

Analisa Karakteristik Dispersi Kromatis pada Serat Kristal Fotonik dengan Menggunakan Metode Beda Hingga

Samdysara Saragih, Sekartedjo, dan Agus M. Hatta

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: sekar@ep.its.ac.id

Abstrak—Serat kristal fotonik (SKF) adalah pandu gelombang cahaya dengan sebuah inti padat pada pusat dikelilingi susunan lubang udara dengan struktur geometri tertentu. Variasi ukuran dan jarak antar lubang udara serat kristal fotonik membuat dispersinya dapat dikontrol untuk mendapatkan dispersi minimal bagi aplikasi sistem komunikasi optis. Dispersi serat kristal fotonik diperoleh setelah terlebih dahulu memecahkan Persamaan Maxwell untuk mendapatkan konstanta propagasi, β , yang pada penelitian ini dipakai kombinasi metode *compact 2D finite difference time domain (FDTD)* dan *compact 2D finite difference frequency domain (FDFD)*. Setelah β diperoleh, maka indeks bias efektif, n_{eff} , dihitung lalu dilakukan pencocokan kurva guna mendapatkan diferensial orde dua n_{eff} terhadap panjang gelombang λ ($d^2n_{\text{eff}}/d\lambda^2$). Nilai ($d^2n_{\text{eff}}/d\lambda^2$) disubstitusikan ke dalam persamaan dispersi D. Dilakukan perhitungan D pada tiga konfigurasi SKF dengan variasi radius lubang udara r dan jarak lubang udara a . Didapat hasil bahwa terjadi perubahan D akibat variasi tersebut. Pada SKF dengan konfigurasi $r = 0.25 \mu\text{m}$ dan $a = 2 \mu\text{m}$, diperoleh *ultraflattened dispersion* pada rentang panjang gelombang 1300 nm-1450 nm yaitu sebesar -2.2496 ps/nm.km hingga 1.8653 ps/nm.km. Hasil ini menunjukkan bahwa SKF konfigurasi ketiga cocok diaplikasikan pada sistem komunikasi optis.

Kata Kunci—*compact FDFD, compact FDTD, dispersi, serat kristal fotonik*

I. PENDAHULUAN

Serat kristal fotonik adalah pandu gelombang di mana *core* atau intinya dikelilingi lubang-lubang udara dengan struktur geometri tertentu. Serat kristal fotonik dibagi menjadi dua tipe berdasarkan mekanisme pengurangan/ pemanduan cahayanya: pita celah dan pandu indeks. Jenis yang kedua ini analog dengan serat optik biasa di mana cahaya merambat pada bagian “inti” (*core*) yang padat dengan lubang udara periodik memanjang berperilaku sebagai “selaput” (*cladding*) [1].

Sebagaimana pada serat optik, serat kristal fotonik juga memiliki karakteristik perambatan, salah satunya dispersi kromatis. Dispersi terkait erat dengan indeks bias material yang adalah fungsi panjang gelombang. Dispersi kromatis ditandai dengan parameter dispersi D yang merupakan fungsi panjang gelombang λ yang mengandung diferensial orde dua dari indeks bias efektif n_{eff} [2].

Kelebihan serat kristal fotonik dibandingkan serat optik adalah dispersinya dapat dikontrol dengan variasi ukuran dan jumlah lubang udara maupun struktur geometrinya. Kontrol

dispersi ini penting, misalnya, dalam aplikasi komunikasi optis dan optik nonlinier [3]. Lubang udara mengelilingi inti dalam bentuk struktur geometri seperti heksagonal [4], lingkaran [5] persegi [6], segi delapan atau oktagonal [7], dan dekahagonal [8].

Dispersi dari sebuah pandu gelombang dapat diketahui setelah indeks bias efektifnya diperoleh. Indeks bias efektif yang merupakan fungsi konstanta propagasi terhadap panjang gelombang ini bisa diketahui setelah Persamaan Maxwell pada struktur pandu gelombang dipecahkan. Hingga saat ini, penyelesaian Persamaan Maxwell secara analitik pada struktur dua dimensi periodik belum dapat dilakukan sehingga tak pelak dibutuhkan solusi secara numerik [9]. Beberapa metode numerik yang lazim digunakan adalah metode elemen hingga, metode beda hingga, metode elemen batas, dll.

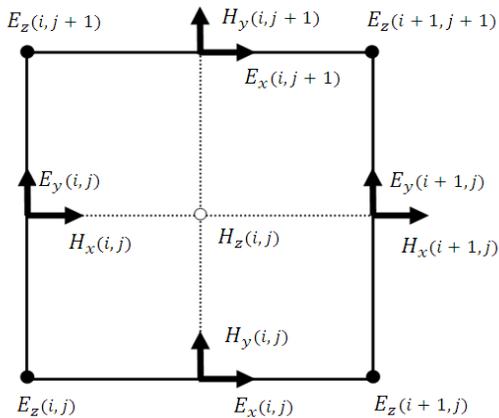
Di antara metode numerik tersebut, metode beda hingga lebih sederhana serta tak tidak kalah akurat dengan metode elemen hingga yang lebih rumit [10]. Zhang [11] misalnya, telah melakukan analisis serat kristal fotonik dengan metode beda hingga dengan menggabungkan *compact 2D finite difference time domain method (FDTD)* dan *compact 2D finite difference frequency method (FDFD)*. Dua metode ini merupakan bentuk sederhana algoritma Yee karena “hanya” menggunakan grid dua dimensi. Akan tetapi Zhang hanya sampai pada perhitungan indeks bias efektif pada satu panjang gelombang saja.

Penelitian ini akan melakukan lebih jauh yaitu menganalisa dispersi dari serat kristal fotonik. Di mana dilakukan perhitungan indeks bias panjang gelombang pada rentang 1200 nm hingga 1700 nm. Dari data-data tersebut kemudian dicari diferensial orde dua dari indeks bias efektif terhadap panjang gelombang. Diferensial orde dua ini dapat diperoleh menggunakan metode pencocokan kurva (*curve fitting*) yang cukup sederhana. Penelitian ini juga memperlihatkan bagaimana pengaruh variasi ukuran lubang udara terhadap dispersi.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Simulasi Compact 2D FDTD

Kane Yee [12] mengusulkan sebuah pendekatan numerik beda hingga untuk memecahkan Persamaan Maxwell pada struktur tiga dimensi. Prinsip algoritma Yee adalah diskretisasi medan listrik dan magnet dalam bentuk-bentuk sel tiga dimensi. Metode ini kemudian mengalami perkembangan dengan



Gambar 1. Unit sel dua dimensi

kemunculan metode *compact 2D finite difference time domain* (FDTD). Grid 3 dimensi “dikompres” dalam bentuk 2 dimensi[13]. Untuk aplikasi serat kristal fotonik, jika konstanta propagasi β sepanjang arah z eksis, maka operator diferensial $\partial/\partial z$ dapat digantikan dengan $-j\beta$ dalam Persamaan Maxwell diskret. Oleh karena itu permasalahan 3D dapat dipecahkan menggunakan mesh atau grid dua dimensi saja.

Persamaan medan dari diskretisasi Persamaan Maxwell dengan menggunakan FDTD yang berisi variabel riil[11],[13] adalah :

$$\{E, H\} = \{E_x, E_y, jE_z, jH_x, jH_y, H_z\} \exp(j\beta z) \quad (1)$$

Bentuk diskret dari tiap-tiap komponen di atas merujuk pada [13]. Dari *compact 2D FDTD* akan diperoleh nilai *eigenship* yang kemudian disubstitusikan ke *compact 2D FDFD*. Oleh karena itu komponen medan listrik yang dipakai adalah pada komponen medan listrik pada arah $-x$. Pada simulasi digunakan distribusi medan pada keadaan awal merujuk pada [11] yaitu:

$$E_x = \exp\left(-0.5 \times \left(\frac{r^2}{a^2}\right)\right) \quad (2)$$

dan

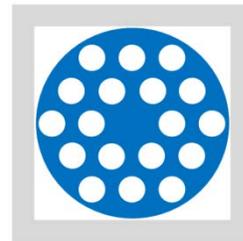
$$E_y = E_z = H_x = H_y = H_z = 0 \quad (3)$$

Di mana a adalah konstanta kisi dan r adalah jarak ke axis (sumbu $-x$) PCF. Transformasi Fourier medan dalam rentang frekuensi dinyatakan:

$$E_x(f) = \sum_{n=0}^N E_x(n\Delta t) \cdot \cos(2\pi f\Delta t \cdot n) - j \sum_{n=0}^N E_x(n\Delta t) \cdot \sin(2\pi f\Delta t \cdot n) \quad (4)$$

B. Simulasi Compact FDFD

Dalam domain frekuensi, algoritma Yee yang disederhanakan menjadi domain dua dimensi disebut metode *compact 2D finite difference frequency domain (FDFD)*. Pada aplikasi *compact 2D FDTD* untuk serat kristal fotonik, konstanta propagasi merupakan nilai eigen atau *eigenvalue* dari persamaan medan dalam bentuk matriks[11]



Gambar 2. Model serat kristal fotonik dengan $r = 2.5 \mu\text{m}$, $a = 6.75 \mu\text{m}$ dan tepi PML-nya

$$P \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Di mana

$$P_{xx} = -k_0^{-2} U_x \epsilon'_{rz}^{-1} V_y V_x U_y + (k_0^2 I + U_x \epsilon'_{rz}^{-1} V_x) (\epsilon'_{rx} + k_0^{-2} V_y U_y) \quad (6)$$

$$P_{xy} = U_x \epsilon'_{rz}^{-1} V_y (\epsilon'_{ry} + k_0^{-2} V_x U_x) - k_0^{-2} (k_0^2 I + U_x \epsilon'_{rz}^{-1} V_x) V_y \quad (7)$$

$$P_{yx} = U_y \epsilon'_{rz}^{-1} V_x (\epsilon'_{rx} + k_0^{-2} V_y U_y) - k_0^{-2} (k_0^2 I + U_y \epsilon'_{rz}^{-1} V_y) V_x \quad (8)$$

$$P_{yy} = -k_0^{-2} U_y \epsilon'_{rz}^{-1} V_x V_y U_x + (k_0^2 I + U_y \epsilon'_{rz}^{-1} V_y) (\epsilon'_{ry} + k_0^{-2} V_x U_x) \quad (9)$$

C. Menghitung Dispersi

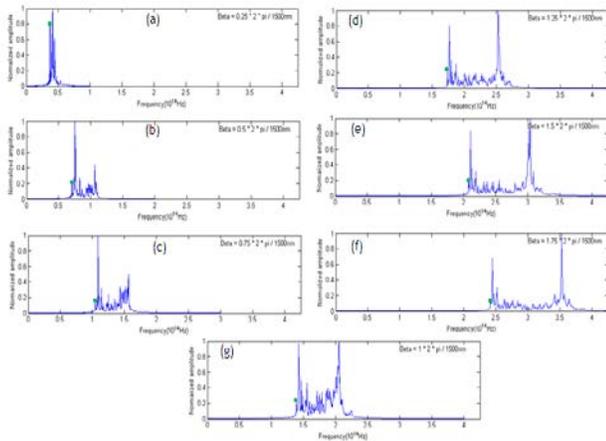
Konstanta propagasi *eigenvalue* yang diperoleh dari Bagian B kemudian digunakan untuk menghitung indeks bias efektif berdasarkan persamaan $n_{\text{eff}} = \beta/k$, di mana k adalah konstanta propagasi pada ruang hampa. Setelah n_{eff} didapat, akan diperoleh dispersi berdasarkan persamaan parameter dispersi D:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 [n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (7)$$

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Dispersi pada Serat Kristal Fotonik

Serat kristal fotonik yang digunakan adalah dengan parameter radius lubang udara $r = 2.5 \mu\text{m}$, konstanta kisi (jarak antar lubang udara) $a = 6.75 \mu\text{m}$. Jumlah lapis PML yang digunakan sebanyak 20 dengan indeks bias silika adalah 1.45. Gambar 3(a) merupakan grafik Persamaan 4 yaitu transformasi Fourier E_z ketika nilai β sebesar $1/4$ dari nilai konstanta propagasi di udara ($0.25 \times 2 \times \pi / 1500$). Sumbu ordinat merupakan amplitudo normalisasi, sedangkan sumbu axis menunjukkan frekuensi. Grafik tersebut terdiri dari puncak-puncak spektral di mana puncak spektral pertama menunjukkan lokasi *eigenfrequency* dari moda dasar serat kristal fotonik. Pada kajian serat kristal fotonik, moda dasar biasanya digunakan sebagai tinjauan utama. Puncak pertama ditandai dengan titik berwarna hijau. Proses yang sama dilakukan dengan koefisien β yang berbeda. Gambar 3(b-g) adalah grafik untuk koefisien 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, dan 1.75. Titik berwarna hijau merupakan puncak pertama.



Gambar 3. Frekuensi pada (a)-(g), $\beta = 0.25 \times 2 \times \pi / 1500 - 1.75 \times 2 \times \pi / 1500$

Tabel 1.

Konstanta propagasi pada sebelas panjang gelombang

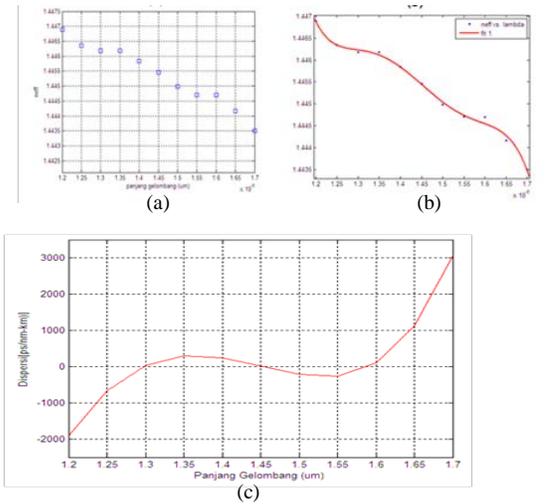
Lambda (nm)	Frekuensi ($\times 10^{14}$ Hz)	K.Propagasi ($\times 10^6 \text{ m}^{-1}$)
1200	2.4983	7.581685
1250	2.3983	7.274182
1300	2.3061	6.993746
1350	2.2207	6.735102
1400	2.1414	6.487389
1450	2.0675	6.263991
1500	1.9986	6.055654
1550	1.9341	5.857456
1600	1.8737	5.668874
1650	1.8169	5.499679
1700	1.7635	5.333065

Tabel 2.

Eigenvalue dan indeks bias efektif pada sebelas panjang gelombang

λ (nm)	f ($\times 10^{14}$ Hz)	β eigenvalue ($\times 10^6$)	Indeks bias efektif
1200	2.4983	7.57591643346528	1.446893458604545
		7.57590928379996	1.446892093119053
1250	2.3983	7.27019089487695	1.446358522676696
		7.27016814939019	1.446353997605883
1300	2.3061	6.98970595537303	1.446180129623421
		6.98968212576641	1.446175199243830
1350	2.2207	6.73082795702588	1.446180129623421
		6.73080500999729	1.446175199243831
1400	2.1414	6.48892267624152	1.445841766970900
		6.48893395102201	1.445844279182767
1450	2.0675	6.26351871120086	1.445461447852482
		6.26350690209163	1.445458722609227
1500	1.9986	6.05273022371176	1.444982901458162
		6.05271878443419	1.444980170531806
1550	1.9341	5.85638411677819	1.444712345286675
		5.85635898348241	1.444706145149873
1600	1.8737	5.67334776524859	1.444706145149874
		5.67337211312887	1.444712345286675
1650	1.8169	5.49936457181605	1.444164241523799
		5.49934560836514	1.444159261614330
1700	1.7635	5.33518808704822	1.443506645843822
		5.33517946531208	1.443504313117549

Untuk mendapatkan nilai konstanta propagasi sebenarnya, maka digunakan metode *least square method*. Dengan cara ini, didapatkan *fitting curve* dan konstanta propagasi untuk 11 panjang gelombang seperti diperlihatkan oleh Tabel 1.



Gambar 4. (a) Plot n_{eff} vs λ , (b) pendekatan kurva, (c) plot dispersi

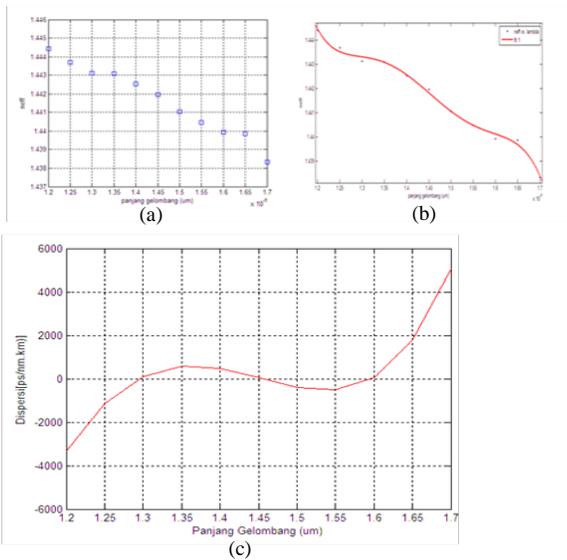
Nilai konstanta propagasi Tabel 1. disebut β -*shif*. Kuadrat β -*shif* dinamakan *eigenshift*. Nilai ini digunakan untuk mendapatkan *eigenvalue* dari Persamaan (5). Tabel 2. menunjukkan β -*eigenvalue* dan indeks bias efektif untuk 11 panjang gelombang. Dua nilai β *eigenvalue* yang diperlihatkan pada Tabel 2. merupakan eror perhitungan.

Diferensial orde dua Persamaan (7) hanya dapat diperoleh dengan menggunakan metode pencocokan kurva (*curve fitting*). Di mana nilai-nilai indeks bias tersebut tersebut didekati dengan sebuah fungsi kontinu polinomial. Setelah fungsi polinomial tersebut diperoleh, maka didapatkan diferensial orde duanya. Karena rata-rata perbedaan antara dua n_{eff} pada Tabel 2. setelah lima angka di belakang koma, maka nilai n_{eff} yang diplot grafik juga sampai lima angka di belakang koma. Gambar 4(a) menunjukkan plot grafik n_{eff} vs λ . Selanjutnya dibuat *pencocokan kurva* dari Gambar 4(a) dengan *tool* bernama “Curve Fitting Tool” pada software Matlab. Dengan *tool* ini, pencocokan kurva dapat diperoleh seperti pada Gambar 4(b).

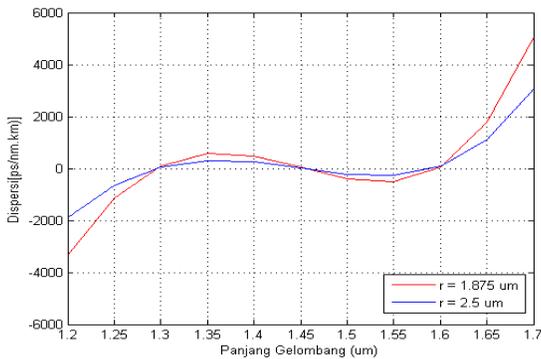
Dari pencocokan kurva tersebut kemudian diperoleh diferensial orde dua n_{eff} terhadap panjang gelombang ($d^2 n_{\text{eff}} / d\lambda^2$). Substitusi nilai ini ke dalam Persamaan (7) menghasilkan plot dispersi pada Gambar 4(c). Rentang dispersi pada Gambar 4(c) adalah dari -1897.7 ps/nm.km hingga 3.0676 ps/nm.km. Pada $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, dispersi paling mendekati nilai nol yakni sebesar 17.9 ps/nm.km.

B. Pengaruh Perubahan Radius Lubang Udara

Untuk melihat pengaruh ukuran lubang udara terhadap dispersi, maka perhitungan dispersi dilakukan untuk serat kristal fotonik Gambar 2 setelah radius lubang udara diubah, dengan konstanta kisi yang sama. Jika radius Gambar 2 adalah sebesar $r = 2.5 \mu\text{m}$, maka radius lubang udara dicituk menjadi $r = 1.875 \mu\text{m}$ atau tiga perempat dari ukuran semula. Dengan langkah-langkah yang sama seperti sebelumnya—mencari *eigenshift*, menghitung β -*eigenvalue*, dan plot indeks bias efektif—maka diperoleh plot grafik n_{eff} vs λ pada Gambar 5(a) dan pencocokan kurvanya pada Gambar 5(b).



Gambar 5. (a) Plot n_{eff} vs λ , (b) pendekatan kurva, (c) plot dispersi.

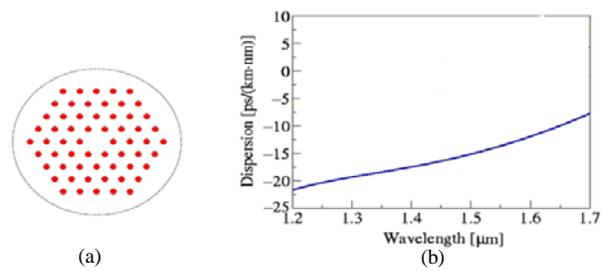


Gambar 6. Dispersi dengan radius lubang udara berbeda

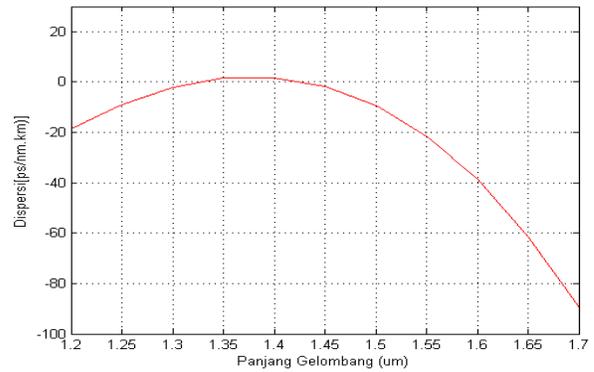
Gambar 5(c) memperlihatkan plot dispersi dari serat kristal fotonik akibat pengaruh perubahan radius lubang udara. Diperoleh dispersi berada pada rentang -3.3297 ps/nm.km hingga 5.0724 ps/nm.km. Dispersi terkecil berada pada panjang gelombang 1450 nm yakni 43.8 ps/nm.km sedangkan pada panjang gelombang 1550 nm sebesar -514.5 ps/nm.km.

Gambar 6 memperlihatkan secara lebih jelas perbandingan antara serat kristal fotonik sebelum dan sesudah radius lubang udaranya diubah.

Kurva berwarna biru adalah dispersi serat kristal fotonik mula-mula dan kurva berwarna merah adalah dispersi hasil perubahan radius lubang udara. Dari segi bentuk kedua kurva tersebut mirip. Akan tetapi kurva warna merah memiliki rentang yang lebih lebar yaitu dari -3.3297 ps/nm.km hingga 5.0724 ps/nm.km. Perbedaan ini terjadi akibat perubahan indeks bias efektif seperti bisa dilihat pada Gambar 4(a) dan Gambar 5(a). Radius lubang udara mempengaruhi indeks bias efektif karena menentukan pemanduan cahaya pada inti. Dari hasil terlihat bahwa indeks bias efektif pada radius lubang udara mula-mula lebih “efektif” karena semakin dekat dengan indeks bias silika. Meski demikian, secara matematis dispersi adalah diferensial orde dua, yang bermakna sebagai laju perubahan dari sebuah fungsi. Bisa saja dua buah fungsi memiliki laju perubahan yang sama meskipun rentang fungsi itu berbeda. Sebagai con



Gambar 7. (a) Model serat kristal fotonik dan (b) Plot disperse [3]



Gambar 8. Dispersi vs panjang gelombang

toh, setiap garis lurus memiliki diferensial orde yang sama yakni nol. Bisa dilihat dari Gambar 6 bahwa dispersi serat kristal fotonik mula-mula lebih bagus karena memiliki rentang yang lebih kecil. Selain itu juga memiliki lekuk yang lebih rata pada rentang $1.3 \mu m$ - $1.6 \mu m$. Ini bermakna bahwa laju perubahan indeks bias efektif pada rentang tersebut lebih kecil dibanding sesudah mengalami perubahan ukuran lubang udara.

C. Pengaruh Akibat Perubahan Radius Lubang Udara dan Konstanta Kisi

Untuk melihat pengaruh radius lubang udara dan konstanta kisi maka digunakan serat kristal fotonik model Saitoh dan Koshiba[3]. Di mana konstanta kisi sebesar $2.0 \mu m$ dan diameter lubang udaranya sebesar $0.5 \mu m$. Koshiba dan Saitoh menggunakan metode numerik *elemen hingga* dengan syarat batas PML. Dispersi yang diperoleh adalah seperti pada Gambar 7 (b).

Berbeda dengan hasil sebelumnya yang mana tidak memasukkan pengaruh dispersi material, maka sebagai pembanding sekaligus validasi, pada simulasi ini pengaruh dispersi material berdasarkan Persamaan Sellmeier[14] diikutsertakan pula. Dengan proses menghitung dispersi yang sama seperti sebelumnya, dispersi pada konfigurasi ketiga ini diperlihatkan Gambar 8.

Dari Gambar 8 terlihat bahwa rentang dispersi lebih lebar dibandingkan dengan hasil Saitoh dkk. Gambar 7(b) menunjukkan rentang dispersi adalah pada kisaran -22 ps/km.nm hingga -7.5 ps/km.nm. Untuk rentang panjang gelombang yang sama, yaitu 1.2 - $1.7 \mu m$, maka dispersi pada Gambar 8 berada pada rentang -89.6849 ps/km.nm hingga 1.8653 ps/km.nm. Meski demikian, hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode *compact* 2D FDTD dan FDFD menunjukkan adanya dispersi pada daerah sekitar nol atau biasa dis-

ebut *ultraflattened dispersion*. Bisa dilihat bahwa pada rentang 1.3-1.45 μm terdapat kecenderungan kurva mendekati nol yaitu dari -2.2496 ps/km.nm hingga 1.8653 ps/km.nm.

Walau berbeda dalam hal area dispersi, akan tetapi terlihat bahwa dengan metode numerik yang berbeda, serat kristal fotonik pada Gambar 7(a) memiliki kecenderungan yang lebih baik untuk diaplikasikan pada sistem komunikasi optis. Tantangan penggunaan metode numerik pada serat kristal fotonik adalah bagaimana menunjukkan konfigurasi serat kristal fotonik terbaik guna mendapatkan karakteristik dispersinya yang mendekati nol. Ini akan memberi keyakinan bagi kalangan yang ingin membuat prototipnya bahwa konfigurasi tersebut adalah yang terbaik. Sebab bagaimanapun hasil eksperimen adalah pembuktian sebenarnya apakah benar dispersi hasil teoritis sesuai dengan kenyataan.

Jika hasil Penelitian ini berbeda dengan Saitoh dan Koshiha[3] dan diasumsikan bahwa metode yang mereka gunakan adalah yang paling mendekati eksperimen, maka berikut adalah beberapa penjelasan mengapa hasil yang didapat tidak sama.

Pertama, pada Penelitian ini jumlah ring lubang udara adalah tiga saja. Padahal jumlah ring lubang udara sangat berpengaruh pada pemanduan cahaya pada bagian inti[3]. Ini terutama berlaku pada serat kristal fotonik dengan ukuran lubang udara yang kecil. *Kedua*, metode elemen hingga bagaimanapun adalah metode numerik yang lebih baik dibandingkan metode beda hingga[10]. Pada metode elemen hingga, bentuk grid-grid didekati menggunakan fungsi interpolasi. Semakin baik interpolasinya, maka semakin akurat hasil yang didapat. Serat kristal fotonik dengan struktur lengkung lebih akurat didekati dengan interpolasi. Berbeda halnya dengan metode beda hingga yang mana grid-grid diasumsikan berbentuk persegi. *Ketiga*, kelemahan metode *compact* FDTD. Metode *compact* FDTD mengharuskan adanya asumsi bahwa nilai konstanta propagasi eksis. Namun permasalahan yang timbul adalah ketika mencari konstanta propagasi yang sebenarnya yang mengharuskan adanya medan eksitasi yang dikonversi ke dalam transformasi Fourier. Medan eksitasi ini akan menghasilkan spektrum di mana tiap puncak menyatakan *eigenfrequency*, dengan puncak pertama menandakan moda dasar. Akan tetapi, dalam mencari puncak pertama ini akan menghadapi kendala berupa berlakunya prinsip ketidakpastian pada transformasi Fourier[15] yang membutuhkan waktu lama untuk mengatasi "ketajaman spektral".

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan, perbandingan, dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan dari Penelitian ini adalah:

1. Pada model serat kristal fotonik dengan konstanta kisi sebesar 6.75 μm dan jari-jari lubang udara 2.5 μm didapati bahwa dispersi terendah berada pada panjang gelombang 1450 nm yakni sebesar 17.9 ps/nm.km. Sedangkan pada panjang gelombang 1550 nm, yang biasa digunakan pada komunikasi optis, diperoleh dispersi sebesar -262.4 ps/nm.km.
2. Terjadi perubahan dispersi akibat variasi ukuran lubang udara. Jika radius lubang udara dicituk menjadi tiga

perempatnya yaitu dari 2.5 μm menjadi 1.875 μm , maka dispersi pada panjang gelombang 1450 nm menjadi 43.8 ps/nm.km dan pada panjang gelombang 1550 nm menjadi -514.5 ps/nm.km.

3. Serat kristal fotonik dengan radius lubang udara 0.25 μm dan konstanta kisi 2.0 μm cocok diaplikasikan dalam sistem komunikasi optis. Pada rentang panjang gelombang 1300-1450 nm terdapat *ultraflattened dispersion* yaitu dari -2.2496 ps/nm.km hingga 1.8653 ps/nm.km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada Mr. Taining Zhang dari Universitas Nankai China atas kesediaan berdiskusi di dunia maya dan bantuan *software*-nya. Juga kepada dosen pembimbing yang dengan setia memberikan bimbingan kepada Penulis sehingga penelitian ini bisa selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J.C. Knight, "Photonic crystal fibres". *Nature* 424, (2003) 847-851
- [2] M.A.Galle, "Single-arm 3-wave interferometer for measuring dispersion in short lengths of fiber". *Master of Applied Science Thesis*. University of Toronto, (2007).
- [3] K. Saitoh, M. Koshiha, T. Hasegawa, dan E. Sasaoka, "Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion". *Optics Express* 11, (2003) 843-852
- [4] J.C. Knight, T.A. Birks, P.S.J. Russel, D.M. Atkin, "All-silica Single Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding". *Optics Letters* 21, (1996) 1547-1549
- [5] A. Argyros, "Ring structures in microstructured polymer optical fibers", *Optics Express* 9, (2001) 813-820.
- [6] A. Bouk, A. Cucinotta, F. Poli, dan S. Selleri, "Dispersion properties of square-lattice photonic crystal fibers." *Optics Express*, Vol. 12 No. 5, (2004) 941-946.
- [7] J.S. Chiang dan T.L. Wu, "Analysis of Propagation Characteristics For an Octagonal Photonic Crystal Fiber (O-PCF)". *Optics Communications*, 256 (2006) 170-176.
- [8] S.M.A. Razzak, Y. Namihira, F. Begum, S. Kaijage, N.H. Hai, dan N. Zou, "Design of a Decagonal Photonic Crystal Fiber for Ultra-Flattened Chromatic Dispersion". *IEICE Trans. Electron* E90 (2007) 2141-2144.
- [9] Novotny, *Principle of Nano-Optics*. Cambridge: University Press, (2007).
- [10] C.P. Yu dan H.C. Chang, "Application of the finite difference mode solution method to photonic crystal structures". *Optical and Quantum Electronics* 36, (2004) 145-163.
- [11] T. Zhang, "Photonic crystal fiber modes analysis using finite difference time domain method and finite difference frequency domain method", (2009).
- [12] K. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media". *IEEE Transactions On Antennas And Propagation* AP-14 (1966) 302-307.
- [13] L. Shuqin, G.R. Zhi, dan J. Shuisheng, "An efficient algorithm for modeling photonic crystal fibers". *Optical Fiber Technology* 1, (2005) 34-45
- [14] I.H. Malitson, "Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica". *Journal of the Optical Society of America* 55: (1965) 1205-1209.
- [15] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, dan R.D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton: University Press, (2008).