

# ANALISIS VARIASI KARAKTERISTIK RESPON *REFLECTIVITY* DAN *SIDE LOBE STRENGTH* SERAT OPTIK PADA FILTER *FIBER BRAGG GRATING*

Metha Mbulan Tinambunan<sup>(1)</sup>, Sihar Parlingoman Panjaitan<sup>(2)</sup>  
Konsentrasi Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)  
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA  
e-mail: [laneytinambunan@yahoo.co.id](mailto:laneytinambunan@yahoo.co.id)

## Abstrak

Tingkat pemantulan pada filter *Fiber Bragg Gratings* (FBG) diharapkan mendekati sempurna (100%), sedangkan lobe sisi diharapkan memiliki nilai yang relatif kecil. Pemantulan ( $r$ ) dan kekuatan lobe sisi adalah karakteristik respon FBG. Filter FBG melewatkan panjang gelombang yang tidak diinginkan dan memantulkan panjang gelombang yang dibutuhkan. Parameter-parameter FBG yang mempengaruhi tingkat pemantulan, di antaranya panjang kisi ( $L$ ), indeks bias efektif ( $n_{\text{eff}}$ ), indeks modulasi, indeks bias terinduksi, dan periode kisi ( $\Lambda$ ). Tulisan ini membahas tentang spektrum pantul dan kekuatan lobe sisi pada kisi seragam serta aplikasi teknik-teknik apodisasi dalam mengoptimasi pemantulan dan kekuatan lobe sisi. Spektrum pantul dianalisis dengan memberikan panjang kisi dan periode kisi yang berbeda.  $z$  merupakan sampel uji panjang kisi yang nilainya bervariasi antara 0 sampai 10mm dengan rentang 1mm ( $0 < z < L$ ). Teknik apodisasi digunakan untuk mengoptimasi spektrum pantul. Berdasarkan hasil analisis diperoleh hasil sebagai berikut. Untuk kisi seragam tanpa apodisasi diperoleh bahwa pada  $z=4\text{mm}$ , tingkat pemantulan mencapai angka 94% dan pada  $z=10\text{mm}$  pemantulannya sudah mencapai  $\pm 99,7\%$ . Dari hasil pengamatan diperoleh bahwa semakin tinggi pemantulan maka semakin besar kekuatan lobe sisi. Teknik apodisasi Raised-cosine merupakan metode yang paling optimal untuk menganalisis respon FBG.

**Kata kunci :** panjang kisi, periode kisi, pemantulan, kekuatan lobe sisi, teknik apodisasi

## 1. Pendahuluan

Demultiplexer adalah salah satu komponen DWDM. Teknologi terkini dari demultiplexer ini adalah *Fiber Bragg Grating* (FBG) [1]. FBG ini bertindak sebagai penggandeng (*couplers*), pemisah, dan penyaring (filter) panjang gelombang [2]. Fotosensitivitas adalah awal dimulainya studi tentang FBG. Dalam percobaan yang dilakukan Hill dkk di Canadian Communications Research Center pada tahun 1978, sebuah laser Argon-ion diluncurkan ke dalam sebuah potongan kecil serat optik mode tunggal dan intensitas cahaya yang terpantul dipantau. Awalnya intensitas cahaya yang terpantul rendah, namun setelah beberapa menit, secara berkelanjutan kekuatan pemantulannya bertambah hingga hampir seluruhnya cahaya dalam serat terpantul kembali. Naiknya tingkat pemantulan cahaya ini dijelaskan dalam suatu istilah baru yakni fotosensitivitas, yang memungkinkan sebuah indeks kisi dibuat permanen di dalam sebuah kisi serat [3].

Semakin tinggi tingkat pemantulan maka semakin baik. Besarnya pemantulan ( $r$ ) dipengaruhi oleh panjang kisi, periode kisi, dan beberapa tetapan lain yang diasumsikan berdasarkan beberapa literatur. Panjang gelombang yang memenuhi kondisi Bragg disebut panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B$ ). Besaran pemantulan (%) diperoleh dengan memvariasikan nilai panjang kisi dan periode kisi. Tingginya tingkat pemantulan ini juga ternyata disertai dengan lobe sisi. Lobe sisi dalam konteks pemantulan kisi adalah pantulan-pantulan panjang gelombang yang terjadi di luar inti serat. Fenomena ini diharapkan tidak terjadi dan sebisa mungkin kekuatan lobe sisi ini harus diminimalisasi.

Untuk menyasiasi lobe sisi dan mendapatkan kombinasi optimal antara kedua karakteristik respon FBG yakni pemantulan dan lobe sisi, maka digunakanlah teknik apodisasi. Teknik ini memiliki beberapa fungsi matematis. Dalam tulisan ini fungsi-fungsi yang dianalisis

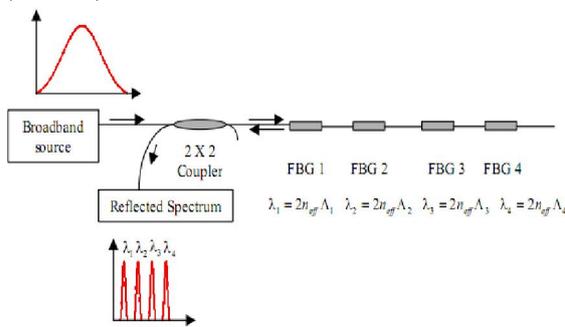
adalah fungsi Gaussian, Raised-cosine, dan Synchronous [4].

2. Fiber Bragg Grating

2.1 Teori Moda-tergandeng

Karakteristik spektrum FBG dapat dipahami dan dimodelkan dengan beberapa pendekatan [5]. Teori yang paling banyak digunakan adalah *Coupled-mode Theory* (teori mode-tergandeng). Teori mode-tergandeng adalah *tool* yang sesuai untuk menggambarkan propagasi gelombang optik dalam gelombang terbimbing dengan perubahan yang perlahan pada beragam indeks di sepanjang gelombang terbimbing tersebut. Karakteristik ini dimiliki oleh struktur FBG.

Teori mode-tergandeng didasari sebuah konsep di mana medan listrik gelombang terbimbing dengan sebuah usikan dapat diwakili oleh sebuah kombinasi linear dari medan distribusi mode tanpa *perturbation* (usikan).

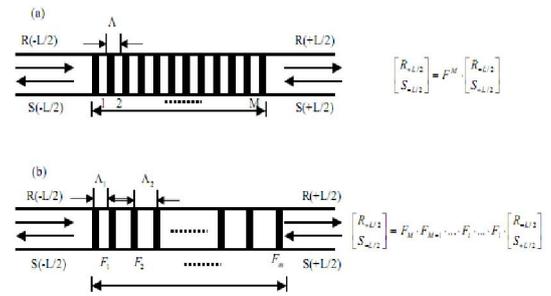


Gambar 1. Skema Penggunaan FBG pada Sistem WDM

Gambar 1 di atas adalah skema penggunaan FBG yang digunakan dalam sistem WDM. Perbedaan tipe-tipe kisi, baik seragam, *phase-shifted* dan *sampled* dapat digunakan dalam sistem WDM [4].

2.2 Metode Transfer-Matriks

Persamaan mode-tergandeng dapat diselesaikan dengan metode transfer matriks baik untuk kisi seragam maupun kisi tak seragam. Gambar 2 adalah struktur dasar ideal yang menunjukkan metode transfer matriks digunakan untuk memperoleh penyelesaian untuk sebuah kisi seragam. Indeks bias dan periode tetap konstan. Untuk kasus ini, transfer matriks 2x2 adalah identik untuk setiap periode kisi. Total transfer matriks diperoleh dengan mengalikan setiap transfer matriks [5].



Gambar 2. Skematik Metode T-Matriks (a) Kisi Seragam (b) Kisi Tak Seragam

Penjabaran matriks untuk kisi seragam adalah sebagai berikut:

Sisi kiri:

$$\begin{cases} S(-L/2) = ? \\ R(-L/2) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Sisi kanan :

$$\begin{cases} R(+L/2) = ? \\ S(+L/2) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

- di mana R : matriks mode maju
- S : matriks mode mundur
- L : panjang total kisi (mm)

Besaran koefisien pantul “ $\rho$ ” dapat dirumuskan dengan:

$$\rho = \frac{S(-L/2)}{R(-L/2)} \quad (3)$$

Koefisien pantul daya “ $r$ ” (*reflectivity*) dapat dituliskan sebagai:

$$r = |\rho|^2$$

2.3 Penyelesaian Analitik Kisi Seragam

Ada penyelesaian bersifat analitik terhadap persamaan teori moda-tergandeng. Penyelesaian analitik dari persamaan mode-tergandeng dapat diperoleh dengan memasukkan batas-batas tertentu.

Spektrum yang terpantul  $r(\lambda)$  dan yang terkirim  $t(\lambda)$  dapat diperoleh dan dijabarkan dengan persamaan [7]:

$$r(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\sigma \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (5)$$

$$t(\lambda) = \frac{\gamma_B^2}{\sigma \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (6)$$

di mana  $k$  : koefisien gandeng AC ;

$$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}}$$

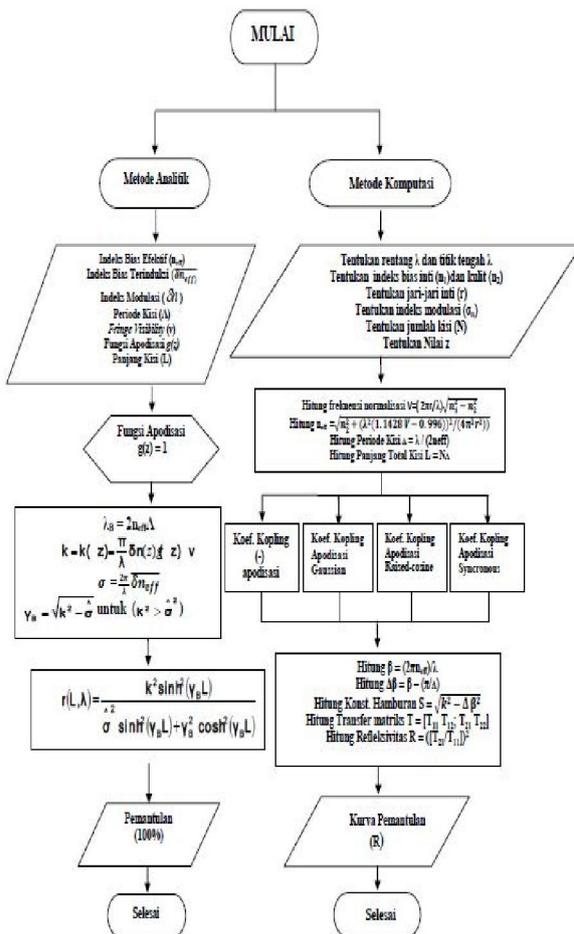
$L$  : panjang total kisi (mm)

Kondisi ini memenuhi Hukum Kekekalan Energi, yang mana berlaku :

$$r(\lambda) + t(\lambda) = 1$$

### 3. Metode Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang ditempuh dalam penelitian ini ada dua jenis yaitu perhitungan tingkat pemantulan secara analitik dan analisis respon FBG dengan menggunakan teknik-teknik apodisasi. Berikut diagram alir garis metode pengumpulan data secara umum.



Gambar 3. Diagram Alir Metode Pengumpulan Data

Penjabaran persamaan-persamaan yang digunakan dalam diagram alir pada Gambar 3 adalah sebagai berikut :

#### 1. Perhitungan Analitik Pemantulan

Langkah-langkahnya, hitung terlebih dahulu setiap nilai dari persamaan-persamaan berikut. Sebelumnya ditentukan nilai beberapa tetapan

dan dihitung beberapa nilai parameter yang mempengaruhi pemantulan. Persamaan pertama yang harus ditentukan adalah panjang gelombang Bragg ( $\lambda_B = \lambda$ ).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (\mu m) \quad (8)$$

dengan:  $n_{eff}$  : indeks bias efektif

$\Lambda$  : periode kisi ( $\mu m$ )

Diikuti dengan persamaan koef. gandeng ( $k$ )

$$k = k(z) = \frac{\pi}{\lambda} \delta n(z) g(z) v \quad (9)$$

dengan  $\delta n(z)$  : indeks modulasi

$g(z)$  : fungsi apodisasi (=1)

$v$  : fringe visibility

Setelah itu tentukan nilai persamaan koef. gandeng DC  $\hat{\sigma}$

$$\sigma = \frac{2\pi \delta n_{eff}}{\lambda} \quad (10)$$

dengan  $\delta n_{eff}$  :  $\Delta$  indeks bias terinduksi

Kemudian dari hasil yang diperoleh dari persamaan-persamaan di atas, tentukan lagi nilai dari persamaan berikut:

$$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}} \quad \text{untuk } (k^2 > \hat{\sigma}) \quad (11)$$

Setelah semua hasil dari persamaan-persamaan diperoleh, hitung nilai dari persamaan pemantulan  $r(L, \lambda)$  berikut:

$$r(L, \lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\sigma \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (12)$$

#### 2. Fungsi-fungsi Teknik Apodisasi

Beberapa fungsi apodisasi dibangun untuk menampilkan grafik. Fungsi apodisasi yang umum digunakan antara lain sebagai berikut [4].

##### a. Tanpa Apodisasi

$$g(z) = 1; z \in [0, L] \quad (13)$$

##### b. Apodisasi Gaussian

$$g(z) = \exp\left\{-\ln 2 \left[\frac{2(z-L/2)}{FWHM}\right]^2\right\}; z \in [0, L] \quad (14)$$

di mana  $FWHM = 0.4L$  dapat digunakan untuk profil ini.

##### c. Apodisasi Raised-cosine

$$g(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi(z-L/2)}{FWHM}\right) \right]; z \in [0, L]$$

di mana  $FWHM = L$  dapat digunakan untuk profil ini.

d. Apodisasi *sinc*

$$g(z) = \text{sinc} \left[ \frac{(z - L/2)}{(FWHM)} \right]; z \in [0, L] \text{ (6)}$$

di mana  $FWHM = L/(2\pi)$  dapat digunakan untuk profil ini.

Persamaan-persamaan fungsi apodisasi ini kemudian disubstitusi ke persamaan koefisien gandeng  $k(z)$ . Langkah berikutnya persamaan ini di-plot menggunakan perangkat lunak Matlab R2010a untuk menampilkan kurva pemantulan dan lobe sisi yang menyertai.

#### 4. Hasil dan Analisis Data

Tingkat pemantulan panjang gelombang pada kisi serat optik dapat diperoleh dengan mengatur nilai panjang kisi (L) dan periode kisi ( $\Lambda$ ). Pemantulan paling sempurna ( $R \rightarrow 100\%$ ) dapat diperoleh dengan memberikan variasi nilai pada panjang kisi (L) dan periode kisi ( $\Lambda$ ). Tingkat pemantulan juga diiringi dengan sederetan lobe sisi, yakni pemantulan yang bocor atau yang keluar dari inti serat optik. Untuk mengoptimalkan kedua karakteristik spektrum ini, yakni pengurangan lobe sisi tanpa penurunan tingkat pemantulan yang signifikan, maka digunakan teknik apodisasi. Teknik apodisasi ini sendiri memiliki beragam fungsi yang digunakan untuk optimasi karakteristik spektrum FBG tersebut di atas seperti apodisasi Gaussian, apodisasi Raised-cosine (kosinus meningkat), apodisasi Synchronous, dan apodisasi Keiser. Tulisan ini membahas tiga fungsi apodisasi saja yakni Gaussian, Raised-cosine, dan Synchronous.

##### 4.1 Hasil Perhitungan Pemantulan Kisi (tanpa Apodisasi, $g(z)=1$ )

Dengan menyelesaikan persamaan-persamaan yang ada dalam perhitungan tingkat pemantulan secara analitik (yang ada pada metode penelitian) untuk masing-masing empat harga periode kisi berbeda yang telah ditentukan dan untuk variasi panjang kisi  $z = 1 \text{ mm}$  s/d  $z = 10 \text{ mm}$  maka hasil perhitungan pemantulan kisi pada FBG ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 4.1** Hasil Perhitungan (r) dengan Variasi L dan  $\Lambda$

Panjang Kisi ( $\mu\text{m}$ )	Periode Kisi ( $\Lambda$ )			
	0.5300	0.5319	0.5325	0.535
	Pemantulan r (%)			
1000	28.49	28.33	28.28	28.06
2000	65.74	65.85	65.79	65.44
3000	85.74	85.60	85.56	85.28
4000	94.19	94.11	94.09	93.91
5000	97.65	97.61	97.6	97.5
6000	99.05	99.03	99.03	98.98
7000	99.62	99.61	99.61	99.58
8000	99.85	99.84	99.84	99.83
9000	99.94	99.94	99.94	99.93
10000	99.97	99.97	99.97	99.97

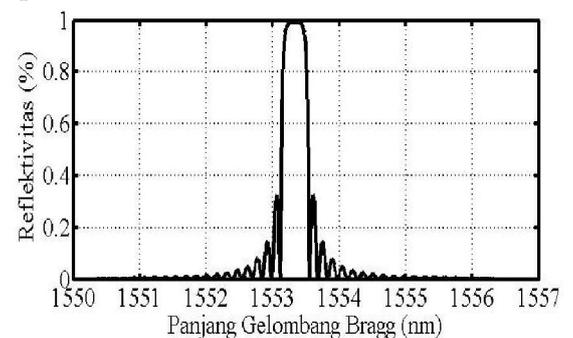
Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diamati bahwa :

1. Untuk  $z = 7\text{mm}$ , tingkat pemantulan (r) sudah mencapai  $\pm 99\%$  pada keempat periode kisi.
2. Untuk  $z = 10\text{mm}$ , tingkat pemantulan (r) sudah mencapai  $\pm 99,7\%$  pada keempat periode kisi.
3. Variasi periode kisi yang berkisar antara 0,5300 sampai 0,5350 tidak banyak memberikan perbedaan pada nilai besaran pemantulan (r). Pemantulan yang paling besar untuk setiap nilai  $z$  adalah pemantulan yang memiliki periode kisi 0,5300.
4. Semakin besar panjang kisi maka semakin besar juga nilai pemantulan, dengan kenaikan yang tidak konstan.

##### 4.2 Tampilan Kurva Pemantulan dan Lobe Sisi dengan Apodisasi Gaussian, Raised-cosine, dan Synchronous

Visualisasi respon FBG pada kisi seragam dengan dan tanpa aplikasi fungsi apodisasi ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

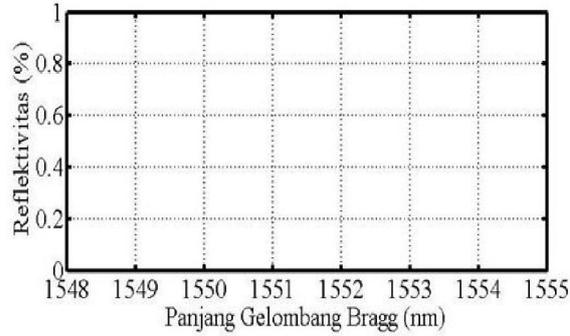
a. Kurva Pemantulan Kisi Seragam tanpa Apodisasi



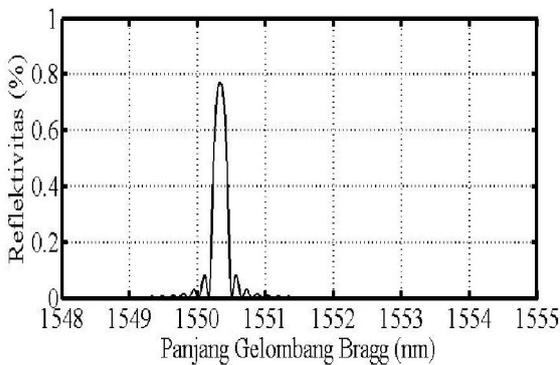
**Gambar 4.** Kisi Seragam (-) Apodisasi

Dari Gambar 4 dapat diamati bahwa spektrum pantul mendekati sempurna. Namun tanpa aplikasi fungsi apodisasi, kekuatan lobe sisinya juga relatif besar di sepanjang panjang gelombang yang digunakan.

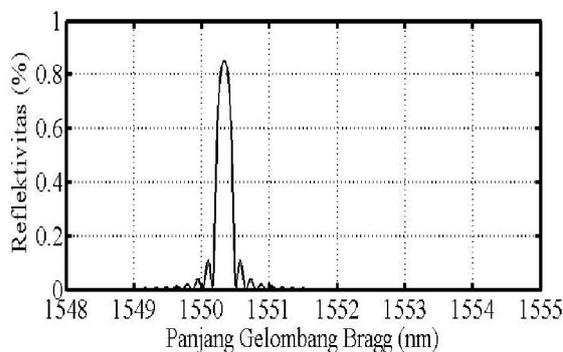
b. Kurva Pemantulan Kisi Apodisasi Fungsi Gaussian, Raised-cosine, Synchronous untuk  $z = 5\text{mm}$



(a) Apodisasi Gaussian



(b) Apodisasi Raised-Cosine



(c) Apodisasi Synchronous

**Gambar 5.** Kurva Pemantulan & Lobe Sisi untuk  $z=5\text{mm}$

Jika panjang kisi dirancang sebesar 5mm ( $z = 5\text{mm}$ ) maka pada visualisasi fungsi apodisasi Gaussian seperti pada Gambar 5(a) tidak terlihat

kurva pantulan dan lobe sisi. Ini disebabkan oleh persamaan fungsi Gaussian itu sendiri di manaz  $= 5\text{mm}$  adalah salah satu faktor pembuat nol.

Pada fungsi Raised-cosine seperti pada Gambar 5(b) pemantulan dan lobe sisi yang dihasilkan masing-masing adalah 77% dan 8%. Sementara dengan menggunakan apodisasi Synchronous yang ditunjukkan Gambar 5(c) pantulan yang dihasilkan adalah 85% dengan iringan lobe sisi sebesar 11%.

Untuk  $z = 1\text{mm}$  s/d  $z = 10\text{mm}$ , berdasarkan kurva pemantulan dan lobe sisi, maka besaran pemantulan dan lobe sisi masing-masing nilai  $z$  dapat ditabelkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Nilai Besaran Pemantulan ( $r$ ) dan Kekuatan Lobe Sisi dengan Variasi  $z$  berdasarkan Kurva (visualisasi Matlab R2010a)

$z$ (mm)	FUNGSI APODISASI					
	Gaussian		Raised-cosine		Synchronous	
	Peman-tulan	Lobe Sisi	Peman-tulan	Lobe Sisi	Peman-tulan	Lobe Sisi
1	3,8%	0,2%	54%	4%	4%	0,2%
2	11,8%	0,5%	61%	5%	0,93%	0,04%
3	44%	2,5%	67%	6%	8,1%	0,4%
4	99%	32%	73%	7%	40,5%	2,5%
5			77%	8%	85%	11%
6	99%	32%	80,5%	9%	40,5%	2,5%
7	44%	2,5%	83%	10%	8,1%	0,4%
8	11,8%	0,5%	84%	10,5%	0,93%	0,04%
9	3,8%	0,2%	85%	11%	4%	0,2%
10	1,65%	0,7%	85%	11%	0,47%	0,02%

Berdasarkan keseluruhan gambar visualisasi kurva dan pentabelannya pada Tabel 4.2 dapat dianalisis hal-hal sebagai berikut, yaitu:

1. Lobe sisi bertambah seiring meningkatnya pemantulan.
2. Untuk apodisasi fungsi Raised-cosine, semakin besar  $z$  maka tingkat pemantulan juga meningkat yang juga disertai peningkatan kekuatan lobe sisi.
3. Dengan apodisasi fungsi Raised-cosine, pemantulan FBG mencapai kestabilan dimulai  $z = 9\text{mm}$ .
4. Apodisasi Gaussian dan Synchronous mengalami titik balik yakni pada saat  $z = 5\text{mm}$ .
5. Untuk apodisasi Gaussian, baik tingkat pemantulan maupun kekuatan lobe sisi meningkat dalam rentang  $1 \leq z \leq 4 \text{ mm}$ .

- Pada  $z = 4\text{mm}$  dan  $z = 6\text{mm}$ , FBG mencapai pemantulan 99% dan kekuatan lobe sisi yang relatif besar yakni 32%.
6. Pada  $z = 5\text{mm}$ , fungsi apodisasi Gaussian tidak menampilkan visualisasi apapun karena  $z = 5\text{mm}$  membuat harga nol pada rumusan fungsi Gaussian. Pada  $z = 6\text{mm}$  FBG kembali memantul sebesar 99%, dan pada  $6 \leq z \leq 10$  menurun dengan nilai besaran yang hampir identik.
  7. Untuk apodisasi Synchronous, tingkat pemantulan meningkat di sepanjang rentang  $1 \leq z \leq 5\text{ mm}$ , di mana pada  $z = 5\text{mm}$  FBG mengalami pemantulan paling besar yakni sekitar 85% dan kekuatan lobe sisi 11%, kemudian pada  $6 \leq z \leq 10$  menurun dengan nilai yang hampir identik dengan kenaikan sebelumnya. Namun pada  $z = 2\text{mm}$  dan  $z = 8\text{mm}$  persentase pemantulannya menurun.
  8. Dari ketiga fungsi apodisasi tersebut, fungsi Raised-cosine merupakan fungsi yang paling optimal karena karakteristik responnya meningkat terus tanpa fluktuasi sehingga lebih terprediksi dan kenaikannya akhirnya mencapai titik stabil, walaupun juga disertai kenaikan lobe sisi.
  9. Kekuatan lobe sisi terkecil adalah pada  $z = 10\text{mm}$  untuk fungsi Synchronous, yaitu 0,02%. Walaupun demikian kondisi ini tidak optimal karena pemantulannya juga sangat kecil, hanya sekitar 0,47%.
  10. Untuk apodisasi fungsi Gaussian pemantulan terbaik terjadi pada  $z = 4\text{mm}$  dan  $z = 6\text{mm}$ . Untuk apodisasi fungsi Raised-cosine pemantulan terbaik terjadi pada  $z = 9\text{mm}$  dan  $z = 10\text{mm}$ . Untuk apodisasi Synchronous pemantulan terbaik terjadi pada  $z = 5\text{mm}$ .

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk kisi seragam dengan Indeks Modulasi  $3 \times 10^{-4}$  dan Indeks Bias Terinduksi  $10^{-4}$ , dengan masukan variasi panjang kisi ( $0 < z < L$ )  $L = 10\text{ mm}$ , diperoleh bahwa pada  $z = 4\text{ mm}$ , tingkat pemantulan sudah mencapai angka 94%, pada  $z = 10\text{mm}$  pemantulannya adalah  $\pm 99,97\%$
2. Semakin besar nilai periode kisi ( $\Lambda$ ) yang dirancang, yang berarti semakin besar panjang gelombang Bragg ( $\lambda$ ) maka semakin

- kecil tingkat pemantulan, meskipun tidak berpengaruh signifikan.
3. Dari visualisasi kurva pemantulan dan lobe sisi terlihat bahwa semakin tinggi tingkat pemantulan, maka lobe sisi juga semakin kuat.
  4. Dari ketiga fungsi apodisasi yang digunakan terlihat bahwa apodisasi fungsi Raised-cosine merupakan fungsi apodisasi yang paling optimal karena kenaikan tingkat pemantulan dan lobe sisinya dapat terprediksi dan paling stabil di antara ketiganya.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Alm. E. Tinambunan S.Pd dan N. br Sinaga selaku orang tua penulis, kepada Ibu Naemah Mubarakah ST.MT., dan Bapak Suherman, PhD yang sudah membimbing dan membantu penulis dalam menyelesaikan tulisan ini, serta semua pihak yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu.

## Referensi

- [1]. Nugraha, Andi. *Serat Optik*. Andi, Yogyakarta. 2006
- [2]. Keiser, Gerd. *Optical Fiber Communication*, edisi ketiga. New Jersey, McGraw-Hill. 2000.
- [3]. Othonos, Andreas. *Fiber Bragg Grating: Fundamental and Applications In Telecommunication and Sensing*. Artech House. 1999.
- [4]. J. Zhao. *An Object-Oriented Simulation Program For Fiber Bragg Gratings*. Faculty of Engineering, Vol. Master of Engineering, Rand Afrikaans University Johannesburg, Republic of South Africa. 2001
- [5]. Erdogan, Turan, "Fiber Grating Spectra", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, hal. 1277-1294, Agustus 1997
- [6]. Yariv, Amnon., "Coupled-Mode Theory for Guided-Wave Optics", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 9, 919-933, 1973
- [7]. Sunita P.Ugale., V. Mishra, "Modelling and Characterization of Fiber Bragg Grating for Maximum Reflectivity," *Elseiver*, 4, 2011