

Simulasi Perambatan Ultra-Short Pulse Pada Nonlinear Fiber-Optik

Endra

Jurusan Sistem Komputer, Universitas Bina Nusantara, Jl K.H. Syahdan No. 9, Kemanggis, Jakarta 11480

E-mail: endraoey@binus.edu

Abstrak

Pada tulisan ini disimulasikan perambatan ultra-short pulse pada nonlinear fiber optik dengan cara menyelesaikan Generalized Nonlinear Schrödinger Equation menggunakan algoritma Split-Step Fourier. Generalized Nonlinear Schrödinger Equation mengandung higher-order parameter berupa delayed Raman response, self steepening dan higher-order dispersion. Hasil simulasi masing-masing efek higher order parameter secara terpisah, didapatkan bahwa ketiganya memberikan efek delay pada perambatan pulsa. Ketika ketiga parameter ini disimulasikan secara bersamaan, parameter delayed Raman response memiliki efek delay paling dominan. Rata-rata tingkat kesalahan perhitungan algoritma Split-Step Fourier untuk mensimulasikan perambatan ultrashort-pulse pada nonlinear fiber optik sejauh lima panjang dispersi adalah sebesar 3,2.10⁻⁴ %, yang berarti memberikan akurasi yang cukup baik.

Kata Kunci – Ultra-Short Pulse, Nonlinear Fiber Optik, Generalized Nonlinear Schrödinger Equation, Split-Step Fourier

I. PENDAHULUAN

Sifat linier dari fiber optik menimbulkan polarisasi yang nilainya sebanding dengan medan listrik cahaya yang merambat di dalamnya. Sifat linier ini memberikan dua efek utama pada perambatan cahaya pada fiber optik yaitu dispersi dan absorpsi.

Dispersi terjadi karena pulsa optik yang merambat pada fiber optik memiliki komponen-komponen frekuensi yang berbeda. Hal tersebut karena indeks bias bergantung pada frekuensi maka komponen-komponen frekuensi yang berbeda pada pulsa optik tersebut akan bergerak dengan kecepatan group yang berbeda yang akan menimbulkan pelebaran pulsa optik tersebut. Dispersi membatasi kecepatan dan jarak data yang dapat dikirim melalui fiber optik.

Pada fiber optik, dispersi ditentukan oleh Group Velocity Delay (GVD) parameter, β_2 . Pada fiber konvensional β_2 bernilai nol pada panjang gelombang sekitar 1,31 μm , disebut dengan zero dispersion wavelength. Jika panjang gelombang lebih kecil dari zero dispersion wavelength maka nilai $\beta_2 > 0$, fiber dikatakan memberikan normal-dispersion sedangkan jika panjang gelombang lebih besar dari zero dispersion wavelength maka nilai $\beta_2 < 0$, fiber dikatakan memberikan anomalous-dispersion. Nilai β_2 selain bergantung dengan frekuensi juga bergantung pada parameter desain

fiber dan perbedaan indeks bias inti dan kulit. Maka zero dispersion wavelength dapat digeser pada panjang gelombang sekitar 1,55 μm dimana fiber loss bernilai minimum, disebut dengan Dispersion Shifted Fiber (DSF).

Namun walau pada zero dispersion wavelength β_2 bernilai nol namun dispersi tidak benar-benar hilang sebab adanya higher order dispersion, β_3 .

Absorpsi menyebabkan pulsa optik yang merambat pada fiber optik akan kehilangan intensitasnya dan mengalami pelemahan, besarnya pelemahan ini ditentukan oleh koefisien atenuasi, α . Nilai α bergantung pada panjang gelombang, nilai α terkecil saat ini adalah sekitar -0,2 dB pada panjang gelombang 1,55 μm .

Respon fiber optik terhadap cahaya akan bersifat non-linier untuk medan elektromagnetik yang kuat. Sifat non-linier pada fiber dibagi menjadi 2 kategori, yaitu stimulated scattering (Raman and Brillouin) dan optical Kerr effect yang menyebabkan perubahan indeks bias terhadap daya optik [1]. Perbedaan utama antara stimulated scattering dan Kerr effect adalah stimulated scattering memerlukan batas level daya untuk dapat terjadi sedangkan Kerr effect tak memerlukannya.

II. LANDASAN TEORI

Ultra-short pulse (pulsa yang memiliki lebar < 1 ps) yang merambat pada nonlinear fiber optik dapat dimodelkan menggunakan Generalized Nonlinear Schrödinger Equation (GNSE), seperti pada persamaan (1), dengan memilih kerangka acuan yang bergerak bersama pulsa pada kecepatan group [2]. Parameter-parameter linier berada di sisi kiri persamaan dan parameter-parameter nonlinear berada di sisi kanan persamaan.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left(|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A|^2 A)}{\partial T} - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \quad (1)$$

A , ω_0 , γ dan T_R adalah pulse envelope, spectrum center, non-linearity parameter dan slope of Raman gain.

Untuk perambatan pulsa di dalam fiber tanpa pelemahan (lossless fiber) maka persamaan (1) dapat dinormalisasi menjadi persamaan (2).

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} + \text{sgn}(\beta_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - \text{sgn}(\beta_3) \delta \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} = iN^2 \left(|U|^2 U + is \frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \tau} - \tau_R U \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau} \right) \quad (2)$$

dimana : $U = \frac{A}{\sqrt{P_0}}$; $\tau = \frac{T}{T_0}$; $\delta = \frac{|\beta_3|}{6|\beta_2|T_0}$;

$N^2 = \frac{L_D}{L_N}$; $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$; $L_N = \frac{1}{\gamma P_0}$; $\xi = \frac{z}{L_D}$;

$s = \frac{1}{\omega_0 T_0}$; $\tau_R = \frac{T_R}{T_0}$ dan $\text{sgn}(\beta_2)$ (atau $\text{sgn}(\beta_3)$)

bernilai +1 and -1 bergantung apakah β_2 (atau β_3) adalah positif atau negatif. U , P_0 , ξ , T_0 , L_D dan L_N adalah normalized pulse envelope, daya input puncak, jarak perambatan pulsa ternormalisasi, lebar pulsa input, dispersion length dan nonlinear length. δ , s dan τ_R adalah koefisien higher-order dispersion, koefisien self-steepening dan koefisien delayed Raman response.

Untuk pulsa dengan $T_0 \geq 1$ ps maka δ , s dan τ_R yang biasanya disebut higher-order parameter nilainya kecil sekali sehingga dapat diabaikan, maka persamaan (2) direduksi menjadi Nonlinear Schrödinger Equation (NSE). Solusi NSE menggunakan Split-Step Fourier dan berbagai analisa akurasinya telah dilakukan pada [3].

III. METODE

Persamaan (2) akan diselesaikan secara numerik menggunakan Split-Step Fourier untuk melihat bagaimana perambatan ultra-short pulse pada nonlinear fiber-optik. Pengaruh masing-masing dari higher-order parameter linier (δ) dan nonlinear (s dan τ_R) akan dilihat secara terpisah. Kemudian setelah itu akan dilihat bagaimana pengaruh ketiga parameter tersebut secara bersamaan.

Persaman (2) dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = \left(\hat{D} + \hat{N} \right) U \quad (3)$$

\hat{D} adalah operator differensial untuk sifat linier fiber :

$$\hat{D} = -\text{sgn}(\beta_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \text{sgn}(\beta_3) \delta \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} \quad (4)$$

\hat{N} adalah operator differensial untuk sifat nonlinear fiber :

$$\hat{N} = iN^2 \left(|U|^2 + \frac{is}{U} \frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \tau} - \tau_R \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau} \right)^2 \quad (5)$$

Solusi persamaan (3) adalah :

$$U(\xi + \Delta\xi, \tau) = \exp\left(\Delta\xi \left(\hat{D} + \hat{N} \right) \right) U(\xi, \tau) \quad (6)$$

dimana $\Delta\xi = \text{step-size}$ dinormalisasi terhadap L_D . Jika nilai $\Delta\xi$ cukup kecil maka persamaan (6) dapat dituliskan menjadi :

$$U(\xi + \Delta\xi, \tau) \approx \exp\left(\Delta\xi \hat{D} \right) \exp\left(\Delta\xi \hat{N} \right) U(\xi, \tau) \quad (7)$$

Solusi GNSE pada persamaan (7) disebut metode Split-Step orde satu karena perambatan pulsa dalam setiap segmen *step-size* dari ξ ke $\xi + \Delta\xi$ diselesaikan dengan 2 *step* yaitu *step* pertama dianggap parameter nonlinear bekerja sendiri ($\hat{D} = 0$) dan *step* kedua

parameter linier bekerja sendiri ($\hat{N} = 0$) dimana operasi dilakukan dalam domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier dengan memanfaatkan algoritma Fast Fourier Transform (FFT). Persamaan untuk parameter nonlinear dapat dituliskan :

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = iN^2 \left(|U|^2 U + is \frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \tau} - \tau_R U \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau} \right) \quad (8)$$

Solusi dari persamaan (8) dapat dilakukan dengan mengevaluasi parameter turunan terhadap waktu di dalam domain frekuensi menggunakan Discrete Fourier Transform (DFT) lalu membalikannya ke dalam domain waktu dengan melakukan inverse DFT. Sehingga persamaan (8) dapat dituliskan menjadi :

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = iN^2 \left(|U|^2 U + is F^{-1} \left(i\omega F \left(|U|^2 U \right) \right) \right) \left(-\tau_R U F^{-1} \left(i\omega F \left(|U|^2 \right) \right) \right) \quad (9)$$

dimana F dan F^{-1} adalah operasi DFT dan IDFT. Solusi persamaan (9) dalam domain ξ dapat dilakukan secara numerik menggunakan algoritma Runge-Kutta orde keempat menggunakan ukuran langkah sebesar $\Delta\xi$ [4].

Persamaan untuk parameter linier dapat dituliskan :

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = -\text{sgn}(\beta_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + \text{sgn}(\beta_3) \delta \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} \quad (10)$$

Dengan melakukan DFT pada persamaan (10) kemudian menyelesaikannya secara eksak dan mengembalikannya ke dalam domain waktu menggunakan IDFT maka solusi persamaan (10) adalah :

$$U_{\xi+\Delta\xi} = F^{-1} \left(F \left(U_{\xi} \right) \exp \left(\Delta\xi \left(\text{sgn}(\beta_2) \frac{i}{2} \omega^2 - \text{sgn}(\beta_3) i \delta \omega^3 \right) \right) \right) \quad (11)$$

U_{ξ} pada persamaan (11) berasal dari solusi persamaan (10). Operasi DFT dan IDFT pada perhitungan komputer dilakukan menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) dan IFFT. Untuk

meningkatkan akurasi *Split-Step Fourier*, persamaan (7) dapat ditingkatkan menjadi orde dua menjadi :

$$U(\xi + \Delta\xi, \tau) \approx \exp\left(\frac{\Delta\xi}{2} \hat{N}\right) \exp\left(\Delta\xi \hat{D}\right) \exp\left(\frac{\Delta\xi}{2} \hat{N}\right) U(\xi, \tau) \quad (12)$$

Nilai awal dari segmen pertama berasal dari pulsa input yang diberikan ke fiber optik. Solusi persamaan (12) untuk setiap segmen *step size* sebesar $\Delta\xi$ adalah : pertama didapatkan solusi *nonlinear* dengan menyelesaikan persamaan (9) menggunakan algoritma *Runge-Kutta* orde keempat dengan ukuran langkah sebesar $\Delta\xi/2$, solusi ini menjadi input bagi persamaan (11) dimana solusinya menjadi input kembali bagi persamaan (9) dan solusinya menggunakan algoritma *Runge-Kutta* orde keempat dengan ukuran langkah sebesar $\Delta\xi/2$ menjadi input bagi segmen berikutnya. Langkah ini diulangi kembali untuk segmen berikutnya, sampai keseluruhan perambatan pulsa di dalam sepanjang fiber optik selesai.

Dengan mengasumsikan bahwa parameter U dan seluruh turunannya dalam waktu konvergen ke nol secara cepat untuk $\tau \rightarrow \pm\infty$ maka energi pulsa, I , nilainya tidak berubah sepanjang perambatan karena fiber optik dianggap tanpa pelemahan.

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\tau \quad (13)$$

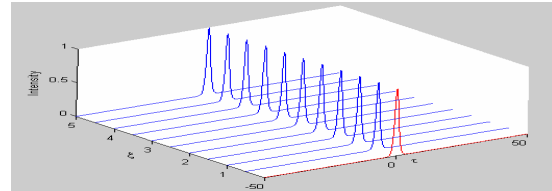
Sehingga tingkat kesalahan algoritma *Split-Step Fourier* diukur dengan menghitung selisih energi pulsa input, $I(0)$, dengan energi pulsa output pada ξ , $I(\xi)$:

$$\varepsilon_I = \frac{|I(0) - I(\xi)|}{I(0)} \times 100\% \quad (14)$$

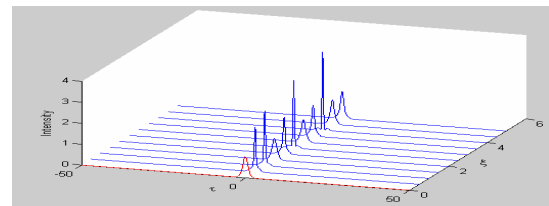
IV. HASIL HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai-nilai parameter fiber optik yang akan digunakan adalah : $\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$ (digunakan *DSF*), $\lambda_0 = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ ($\omega_0 = 1,22 \cdot 10^3 \text{ THz}$) dan $\gamma = 10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. *GNSE* pada persamaan (2) akan diselesaikan menggunakan algoritma *Split-Step Fourier* orde dua. Jumlah sampel *FFT* yang digunakan adalah 1024 titik, dari [3] diketahui bahwa jumlah titik *FFT* ini tidak begitu mempengaruhi tingkat kesalahan dari algoritma *Split-Step Fourier*. Gambar 1. menunjukkan bentuk perambatan pulsa input *sech*(τ) untuk $N = 1$ dan 2 sepanjang $\xi = 5$, $T_0 = 10 \text{ ps}$ sehingga efek *higher-order parameter* (δ , s dan τ_R) diabaikan, digunakan $\Delta\xi = 0,01$. Dari Gambar 1. terlihat untuk $N = 1$ pulsa merambat tanpa perubahan bentuk, perambatan pulsa seperti itu disebut *fundamental soliton*. Sedangkan untuk $N = 2$ terlihat pulsa mengalami perubahan bentuk yang periodik, dimana bentuk pulsa kembali menjadi seperti bentuk pulsa input setelah perambatan sejauh kira-kira $\xi = 1,5$, perambatan pulsa seperti itu disebut *higher-*

order soliton (*second order soliton*, untuk $N = 2$). Untuk kedua nilai N tersebut, puncak pulsa tidak mengalami pergeseran pada sumbu τ sepanjang perambatan. Nilai ε_I untuk $N = 1$ sebesar $7,99 \cdot 10^{-12} \%$, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar $6,83 \cdot 10^{-6} \%$.



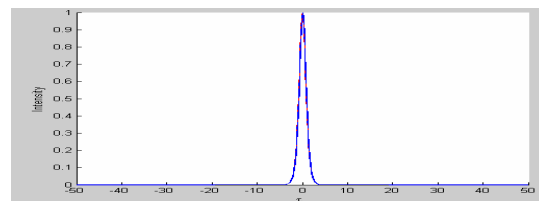
(a). $N = 1$



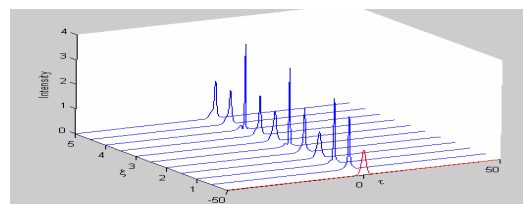
(b). $N = 2$

Gambar 1. Perambatan pulsa *sech*(τ) dengan *higher-order parameter* diabaikan untuk (a). $N = 1$ (b). $N = 2$.

Gambar 2. menunjukkan perambatan pulsa *sech*(τ) sepanjang $\xi = 5$ untuk $N = 1$ dan 2 dengan $T_0 = 30 \text{ fs}$ dan memasukan parameter $s = 0,0274$ sementara nilai δ dan τ_R diabaikan, digunakan $\Delta\xi = 0,01$.



(a). $N = 1$



(b). $N = 2$

Gambar 2. Perambatan pulsa *sech*(τ) dengan $s = 0,0274$ untuk (a). $N = 1$ (b). $N = 2$.

Dari Gambar 2. terlihat untuk $N = 1$ pulsa merambat tanpa perubahan bentuk, namun puncak pulsa mengalami pergeseran pada sumbu τ ke kanan (mengalami *delay*, $\Delta T = \Delta\tau \cdot T_0$) sebesar $2,931 \text{ fs}$. Sedangkan untuk $N = 2$ mengalami perubahan bentuk yang periodik dan *delay* pulsa sebesar $32,22 \text{ fs}$. Nilai ε_I untuk $N = 1$ sebesar $7,33 \cdot 10^{-12} \%$, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar $2,72 \cdot 10^{-5} \%$. Tingkat kesalahan perhitungan untuk berbagai nilai $\Delta\xi$ pada

$\xi = 5$ untuk perambatan pulsa $sech(\tau)$ ditunjukkan oleh Tabel 1., digunakan $N = 1$ dan $T_0 = 30$ fs. Dari Tabel 1. terlihat bahwa ε_I mengalami penurunan (akurasi perhitungan semakin baik) jika nilai $\Delta\xi$ semakin kecil, dimana ε_I mengalami penurunan sekitar 4 orde untuk penurunan $\Delta\xi$ dari sebesar 1 orde.

Tabel 1. Tingkat kesalahan perhitungan pada $\xi = 5$, $N = 1$ dan $T_0 = 30$ fs.

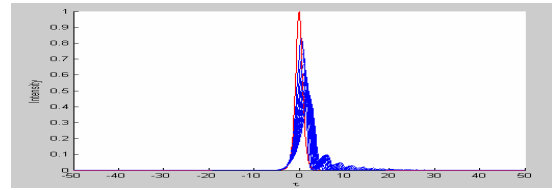
$\Delta\xi$	ε_I (%)
0,5	$1,98 \cdot 10^{-4}$
0,1	$2,59 \cdot 10^{-7}$
0,05	$8,40 \cdot 10^{-9}$
0,01	$7,33 \cdot 10^{-12}$

Pergeseran puncak pulsa dan tingkat kesalahan perhitungan untuk berbagai nilai T_0 pada $\xi = 5$ untuk perambatan pulsa $sech(\tau)$ ditunjukkan oleh Tabel 2., digunakan $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$. Terlihat bahwa pulsa baru mengalami *delay* pada $T_0 = 50$ fs. Nilai rata-rata *delay* yang terjadi sebesar 2,34 fs, sedangkan rata-rata nilai ε_I adalah $6,72 \cdot 10^{-12}$ %.

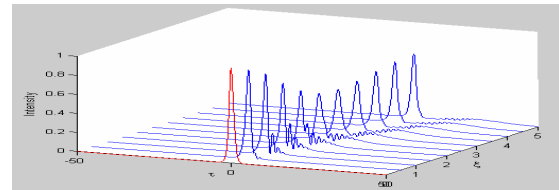
Tabel 2. Pergeseran puncak pulsa untuk parameter s pada $\xi = 5$, $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$.

T_0 (fs)	s	$\Delta\tau$	ΔT (fs)	ε_I (%)
300	0,0027	0	0	$8,19 \cdot 10^{-12}$
100	0,0082	0	0	$8,17 \cdot 10^{-12}$
50	0,0164	0,098	4,885	$7,90 \cdot 10^{-12}$
30	0,0273	0,098	2,931	$7,33 \cdot 10^{-12}$
10	0,0820	0,391	3,906	$2,00 \cdot 10^{-12}$

Gambar 3. menunjukkan perambatan pulsa $sech(\tau)$ sepanjang $\xi = 5$ untuk $N = 1$ dan 2 dengan $T_0 = 30$ fs dan memasukan parameter $\beta_3 = 0,1$ ps³/km sehingga $\delta = 0,556$ sementara nilai s dan τ_R diabaikan, digunakan $\Delta\xi = 0,01$. Dari Gambar 3. terlihat untuk $N = 1$ dan 2 terbentuk ekor-ekor pulsa yang bersama dengan puncak pulsa mengalami pergeseran pada sumbu τ ke kanan (mengalami *delay*). Untuk $N = 1$ besar *delay* adalah 70,32 fs, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar 301,77 fs. Nilai ε_I untuk $N = 1$ sebesar $6,5 \cdot 10^{-4}$ %, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar 0,012 %. Pergeseran puncak pulsa dan tingkat kesalahan perhitungan untuk berbagai nilai T_0 pada $\xi = 5$ untuk perambatan pulsa $sech(\tau)$ ditunjukkan oleh Tabel 3., digunakan $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$. Terlihat bahwa untuk nilai T_0 yang sama, efek parameter δ memberikan nilai ΔT yang lebih besar daripada efek parameter s . Nilai rata-rata *delay* yang terjadi sebesar 84,57 fs, nilai ini jauh lebih besar dari *delay* yang disebabkan oleh parameter s . Rata-rata nilai ε_I adalah $3,85 \cdot 10^{-3}$ %, jauh lebih besar dari tingkat kesalahan pada perhitungan parameter s .



(a). $N = 1$



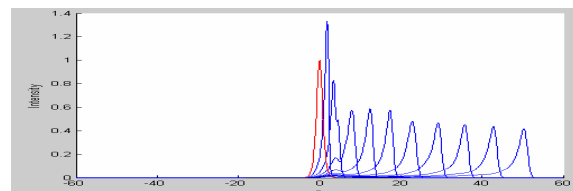
(b). $N = 2$

Gambar 3. Perambatan pulsa $sech(\tau)$ dengan $\delta = 0,5556$ untuk (a). $N = 1$ (b). $N = 2$.

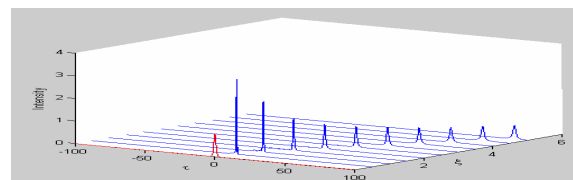
Tabel 3. Pergeseran puncak pulsa untuk parameter δ pada $\xi = 5$, $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$.

T_0 (fs)	δ	$\Delta\tau$	ΔT (fs)	ε_I (%)
300	0,0556	0,293	87,9	$8,05 \cdot 10^{-9}$
100	0,1667	1,367	136,72	$2,41 \cdot 10^{-6}$
50	0,3333	1,953	97,665	$5,25 \cdot 10^{-6}$
30	0,5556	2,344	70,314	$6,50 \cdot 10^{-4}$
10	1,6667	3,027	30,273	$1,86 \cdot 10^{-2}$

Gambar 4. menunjukkan perambatan pulsa $sech(\tau)$ sepanjang $\xi = 5$ untuk $N = 1$ dan 2 dengan $T_0 = 30$ fs dan memasukan parameter $T_R = 5$ fs sehingga $\tau_R = 0,1667$, sementara nilai δ dan τ_R diabaikan, digunakan $\Delta\xi = 0,01$.



(a). $N = 1$



(b). $N = 2$

Gambar 4. Perambatan pulsa $sech(\tau)$ dengan $\tau_R = 0,1667$ untuk (a). $N = 1$ (b). $N = 2$.

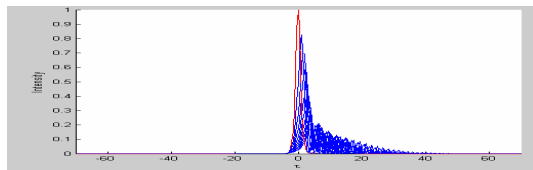
Dari Gambar 4. terlihat untuk $N = 1$ dan 2 puncak pulsa mengalami pergeseran pada sumbu τ ke kanan (mengalami *delay*). Untuk $N = 1$ besar *delay* adalah 1,51 ps, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar 2,73 ps. Nilai ε_I untuk $N = 1$ sebesar $6,07 \cdot 10^{-7}$ %, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar 0,054 %. Pergeseran puncak pulsa dan tingkat kesalahan perhitungan untuk

berbagai nilai T_0 pada $\xi = 5$ untuk perambatan pulsa $sech(\tau)$ ditunjukkan oleh Tabel 4., digunakan $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$. Terlihat bahwa untuk nilai T_0 yang sama, efek parameter τ_R memberikan nilai ΔT yang lebih besar daripada efek parameter s dan δ . Nilai rata-rata *delay* yang terjadi sebesar 1,06 ps, nilai ini jauh lebih besar dari *delay* yang disebabkan oleh parameter s dan δ . Rata-rata nilai ε_I adalah $2,36 \cdot 10^{-3}$ %, hampir sama dengan tingkat kesalahan pada perhitungan parameter δ .

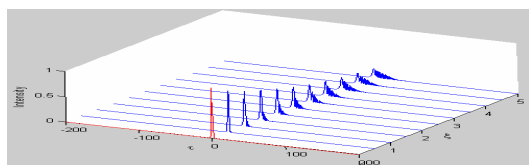
Tabel 4. Pergeseran puncak pulsa untuk parameter τ_R pada $\xi = 5$, $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$.

T_0 (fs)	τ_R	$\Delta\tau$	ΔT (fs)	ε_I (%)
300	0,0167	1,758	527,34	$3,10 \cdot 10^{-11}$
100	0,05	9,863	986,33	$2,51 \cdot 10^{-9}$
50	0,1	29,395	1469,72	$1,00 \cdot 10^{-7}$
30	0,1667	50,391	1511,72	$6,07 \cdot 10^{-7}$
10	0,5	81,641	816,406	$1,18 \cdot 10^{-2}$

Gambar 5. menunjukkan perambatan pulsa $sech(\tau)$ sepanjang $\xi = 5$ untuk $N = 1$ dan 2 dengan $T_0 = 30$ fs dan memasukan semua *higher-order parameter*, $s = 0,0274$, $\delta = 0,556$ dan $\tau_R = 0,1667$, digunakan $\Delta\xi = 0,01$.



(a). $N = 1$



(b). $N = 2$

Gambar 5. Perambatan pulsa $sech(\tau)$ dengan $s = 0,0274$, $\delta = 0,5556$ dan $\tau_R = 0,1667$ untuk (a). $N = 1$ (b). $N = 2$.

Dari Gambar 5. terlihat untuk $N = 1$ dan 2 pulsa mengalami *delay* dan juga terbentuk ekor-ekor pulsa akibat pengaruh δ . Untuk $N = 1$ besar *delay* adalah 128,907 fs, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar 2,672 ps. Nilai ε_I untuk $N = 1$ sebesar $1,83 \cdot 10^{-6}$ %, sedangkan untuk $N = 2$ sebesar $2,81 \cdot 10^{-5}$ %. Pergeseran puncak pulsa dan tingkat kesalahan perhitungan untuk berbagai nilai T_0 pada $\xi = 5$ untuk perambatan pulsa $sech(\tau)$ ditunjukkan oleh Tabel 5., digunakan $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$.

Tabel 5. Pergeseran puncak pulsa untuk seluruh *higher-order parameter*, pada $\xi = 5$, $N = 1$ dan $\Delta\xi = 0,01$.

T_0 (fs)	$\Delta\tau$	ΔT (fs)	ε_I (%)
300	0,781	234,39	$2,78 \cdot 10^{-7}$
100	2,344	234,38	$3,22 \cdot 10^{-8}$
50	3,516	175,78	$2,04 \cdot 10^{-8}$
30	4,297	128,91	$1,83 \cdot 10^{-6}$
10	53,516	535,16	$1,6 \cdot 10^{-3}$

Terlihat bahwa efek parameter τ_R mendominasi nilai ΔT . Nilai rata-rata *delay* yang terjadi sebesar 261,723 fs lebih besar dari *delay* yang disebabkan oleh parameter s dan δ secara terpisah namun lebih kecil dari *delay* yang disebabkan oleh parameter τ_R secara terpisah. Rata-rata nilai ε_I adalah $3,2 \cdot 10^{-4}$ %, dimana tingkat kesalahan ini dominan diberikan oleh parameter δ dan τ_R .

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi masing-masing efek *higher order parameter* secara terpisah, didapatkan bahwa ketiganya memberikan efek *delay* pada perambatan pulsa. Ketika ketiga parameter ini disimulasikan secara bersamaan, parameter *delayed Raman response* memiliki efek *delay* paling dominan. Selain itu pada sepanjang perambatan terbentuk ekor-ekor pulsa sebagai efek dari parameter *higher order dispersion*. Rata-rata tingkat kesalahan perhitungan algoritma *Split-Step Fourier* untuk mensimulasikan perambatan *ultrashort-pulse* pada *nonlinear* fiber optik sejauh lima panjang dispersi adalah sebesar $3,2 \cdot 10^{-4}$ %, yang berarti memberikan akurasi yang cukup baik. Tingkat kesalahan perhitungan ini dominan diberikan oleh parameter *higher order dispersion* dan *delayed Raman response*.

REFERENSI

- [1] Lee, Jong-Hyung, "Analysis Characterization of Fiber Nonlinearities with Deterministic and Stochastic Signal Sources", Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (February 10, 2000).
- [2] Agrawal, P. Govind, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, Sandiego, LA, 1989, p.45.
- [3] Endra, "Metode Split Step Fourier untuk menyelesaikan Nonlinear Schrödinger Equation pada nonlinear fiber optik", Seminar Nasional Ilmu Komputer dan Teknologi 2007, Depok, 29-30 Januari 2007
- [4] Chapra, Steven C., Metode Numerik Untuk Teknik, UI-Press, 1991, p.626.