE} = 0,393$ mW. Saat $x = 12$ mol%, nilai maksimum $P_{ASE} = 0,2014$ mW. Daya derau ASE tidak terpengaruh oleh daya masukan sinyal karena saat $P_s = 2$ mW, nilai maksimum $P_{ASE} = 0,015$ mW.

3. Filter FBG dapat digunakan sebagai peredam (perata) daya derau ASE pada penguat Raman, dengan lebar pita daya derau yang rata sebesar $8,3352 \text{ nm}$ atau $1,0439 \text{ THz}$.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat menggunakan jumlah pompa lebih dari satu, penguat Raman tipe diskrit, dopan selain germanium, atau filter lain sebagai perata daya derau.

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]Beshr, Arwa H. dan Moustafa H. Aly. "Raman Gain and Raman Gain Coefficient for SiO₂, GeO₂, B₂O₃, and P₂O₅ Glasses," 24th Nat. Radio Sci. Conf., 2007.
- [4]Beshr, Arwa H., Moustafa H. Aly, dan A.K. Aboul Seoud. "Amplified Spontaneous Emission Noise Power in Distributed Raman Amplifiers," Int. J. Scientific and Engineering Research, vol. 5, issue 5, May 2012.

- [5]Bruckner, Volkmar. Elements of Optical Networking : Basics and Practice of Optical Data Communication. Springer, 2011.
- [6]Davey, S. T., D. L. Williams, B.J. Ainslie, W. J. M. Rothwell, dan B. Wakefield. "Optical Gain Spectrum of GeO₂-SiO₂ Raman Fibre Amplifiers," Proc. IEEE, vol. 136, pp. 301-306, Dec 1989.
- [7]Dianov, E. M. "Raman Fiber Amplifiers for the Spectral Region Near 1.3 μm," Laser Physics, vol. 6, pp. 579-581, 1996.
- [8]Dianov, E. M. "Raman Fiber Amplifiers," Proc. SPIE, vol. 4083, 2000.
- [9]Fachryto, Tamas. "Analisis dan Simulasi Fiber Bragg Grating sebagai Tunable Filter Optik pada Dense Wavelength Division Multiplexing," Skripsi S.T., Fak. Tek. Elektro, Univ. Telkom, Bandung, 2014.
- [10]Gambling, W.A. "The Rise and Rise of Optical Fibers," IEEE J. Sel. Topics. Quantum Electron., vol. 6, pp. 1084-1093, Dec 2000.
- [11]Headley, Clifford dan Govind P. Agrawal. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. Elsevier Academic Press, 2005.
- [12]Islam, Mohammed N. "Raman Amplifiers for Telecommunications," IEEE J. Sel. Topics. Quantum Electron., vol. 8, pp. 548-559, Jun 2002.
- [13]Kang, Yuhong. "Calculations and Measurements of Raman Gain Coefficients of Different Fiber Types," Tesis M.S., Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [14]Lamon, Deben dan Jelle Stuyvaert. "Raman Amplification," Fac. Engineering, Univ. Porto, Portugal, 2007.
- [15]Liaw, Shien-Kuei, Keang-Po Ho, Cheng-Kai Huang, Wen-Ting Chen, Yuan-Lung Hsiao, dan Ing-Ge Lai. "Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers," National Taiwan University.
- [16]Pawar, Santosh, Shubhada Kumbhaj, Pratima Sen, dan Pranay Kumar Sen. "Fiber Bragg Grating Filter for Optical Communication : Applications and Overview," Int. J. Advanced Elect. Electron. Eng., vol. 2, pp. 51-58, 2013.
- [17]Senior, John M. Optical Fiber Communications Principles and Practice, 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
- [18]Stolen, Rogers H. "Nonlinearity in Fiber Transmission," Proc. IEEE, vol. 68, pp. 1232-1236, Oct 1980.
- [19]Stolen, Rogers H., Clinton Lee, dan R. K. Jain. "Development of the Stimulated Raman Spectrum in Single-Mode Silica Fibers," J. Optical Society of America, vol. 1, pp. 652-657, Aug 1984.
- [20]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.