
KARAKTERISASI RUGI LINGKUNGAN SERAT OPTIK DENGAN *OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETER* UNTUK PENGGUNAANNYA SEBAGAI SENSOR PERGESERAN TANAH

Tomi Budi Waluyo, Dwi Bayuwati dan Bambang Widiyatmoko

Pusat Penelitian Fisika-LIPI
Kawasan Puspiptek Serpong 15314 Tangerang
Email: thom002@lipi.go.id

ABSTRAK

Pada makalah ini diuraikan karakterisasi rugi lengkungan serat optik ragam tunggal yang akan digunakan sebagai sensor pergeseran tanah dengan menggunakan *Optical Time Domain Reflectometer* (OTDR). Karakterisasi dilakukan untuk dua jenis serat, yakni produk Fujikura yang biasa digunakan untuk sistem komunikasi dan produk Newport yang dirancang untuk sistem sensor. Masing-masing serat tersebut panjangnya lebih dari seratus meter untuk memungkinkan pengukuran dengan OTDR. Alasannya adalah agar daya optis yang terukur adalah dari cahaya yang merambat di dalam inti serat, tidak terpengaruh oleh cahaya yang merambat di selubung serat sebagaimana bisa terjadi bila serat optiknya pendek. Karakterisasi ini dilakukan untuk merancang konfigurasi (bentuk dan ukuran) sensor bila serat tersebut akan digunakan sebagai *Fiber Extensometer* untuk sensor pergeseran tanah. Hasil karakterisasi berupa grafik rugi lengkungan sebagai fungsi dari diameter lengkungan yang dialami serat. Terlihat hubungan eksponensial antara rugi dengan diameter lengkungan sebagaimana dinyatakan oleh persamaan teoritisnya. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa serat optik jenis “*telecommunication grade*” Fujikura dapat digunakan sebagai sensor pergeseran dengan diameter lengkungan antara 1.4 – 1.6 cm dengan sensitivitas (perubahan rugi akibat perubahan diameter lengkungan) sebesar 0.2 dB/mm nm, sedangkan serat optik jenis “*sensor grade*” Newport dapat digunakan sebagai sensor dengan diameter lengkungan antara 0.65 – 0.7 cm dengan sensitivitas 0.08 dB/mm, untuk cahaya dengan panjang-gelombang 1310.

Kata kunci: rugi lengkungan, serat optik ragam tunggal, pengukuran OTDR, sensor serat optik

ABSTRACT

We describe in this paper the bending loss characterization of single mode optical fibers that will be used as land displacement sensor utilizing an Optical Time Domain Reflectometer (OTDR). Two types of optical fiber are characterized, namely a telecommunication grade fiber from Fujikura and a sensor grade fiber from Newport. The length of both fibers is more than a hundred meter in order OTDR measurement can be performed. The reason is to make certain that the measured optical power comes from light propagating inside the core of the fiber, not affected by that propagating along the cladding as usually happened in short fibers. The aim of this characterization is to obtain the sensor configuration (form and size) if the fiber will be used as Fiber Extensometer for land displacement sensor. The result of this characterization is curves of bending loss as a function of fiber bend diameter. It is shown that the curve is exponential as expressed by its theoretical expression. The

results of our characterization are as follows: the Fujikura telecommunication grade fiber can be used as displacement sensor with bend radius between 1.4 – 1.6 cm and sensitivity (the change of bending loss caused by the change of bend diameter) of 0.2 dB/mm, while the Newport sensor grade fiber can be used as sensor with bend radius between 0.65 – 0.7 cm with 0.08 dB/mm sensitivity, for light with a wavelength of 1310 nm.

Keywords: bending loss, single mode optical fiber, OTDR measurements, optical fiber sensor

I. PENDAHULUAN

Cahaya yang merambat didalam kabel serat optik dapat keluar dari serat ketika kabel tersebut berbelok/melengkung dengan jari-jari lengkungan cukup kecil (misalnya lebih kecil daripada sepuluh kali diameter kabel). Akibatnya, daya optis yang keluar dari ujung serat, yang diterima oleh detektor cahaya, akan berkurang akibat adanya kerugian (*loss*) ini yang dikenal sebagai *macrobending loss* (kerugian akibat lengkungan makro). Kerugian pun dapat terjadi bila pada serat optik terdapat lengkungan-lengkungan mikroskopis, baik akibat cacat pada proses pembuatannya ataupun disengaja dengan menjepitkan serat tersebut pada suatu struktur bergerigi halus. Kerugian semacam ini dinamakan *microbending loss* (kerugian akibat lengkungan mikro). Pada sistem komunikasi serat optik, kedua kerugian ini sedapat mungkin dihindari atau diminimisasi. Namun pada sistem sensor serat optik, fenomena ini justru dimanfaatkan. Pada tulisan ini diuraikan pengukuran rugi lengkungan serat optik ragam tunggal yang akan digunakan sebagai sensor pergeseran tanah. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*) untuk dua jenis serat, yakni serat optik “*telecommunication grade*” dan serat optik “*sensor grade*”. Masing-masing serat tersebut panjangnya lebih dari seratus meter untuk memungkinkan pengukuran dengan OTDR. Selain itu, juga dilakukan pengukuran rugi lengkungan untuk serat optik “*telecommunication grade*” yang pendek (panjangnya dua meter) dengan menggunakan *Power Meter* (pengukur daya optis). Pengukuran rugi lengkungan ini dilakukan untuk merancang konfigurasi (bentuk dan ukuran) sensor bila serat optik tersebut akan digunakan sebagai *Fiber Extensometer* untuk sensor pergeseran tanah nantinya.

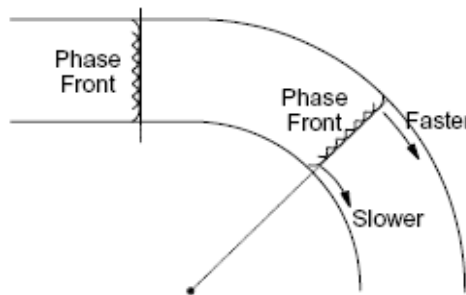
II. TEORI

Gelombang cahaya yang merambat didalam serat optik ragam tunggal (tepatnya: didalam inti/*core* serat) akan terdistorsi bila seratnya dilengkungkan, lihat Gambar 1. Kecepatan cahaya yang merambat pada bagian dalam lengkungan harus lebih lambat daripada yang bagian luarnya untuk

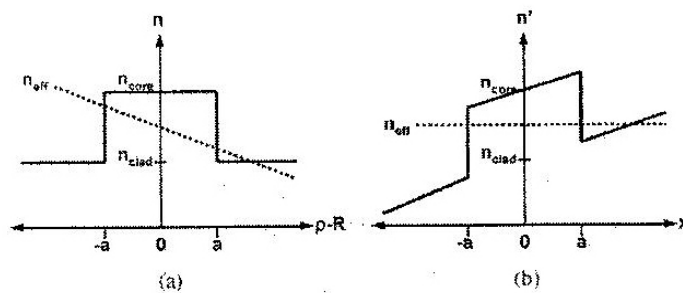
mempertahankan bentuk muka gelombang. Ini berarti nilai indeks bias inti serat pada bagian tersebut lebih kecil bila dibandingkan saat serat dalam keadaan lurus. Semakin kecil jari-jari lengkungan maka nilainya semakin mendekati nilai indeks bias selubung/*cladding* sehingga makin banyak cahaya yang keluar dari inti serat [1], atau semakin besar ruginya. Jadi, profil indeks bias serat saat dilengkungkan berbeda dengan saat serat dalam keadaan lurus (lihat Gambar 2), dan nilainya dapat dinyatakan oleh persamaan [2]:

$$n_{material} = n \left[1 - \frac{n^2 x}{2R} (P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})) \right] \dots\dots\dots (1)$$

dengan R : jari-jari lengkungan, x : posisi pada arah lengkungan, n : nilai indeks bias serat pada saat lurus, ν : nilai perbandingan Poisson bahan serat, P_{11} dan P_{12} : koefisien photoelastis serat,



Gambar 1. Perambatan cahaya pada serat optik yang dilengkungkan [1].



Gambar 2. Profil indeks bias dalam keadaan (a) lurus dan (b) dilengkungkan [2].

Bila $P(0)$ adalah daya optis sebelum serat dilengkungkan maka besarnya daya yang keluar dari serat optik yang dilengkungkan sepanjang L adalah [3]:

$$P(L) = P(0)e^{-\gamma L} \dots\dots\dots (2)$$

dengan γ menyatakan koefisien rugi untuk serat optik ragam tunggal jenis *step index* yang nilainya dapat didekati oleh persamaan berikut [3,4]:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2\rho} \sqrt{\frac{\rho}{R_C}} \frac{U^2}{V^2 W^{3/2} K_1(W)^2} \exp\left\{-\frac{4}{3} \frac{R_C}{\rho} \frac{W^3 \Delta}{V^2}\right\} \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

ρ : jari-jari inti serat

R_C : jari-jari lengkungan serat

Δ : parameter beda indeks bias inti dan selubung serat

$K_1(W)$: fungsi Bessel orde pertama untuk nilai W ; yang mana W , U , dan V merupakan parameter-parameter serat optik ragam tunggal yang dinyatakan oleh persamaan berikut [3,4]:

$$U = \rho [k^2 n_{co}^2 - \beta^2]^{1/2}$$

$$V = k \rho n_{co} \sqrt{2\Delta}$$

$$W = \sqrt{V^2 - U^2} = \rho [\beta^2 - k^2 n_{cl}^2]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

dengan $k=2\pi/\lambda$, λ : panjang-gelombang cahaya, β : konstanta perambatan cahaya, n_{co} : indeks bias inti serat, n_{cl} : indeks bias selubung serat. Persamaan (3) dapat disederhanakan penulisannya menjadi:

$$\gamma = C_1 e^{-C_2 R_C} \dots\dots\dots (5)$$

dengan C_1 dan C_2 merupakan konstanta yang terkait dengan parameter-parameter serat optik dan nilainya merupakan fungsi panjang-gelombang (besarnya rugi akibat lengkungan untuk cahaya pada panjang-gelombang 1500 nm lebih besar daripada yang pada panjang-gelombang 1300 nm (berdasarkan persamaan-persamaan di atas)).

Umumnya besarnya nilai rugi dinyatakan dalam satuan desibel (dB), maka dalam hal ini :

$$\text{Rugi} = -10 \log P(L)/P(0) = -10 \log e^{-\gamma L} = 4.34 \gamma L \text{ [dB]} \dots\dots\dots(6)$$

Sebagai ilustrasi, pada Tabel 1 diperlihatkan hasil perhitungan MS Excel menggunakan persamaan-persamaan tadi untuk menghitung besarnya rugi lengkungan serat optik ragam tunggal dengan parameter-parameter: $\Delta = 0,003$, $n_{co} = 1,47$, $\rho = 3.63 \mu\text{m}$, $V = 2$, $U = 1.528$, dan $K_1(W) = 0.378$ yang dililitkan (a) 100 kali lilitan dengan $R_C = 10 \text{ cm}$ dan (b) 1 kali lilitan dengan $R_C = 1 \text{ cm}$, untuk cahaya dengan panjang-gelombang $\lambda = 1300 \text{ nm}$.

Tabel 1. Penghitungan rugi lengkungan.

	(a)	(b)
panjang-gelombang λ (m)	1,30E-06	1,30E-06
jari-jari inti serat ρ (m)	3,63E-06	3,63E-06
indeks bias inti serat n_{co}	1,47	1,47
parameter beda indeks bias Δ	0,003	0,003
parameter U	1,528	1,528
parameter V	2	2
parameter W	1,29	1,29
nilai fungsi Bessel $K_1(W)$	0,378	0,378
jari-jari lengkungan R_C (m)	1,00E-01	1,00E-02
banyaknya lilitan N	100	1
panjang serat yang dililitkan $L = N \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_C$ (m)	6,28E+01	6,28E-02
konstanta C1	4,10E+03	1,30E+04
konstanta C2	-5,91E+01	-5,91E+00
γL	5,34E-21	2,20E+00
Loss = 4.34γL (dB)	2,32E-20	9,55E+00

Dari contoh perhitungan di atas terlihat bahwa bila serat optik tersebut digulung 100 kali dengan jari-jari lilitan 10 cm maka ruginya dapat diabaikan (orde pangkat minus dua puluh desibel). Namun, bila dililitkan sekali saja dengan jari-jari 1 cm maka rugi akibat lengkungannya adalah hampir 10 dB.

Pada penggunaan serat optik untuk sistem komunikasi, rugi-rugi akibat lengkungan ini harus dihindari atau diminimisasi. Namun untuk sistem sensor serat optik, rugi-rugi ini justru dimanfaatkan, yakni dengan mengukur besarnya rugi yang terjadi akibat besaran fisis yang dialami oleh serat maka nilai besaran fisis tersebut dapat ditentukan. Berdasarkan prinsip ini akan dirancang suatu *Fiber Extensometer* yakni sensor serat optik untuk mendeteksi dan mengukur pergeseran tanah

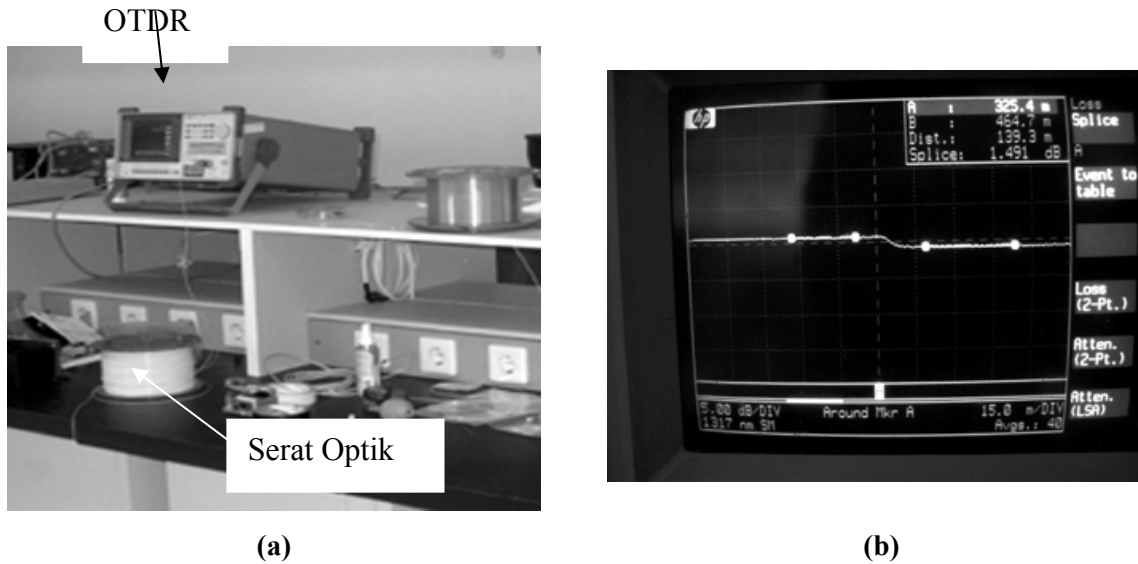
III. PERCOBAAN

Serat optik yang dikarakterisasi rugi lengkungannya pada percobaan ini adalah serat optik jenis “*telecommunication grade*” dari Fujikura serta serat optik jenis “*sensor grade*” dari Newport. Tidak ada data teknis untuk serat optik Fujikura ini namun dapat diketahui bahwa ukuran fisiknya adalah diameter inti: 8 – 10 μm (diameter tipikal serat optik ragam tunggal untuk beroperasi pada panjang-gelombang 1300 -1600 nm), diameter selubung 125 μm (ukuran standard untuk selubung), dan lapisan pelindung plastik berdiameter 0.9 mm. Adapun untuk serat optik Newport diameter inti sekitar 6 μm , diameter selubung 125 μm , dan diameter bahan polimer lapisan pelindungnya sekitar 0,25 mm [5]. Masing-masing serat yang akan diukur panjangnya lebih dari seratus meter agar memungkinkan pengukuran rugi lengkungan dengan menggunakan OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*).

OTDR adalah suatu instrumen optis yang umum digunakan untuk analisis jaringan serat optik. OTDR akan mengirimkan secara periodik pulsa cahaya ke dalam serat dan menganalisis cahaya yang dipantulkan oleh serat ketika pulsa cahaya tersebut merambat sepanjang serat. OTDR menampilkan grafik daya cahaya yang dipantulkan tersebut sebagai fungsi dari panjang serat. Bila ada lengkungan pada serat yang menyebabkan rugi (kehilangan daya) cahaya maka pada grafik yang ditampilkan oleh OTDR terlihat ada patahan/*discontinuity* dan OTDR secara otomatis akan menghitung besarnya rugi akibat lengkungan tersebut. OTDR yang digunakan pada percobaan ini adalah tipe HP8146A yang beroperasi pada panjang-gelombang 1310 nm.

Foto susunan percobaan diperlihatkan pada Gambar 3(a) dan foto tampilan grafik OTDR yang menyatakan rugi lengkungan (dinyatakan seolah rugi sambungan/*splice loss*) diperlihatkan pada Gambar 3(b). Untuk melengkungkan serat optik maka serat tersebut dililitkan pada silinder *acrylic*

dengan diameter bervariasi. Sebagai contoh pada Gambar 4 diperlihatkan foto salah satu silinder tersebut dengan variasi diameter: 2.0, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0 dan 0.8 cm.



Gambar 3. Susunan percobaan pengukuran rugi lengkungan dengan menggunakan OTDR (kiri) serta contoh tampilan OTDR yang menyatakan besarnya rugi lengkungan (kanan).



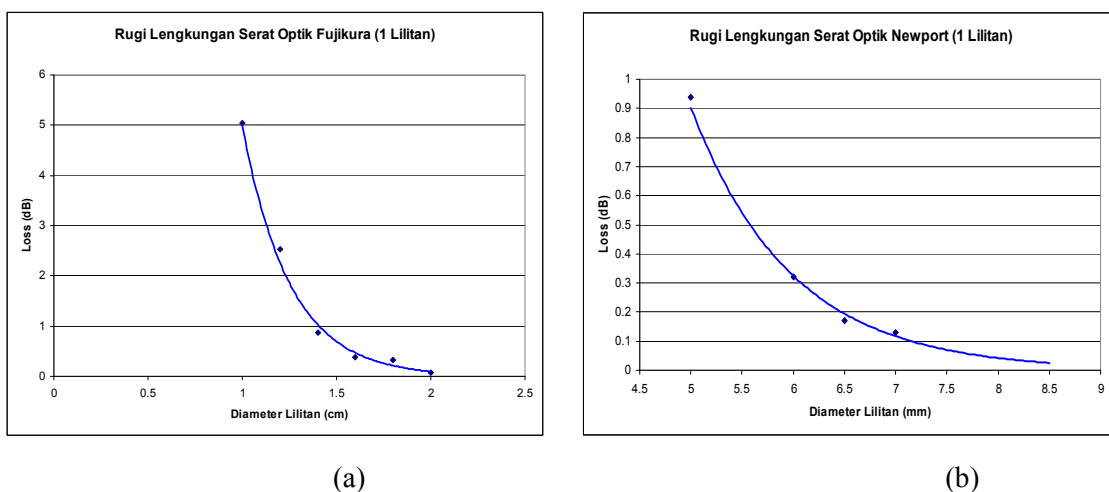
Gambar 4. Silinder *acrylic* dengan diameter bervariasi tempat serat optik dililitkan.

Karakterisasi rugi lengkungan serat optik ini dilakukan untuk mengetahui konfigurasi (bentuk dan ukuran) sensor bila serat tersebut akan digunakan sebagai *extensometer* untuk sensor pergeseran

tanah berdasarkan prinsip *macrobending* atau *microbending* ataupun gabungan keduanya sesuai kondisi di lapangan nantinya.

IV. HASIL PERCOBAAN DAN DISKUSI

Grafik rugi lengkungan untuk cahaya pada panjang-gelombang 1310 nm sebagai fungsi diameter lengkungan yang diukur menggunakan OTDR untuk serat optik Fujikura dan Newport masing-masing diperlihatkan pada Gambar 5(a) dan 5(b). Terlihat hubungan eksponensial antara rugi dan diameter lengkungannya sebagaimana dinyatakan oleh persamaan teoritisnya. Grafik untuk kedua serat tersebut serupa bentuknya hanya saja skala diameter untuk serat Fujikura dalam satuan cm sedangkan untuk yang serat Newport dalam satuan mm. Ini berarti serat optik jenis "sensor grade" Newport bisa dilengkungkan lebih kecil (hingga ukuran mm) dibandingkan serat optik jenis "telecommunication grade" Fujikura. Selain ukuran fisik serat Newport lebih kecil (0.25 mm) dibandingkan serat Fujikura (0.9 mm), berdasarkan spesifikasi teknisnya serat ini memang dirancang untuk menghasilkan rugi lengkungan yang kecil [5]. Bila dicermati, pada grafik untuk serat Fujikura, Gambar 5(a), untuk diameter lengkungan antara 1.4 dan 1.6 cm, sensitivitasnya (perubahan rugi akibat perubahan diameter lengkungan) adalah sekitar 0.4dB/0.2cm atau 2 dB/cm atau 0.2 dB/mm. Adapun untuk serat Newport, Gambar 5(b), untuk diameter lengkungan antara 6.5 dan 7.0 mm, sensitivitasnya adalah sekitar 0.04dB/0.5mm atau atau 0.08 dB/mm.



Gambar 5. Rugi lengkungan untuk (a) serat Fujikura dan (b) serat Newport.

KESIMPULAN

Dari karakterisasi rugi lengkungan serat optik yang telah dilakukan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Serat optik jenis "*telecommunication grade*" Fujikura dapat digunakan sebagai sensor dengan diameter lengkungan antara 1.4 – 1.6 cm dengan sensitivitas 0.2 dB/mm untuk cahaya pada panjang-gelombang 1310 nm.
2. Serat optik jenis "*sensor grade*" Newport dapat digunakan sebagai sensor dengan diameter lengkungan antara 6.5 – 7.0 mm dengan sensitivitas 0.08 dB/mm untuk cahaya pada panjang-gelombang 1310 nm.
3. Hasil karakterisasi memperlihatkan bahwa serat optik jenis "*telecommunication grade*" Fujikura lebih sensitif daripada serat optik jenis "*sensor grade*" Newport. Namun perlu diingat bahwa beberapa jenis serat optik "*telecommunication grade*" yang modern telah dirancang profil indeks biasanya sedemikian rupa agar rugi lengkungannya minimum sehingga diprediksi serat optik jenis tersebut mirip dengan serat optik jenis "*sensor grade*" Newport.
4. Berdasarkan hasil karakterisasi ini selanjutnya akan dilakukan perancangan penggunaan serat optik tersebut sebagai *Fiber Extensometer* sebagai sensor pergeseran tanah dan melakukan percobaan/simulasi laboratorium, mengamati pengaruh temperatur terhadap sensitivitas, hingga percobaan melakukan pengukuran lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications, 1st ed., IBM Corp., International Technical Support Organization, September 1998.
2. Andre Martins, et al., Modelling of Bend Loss in Single-Mode Optical Fibers, <http://www.av.it.pt/conftele2009/Papers/109.pdf>.
3. Frank F. Ruhl, Lecture Notes on Single-Mode Fibre Theory, University of New South Wales, Sydney, 1990.
4. Clifford R. Pollock, Fundamentals of Optoelectronics, Irwin Inc., Chicago, 1995.
5. -, Bend-Insensitive Single Mode Fibers, Newport Catalog, <http://www.newport.com>