

SIMULASI PERAMBATAN PULSA-GAUSSIAN DI DALAM NONLINEAR FIBER OPTIK

Endra

Jurusan Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Bina Nusantara , Jakarta

ABSTRAK

Nonlinear fiber optik adalah respon dari fiber optik terhadap medan elektromagnetik yang kuat, dimana sifat nonlinear yaitu stimulated scattering dan optical Kerr effect akan muncul. Perambatan pulsa optik di dalam nonlinear fiber optik dapat dimodelkan dengan menggunakan Nonlinear Schrödinger Equation (NSE). Bentuk pulsa-Gaussian banyak dipakai dalam simulasi sebab pada komunikasi fiber optik, pulsa optik yang dibangkitkan oleh sumber cahaya seperti LED dan LD memiliki bentuk menghampiri pulsa-Gaussian

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi komputer untuk mempelajari perambatan dan interaksi pulsa-Gaussian di dalam nonlinear fiber optik, yang sebelumnya dilakukan pre-chirping terlebih dahulu. Simulasi dilakukan dengan cara menyelesaikan NSE secara numerik menggunakan Symmetrized Split Step Fourier Method (SSSFM).

Solusi NSE menggunakan SSSFM akurasi diuji dengan membandingkannya terhadap solusi eksak dari NSE. Hasil perbandingan menunjukkan SSSFM memberikan hasil yang sangat akurat dalam menyelesaikan NSE, dimana Normalized Square Deviation (NSD)-nya sangat kecil (dalam orde -8 sampai -9) dibandingkan dengan solusi eksak NSE. Loss pada fiber dikompensasi dengan dilakukan penguatan secara periodik dan metode pre-emphasis.

Dari hasil-hasil dan evaluasi yang diperoleh maka dapat didapatkan bahwa efek pre-chirping menimbulkan efek merugikan bagi perambatan dan interaksi pulsa-Gaussian di dalam nonlinear fiber optik. Sehingga untuk menghasilkan sistem komunikasi fiber optik yang baik maka pulsa-Gaussian input sebaiknya bebas chirp, atau memiliki nilai chirp yang rendah dan bernilai positif.

Kata kunci : *Nonlinear fiber optik, Nonlinear Schrödinger Equation, pulsa-Gaussian, Symmetrized Split Step Fourier Method*

PENDAHULUAN

Sifat linier dari fiber optik memberikan dua efek utama pada perambatan cahaya pada fiber optik yaitu dispersi dan absorpsi. Sebuah pulsa optik terdiri dari sebuah rentang frekuensi- frekuensi optik, karena indeks bias bergantung pada frekuensi maka komponen-komponen frekuensi yang berbeda pada pulsa optik tersebut akan bergerak dengan kecepatan group yang berbeda, sebuah fenomena yang disebut *Group-Velocity Dispersion (GVD)*. *GVD* ini menimbulkan dispersi, dimana ketika pulsa optik dimasukkan ke dalam sebuah fiber optik, pulsa mengalami pelebaran melewati jendela waktunya disebabkan oleh dispersi sehingga menyebabkan pulsa-pulsa yang bersebelahan akan tumpang tindih dan membatasi kecepatan pengiriman data. Absorpsi menyebabkan pulsa optik yang merambat pada pada fiber optik akan kehilangan intensitasnya dan mengalami pelemahan.

Respon dari setiap bahan dielektrik terhadap cahaya akan bersifat non-linier untuk medan elektromagnetik yang kuat. Sifat *non-linear* pada fiber optik dibagi menjadi 2 kategori, yaitu *stimulated scattering (Raman and Brillouin)* dan *optical Kerr effect* yang menyebabkan perubahan indeks bias terhadap daya optik (*nonlinear refractive index*). *Stimulated scattering* menyebabkan kebergantungan *gain* atau *loss* terhadap intensitas sedangkan *nonlinear refractive index* menyebabkan pergeseran fase yang bergantung pada sinyal optik (*Self Phase Modulation (SPM)*, *Cross Phase Modulation (XPM)* dan

Four Wave Mixing (FWM)). Perbedaan utama antara *stimulated scattering* dan *Kerr effect* adalah *stimulated scattering* memerlukan batas level daya untuk dapat terjadi sedangkan *Kerr effect* tak memerlukannya. Sebuah pulsa yang merambat di dalam *nonlinear* fiber optik akan mengalami efek linier maupun *nonlinear* dari fiber optik. Penelitian ini bertujuan mempelajari secara simulasi bagaimana karakteristik perambatan sebuah pulsa-*Gaussian* dan juga interaksi sepasang pulsa - *Gaussian* di dalam *nonlinear* fiber-optik. Bentuk pulsa-*Gaussian* dipakai dalam simulasi ini sebab pada komunikasi fiber optik, pulsa optik yang dibangkitkan oleh sumber cahaya seperti *LED* dan *LD* memiliki bentuk menghampiri pulsa-*Gaussian*. Efek dispersi dan absorpsi akan diperhitungkan sedangkan untuk sifat *nonlinear* yang akan diperhitungkan hanya *Kerr effect*.

PEMBAHASAN

Nonlinear Schrödinger Equation (NSE)

Perambatan pulsa dengan lebar ≥ 1 ps dan mengasumsikan pulsa tetap terpolarisasi linier sepanjang perambatannya di dalam *nonlinear* fiber optik dapat dimodelkan dengan menggunakan *NSE* yang memiliki bentuk :

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{a}{2}A + \frac{i}{2}b_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}b_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = ig|A|^2 A \quad (1)$$

dimana :

A , γ , β_2 , β_3 dan a adalah *pulse envelope (slowly varying variable)*, *non-linearity parameter*, *GVD parameter*, *higer order dispersion* dan *loss fiber (absorpsi)*.

Persamaan (1) dapat dinormalisasi menjadi :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \left(L_D \cdot \frac{a}{2} \right) U + \text{sgn}(b_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \text{sgn}(b_3) \frac{1}{6} b_3 \frac{L_D}{L_D} \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} = iN^2 |U|^2 U \quad (2)$$

dimana : $t = \frac{T}{T_0}$; $L_D = \frac{T_0^2}{|b_2|}$; $L_D' = \frac{T_0^3}{|b_3|}$; $L_N = \frac{1}{gP_{avg}}$; $x = \frac{z}{L_D}$; $N^2 = \frac{L_D}{L_N}$; $U = \frac{A}{\sqrt{P_0}}$

$\text{sgn}(\beta_2)$ (atau $\text{sgn}(\beta_3)$) bernilai +1 and -1 bergantung apakah β_2 (β_3) adalah positif atau negatif. U , P_0 , T_0 , ζ , L_D , L_D' and L_N adalah *normalized pulse envelope*, amplitudo daya input, lebar pulsa input, jarak perambatan normalisasi, *dispersion length*, *higher order dispersion length* and *nonlinear length*.

Split Step Fourier Method (SSFM)

Persamaan (2) dapat diselesaikan secara numerik menggunakan *SSFM* dengan menuliskan persamaan (2) dalam bentuk :

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

\hat{D} adalah operator differensial untuk sifat linier fiber optik (dispersi dan absorpsi) :

$$\hat{D} = -L_D \frac{a}{2} - \text{sgn}(b_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \text{sgn}(b_3) \frac{1}{6} \frac{L_D}{L_D'} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \quad (4)$$

\hat{N} adalah operator differensial untuk sifat *nonlinear* fiber optik (*Kerr effect*) :

$$\hat{N} = iN^2 |U|^2 \quad (5)$$

Solusi persamaan (3) adalah :

$$U(x+h, t) = \exp \left(h \left(\hat{D} + \hat{N} \right) \right) U(x, t) \approx \exp \left(h \hat{D} \right) \exp \left(h \hat{N} \right) U(x, t) \quad (6)$$

h adalah *step size* dinormalisasi terhadap L_D , nilainya dipilih sekecil mungkin agar hasil solusinya akurat, namun h yang sangat kecil membuat proses perhitungan menjadi sangat lama, sehingga biasanya dipilih h yang memenuhi persamaan :

$$\Phi_{\max} = g |U_p|^2 h P_0 L_D \quad (7)$$

Φ_{max} adalah pergeseran fase maksimum setiap *step*.

Solusi *NSE* pada persamaan (6) disebut metode *Split Step Fourier* karena perambatan pulsa dari ζ ke $\zeta + h$ diselesaikan dengan 2 *step* yaitu *step* pertama dianggap sifat *nonlinear* bekerja sendiri ($\hat{D} = 0$) dan *step* kedua dianggap sifat linier bekerja sendiri ($\hat{N} = 0$). Akurasi dari *SSFM* pada persamaan (6) adalah orde 2 dari *step size* ($O(h^2)$).

Eksekusi dari operator eksponensial $\left(\exp\left(h \hat{D} \right) \right)$ di dalam domain *Fourier* menggunakan :

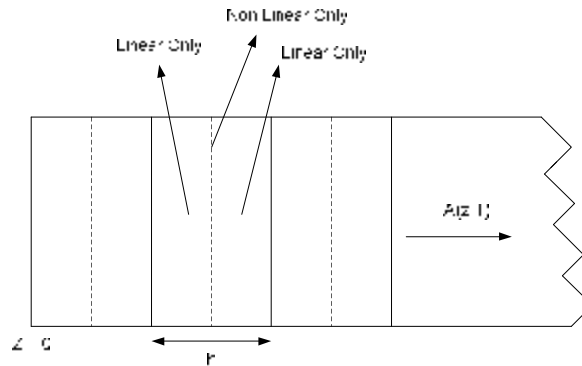
$$\exp\left(h \hat{D} \right) B(x, t) = \left(F^{-1} \exp\left(h \hat{D}(i\omega) \right) F \right) B(x, t) \quad (8)$$

$\hat{D}(i\omega)$ didapatkan dengan mengganti operator differensial $\frac{\partial}{\partial t}$ dengan $i\omega$.

Untuk mengurangi waktu proses perhitungan dan meningkatkan akurasi maka digunakan metode *Symmetrized Split Step Fourier Method (SSSFM)*, yang skemanya dapat dilihat pada Gambar 1. Pada *SSSFM*, sifat *nonlinear* dianggap berada di pertengahan segmen *step size* dan dihitung efeknya untuk keseluruhan segmen sehingga solusi untuk *SSSFM* adalah :

$$U(x + h, t) = \exp\left(\frac{h}{2} \hat{D} \right) \exp\left(\int_x^{x+h} \hat{N}(x') dx' \right) \exp\left(\frac{h}{2} \hat{D} \right) U(x, t) \quad (9)$$

$$\int_x^{x+h} \hat{N}(x') dx' \approx \frac{h}{2} \left(\hat{N}(x) + \hat{N}(x+h) \right) \quad (10)$$



Gambar 1. Skema *Symmetrized Split Step Fourier Method*.

Persamaan (10) memerlukan iterasi karena $\hat{N}(x+h)$ tidak diketahui pada $\zeta + h/2$, sehingga pada awalnya $\hat{N}(x+h)$ diasumsikan sama dengan $\hat{N}(x)$ kemudian dimasukkan ke persamaan (9) dan hasilnya digunakan untuk menghitung $\hat{N}(x+h)$. Akurasi dari *SSSFM* adalah orde 3 dari *step size* ($O(h^3)$).

Pulsa-Gaussian

Sebuah pulsa-*Gaussian* dapat dituliskan dalam persamaan :

$$U(0, t) = \exp\left(-\frac{1+iC}{2} t^2 \right) \quad (11)$$

C adalah nilai *pre-chirping*. Sebuah pulsa di katakan *chirped* jika frekuensi *carrier*-nya berubah terhadap waktu dengan pola yang dapat ditentukan (jika ada variasi acak pada frekuensi *carrier*, seperti *phase noise*, ini secara umum bukan dikatakan sebagai *chirp*). *Pre-chirping* adalah proses memberikan

sebuah *chirp* kepada pulsa optik sebelum dimasukkan ke dalam sebuah sistem fiber optik. Bentuk kuadrat dari variasi fase pada persamaan (11) memberikan sebuah linier frekuensi *chirp* sehingga frekuensi optik bertambah dengan waktu (*up-chirp*) untuk nilai C positif dan frekuensi optik berkurang dengan waktu (*down-chirp*) untuk nilai C negatif.

Akurasi dari SSSF M

Solusi numerik NSE menggunakan SSSF M akurasi akan diuji dengan membandingkan solusi eksak dari NSE . Ketika pulsa input adalah $U(0, \tau) = \text{sech}(\tau)$, maka solusi eksak dari NSE pada persamaan (2) untuk $\beta_3 = 0$, $\text{sgn}(\beta_2) = -1$, $\alpha = 0$, dan $N = 1$ adalah :

$$u(x, t) = \text{sech}(t) \exp\left(i \frac{x}{2}\right) \quad (12)$$

Pers.(12) sangat cocok untuk melihat akurasi dari SSSF M karena solusinya adalah sebagai hasil dari interaksi antara dispersi dan sifat non-linier dari fiber.

Parameter *Normalized Square Deviation (NSD)* digunakan untuk membandingkan solusi eksak dengan solusi NSE secara numerik menggunakan SSSF M didefinisikan :

$$NSD = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |U_A(x, t) - U_B(x, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(0, t)|^2 dt} \quad (13)$$

dimana U_A adalah *output field envelop* dari solusi NSE menggunakan SSSF M dan U_B adalah *output field envelop* dari solusi eksak.

Root Mean Square (RMS) Pulse-Width

Pada nonlinear fiber, bentuk pulsa pada output fiber dapat menyimpang dari bentuk pulsa inputnya dan dapat memiliki bentuk yang sangat rumit, *rms pulse-width*, σ , sering digunakan untuk menyatakan lebar pulsa dengan lebih akurat, dimana σ didefinisikan :

$$s = \left[\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

dimana :

$$\langle t^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^n |U(z, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(z, t)|^2 dt} \quad (15)$$

di dalam satuan ternormalisasi dituliskan :

$$s = \left[\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

dimana :

$$\langle t^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^n |U(x, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(x, t)|^2 dt} \quad (17)$$

Disamping itu *rms pulse-width* merupakan parameter yang berguna untuk memperkirakan keterbatasan kinerja pada sistem komunikasi fiber optik, dimana *rms pulse-width* berhubungan langsung dengan kecepatan data maksimum dengan menggunakan kriteria yang umum digunakan :

$$\sigma_t R_b < \frac{1}{4} \quad (18)$$

dimana σ_t adalah *rms pulse-width* pada output fiber dan R_b adalah *bit rate*.

Metode Pre-Emphasis

Untuk mengkompensasi *loss* yang terjadi pada fiber, maka sebuah penguat diletakkan secara periodik sepanjang fiber dan penguatannya dibuat sehingga *loss* fiber antara dua penguat dikompensasi secara tepat oleh penguatan dari penguat. Amplitudo pulsa dikuatkan pada setiap penguat untuk mengkompensasi *loss* fiber dengan menggunakan :

$$U'(L, t) = \sqrt{G_0} U(L, t) \quad (19)$$

dimana L jarak antar penguat dan G_0 adalah penguatan dari penguatan yang besarnya dibuat sehingga :

$$G_0 \exp(-aL) = 1 \quad (20)$$

Metode *pre-emphasis* adalah metode dengan membuat amplitudo daya input lebih besar.. Untuk mencari nilai N yang dibutuhkan pada metode *pre-emphasis*, diperkenalkan parameter baru, $u(x, t)$ dimana :

$$U(x, t) = u(x, t) \exp\left(-\frac{a}{2} L_D x\right) \quad (21)$$

Sehingga persamaan (2) dapat dituliskan menjadi :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \text{sgn}(b_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \text{sgn}(b_3) \frac{1}{6} b_3 \frac{L_D}{L_D} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = iN^2 \exp(-aL_D x) |u|^2 u \quad (22)$$

Sehingga efek dari *loss* fiber mengurangi nilai efektif dari N selama pulsa merambat di dalam fiber. Jika u tidak berubah secara signifikan antara dua penguat, maka dapat didefinisikan nilai rata-rata dari N dengan merata-ratakan nilai $N^2 \exp(-aL_D x)$ sepanjang jarak antar penguat. Maka persamaan (22) dituliskan menjadi :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \text{sgn}(b_2) \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \text{sgn}(b_3) \frac{1}{6} b_3 \frac{L_D}{L_D} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = iN_{av}^2 |u|^2 u \quad (23)$$

dimana nilai dari N_{av} adalah :

$$N_{av}^2 = N^2 \frac{1}{L} \int_0^L \exp(-aL_D x) dx = N^2 \frac{1}{aL} [1 - \exp(-aL)] \quad (24)$$

Untuk membuat nilai N_{av} harus sama dengan 1, maka nilai input untuk N dipilih sebesar :

$$N = \sqrt{\frac{aL}{1 - \exp(-aL)}} \quad (25)$$

Dengan menggunakan persamaan (20) persamaan (25) dapat dituliskan menjadi :

$$N = \sqrt{\frac{G_0 \ln(G_0)}{G_0 - 1}} \quad (26)$$

Interaksi Pulsa-Gaussian

Untuk mempelajari interaksi pulsa-Gaussian sepanjang perambatan di dalam nonlinear fiber optik, digunakan input berupa pasangan pulsa-Gaussian :

$$U(0, t) = \exp\left(-\frac{1+iC}{2}(t-q_0)^2\right) + r \exp\left(-\frac{1+iC}{2}(t+q_0)^2\right) \exp(iq) \quad (27)$$

Dimana r adalah amplitudo relatif dari pasangan pulsa, θ adalah relatif fase dan $2q_0$ (normalisasi terhadap T_0) adalah jarak pisah mula mula dari pasangan pulsa. q_0 menentukan *bit rate* dengan hubungan :

$$B = \frac{1}{2q_0 T_0} \quad (28)$$

dan *bit rate transmission distance product* yang memenuhi kriteria :

$$B^2 L_T \ll \frac{\xi_p}{4q_0^2 |b_2|} \quad (29)$$

dimana ξ_p dan L_T adalah periode osilasi normalisasi dan jarak transmisi maksimum.

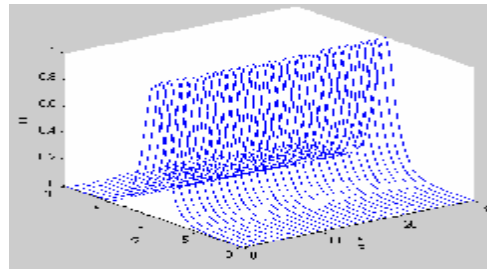
Metode Simulasi

Simulasi dilakukan dengan cara menyelesaikan *NSE* pada persamaan (2). Solusi *NSE* ternormalisasi diperoleh secara numerik dengan *SSSFM*. *SSSFM* dilakukan dengan membuat program menggunakan *MatLab*, dimana program dibuat sehingga memungkinkan pengguna untuk memasukan parameter-parameter yang akan dianalisa seperti nilai *pre-chirping* pada pulsa input, nilai *GVD*, nilai *higher order dispersion*, nilai *step size* dan sebagainya.

Program simulasi *SSSFM* yang dibuat akurasi akan diuji dengan membandingkannya dengan solusi eksak dari *NSE* seperti pada persamaan (12). *Loss* pada fiber akan dikompensasi dengan dilakukan penguatan secara periodik dan metode *pre-emphasis*. Penguatan secara periodik dan metode *pre-emphasis* ini akan digunakan pada simulasi perambatan dari pulsa-*Gaussian*. Hasil-hasil dari simulasi dianalisa dengan melihat bagaimana perubahan parameter amplitudo dan *rms pulse-width* sepanjang perambatan dan interaksi pulsa-*Gaussian* di dalam *nonlinear* fiber optik. Pada simulasi digunakan nilai-nilai parameter : panjang gelombang optik (λ) = 1,55 μm , $\gamma = 3.10^{-3} \text{ mW}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$, $T_0 = 10 \text{ ps}$, $\beta_2 = -2 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0,1 \text{ ps}^3/\text{km}$, $N = 1$ dan $C = -1,5$ sampai 1,5 dengan pertambahan nilai C sebesar 0,1.

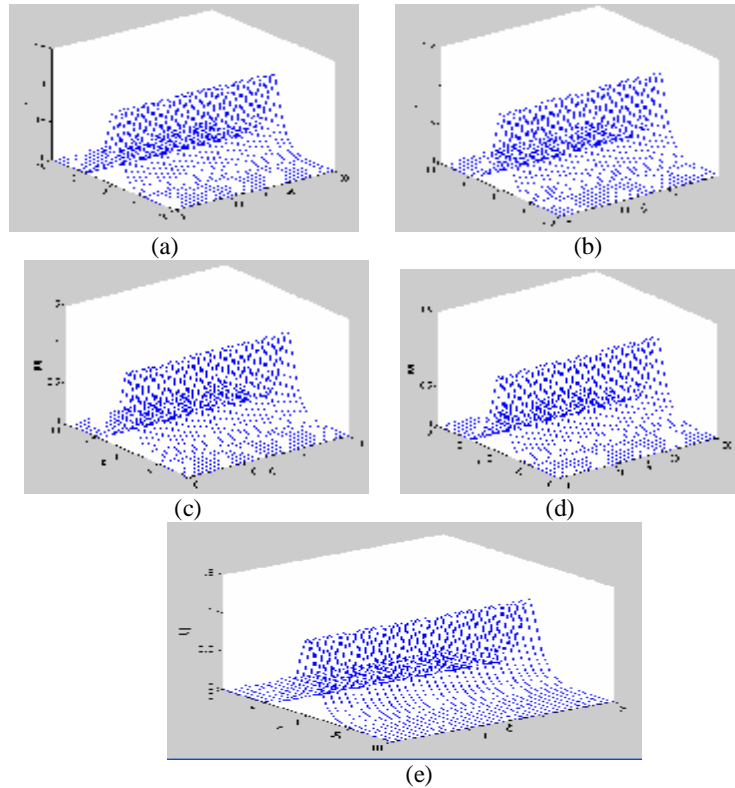
Hasil dan Evaluasi Akurasi SSSF

Gambar 2 adalah perambatan pulsa *sech*(τ) yang diperoleh dari persamaan (12), dapat dilihat bahwa bentuk dan amplitudo dari pulsa tidak berubah sepanjang perambatan di dalam *nonlinear* fiber optik.

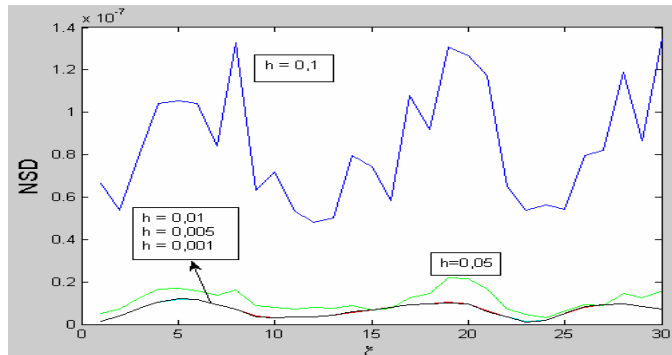


Gambar 2. Solusi eksak *NSE*

Gambar 3(a) sampai 3(e) adalah perambatan pulsa *sech*(τ) yang diperoleh dari *SSSFM* dengan nilai h berurutan-turut 0,1, 0,05, 0,01, 0,005 dan 0,001, terlihat bahwa hasil perambatan fundamena soliton dengan *SSSFM* untuk semua nilai h yang disebutkan di atas memberikan hasil yang hampir sama dengan solusi eksak. Namun untuk melihat akurasi dari *SSSFM* dengan teliti, maka perlu dihitung nilai *NSD* sebagai fungsi ξ untuk masing masing nilai h , hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4, terlihat bahwa nilai *NSD* semakin kecil jika nilai h juga diperkecil.



Gambar 3. Solusi *NSE* menggunakan *SSSFm* dengan nilai $h =$ (a) 0,1 (b) 0,05 (c) 0,01 (d) 0,005 dan (e) 0,001.



Gambar 4. Perbandingan *NSD* untuk $h = 0,1, 0,05, 0,01, 0,005$ dan $0,001$.

Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata *NSD* sepanjang perambatan di dalam fiber optik sejauh $\xi = 30$ untuk berbagai nilai h .

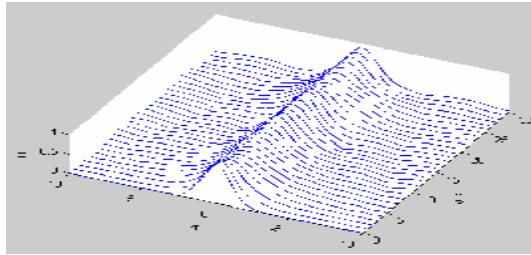
Tabel 1 Nilai rata-rata *NSD*.

h	Nilai rata-rata <i>NSD</i>
0,100	$8,45631 \cdot 10^{-8}$
0,050	$1,1197 \cdot 10^{-8}$
0,010	$6,6839 \cdot 10^{-9}$
0,005	$6,6711 \cdot 10^{-9}$
0,001	$6,6649 \cdot 10^{-9}$

Dari Tabel 1 terlihat bahwa *SSSFm* dalam menyelesaikan *NSE* memberikan hasil yang sangat akurat, dimana *NSD*-nya sangat kecil (dalam orde -8 sampai -9) dibandingkan dengan solusi eksak *NSE*.

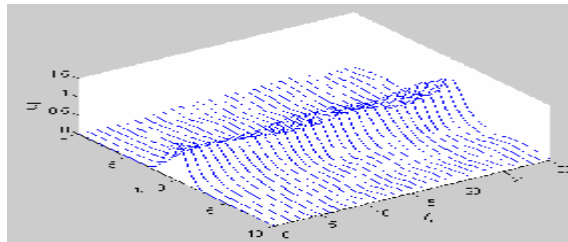
Hasil dan Evaluasi Metode *Pre-Emphasis*

Gambar 5 menunjukkan perambatan pulsa-Gaussian di dalam *nonlinear* fiber optik, dengan nilai $\alpha = 0$ dB, $C = 0$, dan $h = 0,001$.



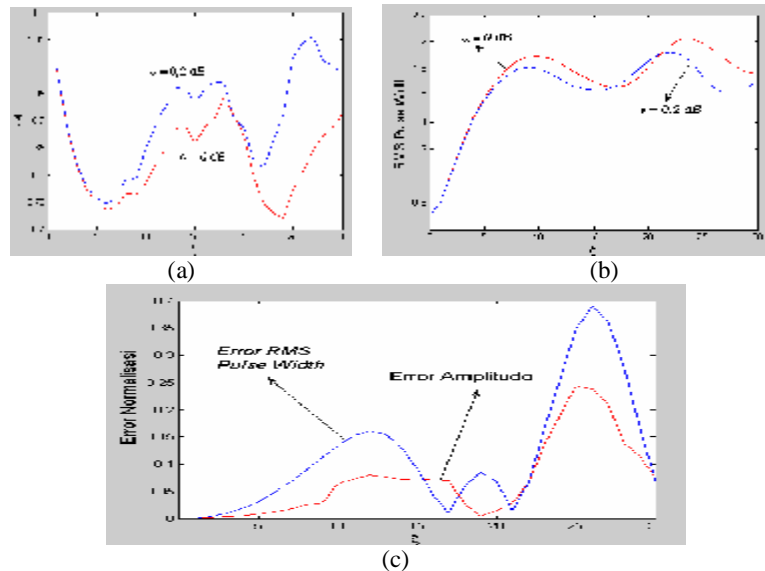
Gambar 5. Perambatan pulsa-Gaussian, $\alpha = 0$ dB.

Gambar 6 menunjukkan perambatan pulsa-Gaussian di dalam *nonlinear* fiber optik menggunakan metode *pre-emphasis*, dengan nilai $\alpha = 0,2$ dB, $L = 0,1L_D$, $C = 0$, dan $h = 0,001$.



Gambar 6. Perambatan pulsa-Gaussian, $\alpha = 0,2$ dB, menggunakan metode *pre-emphasis*.

Gambar 7(a) sampai 7(c) menunjukkan perbandingan amplitudo dan *rms pulse-width* untuk $\alpha = 0$ dB dan $\alpha = 0,2$ dB sebagai fungsi dari jarak perambatan dan *error* keduanya dinormalisasi terhadap nilai inputnya.

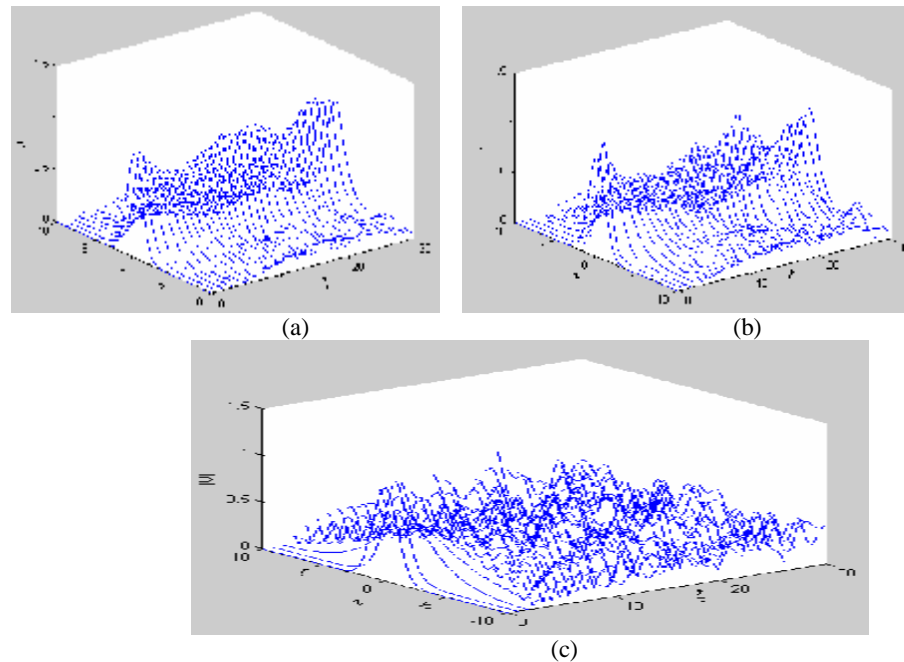


Gambar 7. (a) Perbandingan amplitudo (b) Perbandingan *rms pulse-width* (c) *Error* amplitudo dan *error rms pulse-width* normalisasi.

Nilai rata-rata *error* amplitudo sepanjang perambatan di dalam fiber optik sejauh $\xi = 30$ adalah sebesar 0,074 dan *error* rata-rata *rms pulse-width* adalah sebesar 0,1195. Sehingga metode *pre-emphasis* memberikan hasil yang baik dalam mengkompensasi *loss* pada fiber optik.

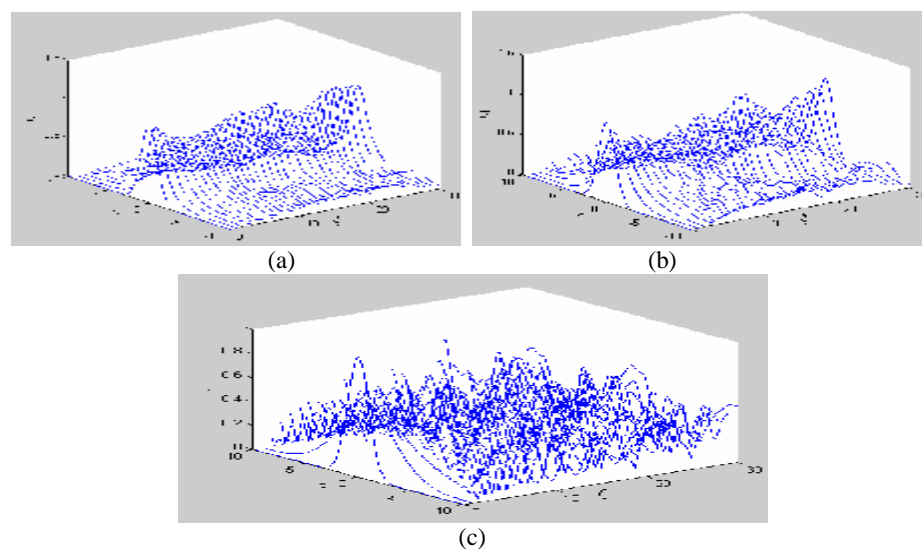
Hasil dan Evaluasi Perambatan Pulsa-Gaussian Di Dalam Nonlinear Fiber optik

Gambar 8(a) sampai 8(c) menunjukkan perambatan pulsa-Gaussian di dalam *nonlinear* fiber optik dengan menggunakan metode *pre-emphasis* dan nilai parameter $L = 0,1L_D$, $\alpha = 0,2 \text{ dB}$, $h = 0,001$ dan $C = 0,1, 0,5$ dan $1,5$.



Gambar 8. Perambatan pulsa-Gaussian untuk positif *chirp*, dengan nilai $C =$ (a) 0,1 (b) 0,5 (c) 1,5.

Dari Gambar 8(a) sampai 8(c) dan untuk nilai positif *chirp* lain yang tak ditampilkan dalam gambar, didapatkan bahwa *efek pre-chirping* dengan nilai C positif menimbulkan ekor ekor pulsa ketika pulsa-Gaussian merambat sepanjang *nonlinear* fiber optik. Semakin besar nilai C maka ekor pulsa semakin banyak dan dapat merusak kestabilan pulsa. Didapatkan bahwa pada nilai $C > 1$, pulsa mulai tidak stabil dan bentuk-nya rusak setelah merambat sekitar $\xi = 4$.



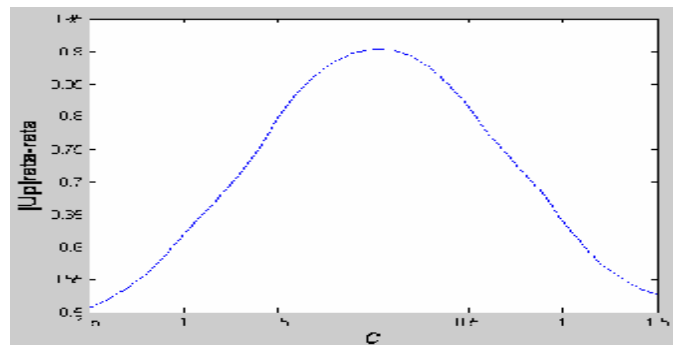
Gambar 9. Perambatan pulsa-Gaussian untuk negatif *chirp*, dengan nilai $C =$ (a) -0,1 (b) -0,5 (c) -1,5.

Gambar 9(a) sampai 9(c) menunjukkan perambatan pulsa-Gaussian di dalam *nonlinear* fiber optik dengan menggunakan metode *pre-emphasis* dan nilai parameter $L = 0,1L_D$, $\alpha = 0,2 \text{ dB}$, $h = 0,001$ dan $C = -0,1, -0,5$ dan $-1,5$

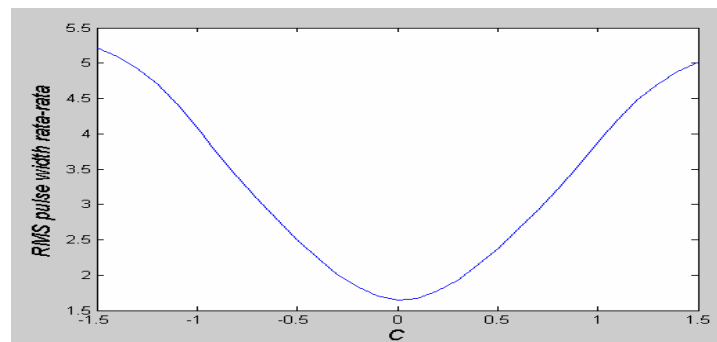
Dari Gambar 9(a) sampai 9(c) dan untuk nilai negatif *chirp* lain yang tak ditampilkan dalam gambar, didapatkan bahwa efek *pre-chirping* dengan nilai C negatif juga menimbulkan ekor ekor pulsa ketika pulsa-Gaussian merambat sepanjang *nonlinear* fiber optik. Semakin negatif nilai C maka ekor pulsa semakin banyak dan dapat merusak kestabilan pulsa. Didapatkan bahwa pada nilai $|C| > 1$, pulsa mulai tidak stabil dan bentuk-nya rusak setelah merambat sekitar $\zeta = 3$.

Grafik nilai rata-rata amplitudo pulsa-Gaussian terhadap nilai *pre-chirping* pada Gambar 10 menunjukkan bahwa efek dari *pre-chirping* baik untuk nilai C positif maupun negatif memberikan efek yang sama yaitu menurunkan nilai rata-rata amplitudo pulsa, dimana makin besar $|C|$ maka makin besar pula penurunan nilai rata-rata amplitudo pulsa yang terjadi. Namun perlu dicatat bahwa negatif *pre-chirping* memberikan penurunan nilai rata-rata amplitudo pulsa yang lebih besar dari pada positif *pre-chirping*.

Grafik nilai rata-rata *rms pulse-width* pulsa-Gaussian terhadap nilai *pre-chirping* pada Gambar 11 menunjukkan bahwa efek dari *pre-chirping* baik untuk nilai C positif maupun negatif memberikan efek yang sama yaitu memperbesar nilai rata-rata *rms pulse-width* pulsa, dimana makin besar $|C|$ maka makin besar pula kenaikan nilai rata-rata *rms pulse-width* pulsa. Namun perlu dicatat bahwa negatif *pre-chirping* memberikan kenaikan nilai rata-rata *rms pulse-width* pulsa yang lebih besar dari pada positif *pre-chirping*.



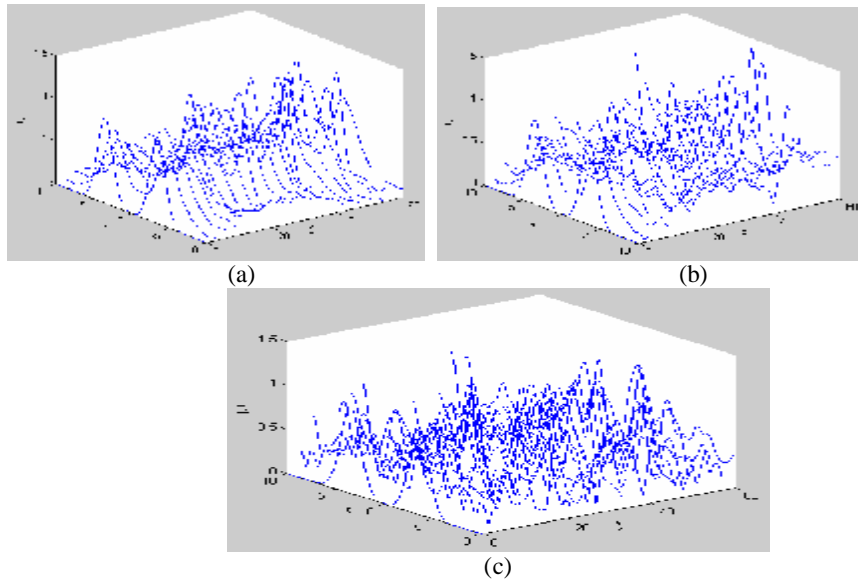
Gambar 10. Nilai rata-rata amplitudo pulsa-Gaussian untuk nilai $C = -1,5 \dots 1,5$.



Gambar 11. Nilai rata-rata *rms pulse width* pulsa Gaussian untuk nilai $C = -1,5 \dots 1,5$.

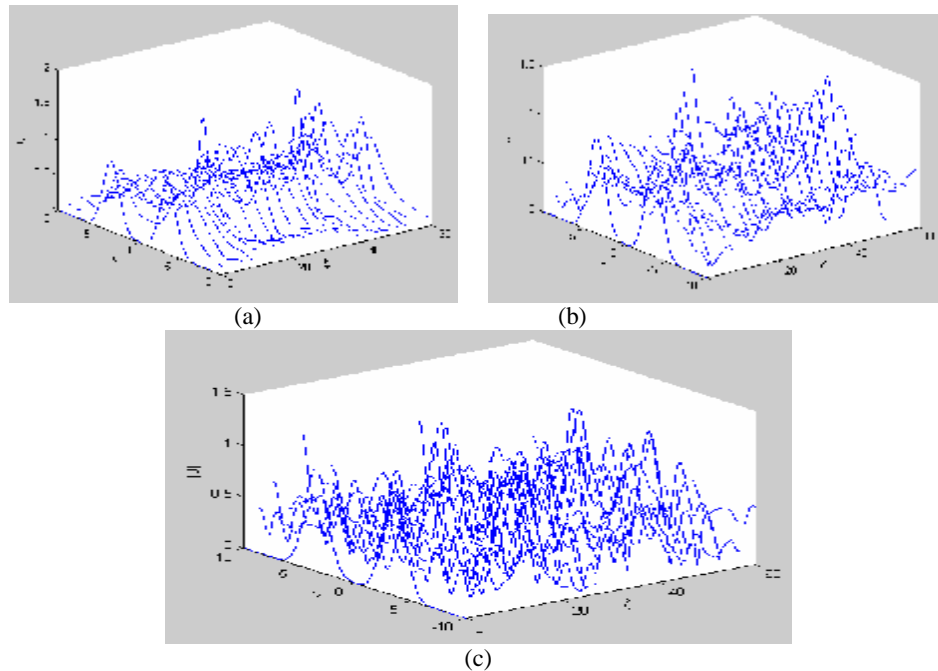
Hasil dan Evaluasi Interaksi Pulsa-Gaussian Di Dalam *Nonlinear* Fiber Optik

Gambar 12(a) sampai 12(c) menunjukkan perambatan dan interaksi sepasang pulsa-Gaussian (lihat persamaan (27)) di dalam *nonlinear* fiber dengan menggunakan metode *pre-emphasis* untuk nilai $C = 0,1, 0,5$ dan $1,5$. Nilai-nilai parameter yang digunakan : $r = 1$, $q_0 = 3,5$ dan $\theta = 0$, $L = 0,1L_D$, $\alpha = 0,2 \text{ dB}$ dan $h = 0,001$.

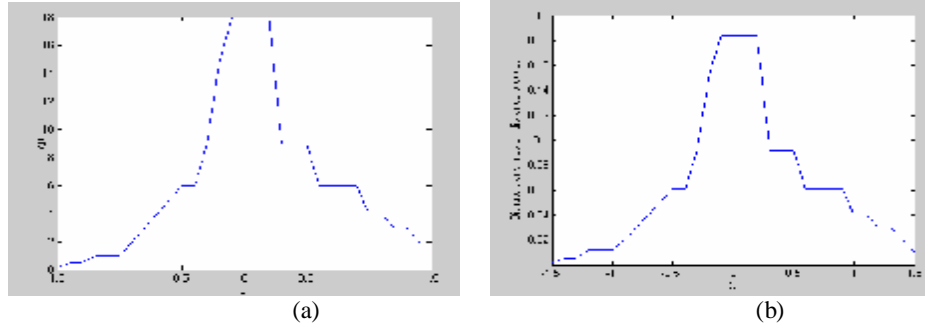


Gambar 12. Perambatan dan interaksi sepasang pulsa-Gaussian untuk positif *chirp*, dengan nilai $C =$ (a) 0,1 (b) 0,5 (c) 1,5.

Gambar 13(a) sampai 13(c) menunjukkan perambatan dan interaksi sepasang pulsa-Gaussian (lihat persamaan (27)) di dalam *nonlinear* fiber dengan metode *pre-emphasis* untuk nilai $C = -0,1, -0,5$ dan $-1,5$. Nilai-nilai parameter yang digunakan : $r = 1, q_0 = 3,5$ dan $\theta = 0, L = 0,1L_D, \alpha = 0,2 \text{ dB}$ dan $h = 0,001$.



Gambar 13. Perambatan dan interaksi sepasang pulsa-Gaussian untuk negatif *chirp*, dengan nilai $C =$ (a) -0,1 (b) -0,5 (c) -1,5.



Gambar 14. (a) Nilai periode osilasi normalisasi, ζ_p , untuk nilai $C = -1,5 \dots 1,5$. (b) Nilai *bit rate transmission distance product*, $B^2 L_T$, untuk nilai $C = -1,5 \dots 1,5$.

Pada Gambar 12 dan 13 terlihat bahwa baik untuk negatif *pre-chirping* maupun positif *pre-chirping* menyebabkan mengecilnya nilai periode osilasi normalisasi, ζ_p . Semakin besar nilai $|C|$ maka nilai ζ_p akan semakin kecil, yang menurut persamaan (29) akan semakin memperkecil nilai *bit rate transmission distance product*. Gambar 14(a) dan 14(b) menunjukkan grafik periode osilasi normalisasi dan *bit rate transmission distance product* sebagai fungsi dari C . Semakin besar nilai $|C|$ maka nilai periode osilasi normalisasi dan *bit rate transmission distance product* semakin mengecil dimana untuk nilai C negatif memberikan penurunan yang lebih cepat daripada nilai C positif.

PENUTUP

Dari hasil-hasil simulasi dan evaluasi yang diperoleh secara keseluruhan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. *SSSFM* dalam menyelesaikan *NSE* memberikan hasil yang sangat akurat, dimana *NSD*-nya terhadap solusi eksak dari *NSE* sangat kecil (dalam orde -8 sampai -9).
2. Metode *pre-emphasis* memberikan hasil yang baik dalam mengkompensasi *loss* pada fiber optik dengan nilai rata-rata *error* amplitudo sepanjang perambatan di dalam fiber optik sejauh $\xi = 30$ adalah sebesar 0,074 dan *error* rata-rata *rms pulse width* adalah sebesar 0,1195.
3. Efek dari *pre-chirping* pada perambatan pulsa-*Gaussian* di dalam *nonlinear* fiber optik baik untuk nilai C positif maupun negatif memberikan efek yang sama yaitu menurunkan nilai rata-rata amplitudo pulsa dan menaikkan nilai rata-rata *rms pulse width* pulsa-*Gaussian*. Semakin besar nilai $|C|$ maka makin besar pula penurunan nilai rata-rata amplitudo pulsa (kenaikan nilai rata-rata *rms pulse width* pulsa). Negatif *pre-chirping* memberikan penurunan amplitudo rata-rata pulsa (kenaikan nilai rata-rata *rms pulse width* pulsa) yang lebih besar dari pada positif *pre-chirping*.
4. Efek dari *pre-chirping* pada perambatan sepasang pulsa-*Gaussian* dan interaksi-nya di dalam *nonlinear* fiber optik, untuk negatif *pre-chirping* maupun positif *pre-chirping* menyebabkan mengecilnya nilai periode osilasi normalisasi, ζ_p . Semakin besar nilai $|C|$ maka nilai ζ_p akan semakin kecil, yang akan semakin memperkecil nilai *bit rate transmission distance product*. Negatif *pre-chirping* memberikan penurunan nilai ζ_p yang lebih besar dari pada positif *pre-chirping*.
5. Dari hasil-hasil dan evaluasi yang diperoleh secara keseluruhan maka dapat disimpulkan bahwa *pre-chirping* menimbulkan efek merugikan bagi perambatan dan interaksi pulsa-*Gaussian* di dalam *nonlinear* fiber optik. Sehingga untuk menghasilkan sistem komunikasi fiber optik yang baik maka pulsa input sebaiknya bebas *chirp*, atau memiliki nilai *chirp* yang rendah dan bernilai positif.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, P. Govind, (1992), *Fiber-Optic Communication Systems*, Willey Series In Microwave And Optical Engineering, (1992).
- C. Palais, Joseph, (2001), *Fiber Optic Communications*, Prentice Hall.
- Agrawal, P. Govind, (1989), *Nonlinear Fiber Optics*, , Academic Press, Sandiego, LA.
- Jong-Hyung Lee, (February 10, 2000), *Analysis and 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.
- Natee Wongsangpaiboon, (May 17, 2000), *Variational Calculation of Optimum Dispersion Compensation For Non-Linear Dispersive Fibers*, Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Endra and S. El Yumin, (August 9 – 10, 2005), “Study of Higher Order Dispersion Effects on Soliton Interaction In Dispersion Shifted Fiber,” Paper submitted to The 8th International Confrence On Quality In Research (QIR), Universitas Indonesia.
- S. Cundiff, B. Collins, L. Boivin, M. Nuss, K. Bergman, W. Knox and S. Evangelides, (1999), “Propagation of highly chirped pulses in fiber-optic communication systems,” *J.Lightwave Tech.* 17, 811-6.
- K. V. Peddanarappagari and M. Brandt-Pearce, (December. 1997) “Volterra series transfer function of single-mode fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol.15, no.12, pp.2232 - 2241.