



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

30.890/H/08



RSF
621.36

Rix
9-1
2007

TUGAS AKHIR RF 1483

**ANALISA PROPAGASI CAHAYA PADA
NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)
MENGUNAKAN SPLIT-STEP FOURIER METHOD**

MEKKA RIADHAH
NRP 2403.100.071

Dosen Pembimbing
Ir. HERU SETIJONO, MSc

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2007

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	28-1-2008
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	229757



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT RF 1483

**ANALYSIS OF LIGHT PROPAGATION
IN *NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)*
USING *SPLIT-STEP FOURIER METHOD***

MEKKA RIADHAH
NRP 2403.100.071

Advisor
Ir. HERU SETIJONO, MSc

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2007

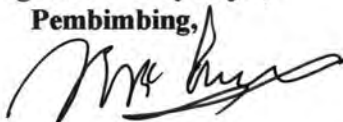
**ANALISA PROPAGASI CAHAYA PADA
NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)
MENGUNAKAN SPLIT-STEP FOURIER METHOD**

TUGAS AKHIR

Oleh:

Mekka Riadhah
NRP. 2403 100 071

Surabaya, Desember 2007
Mengetahui/Menyetujui,
Pembimbing,



Ir. Heru Setijono, MSc
NIP. 130 604 249

**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS**



Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST, MT
NIP. 132 137 895





**ANALISA PROPAGASI CAHAYA PADA
NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)
MENGUNAKAN SPLIT-STEP FOURIER METHOD**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Fotonika
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MEKKA RIADHAH
Nrp.2403 100 071

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|---|---|--------------------|
| 1. Ir. Heru Setijono, MSc |  |(Pembimbing) |
| 2. Dr. Ir. Sekartedjo, MSc |  |(Penguji I) |
| 3. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. N, MSc |  |(Penguji II) |
| 4. Dr. Totok Soehartanto, DEA |  |(Penguji III) |

**SURABAYA
DESEMBER, 2007**

**Analisa Propagasi Cahaya
Pada Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)
Menggunakan Split-Step Fourier Method**

Nama Mahasiswa : MEKKA RIADHAH
NRP : 2403 100 071
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir.Heru Setijono ,Msc

Abstrak

Kebutuhan layanan telekomunikasi yang meningkat menuntut tersedianya jaringan berbasis serat optik yang mampu mentransmisikan data dengan *bitrate* tinggi dan menempuh jarak yang maksimal. Salah satu faktor yang membatasi *bitrate* dan jarak adalah degradasi sinyal berupa pelebaran pulsa (*pulse broadening*). Salah satu cara untuk mengatasinya adalah dengan menggunakan serat optik khusus, yaitu: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*.

Telah dianalisa propagasi cahaya dalam *Reduced Slope Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (RS NZDSF)* sepanjang 25 km di daerah dispersi normal (*Group Velocity Dispersion (GVD)* positif) dan dispersi anomali (*GVD* negatif) dengan menggunakan metode *Split-Step Fourier*. Analisa dilakukan dengan memodelkan pulsa *Gaussian* sebagai pulsa masukan, memplot grafik evolusi pulsa tersebut sepanjang serat optik, dan menghitung nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)*.

Sebagai kondisi awal, pulsa *Gaussian* memiliki *RMS width* 125 ps. Pada daerah dispersi normal terjadi pelebaran dengan $PBR_{25}=7,169$; $T_{FWHM25}=2115$ ps dan di daerah dispersi anomali terjadi penyempitan dengan $PBR_{25}=0,3017$; $T_{FWHM25}=89$ ps. Pelebaran dan penyempitan pulsa ini terjadi karena dispersi kromatik dan efek nonlinier *Self-Phase Modulation (SPM)*. Kemudian RS NZDSF berparameter *GVD* positif dan negatif dipasang seri. Dengan cara ini *bitrate* yang dapat ditransmisikan adalah 737 Mb/s sejauh 50 km, dibandingkan dengan menggunakan *Standard Single Mode Fiber (SMF)* dengan jarak yang sama, *bitrate* hanya mencapai 228 Mb/s.

Kata kunci: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*, *Gaussian pulse*, *Split-Step Fourier Method*

**Analysis of Light Propagation
In Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)
Using Split-Step Fourier Method**

Abstract

The increasing demand of telecommunication services requires high-capacity and long-haul optical communication network. But its maximum bitrate and distance are limited due to signal degradation like pulse broadening. By applying optical fiber like Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF) with special configuration, pulse broadening can be reduced.

Analysis of Gaussian pulse propagating through Reduced-Slope NZDSF over 25 km in normal-dispersion regime (positive Group Velocity Dispersion (GVD)) and anomalous-dispersion regime (negative GVD) using Split-Step Fourier Method reported. Gaussian pulse modeled as input pulse and its evolution plotted along the fiber. Then, the Pulse Broadening Ratio (PBR) calculated.

Initially, the pulse has RMS width of 125 ps. In normal-dispersion regime, it broadened ($PBR_{25}=7,169; T_{FWHM25}=2115\text{ps}$). In anomalous-dispersion regime, it narrowed ($PBR_{25}=0,3017; T_{FWHM25}=89\text{ps}$). Both occur caused by chromatic dispersion and Self-Phase Modulation (SPM). Then, positive-GVD RS NZDSF and negative-GVD RS NZDSF are configured serially. This configuration achieves 737 Mb/s bitrate transmission over 50 km. Compared with *Standard Single Mode Fiber (SMF)* does is only 228 Mb/s.

Keywords: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF), Gaussian pulse, Split-Step Fourier Method*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah. Allah SWT memberikan petunjuk yang tak terbatas kepada penulis hingga dapat bereksitasi ke level energi yang lebih tinggi, meluruh, dan kemudian mengemisikan foton. Salah satu foton tersebut adalah Tugas Akhir ini yang berjudul **“Analisa Propagasi Cahaya Pada *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* Menggunakan *Split-Step Fourier Method*”**.

Tugas Akhir ini ditulis dalam rangka menuangkan ide, melatih kemampuan analisa, dan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar kesarjanaan Strata-1 di Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir, penulis dihadapkan pada berbagai hambatan dan kesulitan. Namun tidak sedikit pula bantuan dari pihak berikut. Penulis sangat menyadari bahwa rangkaian ucapan terima kasih sangat tidak sebanding dengan dukungan yang selalu diberikan. Meskipun demikian, penulis tetap menyebutkan mereka sebagai penghormatan yang mendalam.

1. Dr. Bambang L. Widjiantoro, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
2. Ir. Heru Setijono, M.Sc selaku dosen pembimbing dan kepala Laboratorium Rekayasa Fotonika, terima kasih atas bimbingan dan diskusi sebagai pengarahannya bagi penulis tidak hanya dalam rangka pengerjaan Tugas Akhir namun juga sebagai bekal hidup.
3. Ir. Purwadi Agus Darwito, MSc selaku dosen wali yang mengarahkan penulis saat belajar di ITS, dan juga seluruh dosen dan staf jurusan Teknik Fisika.
4. Abah dan Mama selaku sumber doa dan kekuatan yang tidak bertepi.

5. Aa Eddie dan Ading Nisa selaku sumber inspirasi tak terbatas.
6. Aa Eko yang selalu mengingatkan agar tetap fokus pada pengerjaan Tugas Akhir.
7. Teman-teman di Jurusan Teknik Fisika khususnya *crew* Lab. Rekayasa Fotonika.
8. Teman-teman di ITS Foreign Language Society (IFLS)
9. *Michael Bubble, your "HOME" really heals me.*
10. *John C. Maxwell, your equations are tremendous!*
11. *G. P. Agrawal, your books are enlightening!*
12. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis sangat mengharapkan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak terkait dengan penelitian dan penerapan serat optik khususnya dalam bidang telekomunikasi. Terima Kasih.

Surabaya, 2007

Penulis

DAFTAR ISI



BAB	HALAMAN
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Abstrak	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	viii
Daftar Tabel	x
Daftar Simbol	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Permasalahan	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan	5
1.7 Manfaat Tugas Akhir	6
BAB II <i>NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)</i> DAN PROPAGASI CAHAYA PADA SERAT OPTIK	7
2.1 <i>Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)</i>	7
• Jenis <i>Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)</i>	8
• Aplikasi <i>Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)</i>	11
2.2 Propagasi Cahaya Pada Serat Optik	13
• <i>Nonlinier Schroedinger Equation (NLSE)</i>	15
• Pulsa Cahaya dalam Serat Optik	23

BAB III PENERAPAN METODE	
<i>SPLIT-STEP FOURIER (SSF)</i>	27
3.1 Penerapan Metode <i>Split-Step Fourier (SSF)</i>	
Sebagai Solusi Persamaan <i>Nonlinear Schroedinger</i>	27
3.2 Algoritma Metode <i>Split-Step Fourier (SSF)</i>	30
BAB IV ANALISA PROPAGASI CAHAYA PADA	
<i>NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)</i>	35
4.1 Propagasi Cahaya di Daerah Dispersi Normal	36
4.2 Propagasi Cahaya di Daerah Dispersi Anomali	43
BAB V PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56
Daftar Pustaka	57
Lampiran A	65
Lampiran B	83

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR		HALAMAN
Gambar 1.1	Flowchart Metodologi Penelitian	4
Gambar 2.1	Karakteristik Dispersi <i>NZDSF</i> , <i>DS</i> , dan <i>SMF</i>	9
Gambar 2.2	Profil Indeks Bias <i>NZDSF</i>	10
Gambar 2.3	Kompensasi Dispersi dengan <i>NZDSF</i>	11
Gambar 2.4	Penggunaan <i>NZDSF</i> pada Sistem Transmisi	12
Gambar 2.5	Grafik <i>Loss vs Wavelength</i>	16
Gambar 2.6	Variasi Parameter Dispersi terhadap Panjang Gelombang untuk <i>Single-Mode Fiber</i>	17
Gambar 2.7	Variasi Indeks Bias terhadap Panjang Gelombang Sumber Cahaya	19
Gambar 2.8	Pelebaran Spektral Pulsa Gaussian disebabkan SPM	21
Gambar 2.9	Evolusi Bentuk Pulsa Dalam Daerah (a) Dispersi Normal dan (b) Dispersi Anomali	22
Gambar 2.10	Pulsa <i>Gaussian</i>	24
Gambar 2.11	Pelebaran Pulsa <i>Gaussian</i>	25
Gambar 3.1	Ilustrasi Metode SSF Simetri	29
Gambar 3.2	Flowchart Analisa Propagasi Cahaya	31
Gambar 3.3	Flowchart Algoritma Metode <i>Split-Step Fourier (SSF)</i>	32
Gambar 4.1	Pulsa Masukan <i>Gaussian</i> (dispersi normal)	37
Gambar 4.2	Evolusi Pulsa Sepanjang 25 km	38
Gambar 4.3	<i>Pulse Broadening Ratio</i> ($\beta_2 = 5,0983 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$)	39
Gambar 4.4	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 5 \text{ km}$	40
Gambar 4.5	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 10 \text{ km}$	40
Gambar 4.6	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 15 \text{ km}$	41
Gambar 4.7	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 20 \text{ km}$	42
Gambar 4.8	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 25 \text{ km}$	42

Gambar 4.9	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 0, 10, \text{ dan } 25 \text{ km}$	43
Gambar 4.10	Pulsa Masukan <i>Gaussian</i> (dispersi anomali)	45
Gambar 4.11	Evolusi Pulsa Sepanjang 25 km	45
Gambar 4.12	Pulse Broadening Ratio ($\beta_2 = -5,0983 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$)	46
Gambar 4.13	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 5 \text{ km}$	47
Gambar 4.14	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 10 \text{ km}$	48
Gambar 4.15	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 15 \text{ km}$	48
Gambar 4.16	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 20 \text{ km}$	49
Gambar 4.17	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 25 \text{ km}$	50
Gambar 4.18	Pulsa <i>Gaussian</i> pada $L = 0, 10, \text{ dan } 25 \text{ km}$	50

DAFTAR TABEL

TABEL		HALAMAN
Tabel 2.1	Tipe <i>SMF</i> Spesifikasi <i>ITU</i>	7
Tabel 2.2	<i>Optical Properties LEA NZDSF</i> dan <i>RS NZDSF</i>	9
Tabel 2.3	Nilai RDS dari <i>SMF</i> dan <i>NZDSF</i>	10
Tabel 4.1	Spesifikasi dan Hasil Perhitungan <i>NZDSF</i> (dispersi normal)	37
Tabel 4.2	Hasil Simulasi <i>Pulsa Gaussian</i> di Daerah Dispersi Normal	43
Tabel 4.3	Spesifikasi dan Hasil Perhitungan <i>NZDSF</i> (dispersi anomali)	44
Tabel 4.4	Hasil Simulasi <i>Pulsa Gaussian</i> di Daerah Dispersi Anomali	51
Tabel 4.5	Spesifikasi dan Hasil Perhitungan <i>SMF</i>	54
Tabel 4.6	Pelebaran Pulsa dan <i>Bitrate NZDSF</i> Seri dan <i>SMF</i>	55

DAFTAR SIMBOL

A_{eff}	= <i>effective area</i>
k	= faktor koreksi
MFD	= <i>Mode Field Diameter</i>
E	= vektor medan elektrik
H	= vektor medan magnetik
D	= densitas fluks elektrik
B	= densitas fluks magnetik
J	= vektor densitas arus
ρ_f	= vektor densitas muatan
t	= waktu
ϵ_0	= permitivitas vakum
μ_0	= permeabilitas vakum
P	= polarisasi elektrik
M	= polarisasi magnetik
c	= kecepatan cahaya
P_L	= polarisasi linier
P_{NL}	= polarisasi nonlinier
r	= posisi
ω	= frekuensi
n	= indeks bias serat optik
A	= amplitudo
α	= <i>fiber loss</i>
β	= konstanta mode propagasi
γ	= koefisien nonlinier
P_T	= daya yang ditransmisikan
P_0	= daya keluaran sumber cahaya
α_{dB}	= <i>fiber loss</i> dalam dB/km
L	= panjang serat optik
v_g	= <i>group velocity</i>
n_g	= <i>group index</i>
D	= parameter dispersi



λ	= panjang gelombang
ω_0	= frekuensi pusat
n_0	= indeks bias linier
n_2	= koefisien indeks bias nonlinier
L_D	= <i>dispersion length</i>
T_0	= lebar pulsa
L_{NL}	= <i>nonlinear length</i>
N	= parameter nonlinier
T	= transformasi waktu
z	= jarak
U	= amplitudo ternormalisasi
\tilde{U}	= transformasi <i>Fourier</i> amplitudo ternormalisasi
B_t	= <i>bitrate</i>
σ	= <i>RMS (Root Mean Square) width</i>
τ	= <i>FWHM (Full-Width at Half-Maximum)</i>
ϕ	= fase
\hat{D}	= operator dispersi dan absorpsi dalam medium linier
\hat{N}	= operator nonlinier
h	= <i>step size</i>
P_{TH}	= <i>daya threshold</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Karakteristik yang harus dimiliki suatu sistem komunikasi serat optik antara lain adalah mampu mentransmisikan sinyal dengan *bit rate* dan jarak yang maksimal. Agar *bit rate* dan jarak dapat maksimal, maka degradasi sinyal harus diminimalkan. Degradasi sinyal ketika terpropagasi dalam serat optik dapat disebabkan oleh penyerapan daya oleh serat optik (*fiber attenuation*), dispersi atau pelebaran pulsa (*pulse spreading*) dan fenomena ketidaklinieran serat optik (*fiber nonlinearity*). Salah satu cara untuk mengatasi degradasi sinyal adalah dengan menggunakan serat optik khusus, yaitu: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*.

Untuk itulah dianalisa propagasi cahaya dalam bentuk pulsa *Gaussian* pada NZDSF untuk mengetahui kemampuan NZDSF mengatasi degradasi sinyal, terutama *pulse spreading* dan *fiber nonlinearity*. Propagasi cahaya direpresentasikan oleh persamaan *Schrödinger* nonlinier atau *Nonlinear Schrödinger Equation (NLSE)*. Untuk mendapatkan solusi NLSE digunakan metode *Split-Step Fourier (SSF)*. Metode SSF membagi NZDSF ke dalam beberapa bagian kecil, dimana setiap bagian ini akan terjadi pelebaran pulsa dan efek nonlinier.

Analisa propagasi cahaya dalam NZDSF ini dilakukan dengan menghitung nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)* dan bentuk pulsa pada jarak tertentu.

1.2 Permasalahan

Dengan memperhatikan pentingnya pengaruh degradasi sinyal dalam membatasi *bitrate* dan jarak dalam sistem komunikasi serat optik, maka yang menjadi permasalahan dalam tugas akhir ini adalah bagaimana menganalisa propagasi cahaya

dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* dengan metode *Split-Step Fourier (SSF)* sehingga dapat diketahui kinerja serat optik tersebut dari nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)* dan bentuk pulsa.

1.3 Tujuan Penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini memiliki tujuan untuk menganalisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* dengan metode *Split-Step Fourier*.

1.4 Batasan Permasalahan

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, permasalahan yang terkait dengan analisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* diberi batasan-batasan sebagai berikut:

- Diasumsikan bahwa tidak terjadi *chirping* pada sumber cahaya dan perhitungan dilakukan pada *center wavelength*.
- Diasumsikan bahwa *fiber attenuation* bernilai nol sehingga tidak terjadi *power loss*.
- Nilai dispersi dan *effective area* NZDSF yang digunakan mengacu pada *datasheet*.
- Diasumsikan bahwa NZDSF diimplementasikan pada sistem komunikasi serat optik *single-channel*.

1.5 Metodologi Penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini menggunakan metodologi sebagai berikut.

a. Studi Literatur

Tahap ini dilakukan dengan cara mencari informasi dari buku dan jurnal penelitian untuk mengetahui dan memahami tentang *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*, *Nonlinear Schrödinger Equation (NLSE)* dan metode *Split-Step Fourier*.

b. Simulasi

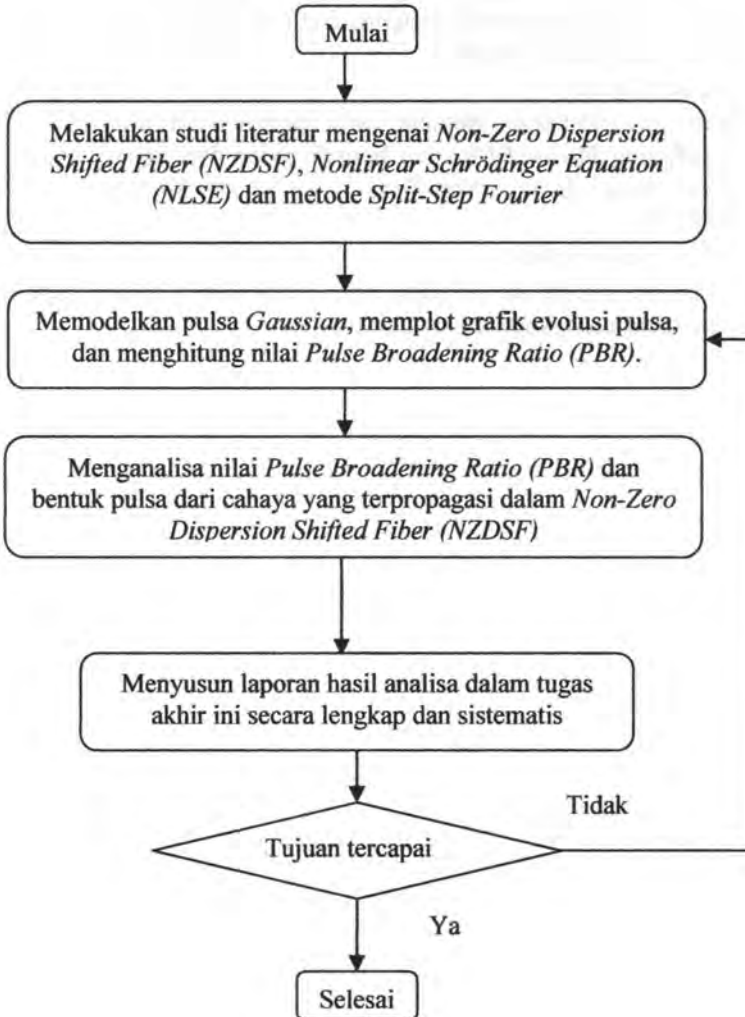
Tahap ini dilakukan dengan cara memodelkan pulsa masukan berupa pulsa *Gaussian*, memplot grafik evolusi pulsa tersebut untuk panjang serat optik tertentu dan menghitung nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)*.

c. Analisa Simulasi

Tahap ini dilakukan dengan cara menganalisa nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)* dan bentuk pulsa dari cahaya yang terpropagasi dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*.

d. Penyusunan Laporan

Tahap ini dilakukan dengan cara menyusun laporan tugas akhir secara lengkap dan sistematis.



Gambar 1.1 Flowchart Metodologi Penelitian

1.6 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini disusun dalam lima bab sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang pentingnya analisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* dengan menggunakan metode *Split-Step Fourier (SSF)*, permasalahan yang terkait dengan analisa, tujuan penelitian dan batasan permasalahan dalam analisa, metodologi penelitian dan sistematika laporan yang memaparkan isi tugas akhir secara singkat.

Bab II NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF) DAN PROPAGASI CAHAYA PADA SERAT OPTIK

Bab ini mengenai teori dasar *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*, propagasi cahaya dalam serat optik, dan *Nonlinear Schrödinger Equation (NLSE)*

Bab III Penerapan Metode *Split-Step Fourier (SSF)*

Bab ini menjelaskan penerapan metode *Split-Step Fourier (SSF)* untuk menganalisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*.

Bab IV Analisa Propagasi Cahaya Pada *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*

Bab ini menjelaskan analisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* berdasarkan nilai *Pulse Broadening Ratio (PBR)* dan bentuk pulsa.

Bab V Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari pengerjaan tugas akhir dan saran dari penulis terkait dengan kinerja *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* maupun arah pengembangan dari tugas akhir ini.

1.7 Manfaat Tugas Akhir

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan pertimbangan mengenai aplikasi NZDSF sebagai alternatif dalam sistem komunikasi serat optik terkait dengan kompensasi dispersi, mengingat peningkatan kebutuhan layanan telekomunikasi yang menuntut tersedianya jaringan dengan *bitrate* tinggi dan jarak maksimal, disamping *Standar Single Mode Fiber (SMF)* yang telah umum dipakai di Indonesia.

BAB II

NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF) DAN PROPAGASI CAHAYA PADA SERAT OPTIK

Salah satu komponen yang paling penting dalam suatu sistem komunikasi serat optik adalah serat optik itu sendiri, karena karakteristik transmisinya memainkan peranan penting dalam menentukan performansi sistem secara keseluruhan. Pada bagian pertama dalam dasar teori ini akan dibahas salah satu tipe serat optik yang akan dianalisa dalam tugas akhir ini, yaitu: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)*. Sedangkan bagian kedua akan dibahas propagasi cahaya dalam serat optik

2.1 Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)

Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF) merupakan salah satu tipe dari serat optik *single mode* atau *Single Mode Fiber (SMF)*. Berdasarkan spesifikasi dari *ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication)*, *Single Mode Fiber (SMF)* dibagi dalam beberapa tipe seperti dalam tabel berikut.

Tabel 2.1 Tipe *SMF* Spesifikasi *ITU-T* (Anonimous, 2002)

Type SMF	Spesifikasi ITU-T	Keterangan
B1.1	G.652	Standard Singlemode Fiber
B1.2	G.654	Cutoff Shifted Fiber
B1.3	G.652	Low Water Peak Fiber
B2	G.653	Dispersion Shifted Fiber
B4	G.655	Non-Zero Dispersion Shifted Fiber

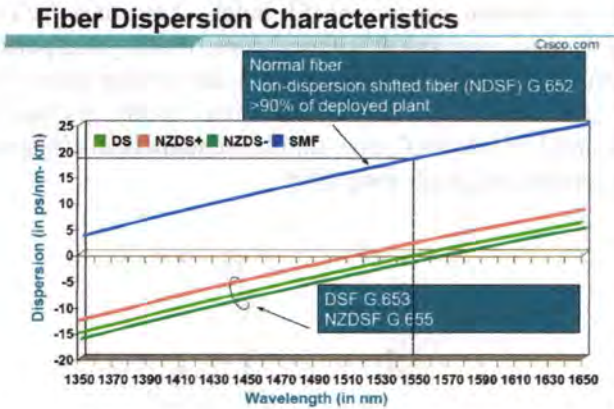
Untuk selanjutnya yang dibahas adalah serat optik spesifikasi *ITU-T G.655*, yaitu tipe *single-mode NZDSF (nonzero dispersion shifted fiber)* yang memanfaatkan karakteristik dispersi yang menekan fenomena *Four-Wave Mixing (FWM)*. *FWM* merupakan masalah pada sistem *Wavelength Division Multiplexing (WDM)*. *NZDSF* diaplikasikan untuk sistem komunikasi jarak jauh dan *bit rate* tinggi.

Untuk memperoleh sistem komunikasi dengan jarak tranmisi maksimum dan kapasitas tinggi tersebut, maka nilai dispersi harus minimum pada panjang gelombang dengan atenuasi minimum yaitu 1550 nm.

Kenyataan ini merupakan ide dasar untuk mendesain serat optik yang memiliki dispersi minimum pada panjang gelombang tersebut. Hal ini dapat dilakukan dengan memodifikasi nilai *waveguide dispersion* serat optik tersebut. *Waveguide dispersion* dimodifikasi dengan cara mengubah profil indeks bias serat optik. *Waveguide dispersion* sendiri adalah fungsi radius *core*, *refractive-index difference*, dan bentuk profil indeks bias.

- Jenis Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)

NZDSF didisain untuk mengatasi permasalahan yang dihadapi oleh *dispersion-shifted fiber*. Berdasarkan nilai dispersi, *NZDSF* terdiri atas dua jenis, yaitu *NZD+* dan *NZD-*. Yang membedakan keduanya adalah *zero-dispersion wavelength*. *Zero-dispersion wavelength* untuk *NZD+* berkisar 1510 nm, sedangkan untuk *NZD-* adalah 1580 nm. Karena titik dispersi bernilai nol ini berada diluar *window* komunikasi, efek *four-wave mixing* dan efek non-linier lainnya dapat diminimalkan. Berikut adalah gambar yang menunjukkan perbandingan karakteristik dispersi *NZDSF (NZD+ dan NZD-)* terhadap serat optik *single-mode standar (SMF)* dan serat optik *dispersion-shifted (DS)*.



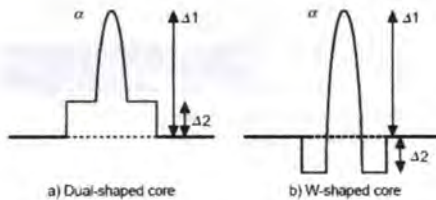
Gambar 2.1 Karakteristik Dispersi NZDSF, DS, dan SMF
(Anonymous, 2004)

Berikut adalah *optical properties* dari dua tipe NZDSF, yaitu: *Large Effective Area NZDSF (LEA NZDSF)* dan *Reduced Slope NZDSF (RS NZDSF)*. LEA NZDSF adalah NZDSF yang didisain untuk memiliki *effective area* yang lebih besar daripada serat optik *single mode* biasa. RS NZDSF adalah NZDSF yang didisain untuk memiliki *dispersion slope* yang lebih kecil daripada serat optik *single mode* biasa.

Tabel 2.2 *Optical Properties LEA NZDSF dan RS NZDSF*
(Salaj Sinha, 2004)

Optical Properties	LEA NZDSF	RS NZDSF
Attenuation at 1550 nm (dB/km)	$\leq 0,22$	$\leq 0,22$
Attenuation at 1625 nm (dB/km)	$\leq 0,24$	$\leq 0,24$
MFD (μm) at 1550 nm	9,6 +/- 0,4	8,4 +/- 0,6
Effective Area (μm^2)	72 (typical)	55 (typical)
Dispersion 1530 – 1625 nm (ps/nm-km)	2,0 – 11,2	2,6 – 8,9
Dispersion Slope (ps/nm ² -km)	$\leq 0,09$	$\leq 0,05$

Berikut adalah contoh profil indeks bias dari NZDSF, yaitu: *dual-shaped core* dan *W-shaped core*. Profil yang pertama lebih mudah dalam hal fabrikasi, namun *dispersion slope* yang dihasilkan tidak bisa lebih rendah dari 0,06 ps/nm²/km. Sedangkan untuk *W-shaped core*, untuk mendapatkan *dispersion slope* yang rendah juga tergolong sulit.



Gambar 2.2 Profil Indeks Bias NZDSF (Naomi Kumano, 2002)

Hingga saat ini, ada tiga tipe NZDSF, yaitu: Tipe A, Tipe B, dan Tipe C. Tipe A memiliki *effective area* yang besar. Tipe B memiliki *dispersion slope* yang kecil. Tipe C memiliki dispersi yang lebih tinggi +8ps/nm.km pada panjang gelombang 1550 nm, untuk aplikasi pada S-band.

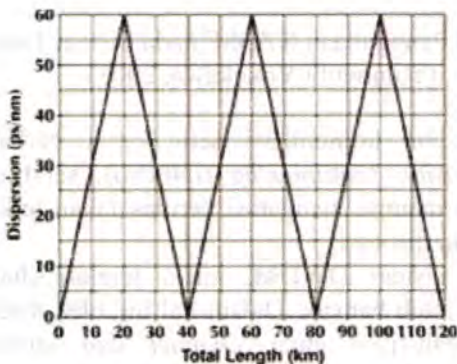
Jika *bit rate* sistem transmisi meningkat, maka nilai dispersi dan *dispersion slope* suatu NZDSF harus dikompensasi dengan *Dispersion Compensating Fiber (DCF)*. Dalam disain DCF untuk kebutuhan ini, dikenal istilah *Relative Dispersion Slope (RDS)*. RDS adalah perbandingan *dispersion slope* terhadap dispersi.

Tabel 2.3 Nilai RDS dari SMF dan NZDSF (Tomoyuki Yokokawa, 2003)

Jenis Serat Optik		RDS @ 1550 nm
SMF		0.0034
NZDSF	Tipe A	0.020
	Tipe B	0.010
	Tipe C	0.0075

- Aplikasi Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)

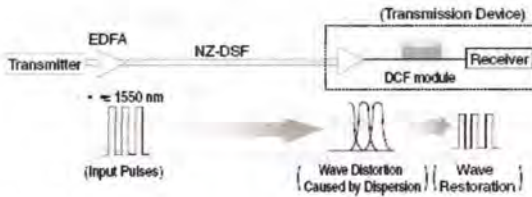
Untuk aplikasi jarak jauh, *NZD+* dan *NZD-* dipasang secara bergantian dengan tujuan kompensasi dispersi. Seperti gambar berikut ini. *NZD+* dan *NZD-* dipasang secara dispersi dengan harapan dispersi pada ujung penerima bernilai nol.



Gambar 2.3 Kompensasi Dispersi dengan *NZDSF*
(Anonimous, 2005)

Konfigurasi *NZDSF* seperti gambar diatas tersebut biasanya diaplikasikan untuk *undersea system* atau sistem komunikasi serat optik bawah laut.

NZDSF meminimalkan dispersi kromatik pada daerah panjang gelombang 1550 nm, dimana atenuasi bernilai rendah. Dengan demikian, *NZDSF* dapat diaplikasikan pada transmisi kecepatan tinggi (misalnya: OC-192, 10 Gb/s) dan jarak yang jauh dengan atenuasi rendah, sehingga mengurangi jumlah perangkat yang digunakan untuk regenerasi sinyal sepanjang *link* serat optik tersebut.



Gambar 2.4 Penggunaan NZDSF pada Sistem Transmisi
(Tomoyuki Yokokawa, 2003)

Pada sistem komunikasi serat optik berbasis *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)*, serat optik yang digunakan harus mampu mengatasi permasalahan terkait dengan efek nonlinier dan dispersi.

Dengan sistem DWDM, maka jumlah channel yang digunakan akan lebih banyak. Dalam hal ini, efek nonlinier akan membatasi jumlah/spasi antar *channel* dan jarak/kecepatan transmisi. Cara untuk mengurangi pengaruh efek nonlinier adalah dengan memperbesar *effective area* dari serat optik.

Pada *NZDSF*, *effective area* didefinisikan persamaan berikut. (Shashi Kant)

$$A_{eff} = k \times \pi \times MFD^2 \quad (2.1)$$

MFD adalah *mode field diameter*, sedangkan k adalah faktor koreksi dengan range 0,95 – 1,03.

Pada *NZDSF*, nilai dispersi memang didisain tidak sama dengan nol. Hal ini dimaksudkan untuk mengatasi salah satu efek nonlinier, yaitu: *Four-Wave Mixing (FWM)*. FWM menyebabkan interaksi antar *channel* ketika terdapat kecocokan fase antar *channel* tersebut akibat nilai dispersi yang nol.

Jika *band* panjang gelombang semakin lebar, maka perbedaan dispersi pada kedua sisi *band* tersebut akan menjadi lebih besar. Sehingga, untuk transmisi jarak jauh, kompensasi

dispersi akan menjadi sulit. Agar transmisi jarak jauh dan berkecepatan tinggi dengan kompensasi yang mudah pada *band* yang lebar dapat dicapai, maka *dispersion slope* harus diperkecil.

2.2 Propagasi Cahaya Pada Serat Optik

Sebagai gelombang elektromagnetik, propagasi cahaya dalam serat optik dapat direpresentasikan oleh persamaan Maxwell berikut. (G.P. Agrawal, 2001)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.5)$$

E adalah vektor medan elektrik dan H adalah vektor medan magnetik. Sedangkan D adalah densitas fluks elektrik dan B densitas fluks magnetik. Vektor densitas arus J dan densitas muatan ρ_f sebagai sumber medan elektromagnetik. Pada serat optik tidak terdapat muatan bebas sehingga $J = 0$ dan $\rho_f = 0$.

Fluks densitas D dan B akan meningkat sebagai tanggapan terhadap medan elektrik E dan medan magnetik H yang terpropagasi dalam serat optik.

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.6)$$

$$B = \mu_0 H + M \quad (2.7)$$

ε_0 adalah permitivitas vakum dan μ_0 adalah permeabilitas vakum. Sedangkan P adalah polarisasi elektrik dan M adalah polarisasi magnetik. Untuk medium nonmagnetik seperti serat optik maka $M = 0$.

Persamaan Maxwell dapat digunakan untuk mendapatkan persamaan gelombang yang menggambarkan propagasi cahaya

dalam serat optik. Dari persamaan (2.2), (2.3), (2.6), dan (2.7), dengan mengeliminasi B dan D diperoleh persamaan berikut.

$$\nabla \times \nabla \times E = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Dalam persamaan diatas, c adalah kecepatan cahaya dan digunakan hubungan $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$. Polarisasi P terdiri atas dua bagian, yaitu: linier dan nonlinier.

$$P(r,t) = P_L(r,t) + P_{NL}(r,t) \quad (2.9)$$

Karena pada serat optik, bagian polarisasi yang nonlinier tergolong lemah, maka $P_{NL} = 0$. Dengan demikian, persamaan (2.8) ditulis dalam domain frekuensi seperti berikut ini.

$$\nabla \times \nabla \times \hat{E}(r,\omega) - \epsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \hat{E}(r,\omega) = 0 \quad (2.10)$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi bentuk berikut.

$$\nabla^2 \hat{E} + n^2(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} \hat{E} = 0 \quad (2.11)$$

Jika suatu pulsa yang terpropagasi dalam serat optik memiliki lebar antara ~10 ns hingga 10 fs, maka dispersi dan efek nonlinier akan mempengaruhi bentuk dan spektrum pulsa tersebut.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_L}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

- Nonlinear Schroedinger Equation (NLSE)

Untuk merepresentasikan propagasi cahaya dalam serat optik digunakan persamaan *Schroedinger* nonlinier atau *Nonlinear Schroedinger Equation (NLSE)*. (G.P. Agrawal, 2001)

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (2.13)$$

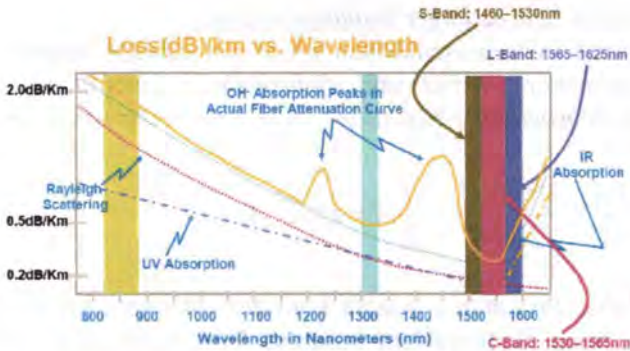
Fiber loss atau α adalah konstanta atenuasi, yaitu suatu parameter yang menunjukkan besarnya kehilangan daya selama transmisi sinyal dalam serat optik. Jika P_0 adalah daya keluaran sumber cahaya yang akan dimasukkan ke serat optik sepanjang L , maka daya yang ditransmisikan adalah sebagai berikut.

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (2.14)$$

Satuan dari α adalah dB/km.

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_T}{P_0}\right) = 4,343\alpha \quad (2.15)$$

Fiber loss bergantung pada panjang gelombang cahaya. Serat optik memiliki *loss* terendah sekitar 0,2 dB/km pada panjang gelombang 1,55 μm . Nilai *loss* akan lebih tinggi pada daerah panjang gelombang yang lebih pendek.



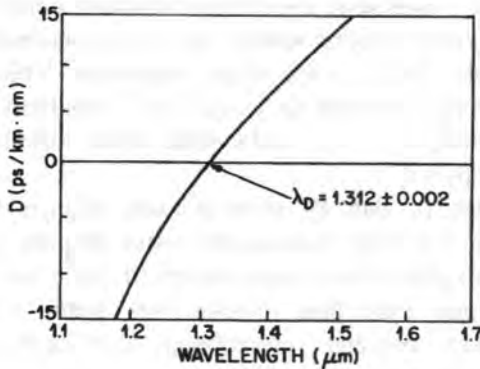
Gambar 2.5 Grafik *Loss vs Wavelength* (Josef Vojtech, 2005)

Parameter β_1 dan β_2 adalah fungsi dari indeks bias n dan turunannya sesuai dengan persamaan berikut.

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (2.16)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (2.17)$$

n_g adalah *group index* dan v_g adalah *group velocity*. Secara fisis, selubung dari suatu pulsa optik bergerak dengan kecepatan v_g sedangkan β_2 mewakili dispersi dari *group velocity* ini yang selanjutnya akan menyebabkan pelebaran pulsa (*pulse broadening*). Fenomena ini disebut *group-velocity dispersion (GVD)* dan β_2 disebut parameter GVD.



Gambar 2.6 Variasi Parameter Dispersi terhadap Panjang Gelombang untuk *Single-Mode Fiber* (G.P. Agrawal, 2001)

Pada panjang gelombang sekitar $1,27 \mu\text{m}$, β_2 bernilai 0 dan akan bernilai negatif untuk panjang gelombang yang lebih tinggi. Panjang gelombang dimana nilai β_2 menjadi 0 disebut *zero-dispersion wavelength* (λ_D). Meskipun demikian, pada panjang gelombang ini, dispersi tidak akan benar-benar hilang karena parameter dispersi orde ketiga β_3 akan muncul.

Hubungan antara parameter dispersi D dengan β_2 adalah sebagai berikut.

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (2.18)$$

Pada serat optik jenis *Zero-Dispersion Shifted Fiber* dan *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*, λ_D digeser ke daerah panjang gelombang $1,55 \mu\text{m}$. Untuk *Zero-Dispersion Shifted Fiber*, pada panjang gelombang tersebut, $D \approx 0$. Sedangkan untuk *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*, $D \neq 0$.

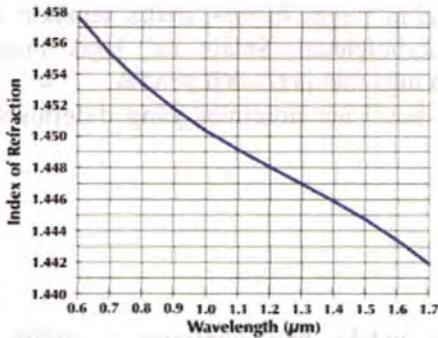
Positif atau negatifnya parameter GVD akan mempengaruhi efek nonlinier yang muncul. Untuk panjang

gelombang $\lambda < \lambda_D$, pada serat optik terjadi dispersi normal dimana $\beta_2 > 0$. Dalam daerah dispersi normal ini, komponen berfrekuensi tinggi dari suatu pulsa optik akan merambat lebih lambat daripada komponen berfrekuensi rendah. Sebaliknya, untuk panjang gelombang $\lambda > \lambda_D$, pada serat optik terjadi dispersi anomali dimana $\beta_2 < 0$.

Parameter β_1 dan β_2 menunjukkan adanya fenomena *chromatic dispersion* yang merupakan bentuk respons dari suatu medium terhadap gelombang elektromagnetik yang merambat di dalamnya. Dengan kata lain, indeks bias suatu serat optik bergantung pada panjang gelombang dari cahaya yang terpropagasi sepanjang serat tersebut.

Chromatic dispersion merupakan fenomena yang menunjukkan bahwa cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda akan terpropagasi dengan kecepatan yang berbeda pula, meskipun merambat hanya dalam satu mode. *Chromatic dispersion* disebabkan oleh dua hal yang disebut *material dispersion* dan *waveguide dispersion*.

Material dispersion terkait dengan sumber cahaya yang memiliki *spectral width* tertentu. Setiap laser memiliki range panjang gelombang. Kecepatan cahaya yang merambat dalam serat optik akan bervariasi terhadap panjang gelombang tersebut. Gambar berikut mengilustrasikan indeks bias silika yang berubah terhadap panjang gelombang. Karena pulsa cahaya dari laser terdiri atas beberapa panjang gelombang, maka akan terjadi pelebaran pulsa atau dispersi. Pelebaran pulsa terjadi karena beberapa panjang gelombang tersebut merambat dengan kecepatan yang berbeda-beda.



Gambar 2.7 Variasi Indeks Bias terhadap Panjang Gelombang Sumber Cahaya (Anonimous, 2005)

Waveguide dispersion terkait dengan adanya daya optik yang merambat tidak hanya di dalam *core* tetapi juga melewati *cladding*. Cahaya yang terpropagasi di dalam *cladding* memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada cahaya di dalam *core*.

Dispersi dalam serat optik ini memiliki peran yang besar terkait dengan propagasi suatu pulsa optik. Komponen spektral yang berbeda akan merambat dengan kecepatan yang berbeda pula. Secara matematis, efek dispersi dapat dihitung dengan menjabarkan konstanta mode propagasi β dalam deret Taylor pada frekuensi ω_0 dimana spektrum pulsa berpusat:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.19)$$

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.20)$$

Fenomena *chromatic dispersion* akan membatasi nilai *bitrate* yang dapat diterapkan dalam suatu sistem komunikasi serat optik. Semakin tinggi *bitrate*, maka semakin rendah nilai dispersi yang diperbolehkan. Selain itu, jarak maksimal yang masih dibolehkan juga menjadi lebih pendek.

γ adalah koefisien nonlinier yang didefinisikan sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} \quad (2.21)$$

Koefisien indeks bias nonlinier n_2 untuk serat optik bervariasi dalam range $2,2-3,4 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$.

Salah satu bentuk ketidaklinieran pada serat optik adalah refraksi nonlinier. Refraksi nonlinier adalah suatu fenomena yang menunjukkan bergantungnya indeks bias terhadap intensitas cahaya yang terpropagasi dalam serat optik. Ada dua jenis efek nonlinier yang sering dibahas terkait dengan refraksi nonlinier ini, yaitu: *Self-Phase Modulation (SPM)* dan *Cross-Phase Modulation (XPM)*.

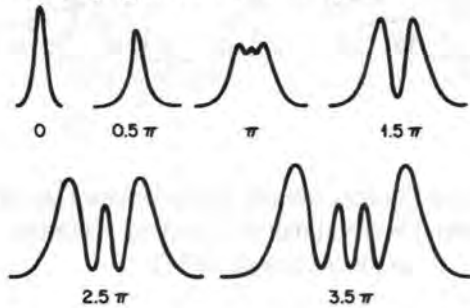
Untuk selanjutnya yang akan dibahas adalah efek SPM, terkait dengan pengaruh dari kombinasi SPM dan dispersi kromatik. Sedangkan efek XPM berpengaruh pada sistem komunikasi serat optik *multi-channel*.

Variasi intensitas suatu sinyal optik ketika terpropagasi dalam serat optik dapat mengubah indeks biasnya. (Hyunchin Kim, 2000)

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2 I \quad (2.22)$$

Variasi indeks bias ini menyebabkan terjadinya pergeseran fase. Pergeseran fase yang dialami oleh suatu medan optik selama propagasinya dalam serat optik disebut *Self-Phase Modulation (SPM)*. Pergeseran fase akan menghasilkan

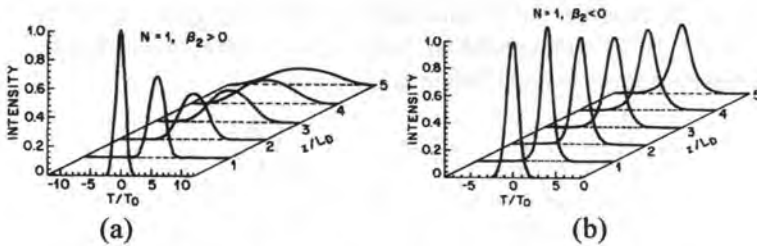
komponen frekuensi baru atau yang disebut dengan *frequency chirp*. Jadi, SPM menyebabkan pelebaran spektral pulsa ketika pulsa tersebut terpropagasi dalam serat optik.



Gambar 2.8 Pelebaran Spektral Pulsa Gaussian disebabkan SPM (G.P. Agrawal, 2001)

Gambar diatas menunjukkan bentuk pulsa *Gaussian* ketika terjadi pergeseran fase maksimum untuk beberapa nilai yang berbeda. Kenaikan pergeseran fase maksimum ini linier terhadap daya puncak pulsa. Terlihat bahwa muncul spektrum pulsa yang terdiri atas beberapa puncak. Jumlah puncak baru tersebut sebanding dengan pergeseran fase. Semakin besar pergeseran fase maka akan semakin banyak pula puncak baru yang muncul.

SPM dan dispersi kromatik akan berkombinasi dan keduanya mempengaruhi propagasi cahaya. Pada daerah dispersi normal ($\beta_2 > 0$), dispersi kromatik memiliki *frequency chirp* positif, begitu juga dengan SPM. Sehingga pelebaran pulsa pada daerah dispersi normal akan lebih besar karena kombinasi SPM dan dispersi kromatik. Sedangkan pada daerah dispersi anomali ($\beta_2 < 0$), dispersi kromatik memiliki *frequency chirp* negatif. Maka, dispersi kromatik ini akan menegasikan *frequency chirp* positif dari SPM. Sehingga, interaksi antara SPM dan dispersi kromatik akan mengurangi pelebaran pulsa yang terjadi.



Gambar 2.9 Evolusi Bentuk Pulsa Dalam Daerah
 (a) Dispersi Normal dan (b) Dispersi Anomali
 (G.P. Agrawal, 2001)

Untuk mengamati evolusi suatu pulsa dalam serat optik, ada dua besaran yang sangat penting, yaitu: *dispersion length* L_D dan *nonlinear length* L_{NL} . (G.P. Agrawal, 2001)

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2.23)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (2.24)$$

Berdasarkan nilai L (panjang serat optik), L_D , dan L_{NL} , perilaku propagasi diklasifikasikan menjadi empat kelompok.

- Kategori 1, jika $L \ll L_D$ dan $L \ll L_{NL}$, maka dispersi dan efek nonlinier tidak memegang peranan penting selama propagasi pulsa.
- Kategori 2, jika $L \ll L_{NL}$ tetapi $L \sim L_D$, maka evolusi pulsa akan sangat ditentukan oleh parameter GVD, sedangkan efek nonlinier tidak terlalu berpengaruh.
- Kategori 3, jika $L \ll L_D$ tetapi $L \sim L_{NL}$, maka evolusi pulsa akan sangat ditentukan SPM yang mengakibatkan pulsa mengalami pelebaran spektral.

- d. Kategori 4, jika L lebih panjang atau sebanding dengan kedua L_D dan L_{NL} , maka dispersi dan efek nonlinier berlaku secara bersama-sama selama pulsa terpropagasi dalam serat optik.

Selain itu, terdapat parameter N dengan nilai sesuai persamaan berikut.

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} \equiv \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2.25)$$

Jika nilai $N \ll 1$, maka efek dispersi akan mendominasi. Jika nilai $N \gg 1$, maka efek SPM yang akan mendominasi. Sedangkan jika nilai $N \sim 1$, maka baik SPM maupun GVD berperan dalam evolusi pulsa.

Persamaan (2.13) dapat disederhanakan dengan menggunakan hubungan ini.

$$T = t - z/v_g \equiv t - \beta_1 z \quad (2.26)$$

Sehingga, persamaan tersebut menjadi,

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\alpha}{2} A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (2.27)$$

- Pulsa Cahaya dalam Serat Optik

Ada berbagai jenis pulsa yang merambat dalam serat optik, yaitu: *Gaussian*, *Chirped Gaussian*, *Hyperbolic-Secant*, dan *Super-Gaussian*. Untuk selanjutnya, yang akan dibahas adalah pulsa *Gaussian* karena inilah jenis pulsa yang akan dianalisa propagasinya.

Persamaan dasar untuk berbagai jenis pulsa masukan serat optik adalah sebagai berikut. (G.P. Agrawal, 2001)

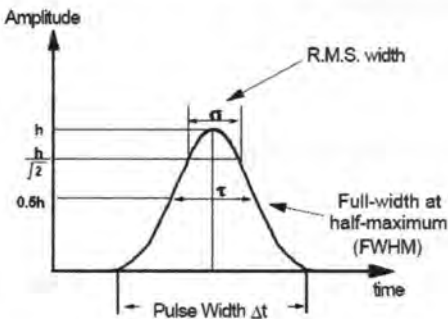
$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(0, \omega) \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 z - i\omega T\right) d\omega \quad (2.28)$$

$$\tilde{U}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(0, T) \exp(i\omega T) dT \quad (2.29)$$

Persamaan untuk pulsa *Gaussian* adalah sebagai berikut.

$$U(0, T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (2.30)$$

Berikut adalah gambar yang menunjukkan pulsa *Gaussian* dan beberapa definisi terkait dengan bentuk pulsa tersebut.



Gambar 2.10 Pulsa *Gaussian* (Gerard Farrell, 2003)

Perhitungan *bitrate* maksimum untuk pulsa *Gaussian* menggunakan persamaan berikut. (Gerard Farrell, 2003)

$$B_t \cong \frac{0,2}{\sigma} \text{ bit / s} \quad (2.31a)$$

$$\sigma = 0,425\tau \quad (2.31b)$$

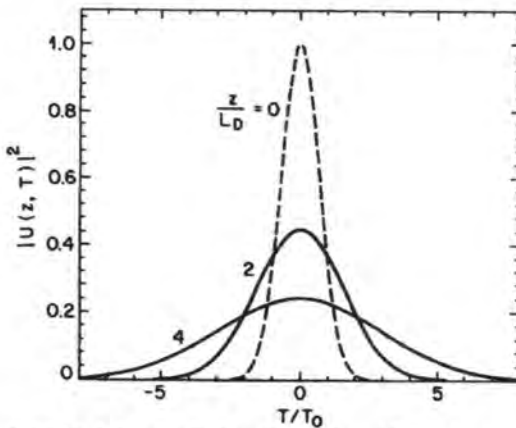
Sedangkan amplitudo pulsa pada titik tertentu z sepanjang serat optik adalah sebagai berikut.

$$U(z, T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right) \quad (2.32)$$

Dengan demikian, selama propagasi bentuk pulsa tetap *Gaussian*, tetapi pulsa semakin melebar seiring dengan semakin jauh jarak z yang ditempuh.

$$T_1(z) = T_0 \left[1 + (z/L_D)^2\right]^{1/2} \quad (2.33)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa GVD akan menyebabkan pelebaran pulsa. Besar pelebaran ini ditentukan oleh nilai *dispersion length* L_D .



Gambar 2.11 Pelebaran Pulsa Gaussian (G.P. Agrawal, 2001)

Gambar diatas menunjukkan pelebaran pulsa Gaussian dengan cara memplot $|U(z, T)|^2$ pada $z = 0, 2L_D$, dan $4L_D$.

Dengan membandingkan persamaan (2.30) dan (2.32), meskipun pulsa *Gaussian* tersebut tidak mengalami *chirping* (tanpa modulasi fase), pulsa yang ditransmisikan tetap mengalami *chirping*. Hal ini dapat dilihat jelas dengan menulis $U(z,T)$ dalam bentuk berikut.

$$U(z,T) = |U(z,T)| \exp[i\phi(z,T)] \quad (2.34)$$

$$\phi(z,T) = -\frac{\text{sgn}(\beta_2)(z/L_D) T^2}{1+(z/L_D)^2 T_0^2} + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{z}{L_D}\right) \quad (2.35)$$

Bergantungnya fase terhadap waktu menunjukkan bahwa frekuensi pada waktu tertentu akan berbeda dengan frekuensi tengah ω_0 .

BAB III PENERAPAN METODE SPLIT-STEP FOURIER (SSF)

3.1 Penerapan Metode *Split-Step Fourier (SSF)* Sebagai Solusi Persamaan *Nonlinear Schroedinger*

Persamaan NLS (2.27) merupakan persamaan diferensial parsial nonlinier. Ada beberapa metode untuk menyelesaikan persamaan tersebut. Salah satunya adalah metode *Split-Step Fourier (SSF)*.

Persamaan (2.27) dapat ditulis kembali dalam bentuk berikut.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (3.1)$$

\hat{D} adalah operator diferensial yang merupakan representasi dari dispersi dan absorpsi dalam medium linier dan \hat{N} adalah operator nonlinier yang mewakili efek nonlinier pada pulsa yang terpropagasi dalam serat optik. Masing-masing operator tertuang dalam persamaan berikut.

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} \quad (3.2)$$

$$\hat{N} = \left[i\gamma \left(|A|^2 \right) + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial T} \left(|A|^2 A \right) \right] \quad (3.3)$$

Secara umum, dispersi dan nonlinieritas berlaku secara bersama-sama sepanjang serat optik. Metode SSF mengasumsikan masing-masing dispersi dan nonlinieritas berlaku

secara independen sepanjang jarak h . Secara detail, propagasi dari z ke $z+h$ dilakukan dalam dua langkah (*step*). Pada *step* pertama, nonlinieritas berlaku dan $\hat{D} = 0$. Pada *step* kedua, dispersi berlaku dan $\hat{N} = 0$. Maka secara matematis,

$$A(z+h, T) \approx \exp(h\hat{D})\exp(h\hat{N})A(z, T) \quad (3.4)$$

Operator $\exp(h\hat{D})$ dalam domain *Fourier* adalah sebagai berikut.

$$\exp(h\hat{D})B(z, T) = F_T^{-1} \exp[h\hat{D}(i\omega)F_T B(z, T)] \quad (3.5)$$

Solusi eksak persamaan (3.1) adalah berikut ini.

$$A(z+h, T) = \exp[h(\hat{D} + \hat{N})]A(z, T) \quad (3.6)$$

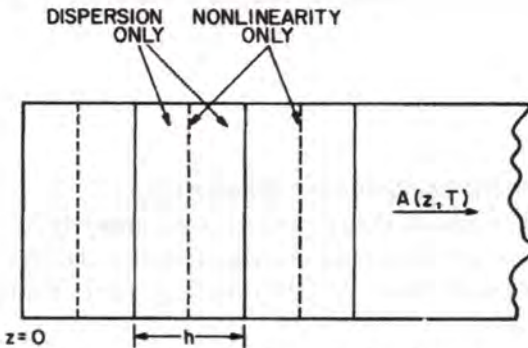
Akurasi metode SSF dapat ditingkatkan dengan mengadopsi prosedur yang berbeda untuk mempropagasikan pulsa optik dalam satu segmen dari z ke $z+h$. Dalam prosedur ini persamaan (3.4) diganti dengan persamaan berikut. (*G.P. Agrawal, 2001*)

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left(\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz'\right) \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T) \quad (3.7)$$

Perbedaannya adalah efek nonlinier dimasukkan pada bagian tengah segmen, bukan pada perbatasan segmen. Karena bentuk operator eksponensial yang simetri pada persamaan (3.7), maka ini disebut dengan metode SSF simetri. Integral ditengah eksponensial digunakan untuk menyertakan operator nonlinier \hat{N} yang bergantung pada z .

Selanjutnya, akurasi metode SSF masih dapat ditingkatkan lagi dengan menerapkan *trapezoidal rule* pada integral di persamaan (3.7).

$$\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz' \approx \frac{h}{2} [\hat{N}(z) + \hat{N}(z+h)] \quad (3.8)$$



Gambar 3.1 Ilustrasi Metode SSF Simetri (G.P. Agrawal, 2001)

Dalam penerapan metode SSF, nilai h yang dipilih harus memenuhi syarat tertentu. Cara menentukan nilai atau ukuran *step* (*step size*) h adalah sebagai berikut:

- Hitung nilai L_D dan L_{NL} . Bandingkan dengan panjang serat optik L .
- Pilih nilai h yang memenuhi syarat berikut: $\lambda < h < L_D$ dan $\lambda < h < L_{NL}$.
- Jika nilai L hampir sama dengan L_D dan L_{NL} , maka pilih nilai h yang kecil.

Efek nonlinier dapat diabaikan jika memenuhi syarat, daya sumber cahaya (P_0) kurang dari sepersepuluh daya *threshold* (P_{TH}). (L.N. Binh, 2004)

$$P_0 \leq \frac{1}{10} P_{TH} \quad (3.9)$$

Sedangkan P_{TH} dihitung dengan persamaan berikut.

$$P_{TH} = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2} \quad (3.10)$$

3.2 Algoritma Metode Split-Step Fourier (SSF)

Berikut adalah dua *flowchart* yang menjelaskan isi dari *listing program* untuk analisa propagasi cahaya dalam *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)* dan algoritma metode *Split-Step Fourier (SSF)*.

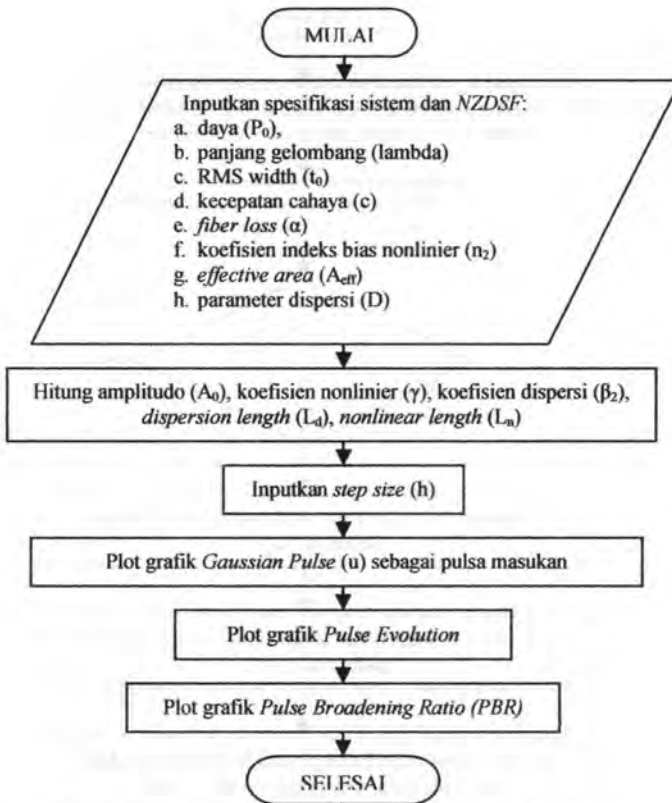
Langkah awal dalam analisa propagasi cahaya ini adalah dengan memasukkan spesifikasi sistem dan NZDSF. Spesifikasi terdiri atas daya, panjang gelombang, *RMS width* dan kecepatan cahaya. Sedangkan spesifikasi NZDSF adalah *fiber loss*, indeks bias nonlinier, *effective area* dan dispersi.

Setelah spesifikasi dimasukkan, akan dihitung nilai amplitud, koefisien nonlinier, koefisien dispersi atau parameter GVD, *dispersion length*, dan *nonlinear length*.

Selanjutnya, nilai *step size* dimasukkan. Nilai *step size* ini harus sesuai dengan persyaratan yang disebutkan pada dasar teori.

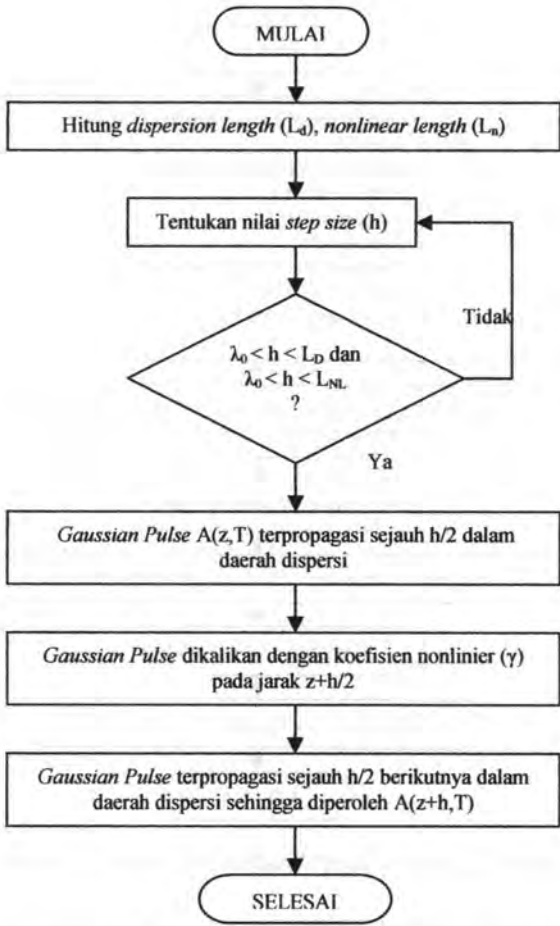
Kemudian akan diplot grafik pulsa masukan *Gaussian*, evolusi pulsa 3-dimensi, evolusi pulsa 2-dimensi setiap jarak 5 km, dan *Pulse Broadening Ratio (PBR)*.

Pulsa *Gaussian* dimodelkan dengan menggunakan persamaan (2.30). Nilai amplitudnya mengacu pada daya sumber cahaya.. Sedangkan lebar pulsanya diwakili oleh *RMS width*.



Gambar 3.2 *Flowchart* Analisa Propagasi Cahaya

Algoritma metode SSF adalah sebagai berikut. Pada langkah awal akan dihitung nilai *dispersion length* dan *nonlinear length*. Kedua nilai ini berguna untuk menentukan *step size* yang akan digunakan. Kemudian *step size* dipilih dengan syarat harus lebih besar daripada panjang gelombang sumber cahaya dan lebih kecil daripada *dispersion length* dan *nonlinear length*. Jika syarat ini terpenuhi, maka pulsa masukan *Gaussian* akan dirambatkan dalam serat optik.



Gambar 3.3 Flowchart Algoritma Metode Split-Step Fourier (SSF)

Pertama-tama, pulsa *Gaussian* terpropagasi dalam daerah dispersi sejauh $h/2$. Kemudian pada jarak $z+h/2$, efek nonlinier dimasukkan dengan cara mengalikan pulsa *Gaussian* dengan koefisien nonlinier. Berikutnya, pulsa *Gaussian* terpropagasi lagi

dalam daerah dispersi sejauh $h/2$ sehingga pulsa *Gaussian* tersebut telah menempuh jarak h . Proses ini berulang sebanyak L/h (25 km/5 km), yaitu lima kali.



BAB IV
ANALISA DAN PEMBAHASAN
PROPAGASI CAHAYA PADA
NON-ZERO DISPERSION SHIFTED FIBER (NZDSF)

Berdasarkan persamaan propagasi cahaya dalam serat optik, yaitu persamaan NLS (2.27), ada tiga variabel penting yang mewakili degradasi sinyal dalam serat optik, yaitu *fiber loss* α , parameter GVD β_2 sebagai representasi fenomena dispersi kromatik, dan koefisien nonlinier γ .

Karena analisa difokuskan pada efek dispersi dan efek nonlinier, maka variabel pertama yaitu *fiber loss* dianggap nol sehingga diasumsikan tidak terjadi *power loss*. Sedangkan variabel kedua yaitu parameter GVD diperoleh dari persamaan (2.18). Maka dengan nilai dispersi yang negatif akan diperoleh parameter GVD positif. Sebaliknya dengan nilai dispersi positif akan diperoleh parameter GVD negatif. Dalam hal ini, dispersi yang dimaksud adalah dispersi kromatik yang disebabkan oleh *spectral width* dari sumber cahaya yang digunakan. Variabel ketiga, yaitu koefisien nonlinier dihitung dengan persamaan (2.21). Dimana koefisien ini merupakan fungsi dari koefisien indeks nonlinier, *center wavelength*, kecepatan cahaya, dan *effective area*.

Jenis NZDSF yang digunakan adalah *Reduced-Slope NZDSF (RS NZDSF)*. RS NZDSF diaplikasikan untuk *Metropolitan Access Network (MAN)* dengan jarak transmisi 20-70 km. Oleh karena itu, panjang RS NZDSF yang akan dianalisa adalah 25 km.

Sesuai dengan salah satu contoh *datasheet* produk RS NZDSF (*Sterlite DOF-LITE™ (RS) Single Mode Optical Fiber*), serat optik ini diaplikasikan pada C-band (1530-1565 nm) dan L-band (1565-1625 nm). Sehingga, panjang gelombang yang

digunakan untuk analisa adalah 1550 nm. Selain itu, nilai dispersi dan *effective area* juga mengacu pada *datasheet* tersebut.

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *dispersion length* $L_D = 3064,8$ km dan *nonlinear length* $L_{NL} = 548,2$ km. Dengan demikian, perilaku propagasi cahaya dalam RS NZDSF ini dapat dimasukkan dalam Kategori 3, yaitu: $L \ll L_D$ tetapi $L \sim L_{NL}$. Secara teori, maka evolusi pulsa akan sangat ditentukan efek nonlinier *Self-Phase Modulation (SPM)* yang mengakibatkan pulsa mengalami pelebaran spektral. Maka setiap panjang gelombang dalam spektrum tersebut akan terpropagasi dengan kecepatan yang berbeda-beda. Sehingga durasi pulsa yang dirambatkan akan bertambah lebar.

Ukuran *step size* (h) yang digunakan adalah 5000 m. Ukuran h akan menentukan ketelitian metode *Split-Step Fourier* dan lamanya waktu komputasi. Semakin kecil nilai h maka semakin teliti metode ini namun semakin lama waktu komputasi. Sebaliknya semakin besar nilai h maka ketelitiannya menurun namun waktu komputasi lebih cepat. Nilai 5000 m dipilih karena nilai ini sesuai dengan syarat pada dasar teori, yaitu: $\lambda < h < L_D$ dan $\lambda < h < L_{NL}$.

Propagasi cahaya dalam RS NZDSF akan dianalisa pada dua daerah dispersi, yaitu: dispersi normal dan dispersi anomali.

4.1 Propagasi Cahaya di Daerah Dispersi Normal

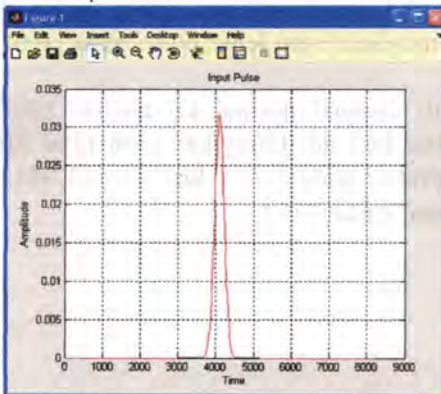
Pada daerah dispersi normal, berarti NZDSF memiliki nilai dispersi negatif dan parameter GVD positif. Seperti yang tertera pada tabel (4.1). Spesifikasi sistem, spesifikasi NZDSF, dan hasil perhitungan dari program ditulis pada *software Matlab 7.0* dalam bentuk *m-file*.

Jenis pulsa masukan yang dipropagasikan dalam NZDSF adalah *Gaussian Pulse*. Dari hasil perhitungan diperoleh amplitudo dari pulsa *Gaussian* 0,03162 W dan T_{FWHM} (*Full-Width at Half-Maximum*) 295 ps. Validasi perhitungan FWHM ini dilakukan secara manual dengan menggunakan persamaan (2.31b). Dengan cara ini diperoleh T_{FWHM} 294,12 ps.

Pulsa *Gaussian* diasumsikan murni, artinya bahwa tidak terjadi *chirping*. *Chirping* adalah pelebaran garis spektrum sumber cahaya. *Chirping* biasanya terjadi pada laser yang dimodulasi secara langsung. Pada analisa ini, dianggap bahwa jenis laser yang digunakan adalah *Distributed Feedback Laser (DFB Laser)*. Modulator yang digunakan untuk *DFB Laser* adalah modulator eksternal, yaitu: *Li-NbO₃ Mach-Zehnder*. Sehingga, *chirping* dianggap tidak terjadi.

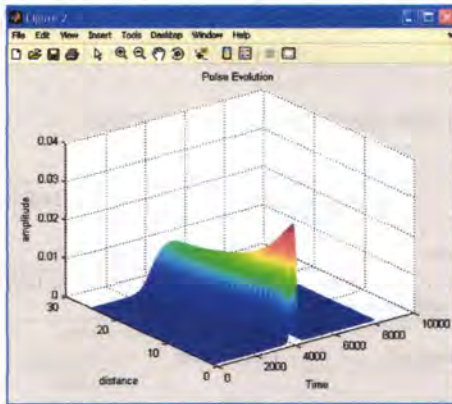
Tabel 4.1 Spesifikasi dan Hasil Perhitungan *NZDSF* (dispersi normal)

Spesifikasi Sistem		Spesifikasi <i>NZDSF</i>		Hasil Perhitungan	
Daya DFB Laser	0,001 W	Fiber Loss	0 dB/km	Amplitudo	0,03162 W
Panjang Gelombang	1550 nm	Non-linier Index Coefficient	$2,25 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$	Parameter GVD (β_2)	$+5,0983 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$
Deltaz	5 km	Dispersi	$-4 \text{ ps}/\text{nm}.\text{km}$	Koefisien Nonlinier (γ)	$0,0018 \text{ W}^{-1}/\text{m}$
RMS Width	125 ps	Effective Area	$50 \mu\text{m}^2$	Dispersion Length (Ld)	$3,0648 \times 10^6 \text{ m}$
Speed light	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	Panjang	25 km	Nonlinear Length (Ln)	$5,482 \times 10^5 \text{ m}$
				Parameter Nonlinier (N)	2,3644



Gambar 4.1 Pulsa Masukan *Gaussian* (dispersi normal)

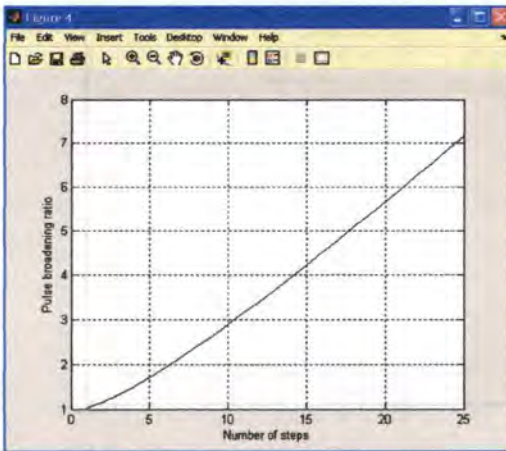
Berikut adalah gambar tiga dimensi evolusi pulsa *Gaussian* tersebut sepanjang 25 km. Gambar ini menunjukkan terjadinya pelebaran durasi pulsa terhadap jarak, meskipun bentuk pulsa tetap *Gaussian*. Semakin jauh jarak yang ditempuh pulsa *Gaussian* tersebut, semakin besar pelebaran yang dialami.



Gambar 4.2 Evolusi Pulsa Sepanjang 25 km

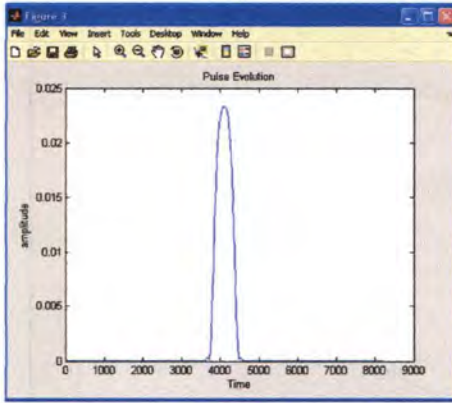
Berikut adalah grafik *Pulse Broadening Ratio (PBR)*. PBR adalah suatu nilai perbandingan lebar pulsa keluaran terhadap lebar pulsa masukan atau lebar pulsa pada jarak tertentu dalam serat optik.

Dalam daerah dispersi normal ini terlihat jelas bahwa terjadi pelebaran pulsa. Hal ini ditunjukkan oleh nilai PBR yang selalu > 1 . PBR_{\min} terukur pada $L = 1$ km, yaitu 1,041. PBR_{\max} terukur pada $L = 25$ km, yaitu 7,169.



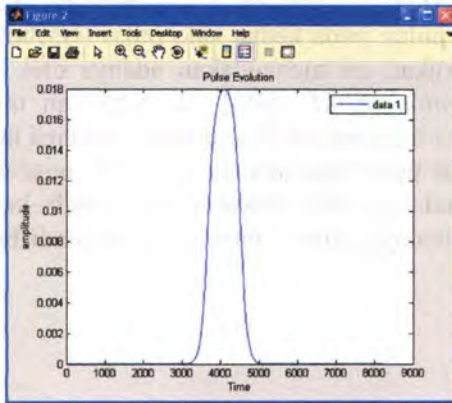
Gambar 4.3 *Pulse Broadening Ratio* ($\beta_2 = +5,0983 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$)

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 5 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,02336 W. Pulsa mengalami pelebaran temporal. Pulsa masukan memiliki T_{FWHM} 295 ps. Kemudian pada $L = 5 \text{ km}$ ini, T_{FWHM} menjadi 505 ps. Jika dilihat dari bentuk pulsa, pada kedua kaki pulsa tersebut terdapat lekukan kecil. Lekukan ini menandakan adanya efek nonlinier *Self-Phase Modulation (SPM)*. SPM menyebabkan munculnya komponen frekuensi baru positif. Komponen frekuensi ini sebagai penyebab pelebaran pulsa dan adanya sejumlah puncak-puncak baru atau dalam hal ini adalah lekukan kecil pada kedua kaki pulsa tersebut. Akibatnya, durasi pulsa juga menjadi bertambah lebar.



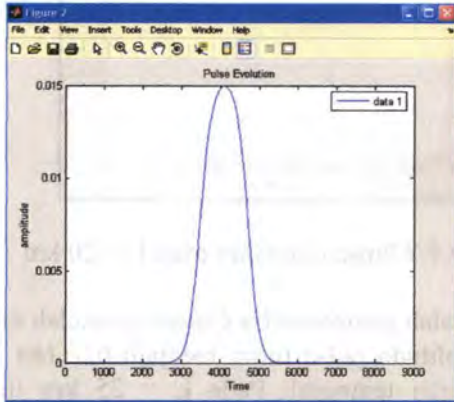
Gambar 4.4 Pulsa *Gaussian* pada $L = 5$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 10 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,01799 W. Pulsa mengalami pelebaran temporal. Pada $L = 10$ km ini, T_{FWHM} menjadi 851 ps.



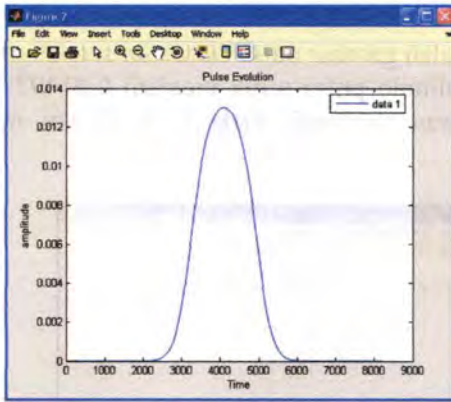
Gambar 4.5 Pulsa *Gaussian* pada $L = 10$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 15 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,01497 W. Pulsa mengalami pelebaran temporal. Pada $L = 15$ km ini, T_{FWHM} menjadi 1249 ps.



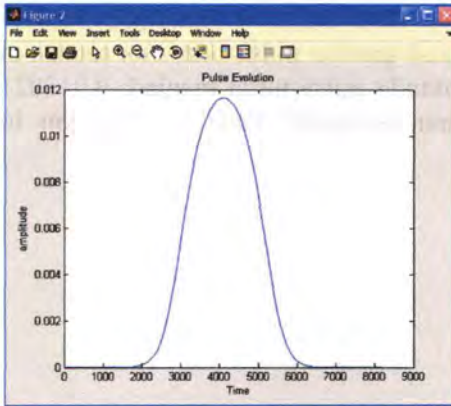
Gambar 4.6 Pulsa *Gaussian* pada $L = 15$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 20 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,01302 W. Pulsa mengalami pelebaran temporal. Pada $L = 20$ km ini, T_{FWHM} menjadi 1673 ps.



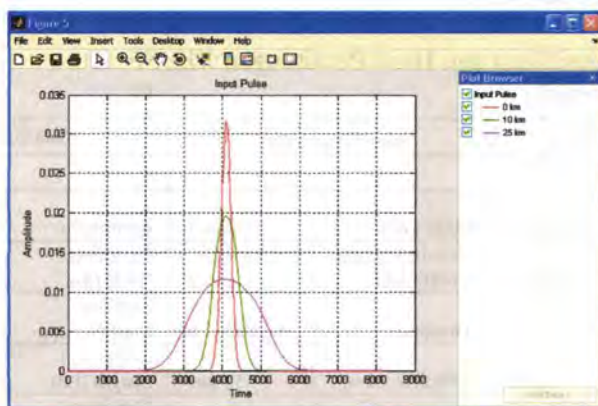
Gambar 4.7 Pulsa *Gaussian* pada $L = 20$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 25 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,01164 W. Pulsa mengalami pelebaran temporal. Pada $L = 25$ km ini, T_{FWHM} menjadi 2115 ps.



Gambar 4.8 Pulsa *Gaussian* pada $L = 25$ km

Berikut adalah gambar yang membandingkan pulsa masukan terhadap pulsa yang terpropagasi dalam NZDSF pada daerah dispersi normal.



Gambar 4.9 Pulsa *Gaussian* pada $L = 0, 10, \text{ dan } 25 \text{ km}$

Secara keseluruhan hasil simulasi pulsa *Gaussian* yang terpropagasi dalam NZDSF di daerah dispersi normal disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi *Pulsa Gaussian* di Daerah Dispersi Normal

Jarak (km)	Amplitudo (W)	T_{FWHM} (ps)	PBR
0	0,03162	295	1
5	0,02336	505	1,7119
10	0,01799	851	2,8847
15	0,01497	1249	4,2239
20	0,01302	1673	5,6712
25	0,01164	2115	7,1695

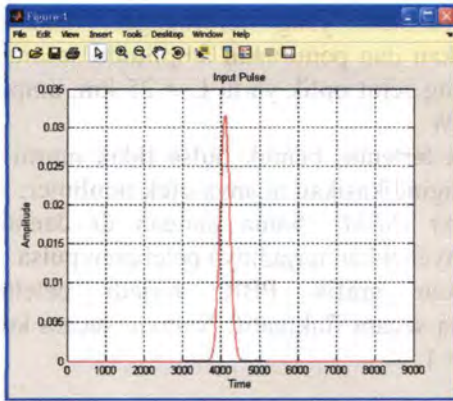
4.2 Propagasi Cahaya di Daerah Dispersi Anomali

Pada daerah dispersi anomali, berarti nilai dispersi serat optik positif dan parameter GVD bernilai negatif. Seperti yang tertera pada tabel (4.3).

Tabel 4.3 Spesifikasi dan Hasil Perhitungan *NZDSF* (dispersi anomali)

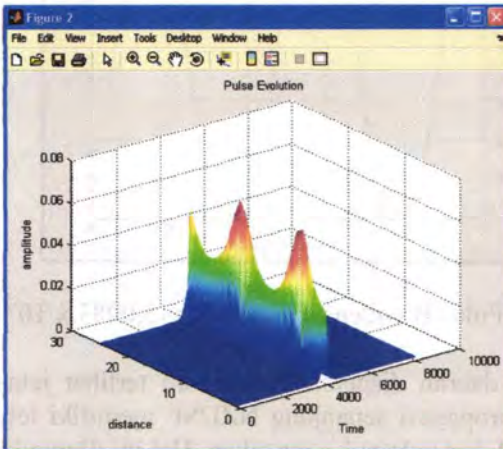
Spesifikasi Sistem		Spesifikasi <i>NZDSF</i>		Hasil Perhitungan	
Daya DFB Laser	0,001 W	Fiber Loss	0 Db/km	Amplitudo	0,0316 W
Panjang Gelombang	1550 nm	Non-linier Index Coefficient	$2,25 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$	Parameter GVD (β_2)	$-5,0983 \times 10^{-27}$
Deltaz	5 km	Dispersi	4 ps/nm.km	Koefisien Nonlinier (γ)	0,0018
RMS Width	125 ps	Effective Area	$50 \mu\text{m}^2$	Dispersion Length (Ld)	$3,0648 \times 10^6$
Speed light	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	Panjang	25 km	Nonlinear Length (Ln)	$5,482 \times 10^5$
				Parameter Nonlinier (N)	2,3644

Sama dengan analisa propagasi cahaya di daerah dispersi normal, pulsa masukan untuk daerah dispersi anomali juga menggunakan *Gaussian Pulse*. Amplitudo pulsa ini juga sebesar 0,03162 W dan T_{FWHM} adalah 295 ps.



Gambar 4.10 Pulsa Masukan *Gaussian* (dispersi anomali)

Berikut adalah gambar evolusi pulsa *Gaussian* tersebut sepanjang 25 km.

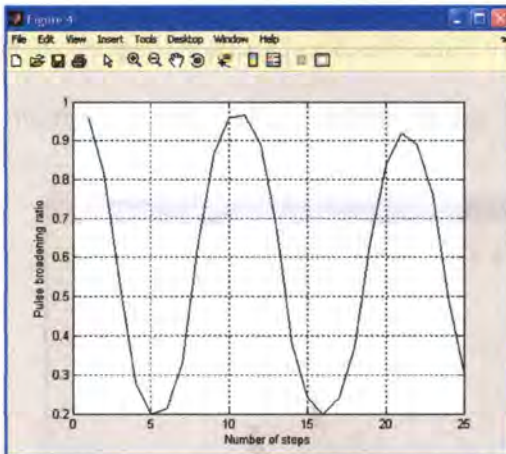


Gambar 4.11 Evolusi Pulsa Sepanjang 25 km

Pulsa *Gaussian* yang terpropagasi dalam NZDSF mengalami kenaikan dan penurunan amplitudo secara fluktuatif. Namun, pada ujung serat optik yaitu $L = 25$ km, amplitudo naik menjadi 0,05128 W.

Pada titik tertentu, bentuk pulsa tidak murni *Gaussian*. Bentuk pulsa mengindikasikan adanya efek nonlinier, yaitu: *Self-Phase Modulation (SPM)*. Sama dengan di daerah dispersi normal, SPM menyebabkan terjadinya pelebaran pulsa.

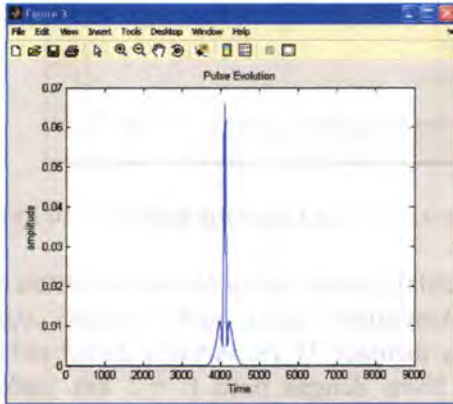
Berdasarkan grafik PBR, terjadi pelebaran dan penyempitan pulsa secara fluktuatif. Namun, secara keseluruhan, nilai PBR selalu < 1 .



Gambar 4.12 Pulse Broadening Ratio ($\beta_2 = -5,0983 \times 10^{-27} \text{ s}^2/\text{m}$)

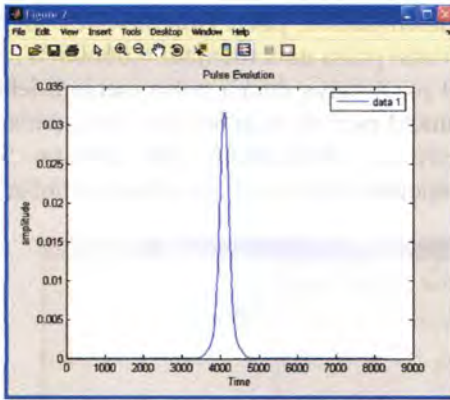
Dalam daerah dispersi anomali ini terlihat jelas bahwa pulsa yang terpropagasi sepanjang NZDSF memiliki lebar pulsa yang lebih kecil daripada pulsa masukan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai PBR yang selalu < 1 tersebut. PBR_{\min} terukur pada $L = 5$ km dan $L = 16$ km, yaitu 0,2. PBR_{\max} terukur pada $L = 11$ km, yaitu 0,9661. Durasi pulsa yang lebih pendek ini disebabkan oleh nilai parameter GVD yang negatif dan dispersi positif.

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 5 km. Amplitudo pulsa naik menjadi 0,06605 W. Sedangkan T_{FWHM} menjadi 59 ps. Artinya durasi pulsa menjadi lebih pendek. Selain itu juga muncul puncak atau lekukan baru pada kedua sisi pulsa. Puncak baru ini disebabkan oleh adanya SPM yang menghasilkan komponen frekuensi baru sehingga pulsa melebar.



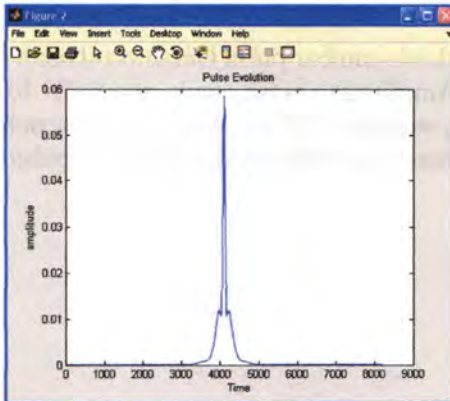
Gambar 4.13 Pulsa *Gaussian* pada $L = 5$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 10 km. Amplitudo pulsa naik menjadi 0,03166 W. Sedangkan T_{FWHM} menjadi 283 ps. Artinya durasi pulsa kembali menjadi lebar namun tetap lebih pendek daripada pulsa masukan.



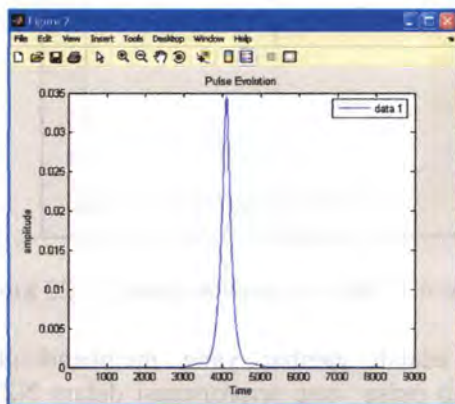
Gambar 4.14 Pulsa *Gaussian* pada $L = 10$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 15 km. Amplitudo pulsa naik menjadi 0,05852 W. Sedangkan T_{FWHM} menjadi 71 ps. Artinya durasi pulsa kembali menjadi pendek. Sama dengan pada $L = 5$ km, pada jarak ini kembali muncul puncak atau lekukan baru pada kedua sisi pulsa.



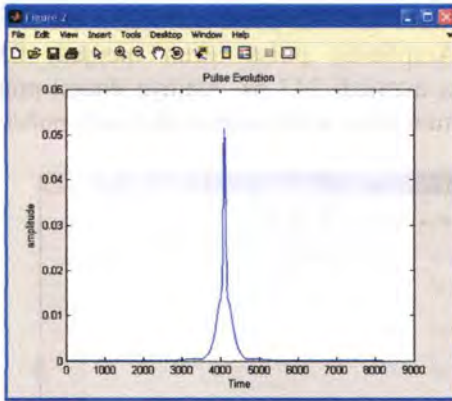
Gambar 4.15 Pulsa *Gaussian* pada $L = 15$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 20 km. Amplitudo pulsa turun menjadi 0,03456 W. Sedangkan T_{FWHM} menjadi 247 ps. Artinya duarsi pulsa kembali menjadi lebar namun tetap lebih pendek daripada pulsa masukan.



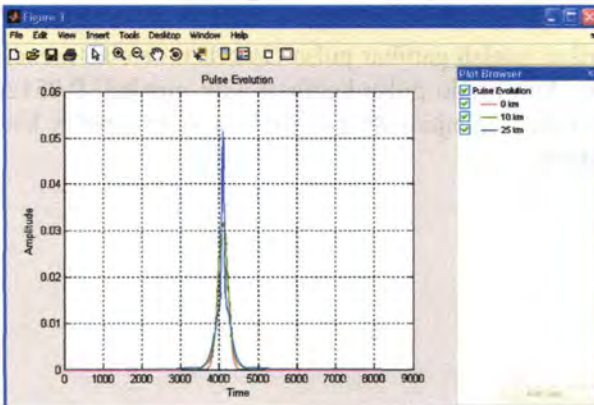
Gambar 4.16 Pulsa *Gaussian* pada $L = 20$ km

Berikut adalah gambar pulsa *Gaussian* setelah menempuh jarak 25 km. Amplitudo pulsa kembali naik menjadi 0,05128 W. Sedangkan T_{FWHM} menjadi 89 ps. Artinya durasi pulsa kembali menjadi pendek.



Gambar 4.17 Pulsa *Gaussian* pada $L = 25$ km

Berikut adalah gambar yang membandingkan pulsa masukan terhadap pulsa yang terpropagasi dalam NZDSF pada daerah dispersi anomali.



Gambar 4.18 Pulsa *Gaussian* pada $L = 0, 10$ dan 25 km

Secara keseluruhan hasil simulasi pulsa Gaussian yang terpropagasi dalam NZDSF di daerah dispersi anomali disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4.4 Hasil Simulasi *Pulsa Gaussian* di Daerah Dispersi Anomali

Jarak (km)	Amplitudo (W)	T_{FWHM} (ps)	PBR
0	0,03162	295	1
5	0,06605	59	0,2
10	0,03166	283	0,95932
15	0,05852	71	0,24068
20	0,03456	247	0,83729
25	0,05128	89	0,30169

Dapat dilihat bahwa, efek nonlinier SPM sangat berperan karena NZDSF dalam analisa ini memiliki *effective area* yang tergolong kecil, yaitu $50 \mu\text{m}^2$. *Effective area* yang kecil menyebabkan daya DFB Laser benar-benar terkonsentrasi pada *core* NZDSF. Respons bahan serat optik terhadap cahaya dengan intensitas tinggi ini akan menjadi tidak nonlinier.

Kombinasi SPM dan dispersi kromatik dalam daerah dispersi normal dan dispersi anomali akan berbeda.

Pada daerah dispersi normal, pelebaran pulsa yang terjadi lebih besar karena selain disebabkan oleh dispersi kromatik yang menghasilkan komponen frekuensi positif (parameter GVD positif), SPM juga menyebabkan pelebaran pulsa karena SPM menghasilkan komponen frekuensi positif.

Sedangkan pada daerah dispersi anomali, SPM yang menghasilkan komponen frekuensi baru yang positif akan dinegasikan oleh komponen frekuensi negatif (parameter GVD negatif) yang dihasilkan oleh dispersi kromatik. Sehingga, interaksi SPM dan dispersi menyebabkan berkurangnya pelebaran pulsa. Dengan kata lain, bisa terjadi penyempitan pulsa.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa, SPM meningkatkan pelebaran pulsa di daerah dispersi normal.

Sedangkan di daerah anomali, pelebaran pulsa karena SPM dinegasikan oleh dispersi kromatik yang memiliki komponen frekuensi negatif. Sehingga, propagasi pulsa cahaya pada daerah dispersi normal cenderung mengalami pelebaran pulsa. Sedangkan pada daerah dispersi anomali, pulsa cahaya cenderung mengalami penyempitan.

Kedua sifat diatas dapat dimanfaatkan untuk aplikasi kompensasi dispersi. Artinya pelebaran pulsa yang terjadi pada NZDSF dengan nilai parameter GVD β_2 positif dapat dikurangi oleh NZDSF dengan nilai parameter GVD β_2 negatif. Hal ini dilakukan dengan cara memasang NZDSF yang memiliki nilai parameter GVD β_2 positif dan negatif secara seri.

Contoh Aplikasi:

Sistem komunikasi serat optik *point-to-point* yang menghubungkan kota A dengan kota B berjarak 50 km. Dengan menggunakan NZDSF, maka pada 25 km pertama dipasang NZDSF dengan nilai β_2 positif dan pada 25 km berikutnya dipasang NZDSF dengan nilai β_2 negatif.

Berikut adalah perhitungan pelebaran pulsa dan *bitrate* yang dapat diaplikasikan dalam sistem ini.

* NZDSF dengan β_2 positif (Dispersi Normal)

$L = 0 - 25$ km; PBR = 7,169

Pulsa masukan *Gaussian* memiliki *RMS width* $T_0 = 125$ ps dan $T_{FWHM0} = 295$ ps. Sedangkan $T_{FWHM25} = 2115$ ps.

* NZDSF dengan β_2 negatif (Dispersi Anomali)

$L = 25 - 50$ km; PBR = 0,3017

Pulsa masukannya adalah pulsa pada $L = 25$ km dengan $T_{FWHM25} = 2115$ ps.

Maka,

$$\begin{aligned} T_{FWHM50} &= \text{PBR} \times T_{FWHM25} \\ &= 0,3017 \times 2115 \text{ ps} \\ &= 638,0995 \text{ ps.} \end{aligned}$$

Jadi, dispersi dalam sistem ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} D &= (T_{FWHM50} - T_{FWHM0})/50 \text{ km} \\ &= (638,0995 - 295)/50 \\ &= 6,86 \text{ ps/nm.km} \end{aligned}$$

Sedangkan *bitrate* yang dapat ditransmisikan dalam sistem ini dihitung dengan menggunakan persamaan (2.31a) dan (2.31b). Sehingga diperoleh nilai berikut.

$$\begin{aligned} B_t &= 0,2/(0,425 \times 638,0995 \text{ ps}) \\ &= 0,000737 \times 10^{12} \text{ b/s} \\ &= 737 \text{ Mb/s} \end{aligned}$$

Bitrate yang dapat ditransmisikan jika tidak terjadi pelebaran pulsa adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} B_t &= 0,2/(0,425 \times 295 \text{ ps}) \\ &= 0,001595 \times 10^{12} \text{ b/s} \\ &= 1595 \text{ Mb/s} \\ &= 1,595 \text{ Gb/s} \end{aligned}$$

Jadi, dengan menggunakan konfigurasi NZDSF β_2 positif dan NZDSF β_2 negatif terjadi penurunan *bitrate* yang dapat ditransmisikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Penurunan } \textit{bitrate} &= [(1595 - 737)/1595] \times 100\% \\ &= 53,79\% \end{aligned}$$

Meskipun demikian, hasil ini lebih baik daripada hanya menggunakan *Standard Single Mode Fiber (SMF)* sepanjang 50 km untuk menghubungkan kota A dan kota B. Hal ini disebabkan, tidak adanya kompensasi terhadap dispersi dalam SMF tersebut. Berikut adalah data spesifikasi sistem dan SMF serta hasil perhitungan. Data numerik ini digunakan untuk menghitung pelebaran dan *bitrate* sistem.

Tabel 4.5 Spesifikasi dan Hasil Perhitungan SMF

Spesifikasi Sistem		Spesifikasi SMF		Hasil Perhitungan	
Daya DFB Laser	0,001 W	Fiber Loss	0 dB/km	Amplitudo	0,03162 W
Panjang Gelombang	1550 nm	Non-linier Index Coefficient	$2,20 \times 10^{-20}$ m ² /W	Parameter GVD (β_2)	$2,2942 \times 10^{-26}$ s ² /m
Deltaz	5 km	Dispersi	-18 ps/nm.km	Koefisien Nonlinier (γ)	0,0011 W ⁻¹ /m
RMS Width	125 ps	Effective Area	84 μ m ²	Dispersion Length (Ld)	$6,8106 \times 10^3$ m
Speed light	3×10^8 m/s	Panjang	50 km	Nonlinear Length (Ln)	$9,4191 \times 10^3$ m
				Parameter Nonlinier (N)	0,8503

Berikut adalah perhitungan pelebaran pulsa dan *bitrate* yang dapat diaplikasikan jika hanya menggunakan SMF.

*L = 0 - 50 km; PBR = 6.9864

Pulsa masukan *Gaussian* memiliki *RMS width* $T_0 = 125$ ps dan $T_{FWHM0} = 295$ ps. Sedangkan $T_{FWHM50} = 2061$ ps.

Jadi, dispersi dalam sistem ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 D &= (T_{FWHM50} - T_{FWHM0})/50 \text{ km} \\
 &= (2061-295)/50 \\
 &= 35,32 \text{ ps/nm.km}
 \end{aligned}$$

Sedangkan *bitrate* yang dapat ditransmisikan dalam sistem ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 B_t &= 0,2/(0,425 \times 2061 \text{ ps}) \\
 &= 0,000228 \times 10^{12} \text{ b/s} \\
 &= 228 \text{ Mb/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Penurunan } \textit{bitrate} &= [(1595-228)/1595] \times 100\% \\
 &= 85,70 \%
 \end{aligned}$$

Jadi, dengan hanya menggunakan SMF terjadi penurunan *bitrate* yang dapat ditransmisikan sebesar 85,70 %.

Berikut adalah perbandingan pelebaran pulsa dan *bitrate* antara NZDSF yang diserikan dan SMF.

Tabel 4.6 Pelebaran Pulsa dan *Bitrate* NZDSF Seri dan SMF

Serat Optik	Jarak (km)	T_{FWHM50} (ps)	Dispersi (ps/nm.km)	<i>Bitrate</i> (Mb/s)	Penurunan <i>Bitrate</i> (%)
NZDSF Seri	50	638,0995	6,86	737	53,79
SMF	50	2061	35,32	228	85,70

Berarti dapat disimpulkan bahwa konfigurasi seri NZDSF β_2 positif dan NZDSF β_2 negatif lebih baik karena mampu mentransmisikan sinyal dengan *bitrate* 737 Mb/s sejauh 50 km.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

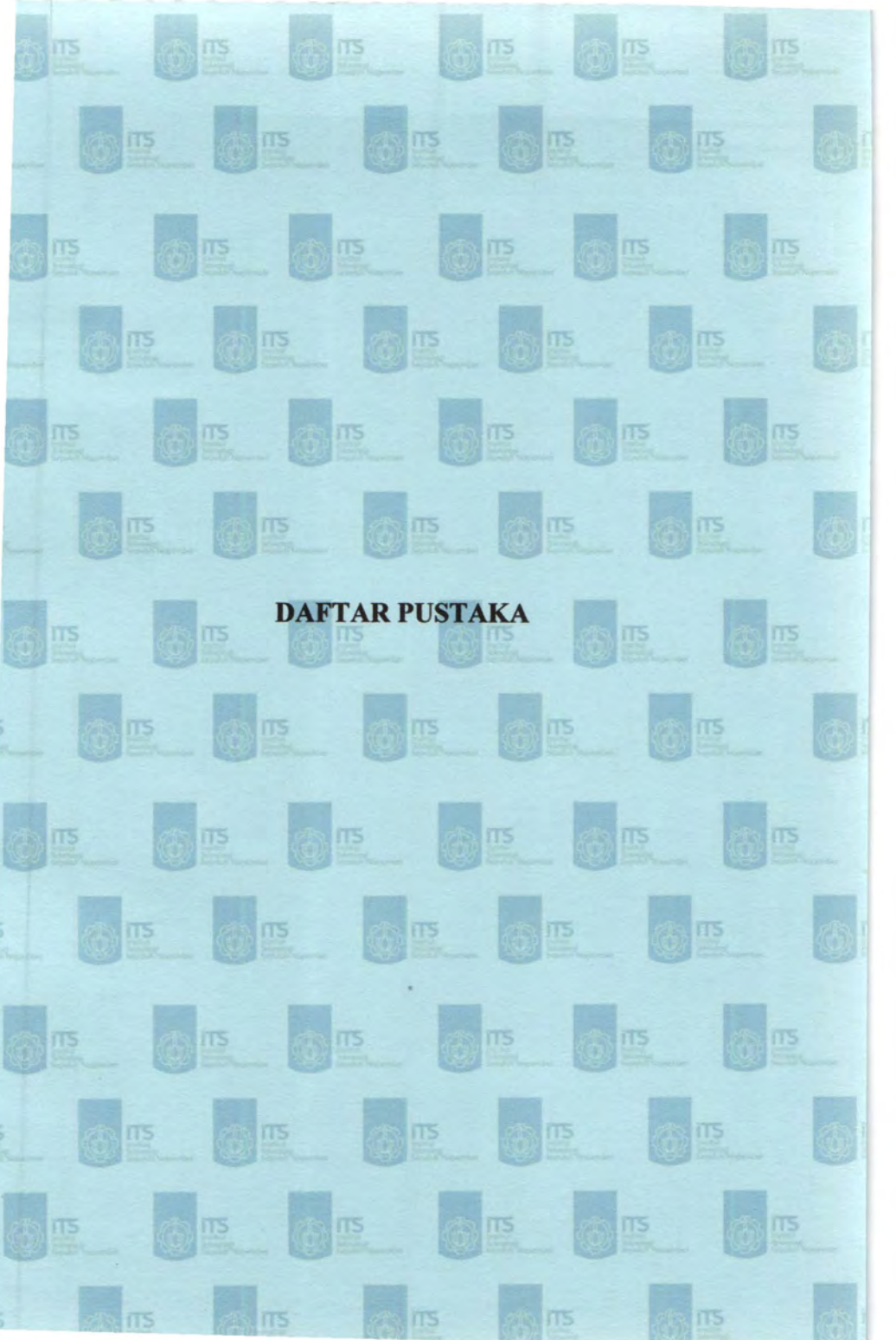
Berdasarkan hasil analisa propagasi cahaya menggunakan metode *Split-Step Fourier*, dengan memodelkan pulsa *Gaussian* sebagai pulsa masukan, memplot grafik evolusi pulsa, dan menghitung PBR, dapat disimpulkan bahwa:

- Pulsa cahaya yang terpropagasi pada daerah dispersi normal dalam NZDSF mengalami pelebaran disebabkan oleh dispersi kromatik yang menghasilkan komponen frekuensi positif dan SPM yang juga menghasilkan komponen frekuensi positif. Dengan panjang NZDSF 25 km, parameter GVD $+5,0983 \text{ ps}^2/\text{km}$, *dispersion length* 3064,8 km, *nonlinear length* 548,2 km, dan *RMS width* 125 ps, diperoleh pulsa keluaran dengan $\text{PBR}_{25} = 7,169$ dan $T_{\text{FWHM}25} = 2115 \text{ ps}$.
- Pulsa cahaya yang terpropagasi pada daerah dispersi anomali dalam NZDSF mengalami penyempitan disebabkan oleh komponen frekuensi positif yang dihasilkan SPM dinegasikan oleh komponen frekuensi negatif dari dispersi kromatik. Dengan panjang NZDSF 25 km, parameter GVD $-5,0983 \text{ ps}^2/\text{km}$, *dispersion length* 3064,8 km, *nonlinear length* 548,2 km, dan *RMS width* 125 ps, diperoleh pulsa keluaran dengan $\text{PBR}_{25} = 0,3017$ dan $T_{\text{FWHM}25} = 89 \text{ ps}$.
- Kecenderungan pulsa cahaya mengalami pelebaran pada daerah dispersi normal dan penyempitan pada daerah dispersi anomali dapat dimanfaatkan untuk aplikasi kompensasi dispersi. Dengan cara memasang NZDSF yang memiliki nilai parameter GVD β_2 positif

dan negatif secara seri, konfigurasi ini mampu mentransmisikan sinyal dengan *bitrate* 737 Mb/s sejauh 50 km, dibandingkan dengan menggunakan SMF sepanjang 50 km, *bitrate* hanya mencapai 228 Mb/s.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada optimalisasi penggunaan NZDSF β_2 negatif sebagai kompensasi dispersi dengan cara menentukan nilai dispersi dan panjang serat optik yang tepat.

The background of the page is a repeating pattern of the ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) logo. Each logo consists of a circular emblem with a stylized 'G' and 'S' inside, followed by the letters 'ITS' and the full name of the institution in Indonesian: 'Institut Teknologi Sepuluh Nopember'.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

Agrawal, G.P. 2001. **Nonlinear Fiber Optics : Third Edition**. San Diego : Academic Press.

Binh, L.N., dan Jay Armstrong. 2004. **A Simulink Model For Simulation of Optical Communications Systems : Part I – Single Channel Transmssion**. Monash University.

Downie, J.D., Michael Sauer, Jason Hurley. **40 Gbit/s Uncompensated 8-Channel CWDM System Over 30 Km Of Non-Zero Dispersion Shifted Fibre**. New York : Corning Inc.

Dutta, A.K., Dutta, N.K., Masahiko Fujiwara. 2002. **WDM Technologies : Active Optical Components**. USA : Academic Press.

Farrell, Gerard. 2003. **Optical Communications Systems : Dispersion In Optical Fibre (II)**. Irlandia : Dublin Institute of Technology.

Kant, Shasi, H.R. Sahu, Abhay Arora. "Enhanced Bend Insensitive High Effective Area NZDS Fiber". **Proceedings of the 55th IWCS/Focus**. International Wire & Cable Symposium:330-333.

Keiser, G. 2000. **Optical Fiber Communication : Third Edition**. McGraw-Hill International Editions.

Kim, Hyunchin. 2000. **Transmission Issues In Regional And Metropolitan Area Networks**. The University of Texas at Dallas.

Kumano, Naomi, dkk. 2002. Development of A Non Zero Dispersion-Shifted Fiber With Ultra Low Dispersion Slope. **Furukawa Review** No. 22.

Lee, Ghang-Ho. 2006. **Demonstration of Optical Tunable Dispersion Compensation With A Virtually-Imaged Phased-Array Based Pulse Shaper**. Purdue University.

Sinha, Salaj. 2004. **Usage of G655 Fiber In Metro/Regional Networks**. India : Sterlite Optical Technologies Ltd.

Tsuda, Sergio, dan Valeria L. Da Silva. **Transmission of 80x 10Gbit/s WDM Channels With 50 GHz Spacing Over 500 Km of LEAF® Fiber**. New Jersey : Corning Inc.

Vojtech, Josef, dkk. 2005. **Deliverable 2.1 Dark Fibre Lighting Technologies**. SEEFIRE Consortium.

Willner, A.E. 2006. **Combating Degrading Effects In Non-Static And Reconfigurable WDM Systems And Networks**. University of Southern California.

Yokokawa, Tomoyuki, dkk. 2003. Dispersion Compensating Optical Fiber For Non-Zero Dispersion-Shifted Optical Fiber. **Sei Technical Review** No. 55.

Anonymous. 2006. **Nonzero Dispersion Shifted Fiber**. <URL:[http://en.wikipedia.org/wiki/Nonzero dispersion shifted fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Nonzero_dispersion_shifted_fiber) - Wikipedia, the free encyclopedia.htm>

Anonymous. 2005. **Fiber Dispersion**. <URL:<http://www.fiber-optics.info/glossary-d/dispersion.htm>>.

Anonymous. 2004. **Optical Fundamentals** : Cisco Optical Workshop. <URL:<http://www.cisco.com>>

Anonymous. 2002. **Singlemode Fiber Types.** <URL:
<http://www.thefoa.org/tech/smf.htm>>

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Listing Program Metode *Split-Step Fourier (SSF)*

Program metode *Split-Step Fourier (SSF)* ini ditulis pada software Matlab 7.0 dalam bentuk m-file.

```
%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF) Using Split-Step Fourier Method
%*****
%*****
%*****
%*****
%Mekka Riadhah, 2403.100.071
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
ln=1;
i=sqrt(-1);
Po=0.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=125e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=-4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (/W.m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----
```

```

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end

```

```

%-----
tau =- 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=0.1:0.1:2.5 %the various fiber lengths can be varied and this
vector can be changed
z=ii*Ld;
u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
figure(1)
plot(abs(u),'r');
title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);
dw=1/dt*2*pi;
w=(-1*l/2:1:l/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);

```

```

pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));
phadisp(ln)=dd;%saving pulse phase
ln=ln+1;
end
toc;
cputime=toc;

figure(2);
mesh(op_pulse(1:1:ln-1,:));
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('distance'); zlabel('amplitude');

figure(3);
plot(op_pulse);
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');

figure(4)
plot(pbratio(1:1:ln-1),'k');
xlabel('Number of steps');
ylabel('Pulse broadening ratio');
grid on;
hold on;

disp('CPU time:'), disp(cputime);

```

Listing Program Metode *Split-Step Fourier (SSF)* untuk $L = 5$ km

```

%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF) Using Split-Step Fourier Method
%*****
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
ln=1;
i=sqrt(-1);
Po=0.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=125e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=-4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (/W.m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end

%-----

```



```

tau =- 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=0.5 %the various fiber lengths can be varied and this vector can be
changed
z=ii*Ld;
    u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
    figure(1)
    plot(abs(u),'r');
    title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);

dw=1/l/dt*2*pi;
w=(-1*1/2:1:l/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size

```

```
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));  
phadisp(ln)=dd;%saving pulse phase  
ln=ln+1;  
end  
toc;  
cputime=toc;
```

```
figure(2);  
plot(op_pulse);  
title('Pulse Evolution');  
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');  
grid on;
```

```
disp('CPU time:'), disp(cputime);
```

Listing Program Metode Split-Step Fourier (SSF) untuk L = 10 km

```
%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF) Using Split-Step Fourier Method
%*****
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
ln=1;
i=sqrt(-1);
Po=.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=125e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (/W.m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end
```

```

%-----
tau = 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=1 %the various fiber lengths can be varied and this vector can be
changed
z=ii*Ld;
    u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
    figure(1)
    plot(abs(u),'r');
    title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);

dw=1/l/dt*2*pi;
w=(-1*1/2:1:l/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));

```

```
phadispln)=dd;%saving pulse phase
ln=ln+1;
end
toc;
cputime=toc;
```

```
figure(2);
plot(op_pulse);
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');
```

```
disp('CPU time:'), disp(cputime);
```

Listing Program Metode Split-Step Fourier (SSF) untuk L = 15 km

```
%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF)Using Split-Step Fourier Method
%*****
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
ln=1;
i=sqrt(-1);
Po=.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=125e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=-4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (/W.m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end
```

```

%-----
tau =- 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=1.5 %the various fiber lengths can be varied and this vector can be
changed
z=ii*Ld;
    u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
    figure(1)
    plot(abs(u),'r');
    title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%%%%%%%%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);

dw=1/l/dt*2*pi;
w=(-1*1/2:1:1/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));

```

```
phadisp(ln)=dd;%saving pulse phase
ln=ln+1;
end
toc;
cputime=toc;

figure(2);
plot(op_pulse);
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');

disp('CPU time:'), disp(cputime);
```


Listing Program Metode Split-Step Fourier (SSF) untuk L = 20 km

```

%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF)Using Split-Step Fourier Method
%*****
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
In=1;
i=sqrt(-1);
Po=.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=125e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=-4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (/W.m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end

```



```

%-----
tau =- 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=2.0 %the various fiber lengths can be varied and this vector can be
changed
z=ii*Ld;
u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
figure(1)
plot(abs(u),'r');
title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);

dw=1/l/dt*2*pi;
w=(-1*1/2:1:l/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));

```

```
phadisp(ln)=dd;%saving pulse phase
ln=ln+1;
end
toc;
cputime=toc;
```

```
figure(2);
plot(op_pulse);
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');
```

```
disp('CPU time:'), disp(cputime);
```

Listing Program Metode Split-Step Fourier (SSF) untuk $L = 25$ km

```

%Analysis of Light Propagation in Non-Zero Dispersion Shifted Fiber
(NZDSF)Using Split-Step Fourier Method
%*****
%-----
clc; clear all; close all; clf;
cputime=0;
tic;
ln=1;
i=sqrt(-1);
Po=.001; %input power (watts)
alpha=0; %fiber loss (dB/km)
alph=alpha/(4.343); %eqn 2.15(Chapter II)
to=10e-12; %initial pulse width(s)
pi=3.1415926535;
n2=2.25*10^-20; %nonlinear index coefficient(m2/W)
lambda=1.55*10^-6; %wavelength (m)
Aeff=50*10^-12; %effective area (m2)
D=4*10^-6; %dispersion coefficient (ps/m.m)
c=3*10^8; %light speed (m/s)
Ao=sqrt(Po); %amplitude
gamma=((2*pi*n2)/(lambda*Aeff)); %nonlinear parameter (W^-1/m)
b2=((D*lambda^2)/(-2*pi*c)); %GVD paramter(s2/m)
Ld=((to^2)/(abs(b2))); %dispersion length (m)
Ln=(1/(gamma*Po)); %nonlinear length(m)
%-----

Preq=(abs(b2))/(gamma*(to^2)) %power required to generate pulse
(watts)
if Po<(Preq/10) %check non linearity limit and determine N
N=1 %if fiber power < pulse required per pulse non-linearities
negligable
else
N=(gamma*Ld*Po)^0.5 %If fiber power >= pulse required incorporate
non linear effects
end

```

```

%-----
tau =- 4096e-12:1e-12: 4095e-12;% dt=t/to
dt=1e-12;
rel_error=1e-5;
h=5000;% step size
for ii=2.5 %the various fiber lengths can be varied and this vector can be
changed
z=ii*Ld;
    u=Ao*exp(-(1/2)*(tau/to).^2);
    figure(1)
    plot(abs(u),'r');
    title('Input Pulse'); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude');
grid on;
hold on;
l=max(size(u));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fwhm1=find(abs(u)>abs(max(u)/2));
fwhm1=length(fwhm1);

dw=1/l/dt*2*pi;
w=(-1*1/2:1:l/2-1)*dw;
u=fftshift(u);
w=fftshift(w);
pulse=fft(fftshift(u));
for jj=h:h:z
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
f=ifft(pulse);
f=f.*exp(i*gamma*((abs(f)).^2)*(h));
pulse=fft(f);
pulse=pulse.*exp(-alph*(h/2)+i*b2/2*w.^2*(h/2));
end
f=ifft(pulse);
op_pulse(ln,:)=abs(f);%saving output pulse at all intervals
fwhm=find(abs(f)>abs(max(f)/2));
fwhm=length(fwhm);
ratio=fwhm/fwhm1;%PBR at every value
pbratio(ln)=ratio;%saving PBR at every step size
dd=atand((abs(imag(f)))/(abs(real(f))));

```

```
phadisp(ln)=dd;%saving pulse phase
ln=ln+1;
end
toc;
cputime=toc;

figure(2);
plot(op_pulse);
title('Pulse Evolution');
xlabel('Time'); ylabel('amplitude');

disp('CPU time:'), disp(cputime);
```

LAMPIRAN B

Sterlite DOF-LITE™ (RS) Single Mode Optical Fiber

Technical Specifications: SOTL/ DOF-LITE/RS/01/06

Sterlite DOF-LITE™ (RS) Single-Mode Optical Fiber, a Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (NZ-DSF), is a significant breakthrough in optical fiber technology, providing high data-rate, multi-wavelength and long haul transmission. The key advantage of DOF-LITE™ is its industry-lowest dispersion slope that enables high performance, maximum dense wavelength division multiplexing (DWDM). Low dispersion lowers total network cost by reducing the need for complex and expensive dispersion compensation, and enables more accurate compensation as the need arises. It also improves network performance by reducing the non-linear effect of four-wave mixing.

Sterlite DOF-LITE™ (RS) is complied with ITU-T G655 C & D standard and suitable for transmission in the conventional C band (1530-1565nm), as well as in the emerging L-band (1565- 1625nm). It has industry leading attenuation, which ensures improved optical signal-to-noise ratio, longer amplifier spacings and reduced network costs. Also, its lowest bend induced losses guarantee optimum installation performance at 1550nm, and at the more sensitive 1625nm wavelength. DOF-LITE™ (RS) exceeds the requirements for today's high-channel-count 2.5 Gb/s and 10 Gb/s systems, and supports migration to next generation 40 Gb/s data rates.

Specifications

Attenuation	≤ 0.22 dB/km at 1550 nm ≤ 0.24 dB/km at 1625 nm
Mode Field Diameter at 1550 nm	8.4 ± 0.6 μm
Dispersion Slope at 1550 nm	≤ 0.05 ps/nm ² .km
Dispersion coefficient at 1460 nm	-1.5 to 0.15 ps/nm.km
Dispersion coefficient at 1530 nm	2 to 5.5 ps/nm.km
Dispersion coefficient at 1550 nm	3.25 to 6.0 ps/nm.km
Dispersion coefficient at 1565 nm	4.5 to 6.0 ps/nm.km
Dispersion coefficient at 1625 nm	5.77 to 8.9 ps/nm.km
Effective Area (Typical)	50 μm ²
Fiber PMD Link Design Value#	≤ 0.2 ps/√km
Cladding Diameter	125.0 ± 1 μm
Core / Cladding Concentricity Error	≤ 0.5 μm
Cladding Non Circularity	≤ 1 %
Coating Diameter (uncolored)	245 ± 5 μm
Coating / Cladding Concentricity Error	≤ 12 μm

Individual PMD values may change when cabled

Point Discontinuities: There are no attenuation discontinuities greater than 0.05 dB at 1550 nm.

Mechanical Characteristics

Proof Test Levels	100 kpsi (0.7 GN/m ²). This is equivalent to 1% strain
Coating Strip Force (Force to Mechanically strip the dual coating)	≥ 1.3 N (0.3 lbf) and < 5.0 N (1.2 lbf)
Fiber Curl	≥ 4 m

Sterlite DOF-LITE™ (RS) Single Mode Optical Fiber

Technical Specifications: SOTL/ DOF-LITE/RS/01/06

Macro-bending Attenuation: The maximum attenuation with bending does not exceed the specified values with the following deployment conditions

Deployment conditions	Wavelength	Induced Attenuation
1 turn, 16 mm (0.6 inch) radius	1550 nm	≤ 0.50 dB
	1625 nm	≤ 0.50 dB
100 turns, 30 mm (1.18 inch) radius	1550 nm	≤ 0.05 dB
	1625 nm	≤ 0.10 dB

Environmental Characteristics

Temperature Dependence of Attenuation Induced Attenuation, -60°C to +85°C at 1550 and 1625 nm	≤ 0.05 dB/km
Temperature – Humidity Cycling Induced Attenuation, -10°C to +85°C and 95% relative humidity at 1550 and 1625 nm	≤ 0.05 dB/km
Water Immersion, 23°C Induced Attenuation due to Water Immersion at 23 ± 2°C at 1550 and 1625 nm	≤ 0.05 dB/km
Accelerated Aging (Temperature), 85°C Induced Attenuation due to Temperature Aging at 85 ± 2°C at 1550 and 1625 nm:	≤ 0.05 dB/km

Other Performance Characterizations*

Effective Group Index of Refraction	1.470 at 1550 nm
Dynamic Fatigue Parameter (nd)	≥ 20
Weight Per Unit Length	64 grams/km

* Values stated are typical

Fiber Shipping Details

Shipping Spool Flange Diameter	23.50 cm (9.25 inches) or 26.5 cm (10.4 inches)
Shipping Spool Barrel Diameter	15.24 cm (6.00 inches) or 17.0 cm (6.7 inches)
Shipping Spool Traverse Width	9.46 cm (4.70 inches) or 15.0 cm (5.9 inches)
Shipping Spool Weight	0.50 kg (1.36 lbs) or 0.88 kg (1.93 lbs)
Shipping Length : Standard length available per reel is 50.4 km. Lengths per reel as per customer request are also available	

Sterlite Optical Technologies control every stage of the manufacturing process so that quality is *built in* to every meter of fiber, rather than *selected out* at the end through testing. To ensure the accuracy and precision of the manufacturing process, Sterlite Optical Technologies routinely calibrate and re-certify process equipment and measurement benches against internationally traceable standards from NPL/NIST, and follow test methods compliant with EIA/TIA, IEC and ITU standards. All Sterlite Optical fibers are manufactured at ISO 9001:2000, ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:1999 certified facilities.

© Sterlite Optical Technologies Ltd, E-1/2/3, MIDC, Waluj, Aurangabad, Maharashtra, INDIA
 Phone +91-240-2564599 Fax: +91-240-2564598. Email: ofmarketing@sterlite.com. URL: www.sterliteoptical.com