

PERANCANGAN *DISPERSION FLATTENED FIBER (DFF)* DENGAN DISPERSI RENDAH UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANSI KOMUNIKASI DATA

Johan Hadi Pranoto, Mamat Rokhmat¹⁾, A. Hambali²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Fisika, Institut Teknologi Telkom

²⁾Program Studi Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Telkom

Jl. Telekomunikasi No.1, Bandung

E-mail : mrm@ittelkom.ac.id

Abstrak

Sistem Komunikasi Serat Optik memungkinkan transmisi informasi dengan kapasitas data yang besar dan waktu yang cepat. Salah satu kendala pentransmisi ini dipengaruhi oleh dispersi. Berbagai metode digunakan dalam perancangan untuk mengurangi dispersi sehingga didapatkan optimalisasi transmisi, salah satunya adalah dengan perancangan Dispersion Flattened Fiber (DFF). Dispersion Flattened Fiber merupakan serat optik yang telah dimodifikasi sehingga memungkinkan dispersi yang terjadi mendekati nol di dua atau tiga panjang gelombang yang berbeda dan sangat mendekati nol diantaranya. Perancangan DFF ini dilakukan melalui cladding serat optik yang dibuat berlapis-lapis dan dilakukan pada serat optik Single-Mode Step-Index (SM/SI). Cladding yang dibuat sampai dengan tiga lapis (Triple-Cladding).

Keywords: DFF, Single Mode, Triple Cladding, Dispersi

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sistem komunikasi yang handal dari segi besarnya kapasitas, sedikitnya pengaruh redaman, dan kecepatan pengiriman semakin hari semakin meningkat. Penggunaan serat optik merupakan suatu kewajiban dalam sistem komunikasi yang memungkinkan tercapainya ketiga aspek tersebut. Namun, proses pengiriman informasi melalui serat optik sangat dipengaruhi oleh distorsi dan dispersi sinyal yang akan mengakibatkan sinyal yang diterima akan berbeda dari sinyal asal [Agrawal, 1989].

Berbagai metode telah ditemukan dan digunakan dalam perancangan guna mengurangi dispersi dan distorsi sehingga didapatkan optimalisasi proses transmisi dalam serat. Salah satunya adalah dengan serat optik *Dispersion Flattened Fiber (DFF)* [Barake, 1997]. *DFF* merupakan serat optik yang telah dimodifikasi sehingga memungkinkan dispersi yang terjadi mendekati nol di dua atau tiga panjang gelombang yang berbeda. Perancangan ini dilakukan dengan memanipulasi profil index bias dan geometri dari serat optik itu sendiri [Hattori, 1998].

Dalam paper ini perancangan dibuat agar didapat dispersi yang minimum yaitu kurang dari 1 (ps/nm.km) dalam panjang gelombang 1,31 μ m–1,67 μ m.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem komunikasi pada dasarnya berfungsi untuk menyalurkan informasi dari sumber informasi melalui media transmisi ke suatu tujuan. Sebagai media transmisi, serat optik menjadi alternatif utama untuk komunikasi *wired* karena kemampuannya untuk menyalurkan informasi dengan kapasitas yang besar dan mempunyai kehandalan yang cukup tinggi. Kapasitas transmisinya mencapai 25 Thz sehingga serat optik dapat diaplikasikan untuk pentransmisi berbagai layanan informasi yang beragam dan memerlukan *bandwidth* yang cukup tinggi [Hanselman, 2000].

Sistem komunikasi serat optik mempergunakan cahaya sebagai pembawa informasi. Hal ini sangat berbeda dengan sistem komunikasi radio, seluler, ataupun satelit yang mempergunakan gelombang elektromagnetik. Serat optik yang biasa digunakan untuk pentransmisi informasi seperti halnya kabel *coaxial* ataupun tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibanding kedua media transmisi tersebut. Kelebihan tersebut antara lain Redaman kecil yaitu sekitar 0,2 dB/km, Bandwidth lebar, tidak ada interferensi, dan lain-lain [Keisser, 2000].

Proses pentransmisi informasi dimulai dari perubahan informasi yang berupa informasi elektrik menjadi gelombang cahaya. Perubahan ini bersamaan dengan proses modulasi pada bagian *transmitter*, dan sebaliknya di *receiver* akan dikonversi kembali ke bentuk elektrik.

Serat Optik terdiri atas tiga bagian yaitu: inti (*core*) yang berfungsi sebagai penyalur gelombang, selimut (*cladding*) yang mengelilingi inti dan berfungsi untuk memperkecil rugi-rugi permukaan dan mengarahkan gelombang cahaya, dan jaket (*coating*) yang merupakan pelindung lapisan inti dan *cladding* dari pengaruh absorpsi, gesekan, dan goresan. Indeks bias *cladding* selalu dibuat lebih kecil daripada indeks bias *cor*, sehingga cahaya yang ditransmisikan tidak diradiasikan keluar.

Gelombang cahaya sebagai informasi pembawa mengalami redaman dan dispersi pada penjalarnya dalam serat optik. Oleh karena itu dibutuhkan jenis serat optik yang mempunyai dispersi kecil serta redaman

relatif kecil, dan pemakaian *repeater*/penguat yang berfungsi memperkuat gelombang cahaya yang teredam [Senior, 1992].

Informasi yang ditransmisikan melalui serat optik dapat mengalami kerusakan, salah satunya disebabkan oleh dispersi. Dispersi merupakan pelebaran pulsa per satuan panjang yang dialami gelombang cahaya dalam perambatannya. Pulsa yang melebar ini akan saling menumpuk, sehingga menjadi tidak bisa dibedakan pada *input* penerima. Efek ini dikenal dengan *Inter Symbol Interference* (ISI). Dispersi inilah yang akan mebatasi lebar pita (*Bandwidth*) maksimum yang dapat dicapai agar masing-masing simbol masih dapat dibedakan.

DFP merupakan salah satu jenis serat optik yang telah dimodifikasi dispersinya (*Dispersion-Altered Fibers*), sehingga memungkinkan dispersi yang terjadi mendekati nol di dua atau tiga panjang gelombang yang berbeda, dan sangat mendekati nol diantaranya. Modifikasi ini didapat dengan memanipulasi indeks profil dari seratnya [7]. Dispersi yang flat ini muncul karena bagian yang hilang dari dispersi pandu gelombang oleh dispersi material diantara panjang gelombang operasi. Beberapa aplikasi secara praktis, antara lain pada sistem *Wavelength Division Multiplexing* (WDM).

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dipakai adalah sebagai berikut. Langkah pertama dengan memodelkan secara matematis geometri dari serat optik dalam bentuk persamaan diferensial. Langkah kedua adalah mencari solusi persamaan tersebut dengan menggunakan metode numerik, langkah terakhir adalah membuat program pencarian solusi dan simulasi menggunakan Matlab. Berikut adalah penjabaran dari langkah-langkah tersebut.

Serat optik *multiple cladding* dibuat untuk memperoleh serat optik dengan slope dispersi yang optimum. Pada bagian ini, analisis umum perancangan serat optik *multiple cladding* dikhususkan pada struktur dielektrik silindris empat *layer* yaitu satu core dan tiga cladding. Persamaan khusus dibuat secara umum untuk diaplikasikan pada berbagai kemungkinan serat optik triple-clad dengan profil step-index. Persamaan ini juga bisa digunakan untuk analisis serat optik *double-clad* ataupun *single-clad*.

Serat optik dengan empat *layer* yaitu satu core dan tiga cladding atau bisa disebut dengan cukup serat optik triple-clad mempunyai struktur silindris. Serat optik triple-clad ini diasumsikan lossless, linier, isotopis, homogen, dan nonmagnetik. Adapun untuk keperluan analisa medan digunakan system koordinat silindris (r, φ, z) dengan sumbu z sebagai sumbu dari struktur dielektrik serat.

Empat *layer* yang dirancang masing-masing memiliki jari-jari. r_i merupakan index bias *layer* ke- i . Adapun $i = 1$ merupakan core dari serat optik, dan $i = 2, 3$, dan 4 merupakan *layer cladding*. *Layer* terluar ($i = 4$) dari serat diasumsikan mempunyai jari-jari tak terbatas radial keluar.

Perambatan cahaya dalam DFP dikarakterisasi oleh solusi gelombang TEM skalar yang memenuhi

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \bar{k}^2 \psi = 0$$

dengan $\bar{k}^2 = k_0^2 n^2 - \beta^2$.

Solusi persamaan di atas memenuhi persamaan karakteristik

$$\xi_2 \frac{\eta_{10} - \eta_9}{\eta_{10} - \eta_8} = \frac{(\eta_1 - \eta_3)(\eta_4 - \eta_7) - \xi_1(\eta_1 - \eta_2)(\eta_5 - \eta_7)}{(\eta_1 - \eta_3)(\eta_4 - \eta_6) - \xi_1(\eta_1 - \eta_2)(\eta_5 - \eta_6)}$$

dengan

$$\eta_8 = \frac{\bar{X}_3 Z' n_3(\bar{X}_3)}{Z n_3(\bar{X}_3)} \quad \eta_9 = \frac{\bar{X}_3 \bar{Z}' n_3(\bar{X}_3)}{\bar{Z} n_3(\bar{X}_3)}$$

$$\eta_{10} = \frac{X_4 Z' n_4(X_4)}{Z n_4(X_4)} \quad \xi_1 = \frac{\bar{Z}_{n_2}(\bar{X}_2) Z n_2(X_2)}{\bar{Z}_{n_2}(X_2) Z n_2(\bar{X}_2)}$$

$$\xi_2 = \frac{\bar{Z}_{n_3}(\bar{X}_3) Z n_3(X_3)}{\bar{Z}_{n_3}(X_3) Z n_3(\bar{X}_3)}$$

Persamaan karakteristik merupakan fungsi dari parameter-parameter serat optik yang meliputi jari-jari dari masing-masing *layer* pada serat optik beserta indeks biasnya, konstanta azimuth v , panjang gelombang λ , dan konstanta propagasi β . Sehingga persamaan karakteristik bisa diekspresikan seperti :

$$f(r_i, n_i; i = 1, \dots, 4, v, \lambda, \beta) = 0 \quad (1)$$

Pemberian parameter dari serat dan beberapa nilai v pada persamaan (1) menjadikan persamaan tersebut hanya mengandung variabel β dan λ . Persamaan ini harus diselesaikan secara numerikal yaitu dengan metode *Bisection*. Dengan memasukan *range* variabel λ maka akan didapat beberapa nilai β , yang

mempresentasikan modus pandu gelombang. Modus-modus ini bisa dipresentasikan dengan LP_{vm} . Dimana LP menandakan polarisasi linear. Sedangkan $m \geq 1$ adalah orde dari modus yang biasa menandakan nilai medan maksimum/minimum pada arah radial. Disisi lain, integer $v \geq 0$ menandakan medan maksimum/minimum pada arah azimuth.

Pada serat optik multi-clad silindris berlaku $n_4 < \beta < n_{\max}$. Dimana n_4 merupakan indeks bias pada layer terluar atau layer cladding ketiga dan n_{\max} merupakan indeks bias maksimum. Kondisi cutoff diperoleh ketika $\bar{\beta} = n_4$ atau $k_4 = 0$. Dari syarat tersebut, maka kondisi cutt off bisa diperoleh dari persamaan karakteristik dimana nilai limit $k_4 \rightarrow 0$. Sejak η_{10} hanyalah bentuk dari fungsi k_4 .

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Properti Transmisi

Properti transmisi yang akan dikaji meliputi konstanta propagasi ternormalisasi, karakteristik dispersi, panjang gelombang cutoff, dan distribusi medan. Hasil numerik menggambarkan variasi konstanta propagasi dan dispersi terhadap panjang gelombang diperlihatkan untuk mode orde yang lebih rendah. Juga diperlihatkan plot dari distribusi medan radial pada $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

Program komputer dibuat dan dikembangkan untuk mendapatkan solusi numerik dari persamaan karakteristik. Inputan pada program ini meliputi komposisi material (n) dan jari-jari dari tiap lapisan (r), panjang gelombang (λ), serta mode(v). Konstanta propagasi dihitung sebagai fungsi panjang gelombang menggunakan teknik pencarian akar persamaan differensial. Konstanta propagasi ternormalisasi (b) dirumuskan dengan:

$$b = \frac{\bar{\beta}^2 - n_4^2}{n_{\max}^2 - n_4^2} \quad (2)$$

$$\text{dengan : } \bar{\beta} = \frac{\beta}{k_0} \quad (3)$$

nilai beta (β) sendiri harus bekisar $n_4 < \beta < n_{\max}$, dan nilai konstanta propagasi ternormalisasi (b) selalu bernilai di antara 0 dan 1, terlepas dari bentuk profil. Perhitungan persamaan karakteristik dapat dituliskan sebagai

$$f(\lambda, b) = f_1(\lambda, b) - f_2(\lambda, b) = 0 \quad (4)$$

dengan f_1 dan f_2 merupakan bagian sebelah kiri dan sebelah kanan dari persamaan karakteristik (1).

Perancangan DFF Triple-Cladding ini dilakukan dengan mengubah-ubah nilai jari-jari core (r_1), jari-jari cladding 1 (r_2), jari-jari cladding 2 (r_3), index bias core (n_1), index bias cladding 1 (n_2), index bias cladding 2 (n_3), dan index bias cladding 3 (n_4). Pada Tabel I ditampilkan 3 fiber yang memenuhi spesifikasi yang diharapkan, yaitu fiber DFF dengan dispersi rendah ($< 1 \text{ ps/nm.km}$) untuk panjang gelombang $1,32 \mu\text{m} < \lambda < 1,66 \mu\text{m}$.

Pemilihan bahan dan geometri jari-jari di tiap layer pada serat optik triple-cladding SM/SI sangatlah mempengaruhi hasil dispersi yang didapatkan. Dari tujuh kali pemanipulasian yang dilakukan yaitu pada nilai jari-jari core (r_1), jari-jari cladding 1 (r_2), jari-jari cladding 2 (r_3), index bias core (n_1), index bias cladding 1 (n_2), index bias cladding 2 (n_3), dan index bias cladding 3 (n_4) didapatkan bahwa fiber a, n, dan o merupakan fiber yang sangat mendekati dari fiber yang menjadi tujuan akhir pada penelitian ini. Fiber a, sebagai contoh, mempunyai profil seperti pada gambar 3.2e yaitu $n_2 < n_3 < n_4 < n_1$. Fiber a, n, dan o ini mempunyai total dispersi kurang dari 1 ps/nm.km pada panjang gelombang antara $1,32 \mu\text{m} < \lambda < 1,66 \mu\text{m}$. Selain itu, dispersi pada panjang gelombang $1,55 \mu\text{m}$ sama dengan $0,08434 \text{ ps/nm.km}$. Hasil ini dirasa cukup baik untuk mengakomodasi transmisi informasi dengan kapasitas besar dan dispersi yang kecil.

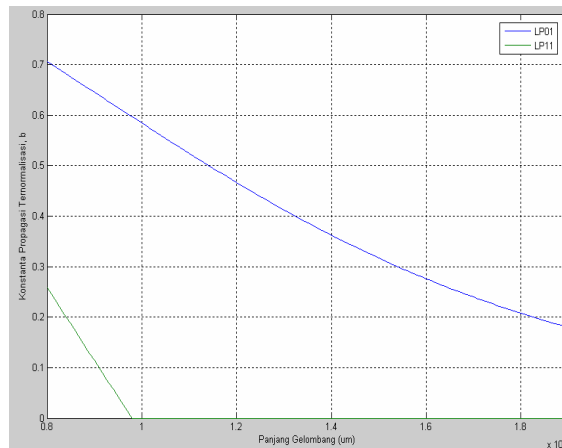
Tabel I. Fiber hasil perancangan yang memenuhi spesifikasi yang diharapkan

Jenis Fiber	Core	Cladding 1	Cladding 2	Cladding 3
Fiber a	9.1 m/o P ₂ O ₅ , 90.9 m/o SiO ₂ $r_1 = 2.9 \mu\text{m}$	13.5 m/o B ₂ O ₃ , 86.5 m/o SiO ₂ $r_2 = 3.4 \mu\text{m}$	Quenched m/o SiO ₂ $r_3 = 4.5 \mu\text{m}$	4.1 m/o GeO ₂ , 95.9 m/o SiO ₂ $r_4 = \infty$
Fiber n	9.1 m/o P ₂ O ₅ , 90.9 m/o SiO ₂ $r_1 = 2.9 \mu\text{m}$	13.5 m/o B ₂ O ₃ , 86.5 m/o SiO ₂ $r_2 = 3.4 \mu\text{m}$	3.3 m/o GeO ₂ , 9.2 m/o B ₂ O ₃ , 87.5 m/o SiO ₂ $r_3 = 4.5 \mu\text{m}$	3.1 m/o GeO ₂ , 96.9 m/o SiO ₂ $r_4 = \infty$
Fiber o	9.1 m/o P ₂ O ₅ , 90.9 m/o SiO ₂ $r_1 = 2.9 \mu\text{m}$	13.5 m/o B ₂ O ₃ , 86.5 m/o SiO ₂ $r_2 = 3.4 \mu\text{m}$	3.0 m/o B ₂ O ₃ , 97.0 m/o SiO ₂ $r_3 = 4.5 \mu\text{m}$	4.03 m/o GeO ₂ , 9.7 m/o B ₂ O ₃ , 86.27 m/o SiO ₂ $r_4 = \infty$

Nilai dispersi kurang dari 1 ps/nm.km pada panjang gelombang antara $1,32 \mu\text{m} < \lambda < 1,66 \mu\text{m}$, menyimpang sedikit pada tujuan akhir penelitian ini yaitu dispersi kurang dari 1 ps/nm.km pada panjang gelombang $1,31 \mu\text{m} < \lambda < 1,67 \mu\text{m}$. Hal ini dikarenakan karena tingkat ketelitian sebagai akibat penggunaan metode numerik dalam penyelesaian persamaan umum karakteristik untuk mendapatkan serat optic *triple-cladding*.

Konstanta Propagasi Ternormalisasi

Gambar 1 menggambarkan konstanta propagasi ternormalisasi b sebagai fungsi panjang gelombang untuk dua orde mode terendah yaitu LP₀₁ dan LP₁₁ untuk fiber a sebagai contoh. Dari gambar 4.8 juga dapat dilihat bahwa cutoff untuk mode dasar LP₀₁ terjadi pada panjang gelombang $\lambda > 2\mu\text{m}$, sedangkan cutoff untuk mode LP₁₁ terjadi pada $0,96\mu\text{m}$. Semua mode lainnya mempunyai frekuensi cutoff lebih kecil dari mode LP₁₁. Karenanya, fiber a bermode tunggal pada daerah panjang gelombang $1,0\mu\text{m} < \lambda < 2,0\mu\text{m}$.



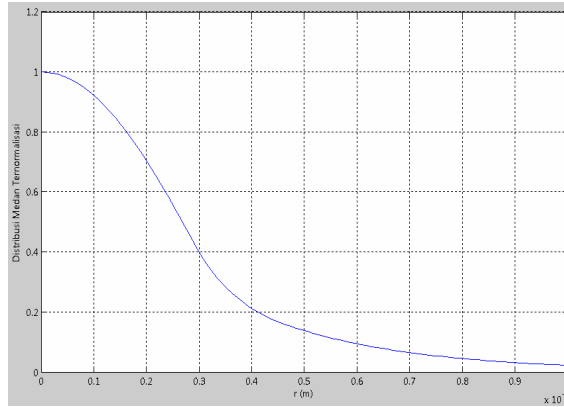
Gambar 1. Konstanta propagasi ternormalisasi fiber a

Distribusi Medan

Distribusi medan secara radial dihitung secara spesifik pada panjang gelombang tertentu. Hasil medan maksimum kemudian dinormalisasikan dan diplot terhadap jari-jari r . Hasil plot distribusi medan secara radial pada panjang gelombang $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ untuk fiber a dapat dilihat pada Gambar 2.

Medan pada serat optik maksimum pada *layer* yang mempunyai index bias tertinggi. Pada fiber a *layer core* mempunyai index bias tertinggi sehingga pada *layer* ini mempunyai distribusi medan ternormalisasi maksimum. Informasi pada distribusi medan ternormalisasi dibutuhkan untuk mencari perkiraan ketebalan pada *layer* terluar atau jari-jari *cladding* 3 (r_4). *Cladding* ini dianggap mempunyai jari-jari tak terhingga pada model yang digunakan untuk menganalisa serat optik *triple-cladding*. Namun pada manufaktur secara nyata, *cladding* 3 harus mempunyai jari-jari yang terbatas. Untuk mengestimasi ketebalan dari *cladding* 3 ini, medan maksimum yang muncul pada *cladding* ini harus mempunyai kriteria. Kriteria ini, sebagai contoh, harus memenuhi bahwa

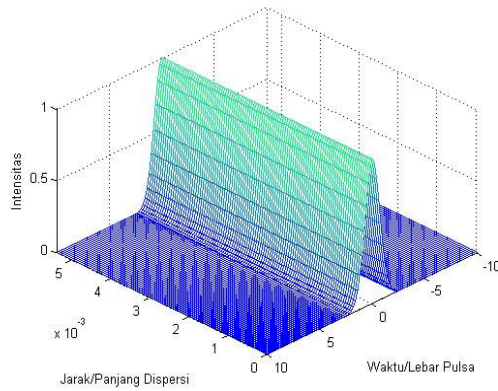
distribusi medan pada cladding 3 tidak melebihi 10^{-4} % dari medan maksimum yang muncul pada *core*. Berdasarkan pada kriteria ini didapatkan bahwa jari-jari dari cladding 3 sama dengan $26,77 \mu\text{m}$ yaitu dengan besar medan ternormalisasi $0,8572 (10^{-4} \%$ dari 1).



Gambar 2. Distribusi medan ternormalisasi untuk fiber a pada $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Propagasi Pulsa

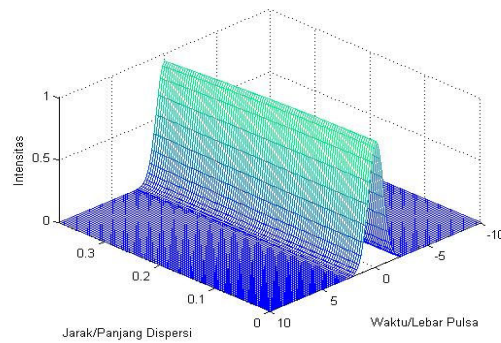
Efek dispersi sangat berpengaruh pada perambatan pulsa. Pada *Fiber a* mempunyai dispersi total sebesar $0,08434 \text{ ps/nm.km}$ pada panjang gelombang $1,55 \mu\text{m}$. Apabila diberikan lebar pulsa awal sebesar 1.10^{-11} s maka pada jarak sama dengan 5.10^3 m maka lebar pulsa masih sebesar 1.10^{-11} s . Hal ini dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Evolusi propagasi pulsa DFF *Triple Cladding SM/SI* pada $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

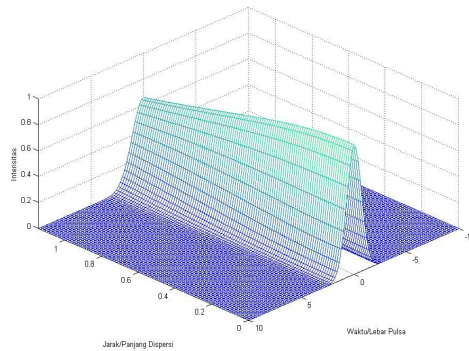
Hal ini sangat berbeda jika digunakan serat optik jenis *Non Zero Dispersion Shifted Fiber* (NZDSF) dan *Non Dispersion Shifted Fiber* (NDSF).

Serat optik NZDSF memberikan dispersi maksimum 6 ps/nm.km pada panjang gelombang $1,55 \mu\text{m}$ dibuat berdasarkan ITU-T G.655. Pengaruh dispersi pada perambatan pulsa diperlihatkan pada gambar 4, dimana apabila diberikan lebar pulsa awal sebesar 1.10^{-11} s maka pada jarak sama dengan 5.10^3 m maka lebar pulsa menjadi $1,0706.10^{-11} \text{ s}$.



Gambar 4. Evolusi propagasi pulsa NZDSF pada $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Sedangkan serat optik NDSF memberikan dispersi maksimum 18 ps/nm.km pada panjang gelombang 1,55 μm dan dibuat berdasarkan ITU-T G.655. Pengaruh dispersi pada perambatan pulsa diperlihatkan pada gambar 4.12, dimana apabila diberikan lebar pulsa awal sebesar $1 \cdot 10^{-11}$ s maka pada jarak sama dengan $5 \cdot 10^3$ m maka lebar pulsa menjadi $1,5214 \cdot 10^{-11}$ s.



Gambar 5. Evolusi propagasi pulsa NDSF pada $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa efek dispersi sangat berpengaruh terhadap perambatan pulsa, dengan dispersi kurang dari 1 ps/nm.km seperti pada DFF Triple Cladding SM/SI hasil perancangan maka pulsa akan dapat merambat sejauh Z dengan pelebaran lebih kecil dan intensitas lebih tinggi, dibanding pada pulsa yang mempunyai dispersi lebih tinggi dari 1 ps/nm.km dan merambat dengan jarak yang sama seperti halnya pada NZDSF dan NDSF.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dan hasil perancangan yang dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut

- Dispersion Flattened Fiber* (DFF) *Triple-Cladding Single-Mode Step-Index* (SM/SI) hasil rancangan pada ini mempunyai dispersi kurang dari 1 ps/nm.km pada panjang gelombang 1,32 μm – 1,66 μm dan 0,08434 ps/nm.km pada panjang gelombang 1,55 μm . Sedangkan karakteristik *Single-Mode* muncul pada $1,0 \mu\text{m} < \lambda < 2,0 \mu\text{m}$.
- Perancangan *Dispersion Flattened Fiber* (DFF) *Triple-Cladding Single-Mode Step-Index* (SM/SI) dilakukan dengan melakukan manipulasi pada tujuh parameter DFF *Triple-Cladding* SM/SI yaitu pada jari-jari *core* (r_1), jari-jari *cladding* 1 (r_2), jari-jari *cladding* 2 (r_3), indeks bias *core* (n_1), indeks bias *cladding* 1 (n_2), indeks bias *cladding* 2 (n_3), dan indeks bias *cladding* 3 (n_4). Perubahan nilai tujuh parameter ini berpengaruh terhadap nilai total dispersi terutama perubahan jari-jari *core* (r_1) dan indeks bias *core* (n_1).
- Hasil perancangan tujuh parameter DFF *Triple-Cladding* SM/SI yaitu $r_1=2,9 \mu\text{m}$, $r_2=3,4 \mu\text{m}$, $r_3=4,5 \mu\text{m}$, $n_1=M20$, $n_2=M8$, $n_3=M18$, $n_4=M4$.

- d. Distribusi medan ternormalisasi pada DFF *Triple-Cladding* SM/SI maksimum terjadi pada *core* dan mengecil secara eksponensial ke arah radial. Dari distribusi medan ini didapatkan informasi bahwa jari-jari dari *cladding* 3 (r_4) sama dengan $26,77\mu\text{m}$.
- e. Efek dispersi sangat berpengaruh terhadap perambatan pulsa, dengan dispersi kurang dari 1 ps/nm.km maka pulsa akan dapat merambat sejauh Z dengan pelebaran lebih kecil dan intensitas lebih tinggi dibanding pada pulsa yang mempunyai dispersi lebih tinggi dari 1 ps/nm.km dan merambat dengan jarak yang sama.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, P.Govind, 1989, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, New York
- Barake, Taha M. 1997. *A Generalized Analysis of Multiple-Clad Optical Fibers with Arbitrary Step-Index Profiles and Applications*: Tesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Hattori, Harroldo T. 1998. *Low Nonlinearity Optical Fibers for Broadband and Long-Distance Communications*: Tesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Hanselman, Duane. Littlefield, Bruce, 2000, *MATLAB Bahasa Komputasi Teknis*, Penerbit ANDI, Yogyakarta
- Keiser, Gerd. 2000. *Optical Fiber Communications 3rd Edition*, McGraw-Hill, Singapura
- Senior, John M. 1992. *Optical Fiber Communications Principle and Practice 2nd Edition*. London: Prentice Hall