

ANALISIS DAYA HILANG PADA SERAT OPTIK MELENGKUNG MENGUNAKAN METODE GEOMETRIS DAN FDTD

Okfarima Mandasari¹, Erna Sri Sugesti², Bambang Setia Nugroho³

^{1,2,3}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹okfarima@gmail.com, ²ernasugesti@telkomuniversity.ac.id,

³bambangsetianugroho@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Analisis dan pengukuran redaman akibat lengkungan serat optik sangat jarang dilakukan. Penelitian ini difokuskan pada analisis daya yang hilang karena lengkungan serat optik dengan menggunakan metode geometris dan *Finite Difference Time Domain* (FDTD). Hasil analisis kedua metode itu dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hasilnya menunjukkan bahwa metode FDTD lebih mendekati hasil pengukuran.

Kata Kunci: redaman lengkungan, serat optik, geometris, FDTD

Abstract

It's quite rare to do an analysis on attenuation caused by optical fiber bending. In this paper, we focus on the power loss due to the optical fiber bending using geometrical and FDTD approaches. The results of both methods are then compared with the measurement results. The results show that the FDTD method is more valid than geometrical method.

Keywords: bending attenuation, optical fiber, geometric, FDTD

1. Pendahuluan

Dalam komunikasi menggunakan serat optik sebagai media transmisi, lengkungan serat optik karena instalasi kabel serat optik tidak dapat dihindari dan sering kali redaman yang timbul diabaikan. Hal ini karena secara teoritis, redaman yang ditimbulkan akibat lengkungan telah dicakup oleh faktor margin. Di sisi lain, serat optik yang justru sengaja dilengkungkan dapat dimanfaatkan untuk aplikasi tertentu, yaitu sensor berbasis lengkungan serat optik. Perkembangan aplikasinya seperti dilaporkan lebih dahulu oleh [9], kemudian sebagai sensor yang efisien dan ekonomis untuk *Oil Recovery* dan juga sebagai sensor biomedik. Dengan demikian, serat optik yang dilengkungkan memiliki potensi manfaat yang dapat dikembangkan di berbagai bidang.

Peningkatan kinerja sensor serat optik tersebut dapat dilakukan melalui modifikasi fisik sensor dan analisis pemodelan. Maksud istilah modifikasi fisik sensor adalah riset yang memodifikasi fisik serat optik, baik dari sisi bentuk maupun tujuan tertentu, dan dikaitkan dengan pengukuran [11, 22, 24, 25]. Adapun analisis pemodelan adalah pengembangan teori numerik terkait suatu fungsi tertentu yang hasilnya disimulasikan [11, 14].

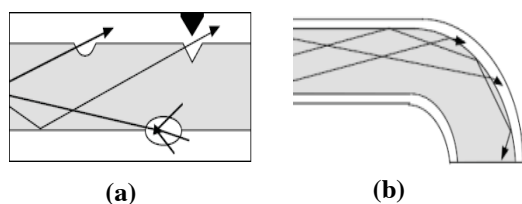
Pemodelan suatu fungsi menggunakan *Finite Difference Time Domain* (FDTD) pada serat optik semakin banyak digunakan [4, 6, 15, 17, 20, 23]. Riset ini mendalami proses daya hilang yang terjadi pada serat optik *step index multimode* yang dilengkungkan dengan menggunakan metode FDTD.

Hasil yang diperoleh diperbandingkan dengan perhitungan pendekatan geometris jumlah mode yang hilang.

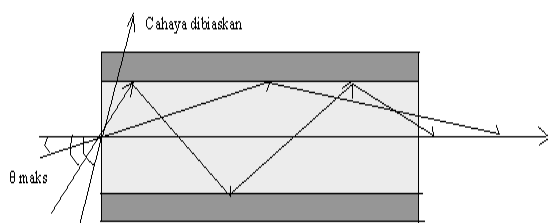
2. Redaman pada Serat Optik Melengkung

Lengkungan dapat terjadi akibat hal-hal yang tidak sengaja, sehingga mengakibatkan arah propagasi cahaya di dalam serat optik berbelok dari arah transmisi semula keluar dari *core* ke arah *cladding*. Jenis lengkungan dapat dikelompokkan ke dalam dua macam, yaitu *microbending* dan *macrobending*. *Microbending* seperti terlihat pada Gambar 1(a), merupakan rugi-rugi yang disebabkan oleh efek mikroskopik karena cacat pada batas *core-cladding*. Cacat tersebut diakibatkan oleh fabrikasi kabel yang kurang baik, kesalahan selama pengkabelan, suhu rendah dan ada bagian serat yang tertekan sesuatu. *Microbending* lebih sulit untuk dideteksi karena jari-jari kelengkungan mendekati jari-jari inti serat optik, sehingga mengakibatkan adanya kopling daya antar mode. Rugi *microbending* dikurangi dengan menggunakan jaket pelindung serat yang fleksibel.

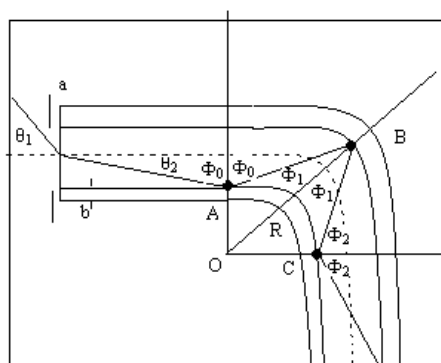
Macrobending seperti diperlihatkan pada Gambar 1(b), dapat diartikan sebagai rugi-rugi yang terjadi jika jari-jari kelengkungan jauh lebih besar dari jari-jari inti serat optik. Hal ini disebabkan oleh efek makroskopik seperti adanya belokan kecil pada serat itu sendiri, dan juga karena penanganan dan instalasi yang kurang baik saat penggelaran kabel di lapangan.



Gambar 1. (a) *Microbending*,
(b) *Macrobending* [3]



Gambar 2. *Numerical Aperture* [2]



a = diameter inti
b = diameter cladding
Rb = radius bending
 θ_1 = sudut penerimaan
 θ_2 = sudut bias
 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 = sudut pantul dalam serat

Gambar 3. Model Berkas Cahaya
pada Lengkungan Serat Optik

3. Parameter Berpengaruh

Terdapat beberapa parameter berpengaruh pada daya hilang di serat optik melengkung. Parameter tersebut yaitu *fiber strength*, *bend radius*, *Numerical Aperture* (NA), dan jumlah lilitan.

3.1. Fiber Strength

Tekanan yang cukup kuat pada serat optik sangat berpengaruh [13]. Biasanya tekanan-tekanan terjadi pada serat optik yang ditanam di dalam tanah. Semakin sering serat optik mengalami tekanan, semakin banyak cahaya yang merambat keluar dari inti serat optik.

3.2. Radius Lengkungan

Ukuran radius lengkungan pada serat optik sangat mempengaruhi daya yang hilang pada terjadi saat radius lengkungan semakin mengecil. Besarnya

daya sebanding dengan banyaknya jumlah modus yang masih menjalar pada serat. Untuk mengetahui jumlah modus yang masih menjalar pada serat dapat diperoleh dari persamaan (1), (2), dan (3) [2].

$$N_{eff} = N_{\infty} \left(1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{r} + \left(\frac{3}{2n_2kr} \right)^{2/3} \right] \right) \quad (1)$$

$$N_{\infty} = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \times (n_1 \times k \times a)^2 \times \Delta \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \times n_1^2} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

di mana N_{∞} adalah jumlah modus pada serat kondisi lurus, N_{eff} adalah jumlah modus yang masih menjalar pada serat setelah lengkungan, λ adalah panjang gelombang (μm), α adalah konstanta profil indeks, Δ adalah beda indeks bias relatif, n_1 adalah indeks bias inti, n_2 adalah indeks bias *cladding*, dan r adalah radius lengkungan (cm). Oleh karena itu, biasanya untuk mengatasi masalah *macrobending*, semua serat optik memiliki batas *minimum bend radius* (*critical radius*). Besarnya *critical radius* dapat dihitung menggunakan persamaan (5) [8].

$$r_{critical} = \frac{3n_1\lambda}{4\pi(NA)^3} \quad (5)$$

3.3. Numerical Aperture (NA)

Numerical Aperture (NA) tergantung dari jenis serat yang digunakan. Sudut penerimaan pada serat plastik lebih besar dibanding serat kaca. NA dapat diartikan sebagai parameter serat yang merepresentasikan besar sudut penerimaan maksimum di mana berkas cahaya masih dapat diterima dan merambat di dalam inti serat. Besar NA tergantung pada karakteristik indeks bias inti dan *cladding* seperti pada Gambar 2.

Semakin besar NA maka akan semakin banyak jumlah cahaya yang diterima serat[1]. Besar NA dapat dihitung menggunakan persamaan (6) [2].

$$NA = \sin \theta_{maks} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = n_1 \sqrt{2 \cdot \Delta} \quad (6)$$

3.4. Jumlah Lilitan

Dalam sambungan kabel serat optik, banyak lilitan serat optik di baki *enclosure* mempengaruhi besar daya hilang. Semakin banyak lilitan maka akan semakin besar pula cahaya di dalam serat optik yang berbelok dari arah transmisi semula dan kemudian akan hilang. Hal ini menimbulkan redaman yang cukup besar dalam transmisi menggunakan serat optik.

4. Pendekatan Geometris

Ada beberapa karakteristik fisik serat yang harus diperhatikan dalam lengkungannya yaitu berupa peninjauan berkas cahaya berdasarkan sudut penerimaan, sudut kritis, dan besar jari-jari kelengkungan seperti terlihat pada Gambar 3. Dari gambar tersebut tampak berkas cahaya yang menjalar pada serat yang mengalami lengkungannya dan dapat diturunkan. Ditinjau dari segitiga OBC:

$$\frac{\sin \varphi_1}{OC} = \frac{\sin(180 - \varphi_2)}{OB} \quad (7)$$

$$\frac{\sin \varphi_1}{OC} = \frac{\sin \varphi_2}{OB} \quad (8)$$

Kemudian, dapat diperoleh:

$$OC = R - \frac{a}{2} \quad \text{dan} \quad OB = R + \frac{a}{2}$$

sehingga,

$$\frac{\sin \varphi_1}{R - \frac{a}{2}} = \frac{\sin \varphi_2}{R + \frac{a}{2}} \rightarrow \sin \varphi_1 = \frac{R - \frac{a}{2}}{R + \frac{a}{2}} \times \sin \varphi_2 \quad (9)$$

Tinjau segitiga BOA, bahwa:

$$\frac{\sin \varphi_1}{OA} = \frac{\sin(180 - \varphi_0)}{OB} \quad (10)$$

Inti serat dianggap sebagai referensi nilai nol, sehingga:

$$-\frac{a}{2} \leq b \leq \frac{a}{2}$$

maka $OA = R + b$,

$$\begin{aligned} \frac{\sin \varphi_1}{R + b} &= \frac{\sin \varphi_0}{R + \frac{a}{2}} \\ \sin \varphi_1 &= \frac{R + b}{R + \frac{a}{2}} \times \sin \varphi_0 \end{aligned} \quad (11)$$

Dari persamaan (9), diperoleh:

$$\frac{R - \frac{a}{2}}{R + \frac{a}{2}} < 1 \rightarrow \sin \varphi_1 < \sin \varphi_2 \quad (12)$$

serta dari persamaan (11), diperoleh:

$$\frac{R + b}{R + \frac{a}{2}} \leq 1 \rightarrow \sin \varphi_1 \leq \sin \varphi_0$$

Dengan demikian, maka:

$$\sin \varphi_1 \leq \sin \varphi_0 \leq \sin \varphi_2 \quad (13)$$

Berdasarkan syarat terjadinya pemantulan sempurna, yaitu sudut datang lebih besar dari sudut kritis [3], maka:

$$\sin \varphi_1 > \frac{n_2}{n_1} \quad \text{dan} \quad \sin \varphi_1 > \frac{n_2}{n_1} \quad (14)$$

$$\sin \varphi_1 < \sin \varphi_2 \Leftrightarrow \sin \varphi_1 > \frac{n_2}{n_1}$$

Dari persamaan (11), didapatkan:

$$\Leftrightarrow \frac{R + b}{R + \frac{a}{2}} \sin \varphi_0 > \frac{n_2}{n_1}$$

Karena $b \geq -(a/2)$, maka:

$$\Leftrightarrow \sin \varphi_0 > \frac{n_2}{n_1} \times \frac{R + \frac{a}{2}}{R - \frac{a}{2}} \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan sudut datang pertama (θ_1):

$$n_0 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (16)$$

Karena $n_0 = 1$, maka:

$$\sin \theta_1 = n_1 \cos \varphi_0$$

Dengan:

$$\theta_2 = 90 - \varphi_0$$

$$\Leftrightarrow \sin \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0}$$

$$\Leftrightarrow \sin \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \times \frac{R + \frac{a}{2}}{R - \frac{a}{2}} \right)^2}$$

$$\Leftrightarrow \sin \theta_1 < \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \left(\frac{R + \frac{a}{2}}{R - \frac{a}{2}} \right)^2}$$

sehingga dapat diperoleh $R > R_c$, yaitu:

$$\Leftrightarrow R_c = \frac{a}{2} \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1} + n_2}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta_1} - n_2} \right) \quad (17)$$

di mana R_c adalah radius kritis (cm).

5. Penurunan Daya Hilang Akibat Lengkungan dengan Metode FDTD

Untuk penurunan daya hilang akibat lengkungan secara matematis digunakan penurunan rumus daya dengan metode FDTD yang divisualisasikan dalam bahasa pemrograman MATLAB.

5.1. Penentuan Medan Listrik dan Medan Magnet

Metode yang digunakan yaitu FDTD TE dua dimensi. Dalam metode ini sumbu- z memiliki unsur medan magnet sedangkan sumbu- x dan y terdapat unsur medan listrik. Yang perlu lebih diperhatikan dalam metode ini adalah peletakan medan listrik di sekeliling sel dan medan magnet diletakkan pada pusat sel.

Dalam penurunannya, medan listrik dapat diperoleh dengan persamaan (18), (19), dan (20) [16]:

$$E_x^n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma \Delta t} E_x^{n-1} - \frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} J_z^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \frac{\partial H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\partial y} \quad (18)$$

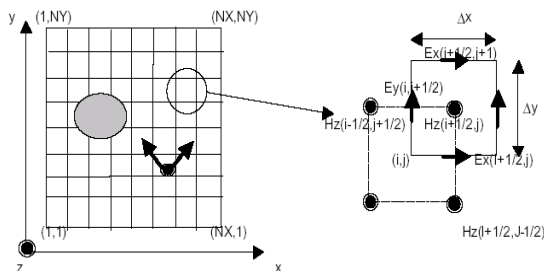
$$E_y^n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma \Delta t} E_y^{n-1} - \frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} J_z^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\varepsilon + \sigma \Delta t} \frac{\partial H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\partial x} \quad (19)$$

$$J_z^{n-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} I \quad (20)$$

dengan:

$$I = \sin(2\pi ft)$$

Peletakan medan elektromagnetik dan medan listrik dapat dilihat dalam Gambar 4.



Gambar 4. Peletakan Medan Elektromagnetik di Atas Satuan Sel untuk Mode TE [16]

Terlihat bahwa E_x dan E_y terletak pada koordinat $\{(i+\frac{1}{2}, j); (i, j+\frac{1}{2})\}$, maka dapat diperoleh hasil turunannya pada persamaan (21) dan (22) [16]:

$$\left. \frac{\partial H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\partial y} \right|_{(i+\frac{1}{2}, j)} = \frac{1}{\Delta y} \{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2})\} \quad (21)$$

$$\left. \frac{\partial H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\partial x} \right|_{(i, j+\frac{1}{2})} = \frac{1}{\Delta x} \{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})\} \quad (22)$$

Kemudian persamaan (21) dan (22) disubstitusikan ke dalam persamaan (18) dan (19), sehingga diperoleh hasil persamaan (23) dan (24) [16]:

$$E_x^n(i+\frac{1}{2}, j) = \frac{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j)}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j) + \sigma(i+\frac{1}{2}, j)\Delta t} E_x^{n-1}(i+\frac{1}{2}, j) - \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j) + \sigma(i+\frac{1}{2}, j)\Delta t} J_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j) + \sigma(i+\frac{1}{2}, j)\Delta t} \frac{1}{\Delta y} \{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2})\} \quad (23)$$

$$E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) = \frac{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2})}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2}) + \sigma(i, j+\frac{1}{2})\Delta t} E_y^{n-1}(i, j+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2}) + \sigma(i, j+\frac{1}{2})\Delta t} J_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2}) + \sigma(i, j+\frac{1}{2})\Delta t} \frac{1}{\Delta x} \{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})\} \quad (24)$$

Untuk persamaan medan magnet diperoleh dari persamaan awal:

$$H^{n+\frac{1}{2}} = H^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times E^n$$

yang dapat diturunkan menjadi persamaan (25) [16]:

$$H_z^{n+\frac{1}{2}} = H_z^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \left(\frac{\partial E_y^n}{\partial x} - \frac{\partial E_x^n}{\partial y} \right) \quad (25)$$

H_z diletakkan pada koordinat $(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})$ maka untuk persamaan (25) juga diletakkan pada koordinat $(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})$, sehingga diperoleh persamaan (26) dan (27) [16]:

$$\left. \frac{\partial E_y^n}{\partial x} \right|_{(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) \right\} \quad (26)$$

$$\left. \frac{\partial E_x^n}{\partial y} \right|_{(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ E_x^n(i+1, j+\frac{1}{2}) - E_x^n(i+1, j) \right\} \quad (27)$$

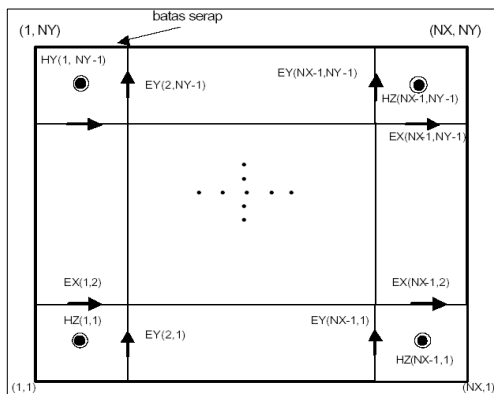
Kemudian persamaan (26) dan (27) disubstitusikan ke dalam persamaan (24) dan diperoleh persamaan FDTD untuk mencari medan magnet yaitu pada persamaan (28) [16]:

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})} \left[\frac{1}{\Delta x} \left\{ E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) \right\} - \frac{1}{\Delta y} \left\{ E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j) \right\} \right] \quad (28)$$

Di dalam program, medan elektromagnet yang diperoleh diubah menjadi bentuk matriks seperti di persamaan (29) [16]:

$$\begin{aligned} E_x(i+\frac{1}{2}, j) &\Rightarrow EX(I, J) \\ E_y(i, j+\frac{1}{2}) &\Rightarrow EY(I, J) \\ H_z(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) &\Rightarrow HZ(I, J) \end{aligned} \quad (29)$$

Hasil persamaan tersebut disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peletakan Medan Elektromagnet di Dekat Batas Serap [16]

5.2. Penentuan Syarat Batas dengan ABC MUR

Penurunan secara matematis syarat batas MUR metode FDTD diperoleh melalui pencacahan diferensial terhadap waktu menggunakan algoritma Yee [16]:

$$\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{1}{v} \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

$$\left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{t=(n-\frac{1}{2})\Delta t} = \frac{E^n - E^{n-1}}{\Delta t} = v \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial x} \quad (31)$$

$$\frac{E^n(x=\frac{\Delta x}{2}) - E^{n-1}(x=\frac{\Delta x}{2})}{\Delta t} = v \frac{E^{n-\frac{1}{2}}(2) - E^{n-\frac{1}{2}}(1)}{\Delta x} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} E^n(x=\frac{\Delta x}{2}) &= \frac{E^n(1) + E^n(2)}{2} \\ E^{n-\frac{1}{2}}(1) &= \frac{E^n(1) + E^{n-1}(1)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

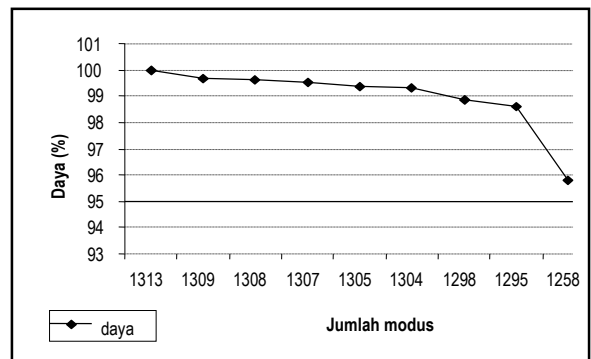
$$E^n(1) = E^{n-1}(2) + \frac{v\Delta t - \Delta x}{v\Delta t + \Delta x} \left\{ E^n(2) - E^{n-1}(1) \right\} \quad (34)$$

$$E^n(1, J, K) = E^{n-1}(2, J, K) + \frac{v\Delta t - \Delta x}{v\Delta t + \Delta x} \left\{ E^n(2, J, K) - E^{n-1}(1, J, K) \right\} \quad (35)$$

6. Analisis

6.1. Pendekatan Geometris

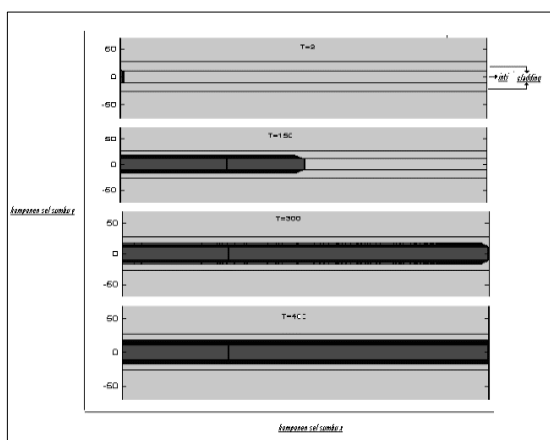
Dengan mensubstitusikan parameter di Tabel 1 pada persamaan (1) sampai dengan (4), maka dapat diperoleh jumlah modus yang hilang seperti tampak di Gambar 6.



Gambar 6. Korelasi Jumlah Modus dan Daya pada Serat Melengkung dengan Radius Lengkungan (1,75 - 0,125) cm

Tabel 1. Parameter Serat Optik yang Digunakan

n_1 : 1,46	λ : 632,8 nm	α : ∞	NA: 0,205885
n_2 : 1,45	Δ : 0,01	a : 25 μm	



Gambar 7. Perambatan Daya Saat Belum Terjadi Lengkungan

Modus yang hilang berkorelasi positif dengan daya yang hilang, jika kondisi radius lengkungan diperkecil dari (1,75 - 0,125) cm.

Secara teoritis telah pula dihitung ukuran lengkungan kritisnya menggunakan persamaan (17), dengan hasil $R_c = 0,72735$ cm. Nilai radius kritis tersebut hanya mempertimbangkan karakteristik fisik serat yang meliputi sudut penerimaan, indeks bias inti dan *cladding* tanpa memperhatikan panjang gelombang operasi pada serat.

6.2. Pendekatan FDTD

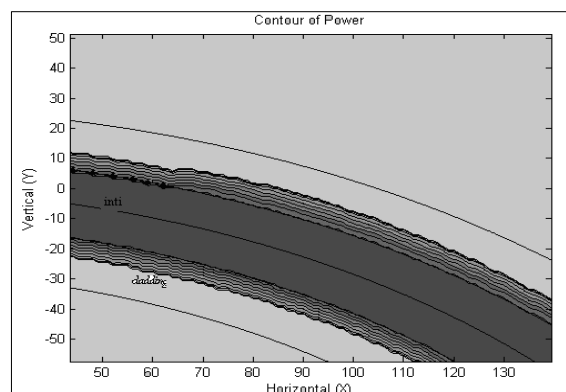
Pada prinsipnya, metode FDTD dipengaruhi oleh fungsi waktu dan pergeseran. Hasil perambatan gelombang yang diperoleh dengan metode FDTD bertahap sesuai waktunya.

Gambar 7 menunjukkan perambatan gelombang dalam serat tanpa lengkungan dengan menggunakan iterasi yang berbeda yaitu pada iterasi 2, 150, 300, dan 400. Konsentrasi tertinggi terlihat pada inti yang berwarna ungu terang dan terdapat gradasi warna ke arah *cladding* akibat pengaruh daya dari inti, namun tidak terlihat pengaruh perbedaan konsentrasi yang cukup besar pada daerah perbatasan inti dan *cladding*. Artinya, pada serat tanpa lengkungan tidak ada daya hilang ke arah *cladding*.

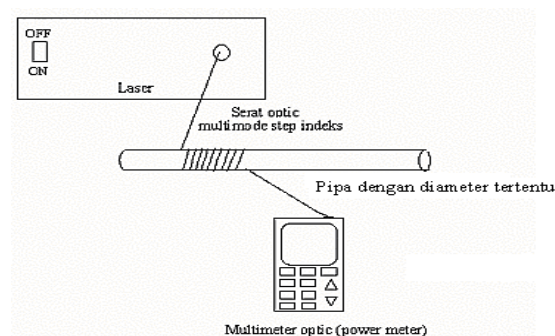
Perhitungan daya hilang akibat *lengkungan* dapat menggunakan persamaan (36), yaitu:

$$\text{daya hilang} = \frac{\bar{P}(0) - P_{clad}}{\bar{P}(0)} \times 100\% \quad (36)$$

Dari penurunan daya, diperoleh daya hilang rata-rata sebesar 31,85% (Tabel 2). Daya hilang yang terjadi hanya diakibatkan oleh pengaruh parameter radius lengkungan tanpa dipengaruhi redaman karakteristik serat.



Gambar 8. Keluaran Aplikasi pada Serat yang Mengalami Lengkungan dengan Radius 0,125 cm pada Iterasi Ke-400



Gambar 9. Setting Pengukuran Daya Hilang pada Serat Optik

Tabel 2. Perolehan Daya Menggunakan FDTD

T	$P(0)$	P_r	% daya hilang
300	$2,1061 \times 10^{-36}$	$1,6097 \times 10^{-36}$	23,57
310	$1,5975 \times 10^{-35}$	$9,9529 \times 10^{-36}$	37,70
380	$1,5933 \times 10^{-35}$	$1,1724 \times 10^{-35}$	26,42
400	$4,6911 \times 10^{-36}$	$1,0116 \times 10^{-36}$	78,44
420	$1,7419 \times 10^{-35}$	$1,2881 \times 10^{-35}$	26,05
530	$4,0992 \times 10^{-35}$	$3,511 \times 10^{-35}$	14,20
550	$9,5115 \times 10^{-36}$	$4,2269 \times 10^{-36}$	55,14
630	$9,8461 \times 10^{-35}$	$6,6255 \times 10^{-35}$	32,71
680	$3,2981 \times 10^{-36}$	$2,4992 \times 10^{-36}$	24,22
% daya hilang rata-rata			31,85

Untuk aplikasi serat akibat *lengkungan* diambil salah satu hasil pada radius *lengkungan* 0,125 cm yaitu pada iterasi ke-400 seperti terlihat pada Gambar 8.

Dari gambar tersebut dan dari hasil yang diperoleh saat serat mulai mengalami lengkungan terdapat daya dengan konsentrasi lebih besar daripada sebelumnya di kawasan perbatasan inti dan *cladding* yaitu $2,04 \times 10^{-101}$ W menjadi $1,95 \times 10^{-93}$ W. Dari hasil tersebut terlihat bahwa lengkungan mengakibatkan adanya perambatan cahaya yang keluar dari transmisi semula ke arah *cladding*.

6.3. Validasi Hasil

Untuk mengetahui tingkat kebenaran hasil pendekatan dua metode tersebut, maka dibandingkan dengan hasil pengukuran yang nyata. *Setting* pengukurannya tampak di Gambar 9.

Tabel 3. Daya Hilang Hasil Pengukuran (%)

Σ lilitan	Diameter Lengkungan (cm)							
	3,5	2,5	2,1	1,8	1,5	0,9	0,7	0,25
1	2,61	2,21	1,78	4,04	2,23	40,3	41,1	47,39
2	3,15	3,46	2,30	4,74	4,02	40,81	42,54	48,29
3	3,13	3,68	2,77	4,70	4,83	41,16	42,22	48,94
4	3,22	3,68	3,08	5,46	5,57	41,38	42,41	49,34
5	3,51	4,10	3,39	6,29	5,98	41,59	42,45	50,57
6	3,91	4,06	4,15	6,14	5,51	41,82	42,93	50,09
7	4,15	4,65	4,94	6,82	5,44	42,03	43,09	51,07
8	4,68	4,96	5,09	6,82	6,48	42,3	43,73	51,47
9	4,59	5,09	5,29	7,08	6,01	42,76	44,23	52,68
10	5,05	5,46	5,49	7,36	6,33	43,35	44,51	53,17

Serat optik yang digunakan tipe *multimode*, *laser multimode* pada panjang gelombang 632,8 nm, pipa dengan berbagai ukuran diameter dan sebuah *power meter* optik. Hasil pengukuran tampak di Tabel 3.

Secara umum dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak lilitan dan semakin kecil radius lengkungan menyebabkan daya hilang semakin tinggi. Dan daya hilang terbesar terjadi di lengkungan paling kecil.

7. Kesimpulan

Dari berbagai analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Hasil analisis menggunakan pendekatan geometris melenceng jauh dari hasil pengukuran. Sehingga dapat dikatakan model pendekatan ini kurang valid.
- Hasil analisis pendekatan FDTD memberikan hasil yang lebih valid karena hasil iterasinya mendekati hasil pengukuran, meski pun hasil iterasi yang dilakukan tidak selalu stabil seperti pada pengukuran. Mungkin terdapat korelasi posisi daerah *sampling* dengan perulangan iterasinya. Dan pada penurunannya mengabaikan faktor redaman serat optik. Hal ini dapat diselidiki lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

Daftar Pustaka

- [1] Ando Electric Co., Ltd., “AQ 2150 Optical Multimeter Instruction Manual”, Japan, 1995.
- [2] Anggraini, Y., “Evaluasi Hasil Pengukuran Karakteristik Kabel Serat Optik Single Mode G.652 series dan G.655 series”, STT Telkom, Bandung, 2005.
- [3] Fiber Option, Ltd., “Learning about Option in Fiber”, UK, 1994.
- [4] Guoqiang Shen, Yinchao Chen, dan R. Mittra, “A Nonuniform FDTD Technique for Efficient Analysis of Propagation Characteristics of Optical Fiber Waveguides”, IEEE Transactions

on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, issue 3, pp. 345 – 349, 1999.

- [5] Guryiang Shen, Yinchao Chen, dan Raj Mittra, “An Efficient Non-Uniform FDTD Method for Analysis of Propagation Characteristics of Optical Fiber Waveguides”, IEEE, pp. 1488 - 1491, 1998.
- [6] Joseph, Rose M., dan Allen Taflove, “FDTD Maxwell’s Equations Models for Nonlinear Electrodynamics and Optics”, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 45, no. 3, Maret 1997.
- [7] Jun Wang, Mingyu Li, dan Jian-Jun He, “Analysis of Deep Etched Trench in Planar Optical Waveguide by FDTD Method, Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference”, Shanghai, Oktober 17-19, 2007.
- [8] Keiser, G., “Optical Fiber Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2000.
- [9] Lagakos, Nicholas, J. H. Cole, dan J. A. Bucaro, “Microbend Fiber Optic Sensor”, Applied Optics, vol. 26, no. 11, pp. 2171-2180, Juni 1, 1987.
- [10] Nady, M., Mohamed B. El Mashade, dan Ahmed M. Attiya, “Analysis of Ultra-Short Pulse Propagation in a Nonlinear Optical Fiber by using BOR-FDTD Technique”, 25th National Radio Science Conference (NRSC 2008), Egypt, 2008.
- [11] Ortega-Quijano, N., G. Lamadrid-Perojo, M.A. Rodriguez-Colmenares, F. Fanjul-Velez, I. Salas-Garcia, S. Camara, dan J.L. Arce-Diego, “Bending Loss Characterization under Temperature Variations of ITU-T G.657 Optical Fiber Standard for its Implementation in the Last Mile”, Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1 – 4, 2011.
- [12] P. Wang, Y. Semenova, Q. Wu, dan G. Farrell, “A Bend Loss Based Single Mode Fiber Micro-Displacement Sensor”, Microwave and Optical Technology Letters, vol. 52, no. 10, pp. 2231-2235, Oktober 2010.
- [13] Powers, J., “An Introduction to Fiber Optic System”, a Times Higher Education Group, 1993 dan 1997.
- [14] Schermer, R. T. dan J. H. Cole, “Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 43, issue 10, pp. 899 – 909, 2007.
- [15] Shyh-Lin Tsao dan Wen-Ming Cheng, “Realization of an Online Fiber Optic Bending

- Loss Measurement System*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, issue 1, pp. 72-79, 2004.
- [16] Sterling, D.J., “*Technician’s Guide to Fiber Optic*”, Delmar Publisher Inc., Albany, New York, 1993.
- [17] Sullivan, Dennis, Jeffrey Young, dan Mark Kuzyk, “FDTD Simulation of Nonlinear Optical PBG Fibers”, Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 698 – 701, 2002.
- [18] Tetuko, J., “*Analisa Gelombang Listrik Hantaran dengan Menggunakan Metode Finite Difference Time Domain*”, ITB, Bandung, 1998.
- [19] Tomeh ,Mahmoud Munes, Sebastien Goasguen, dan Samir M. El-Ghazaly, “*Time-Domain Optical Response of an Electrooptic Modulator using FDTD*”, IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, vol. 49, no. 12, Desember 2001.
- [20] Trivunac-Vukovic, NaWa dan Bratislav Miovanovi, “*FDTD Simulation Of The Soliton Propagation In The Optical Fiber, Microwaves*”, 13th International Conference on Radar and Wireless Communications, vol. 2, pp. 435 – 438, 2000.
- [21] Vu Ngoc Hai, Young-Ho Kim, dan In-Kag Hwang, “*3D-FDTD Algorithm with Anisotropic Resolutions for Analyses of Photonic Crystal Fibers, Lasers and Electro-Optics*”, Seoul, IEEE, Agustus 26-31, 2007.
- [22] Wei Hong, Dongning Wang, Dingshan Gao, Yuhua Li, Changrui Liao, Ying Wang, Shujing Liu, Xia Fang, dan Lina Ma, “*Investigation on Transmission Properties of a Single Mode Fiber with a Cross-Sectional Micro-Channel using Time-Domain Finite Difference (FDTD) Method*”, Opto Electronics and Communications Conference, Hongkong, 2009.
- [23] Yiping Wang, David Richardson, Gilberto Brambilla, Xian Feng, Marco Petrovich, Ming Ding, dan Zhangqi Song, “*Bend Sensors Based on Periodically Tapered Soft Glass Fibers*”, Proc. SPIE 7753, 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Ottawa, Canada, Mei 15, 2011.
- [24] Yongxing Jin, Chi Chiu Chan, Xinyong Dong, dan Y.F Zhang, “*Bending Sensor with Tilted Fiber Bragg Grating Interacting with Multi Mode Fiber*”, Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), Shanghai, China, pp. 1 - 6, November 2-6, 2009.
- [25] Youichi Akasaka dan Motoyoshi Sekiya, “*FDTD calculation of Polarization Dependent Splice Loss in Optical Fiber*”, Photonics Conference (PHO), Arlington, pp. 236 – 237, Oktober 9-13, 2011.