

ANALISIS RAMBATAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK DALAM FIBER OPTIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN *FINITE DIFFERENCE* METODA LAASONEN

Radhiyah Mardhiyah^{#1}, Hidayati^{#2}, Masril^{#2}

¹Mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA UNP, email: dhiyahalamuddin@yahoo.co.id

²Staf Pengajar Jurusan Fisika FMIPA UNP

Abstract

Wave Nonlinear Schrodinger (NLS) is a wave that propagates in an optical fiber. NLS wave has a wave with wave propagation characteristics are stable and propagate without change of shape. This study aims to examine and analyze the behavior of wave propagation NLS with the influence wavelengths ($N\lambda$) on its amplitude. Research conducted including the type of basic research using a numerical approach. Used numerical approach is the Finite Difference Laasonen method. Based on the generated soliton solutions, the wave nature of the NLS can be analyzed which shows that large amplitude (A) NLS waves is influenced by the wavelength (λ). Results of programming in the form of a graphic display output and modeling. Modeling results for the NLS equation wavelength waves ($N=1$) which is comparable to the wavelength of the amplitude values. Modeling results for the wavelength variation ($N=2$) also showed that the wavelength is proportional to the amplitude.

Keywords: Nonlinear Schrodinger (NLS), Laasonen method, optical fiber

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada saat sekarang ini banyak berpengaruh pada berbagai bidang diantaranya bidang ekonomi, sosial, budaya, dan sains. Salah satu bidang yang sangat dipengaruhi adalah sains khususnya bidang ilmu fisika. Fisika adalah salah bidang ilmu yang membahas tentang gejala-gejala yang terjadi dalam kehidupan dan alam semesta baik yang linier maupun yang nonlinier. Salah satu contoh gejala-gejala alam adalah gelombang.

Gelombang merupakan suatu gejala gangguan yang merambat dalam selang waktu tertentu ke ruang sekitarnya. Jika sistem diganggu dari posisi kesetimbangannya maka akan terjadi gelombang dan gangguan tersebut akan merambat dari suatu daerah sistem ke daerah lainnya. Gerak gelombang dapat dilihat sebagai perpindahan berupa momentum dan pulsa energi dari suatu daerah ke daerah lain^[1].

Gerak gelombang merupakan gejala yang timbul karena gangguan lokal pada besaran fisis tertentu serta penjalaran gangguan itu dalam medium disekitarnya. Gangguan tersebut dapat berupa, osilasi tekanan atau kerapatan massa dalam medium bersangkutan, osilasi medan listrik/ magnet dan osilasi kedudukan partikel. Kecuali gelombang elektromagnetik, penjalaran gangguan lokal tersebut selalu terjadi dimedium material^[2]. Gejala nonlinier adalah fenomena umum dalam fisika karena hampir semua fenomena alam semesta bersifat nonlinier. Salah satu contoh dari gejala nonlinier adalah gelombang soliton.

Soliton adalah gelombang nonlinier yang dapat memperkuat diri dan mempertahankan bentuknya selama penjalaran dengan kecepatan konstan. Soliton terjadi disebabkan oleh efek nonlinier dan efek

dispersif dalam medium yang saling mengkompresi. Efek dispersif merujuk pada hubungan dispersi, hubungan antara frekuensi dan kecepatan gelombang dalam medium^[3].

Soliton merupakan gelombang nonlinier yang cepat rambatnya dipengaruhi oleh amplitudo. Pada tahun 1834, Jhon Scott Russel mengamati suatu gerak gelombang tunggal yang bergerak sepanjang kanal tanpa mengalami perubahan bentuk maupun pengurangan laju rambat gelombang^[4]. Keunikan soliton adalah soliton tunggal dapat menjalar pada jarak yang jauh tanpa ada perubahan kecepatan dan bentuk selama perambatannya dan soliton mampu mempertahankan bentuknya setelah bertumbukan dengan soliton lainnya. Berarti soliton selama penjalarannya tidak mengalami pengurangan energi dan dapat memperkuat diri serta mempertahankan bentuknya selama penjalaran dengan kecepatan konstan. Kecepatan penjalaran soliton sebanding dengan amplitudo, semakin besar amplitudo maka kecepatannya semakin besar juga. Konsep soliton banyak digunakan dalam perkembangan teknologi diantaranya adalah model partikel subatomik, transfer energi pada syaraf sistem manusia, komonikasi serat optik, fluxons pada *Josephson Junction*, sistem *Deoxyribonucleic acid* (DNA), dan lain-lain. Salah satu bidang teknologi yang menggunakan konsep soliton adalah komunikasi fiber optik.

Fiber optik adalah sebuah kaca murni yang panjang dan tipis yang dapat mampu membimbing cahaya^[3]. Dalam kehidupan sehari-hari fiber optik yang digunakan digabung menjadi satu dalam sebuah tempat yang lebih dikenal dengan kabel optik. Kabel optik digunakan untuk menyalurkan data digital berupa cahaya untuk jarak yang sangat jauh.

Fiber optik memanfaatkan cahaya yaitu gelombang elektromagnetik sebagai gelombang

pembawa informasi yang dikirim. Pengiriman isyarat informasi pada bagian pengiriman diubah menjadi isyarat optik, kemudian diteruskan ke saluran informasi yang terbuat dari serat optik sebagai pemandu gelombang. Sampai di penerima isyarat optik yang terdeteksi oleh detektor cahaya, diubah besaran optik menjadi besaran elektrik. Pada detektor cahaya dapat mengalami pelemahan dan pelebaran yang disebabkan oleh ketidakmurnian bahan serat, menyerap serta menyebarkan cahaya.

Salah satu jenis kabel optik yaitu *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM). DWDM adalah suatu teknologi transfer data yang memanfaatkan beberapa panjang gelombang yang berbeda sebagai kanal untuk mengirim data melalui sebuah serat optik tunggal secara bersamaan.

Jika suatu medium perambatan gelombang elektromagnetik bersifat linier, maka^[6]

$$D = \epsilon E \quad \text{dan} \quad H = \frac{1}{\mu} B \quad (1)$$

Bila medium bersifat homogen, maka nilai konstanta permivitas, ϵ , dan permeabilitas, μ tidak mengalami variasi pada setiap titik dalam medium, sehingga persamaan maxwell dapat dinyatakan sebagai

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2)$$

Besar kecepatan rambat gelombang elektromagnetik adalah^[6]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3)$$

Biasanya kecepatan rambat gelombang elektromagnetik pada suatu medium lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan rambat gelombang elektromagnetik.

Perambatan gelombang pada optik dapat diturunkan dari persamaan Maxwell (satuan Gaussian) dalam bahan^[7], yaitu:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

Diasumsikan dalam keempat persamaan di atas tidak ada rapat muatan listrik dan rapat arus listrik luar yang di berikan, $\rho = \mathbf{J} = 0$, rapat arus $\mathbf{D}$ dan $\mathbf{B}$ menimbulkan reaksi medan listrik dan medan magnet di dalam medium dan hubungan keduanya dapat ditulis sebagai berikut^[8]

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (9)$$

ϵ_0 adalah permivitas ruang hampa dan μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa, dan $\mathbf{P}$ dan $\mathbf{M}$ adalah induksi listrik dan polarisasi magnetik. Jika tidak terdapat muatan luar maka $\vec{\nabla} \cdot \mathbf{E} = 0$ serta mediumnya

non magnetik ($\mathbf{M} = 0$), maka dengan melakukan curl pada persamaan (4) :

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (10)$$

Untuk bahan dielektrik isotropik bersifat non magnetik berarti $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan (5) diketahui: $\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}$ sehingga persamaan (11) dapat ditulis

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{D} \quad (12)$$

Penerapan vektor identitas untuk medan listrik $\mathbf{E}$, sehingga persamaan (12) menjadi

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{D} = 0 \quad (13)$$

Dari persamaan (1) dan (3) persamaan (13) dapat ditulis dalam bentuk

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0 \quad (14)$$

Persamaan (14) merupakan persamaan gelombang linier untuk gelombang elektromagnetik dengan kecepatan rambat c .

Medium $\mathbf{D}$ dan $\mathbf{E}$ dalam domain frekuensi dengan menggunakan persamaan tranformasi Fourier adalah :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (15a)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (15b)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (15c)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (15d)$$

Berdasarkan persamaan (15) ini persamaan (13) menjadi

$$\vec{\nabla}^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) - \mu_0 (-i\omega)^2 \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (16)$$

Dalam serat optik, berlaku hubungan^[8] :

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^1 \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^3 E^2 \mathbf{E} + \dots, \quad (17)$$

χ adalah polarisabilitas atau suseptibilitas dielektrik dalam medium. Relasi medan perpindahan listrik dapat dituliskan:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL}, \quad (18a)$$

Dari persamaan (18a) dapat diketahui bahwa perpindahan listrik ($\mathbf{D}$) dipengaruhi oleh medan listrik, polarisasi linier dan polarisasi nonlinier. Polarisasi linier dan nonlinier tercakup dalam persamaan (17). Substitusi persamaan (17) ke persamaan (18a) menghasilkan^[9] :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + (\epsilon_0 \chi^1 + \epsilon_0 \chi^3 |E|^2 + \dots) \mathbf{E}, \quad (18b)$$

Jika ditinjau bahwa suseptibilitas nonlinier yang dominan sampai suseptibilitas orde tiga, maka persamaan (18b) menjadi :

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0(1 + \chi^1 + \chi^3|E|^2 + \dots)\mathbf{E} \\ &= \varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} \end{aligned} \quad (18c)$$

$$\text{Untuk } n^2 = \varepsilon_r, \quad (19a)$$

$$n^2 = 1 + \chi^1 + \chi^3|E|^2 \quad (19b)$$

Persamaan (19b) merupakan persamaan indeks bias yang terdiri dari indeks bias linier dan nonlinier,

$$n^2 = n_L^2 + n_{NL}^2 I(t) \quad (20)$$

dengan indeks bias linier adalah

$$n = \sqrt{1 + \chi^1} \quad (21)$$

Koefisien n_{NL} adalah indeks bias nonlinier dan sebanding dengan suseptibilitas orde ketiga ($n_{NL}^2 = \chi^3$). Dari persamaan (20), indeks bias bergantung pada intensitas dengan $I(t) \sim |E|^2$.

Relasi $\mathbf{D}$ dan $\mathbf{E}$ dari persamaan (8) dan dapat pula dinyatakan oleh persamaan (18c) jika digunakan pendefinisian konstanta dielektrik berdasarkan persamaan (18b) maka menghasilkan:

$$\mathbf{D}(r, t) = \varepsilon_0 n^2 \mathbf{E}(r, t) \quad (22)$$

dimana n adalah indeks bias yang bergantung frekuensi dan intensitas medan listrik dalam persamaan (20)

$$n = n_L(\omega) + n_{NL}|E|^2 \equiv n(\omega, E) \quad (23)$$

Tinjau kembali persamaan (22) dan lakukan transformasi Fourier melalui definisi persamaan (14) diperoleh

$$\mathbf{D}(r, \omega) = \varepsilon_0 n^2(\omega, E) \mathbf{E}(r, \omega) \quad (24)$$

Persamaan (24) jika disubstitusikan ke dalam persamaan (16) menjadi^[8]

$$\nabla^2 \mathbf{E}(r, \omega) + \frac{\omega^2 n^2(\omega, E)}{c^2} \mathbf{E}(r, \omega) = 0 \quad (25)$$

Selanjutnya gunakan definisi k dan ω

$$k^2(\omega, E) = \frac{\omega^2 n^2(\omega, E)}{c^2} \quad (26)$$

Dari persamaan (26) terlihat bilangan gelombang sebagai fungsi dari frekuensi (ω) dan intensitas medan listrik ($\mathbf{E}$). Substitusikan persamaan (23) ke persamaan (26) menghasilkan :

$$k(\omega, E) = \frac{\omega}{c} n_L(\omega) + \frac{\omega}{c} n_{NL}|E|^2 \quad (27)$$

Suku pertama dari persamaan (27) adalah konstanta gelombang $k(\omega)$, suku kedua merupakan suku tambahan sebagai konsekuensi indeks bias terhadap intensitas.

Selanjutnya di definisikan konstanta nonlinieritas sebagai^[10]:

$$\gamma = \frac{\omega n_{NL}}{c}$$

Medan listrik dalam serat optik yang merambat pada arah z dapat di ungkapkan melalui^[11]

$$E(z, t) = A(z, t) \exp[-i(\omega_0 t - k_0 z)] \quad (28)$$

k_0 dan ω_0 menyatakan bilangan gelombang dan frekuensi gelombang pembawa, serta $A(z, t)$ diasumsikan sebagai fungsi selubung (*envelope*) yang bervariasi lambat terhadap jarak (*slowly varying envelope*). Persamaan dinamika selubung medan listrik $A(z, t)$ dapat diperoleh dengan cara, pertama-tama persamaan (28) di transformasikan ke dalam domain frekuensi

$$\begin{aligned} E(z, \omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} E(z, t) e^{i\omega t} dt \\ &= e^{ik_0 z} A(z, \omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (29)$$

Selanjutnya disubstitusikan persamaan (29) ke persamaan (25) dengan mengingat bahwa arah perambatan gelombang hanya pada sumbu z

$$\begin{aligned} \nabla^2 e^{ik_0 z} A(z, \omega - \omega_0) \\ + \frac{\omega^2 n^2(\omega, E)}{c^2} e^{ik_0 z} A(z, \omega - \omega_0) = 0 \end{aligned}$$

sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} (ik_0)^2 A(z, \omega - \omega_0) + 2(ik_0) \frac{\partial}{\partial z} A(z, \omega - \omega_0) + \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} A(z, \omega - \omega_0) + k^2(\omega, E) A(z, \omega - \omega_0) = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Berdasarkan asumsi bahwa fungsi selubung bervariasi lambat terhadap waktu (*slowly varying envelope*), maka diperkenankan mengaproksimasi persamaan (30) dengan mengabaikan suku ketiga, ini artinya fungsi selubung boleh bergerak namun percepatan harus jauh lebih kecil daripada kecepatannya^[8]

$$\left| \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right| \ll \left| \frac{\partial A}{\partial z} \right| \quad (31)$$

Persamaan (33) dapat diaproksimasi menjadi

$$2(ik_0) \frac{\partial}{\partial z} A(z, \omega - \omega_0) + [k^2(\omega, E) - k_0^2] A(z, \omega - \omega_0) = 0 \quad (32)$$

Mengingat bahwa $k(\omega, E)$ seperti dinyatakan dalam persamaan (27), maka dapat ditulis

$$k(\omega, E) = k(\omega) + \Delta k(\omega, E) \quad (33)$$

$k(\omega, E)$ dapat diuraikan dalam ekspansi deret Taylor di sekitar pusat ω_0 terhadap k dan diperoleh^[8]:

$$k(\omega) = k_0 + (\omega - \omega_0)k_1 + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} k_2 + \dots, \quad (34)$$

Kemudian, persamaan (33) dan (34) dapat digunakan untuk menghitung suku $[k^2(\omega, E) - k_0^2]$ dalam persamaan (32). Dapat dituliskan kembali persamaan (32) dalam bentuk :

$$i \frac{\partial}{\partial z} A(z, \omega - \omega_0) + \left[(\omega - \omega_0) k_1 + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} k_2 + \Delta k \right] A(z, \omega - \omega_0) = 0 \quad (35)$$

Lakukan transformasi Fourier balik (invers) terhadap persamaan (35) dan akan didapatkan persamaan :

$$i \frac{\partial}{\partial z} A(z, t) + i k_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z, t) - \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z, t) + \Delta k A(z, t) = 0 \quad (36)$$

Bandingkan Δk pada persamaan (33) dan (27), persamaan (36) dapat ditulis dalam bentuk :

$$i \frac{\partial}{\partial z} A(z, t) + i k_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z, t) - \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z, t) + \frac{\omega}{c} n_{NL} |E|^2 A(z, t) = 0$$

maka persamaan (36) di representasikan dalam bentuk :

$$i \frac{\partial}{\partial z} A(z, t) + i k_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z, t) - \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z, t) + [\gamma |A(z, t)|^2] A(z, t) = 0 \quad (37)$$

Persamaan (37) dapat di sederhanakan dengan transformasi koordinat bergerak dengan kecepatan sama dengan kecepatan grup V_g sebagai berikut^[8] :

$$\tau = t - \frac{z}{V_g} \quad (38)$$

Dari transformasi pada persamaan (38) serta menggunakan aturan differensial, persamaan (37) dapat ditulis menjadi :

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (39)$$

Jika ditinjau perambatan pulsa dalam medium dimana $k_2 < 0$ (*anomalous dispersion*), maka persamaan (39) dengan mengambil $k_2 = -k_2$ menjadi :

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2} k_2 \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (40)$$

Persamaan (40) merupakan persamaan nonlinier schrodinger (NLS). Persamaan NLS dapat menggambarkan dengan baik sistem komonikasi optik nonlinier dalam orde durasi pikodetik memiliki solusi 2 soliton^[12].

Persamaan NLS memiliki solusi N-soliton. Solusi persamaan NLS untuk 1 panjang gelombang bisa di selesaikan secara analitik. Tetapi untuk pulsa atau gelombang yang memiliki 2 atau lebih panjang gelombang yang dikirimkan dalam waktu bersamaan jika diselesaikan secara analitik akan menemukan kesulitan karena memerlukan waktu yang lama dan penyelesaian yang rumit. Untuk mengatasi masalah tersebut salah satu metode yang digunakan metode pendekatan yaitu pendekatan *finite difference* metoda *laasonen*.

Persamaan (40) didiskritisasi menggunakan pendekatan *Finite Difference* metode *laasonen*, sehingga diperoleh persamaan (41)^[13]

$$i \frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta z} + \frac{k_2}{2(\Delta \tau)^2} [A_{i+1}^{n+1} - 2A_i^{n+1} + A_{i-1}^{n+1}] + \gamma |A|^2 A = 0 \quad (41)$$

$\gamma |A|^2 A$ merupakan konstanta sehingga dapat dimisalkan menjadi nol, persamaan (41) menjadi

$$\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta z} = \frac{ik_2}{2(\Delta \tau)^2} [A_{i+1}^{n+1} - 2A_i^{n+1} + A_{i-1}^{n+1}] \quad (42)$$

Kemudian persamaan (42) dapat disederhanakan dan ditulis kembali yaitu

$$A_i^n = - \frac{ik_2(\Delta z)}{2(\Delta \tau)^2} [A_{i+1}^{n+1} - 2A_i^{n+1} + A_{i-1}^{n+1}] + A_i^{n+1} \quad (43)$$

Selanjutnya Persamaan (43) diselesaikan menggunakan matrik tridiagonal. sehingga menghasilkan pemodelan dari persamaan NLS dan memperlihatkan pemodelan rambatan gelombang elektromagnetik pada fiber optik dan menganalisis rambatan gelombang elektromagnetik ketika banyak panjang gelombang ($N\lambda$) yang dikirimkan melalui pulsa dengan N adalah 1 dan 2.

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan adalah penelitian dasar. Penelitian dasar merupakan penelitian yang dilakukan untuk menjawab rasa ingin tahu dalam rangka pengembangan ilmu pengetahuan dan memiliki kegunaan praktis yang tidak dapat diaplikasikan secara langsung dalam kehidupan sehari-hari. Penelitian tentang analisis rambatan gelombang elektromagnetik pada serat optik ini dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh panjang gelombang terhadap rambatan gelombang elektromagnetik serta untuk mengetahui apakah bentuk gelombang elektromagnetik pada serat optik berbentuk soliton.

Variabel dalam penelitian terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas merupakan variabel yang dapat dimanipulasi pada penelitian ini yaitu panjang gelombang. Variabel terikat merupakan variabel yang menerima akibat dari variabel bebas, pada penelitian ini berupa amplitudo.

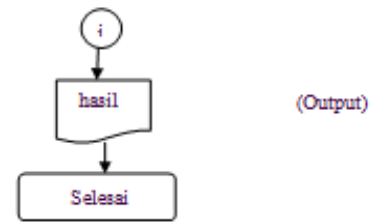
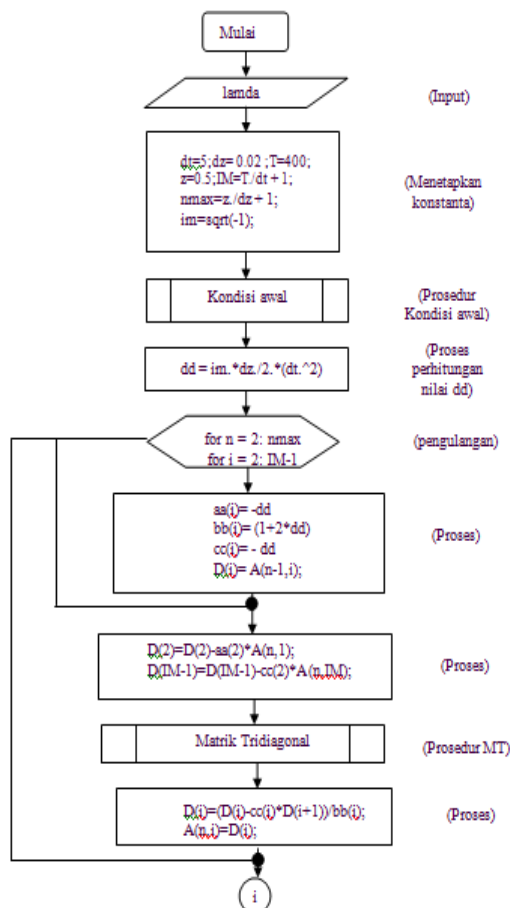
Tahapan penelitian terdiri dari tahap persiapan, tahap pelaksanaan, dan tahap penyelesaian. Segala persiapan yang berhubungan dengan penelitian seperti menelusuri kepustakaan, kajian teori, dan analisis kebutuhan, serta perancangan *flowchart* untuk program yang akan dibuat. Pada tahap pelaksanaan, membuat program berdasarkan *flowchart* yang telah dibuat dan menguji kelayakan program. Pembuatan draft laporan dan perbaikan laporan akhir dapat dilakukan pada tahap penyusunan laporan akhir.

Instrumen penelitian yang digunakan adalah Satu set komputer dengan bahasa pemrograman Matlab R.7 yang dijalankan dengan sistem operasi Windows Seven, Satu perangkat printer untuk

mencetak hasil laporan, Satu *flashdisk* yang digunakan untuk media penyimpanan data.

Penelitian ini dapat memperlihatkan pemodelan, menganalisis dan mengkaji rambatan gelombang elektromagnetik pada serat optik. Pemodelan gelombang NLS menggunakan persamaan (40) didekati melalui metode numerik yaitu pendekatan *Finite Difference* metode *Laasonen*. Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi masalah dan di selesaikan secara matematis sehingga mendapatkan solusi dalam bentuk matematis yaitu persamaan (40). Selanjutnya diselesaikan dengan menformulasikan persamaan (40) ke *Finite Difference* metode *Laasonen* dan menyusun diagram alir (*flowchart*) sesuai dengan metode numerik yang digunakan. Setelah itu menterjemahkan *flowchart* kedalam bahasa program yang digunakan, pada penelitian ini bahasa pemrograman yang digunakan adalah MATLAB 7.0. Kemudian menjalankan program (*Run*) hingga dihasilkan sebuah hasil dalam bentuk pemodelan gelombang NLS. Hasil yang didapatkan akan di interpretasikan dan disesuaikan dengan teori soliton dan teori pendukung.

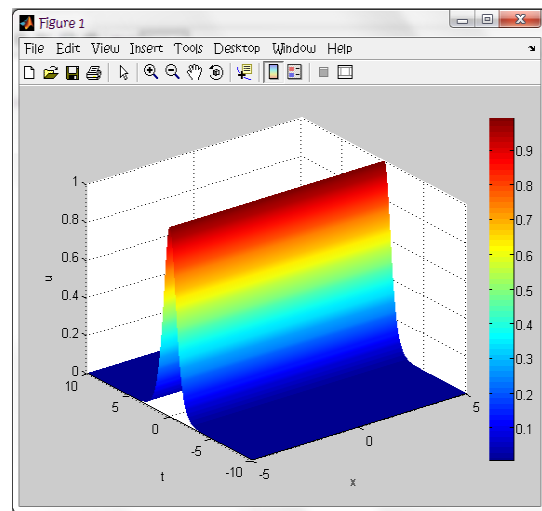
Adapun *flowchart* yang digunakan adalah



Gambar 1. Flowchart Solusi Persamaan NLS Menggunakan Pendekatan *Finite Difference* Metoda *Laasonen*

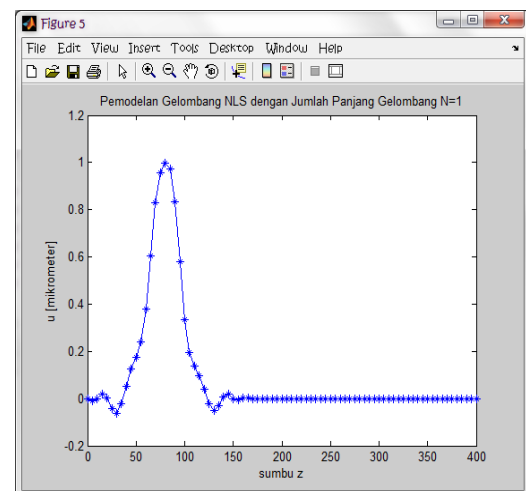
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan gelombang NLS pada fiber optik yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan pendekatan *finite difference* metode *laasonen*. Untuk jumlah panjang gelombang $N=1$, hasil pemodelan solusi eksak dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Persamaan NLS untuk $N=1$ dengan Solusi Eksak

Pemodelan persamaan NLS dengan $N=1$ menggunakan pendekatan *finite difference* metode *laasonen* ($\lambda=1$) ditunjukkan oleh Gambar 3.

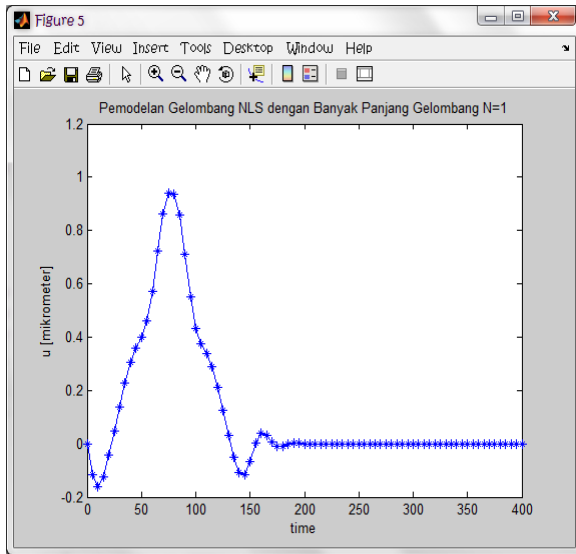


(a)

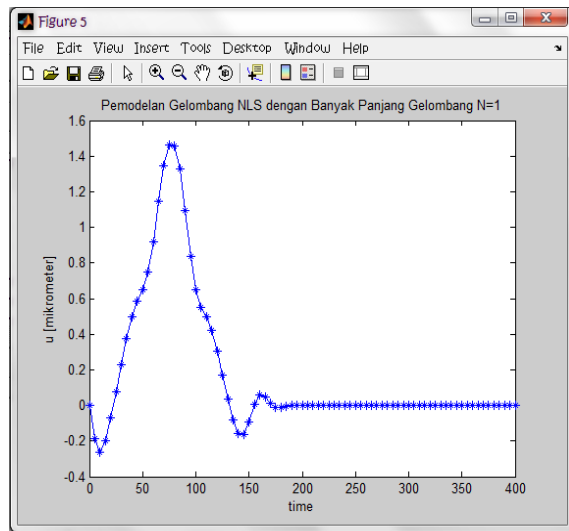
Gambar 3. Pemodelan Persamaan NLS untuk $N=1$ dengan Metode *Laasonen*

Selanjutnya dapat dibandingkan hasil penelitian ini dengan hasil pemodelan solusi eksak persamaan NLS. Antara solusi eksak dengan solusi menggunakan pendekatan *finite difference* metode *laasonen* terdapat perbedaan amplitudo sebesar 15.6 %. Hasil penelitian ini masih terdapat beberapa gangguan selama penjarannya. Karena kesalahan program 15.6 %, maka program yang dibuat sudah dapat digunakan sesuai dengan tujuan penelitian.

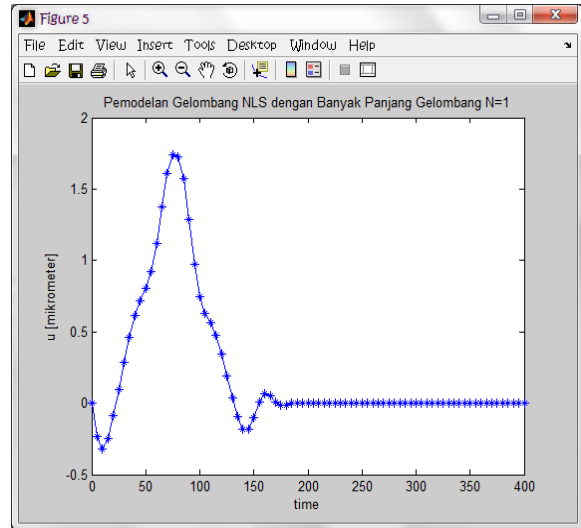
Variasi panjang gelombang terhadap amplitudo ($\lambda = 0.8\mu\text{m}$, $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ dan $\lambda = 1.6\mu\text{m}$) untuk $N=1$ dapat dilihat pada Gambar 4.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Pemodelan Persamaan NLS untuk $N=1$ (a) $\lambda = 0.8\mu\text{m}$, (b) $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ dan (c) $\lambda = 1.6\mu\text{m}$

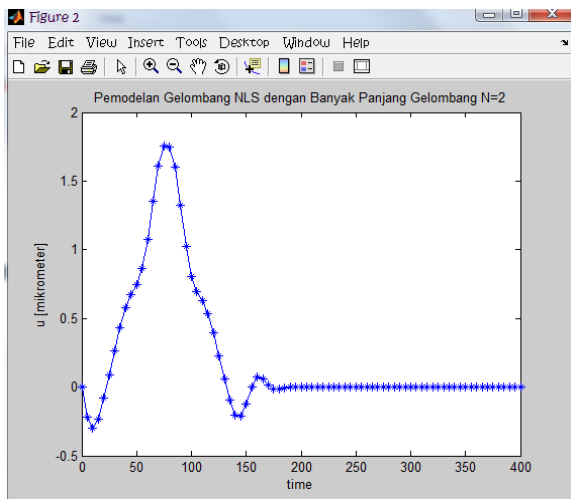
Variasi panjang gelombang terhadap amplitudo gelombang dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat bahwa nilai panjang gelombang sebanding terhadap amplitudo.

Tabel1. Variasi Panjang Gelombang terhadap Amplitudo

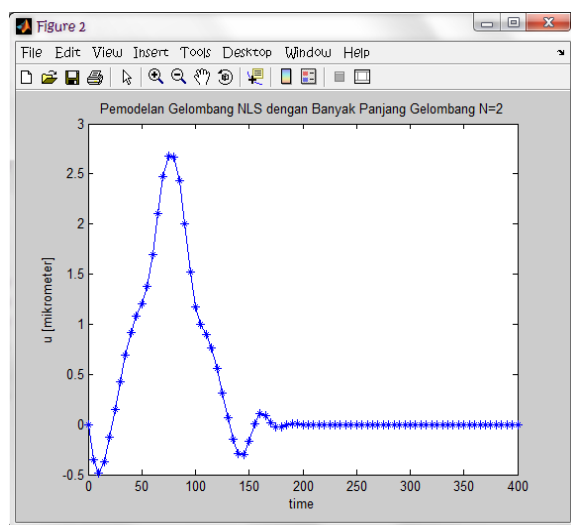
No	Panjang Gelombang (μm)	Amplitudo (μm)
1	0.8	0.9393
2	1.3	1.4605
3	1.6	1.7375

Hasil ini dapat dibuat perbandingan antara nilai panjang gelombang dengan nilai amplitudo yaitu semakin besar nilai panjang gelombang maka amplitudo semakin besar juga ($A_I < A_{II} < A_{III}$).

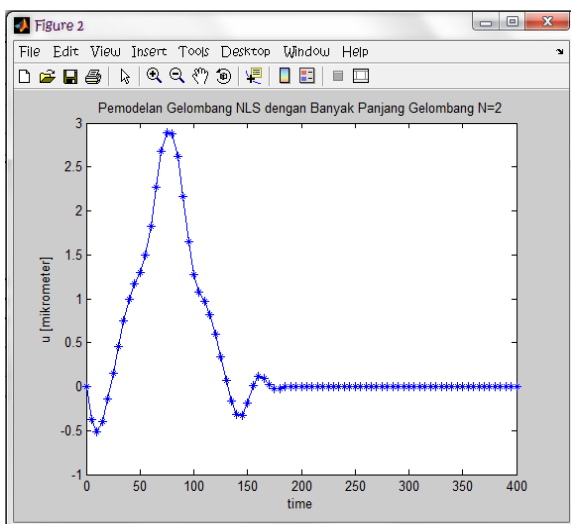
Variasi panjang gelombang terhadap amplitudo (λ_1 dan $\lambda_2 = 1\mu\text{m}$ dan $0.5\mu\text{m}$, λ_1 dan $\lambda_2 = 1.6\mu\text{m}$ dan $0.8\mu\text{m}$, λ_1 dan $\lambda_2 = 1.6\mu\text{m}$ dan $1\mu\text{m}$) untuk $N=2$ dapat dilihat pada Gambar 5.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. Pemodelan Persamaan NLS untuk $N=2$ (a) λ_1 dan $\lambda_2 = 1\mu\text{m}$ dan $0.5\mu\text{m}$, (b) λ_1 dan $\lambda_2 = 1.6\mu\text{m}$ dan $0.8\mu\text{m}$, (c) λ_1 dan $\lambda_2 = 1.6\mu\text{m}$ dan $1\mu\text{m}$

Variasi panjang gelombang terhadap amplitudo gelombang ditunjukkan oleh Gambar 5. Berdasarkan gambar dapat dilihat bahwa variasi panjang gelombang sebanding dengan nilai amplitudo

Tabel2. Variasi Panjang Gelombang terhadap Amplitudo untuk $N=2$

No	Panjang Gelombang 1(μm)	Panjang Gelombang 2(μm)	Amplitudo (μm)
1	1	0.5	1.7534
2	1.6	0.8	2.6768
3	1.6	1	2.8935

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai amplitudo sebanding dengan nilai panjang gelombang. Hasil ini dapat dibuat perbandingan antara nilai panjang gelombang dengan nilai amplitudo yaitu semakin tinggi nilai panjang gelombang maka nilai amplitudo juga semakin besar ($A_I < A_{II} < A_{III}$).

Dalam penelitian ini, peneliti memperlihatkan pengaruh panjang gelombang terhadap amplitudo atau intensitas. Hasil pemodelan persamaan gelombang NLS untuk panjang gelombang ($N=1$) yaitu panjang gelombang sebanding dengan nilai amplitudo. Hasil pemodelan untuk variasi panjang gelombang ($N=2$) juga menunjukkan bahwa panjang gelombang sebanding dengan amplitudo. Sehingga dapat disimpulkan bahwa amplitudo dipengaruhi oleh panjang gelombang. Semakin besar panjang gelombang maka amplitudo gelombang juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori tentang soliton yaitu kecepatan gelombang sebanding dengan amplitudo gelombang. Jika panjang gelombang semakin besar maka nilai kecepatan juga semakin besar sehingga nilai amplitudo juga semakin besar karena amplitudo sebanding dengan kecepatan.

Selain itu pada penelitian ini juga mengamati bentuk gelombang selama penjalarannya. Seperti yang di ungkapkan oleh John Scott Russel bahwa gelombang soliton tidak berubah bentuk selama penjalaran. Hasil penelitian ini menggambarkan perambatan gelombang yang tidak berubah selama penjalarannya. Namun bentuk penjalaran gelombang pada penelitian ini masih terdapat gangguan. Gangguan ini di sebabkan oleh besarnya angka kesalahan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa numerik dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan gelombang NLS berupa Grafik yang menunjukkan hubungan yang sebanding antara amplitudo (A) terhadap panjang gelombang (λ).

2. Amplitudo (A) gelombang NLS dipengaruhi oleh banyak panjang gelombang ($N\lambda$) yaitu:
 - a. Pada panjang gelombang $N=1$, panjang gelombang berbanding lurus dengan amplitudo (A)
 - b. Pada panjang gelombang $N=2$, panjang gelombang berbanding lurus dengan amplitudo (A)

Semakin besar nilai panjang gelombang yang dikirimkan melalui pulsa maka amplitudo gelombang semakin besar juga, karena panjang gelombang sebanding dengan kecepatan gelombang. Hasil ini dengan teori soliton yaitu kecepatan gelombang sebanding dengan amplitudo

REFERENSI

- [1] Giancoli, Douglas C. 1998. *Physics Fifth Edition*. Jakarta : Erlangga
- [2] Tjia, M.O. 1993. *Gelombang*. Bandung : ITB.
- [3] Hidayati. 2005. *Solusi Numerik Schrodinger Nonlinier*. Proceeding Seminar Fisika. UNAND
- [4] Wadati, Miki. 2001. *Introduction to Soliton*. Tokyo : Universitas of Tokyo.
- [5] Crisp, John. 2001. *Introduction to Fiber Optics, 2nd*. Oxford: Newnes.
- [6] Supriyanto. 2007. *Perambatan Gelombang Elektromagnetik*. Depok: Universitas Indonesia
- [7] Griffiths, David J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey : Prentice-Hall.
- [8] Agrawal, G.P. 1995. *Nonlinear Fiber Optics, 3rd Edition*. Academic Press, San Diego.
- [9] Mitschke, Fedor. 2009. *Fiber Optics Physics and Technology*. Berlin: Springer.
- [10] Hasegawa, Akira. 2000. *An Historical Review of Application of Optical Solitons for High Speed Communication*. Kochi University of Technology, Volume 10, No 3.
- [11] Azadeh Mohammad. 2009. *Fiber Optics Engineering*. USA : Springer.
- [12] Meiyanto Eko Sulistyoto. (-). *Sistem Penjamakan pada Komunikasi Serat Optik*. Yogyakarta : Amik Kartika Yani. Diakses tgl 5 Oktober 2012.
- [13] Hoffman, Klaus A dan Chiang, Steve T. 2000. *Computation Fluid Dynamics Volume 1 Fourth Edition*. USA : A Publication of Engineering Education System