

Rancang Bangun Sensor Strain Menggunakan Metode Interpolasi Lagrange Berbasis Serat Optik Berstruktur SMS (Singlemode-Multimode-Singlemode) dan OTDR

Aslam Chitami Priawan Siregar

Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
E-mail : aslam.chitami@itats.ac.id

Abstrak. Serat optik berstruktur singlemode-multimode-singlemode (SMS) telah banyak dikembangkan untuk berbagai jenis sensor. *Optical Time Domain Reflectometer* (OTDR) dapat mengukur rugi daya per unit panjang, serta menunjukkan letak suatu kesalahan pada sistem jaringan serat optik. Pada penelitian ini dikembangkan suatu teknik pengukuran *strain* menggunakan serat optik berstruktur SMS dan OTDR. Setelah itu, dilakukan penghitungan dengan metode Interpolasi Lagrange berbasis Borland Delphi 7. Karakteristik dari setiap sensor serat optik berstruktur SMS yang telah dibuat menggunakan serat optik multimode dengan panjang 5,5 cm, 6 cm, 6,5 cm, dan 7 cm serta dengan penggunaan panjang gelombang operasinya, yaitu 1310 nm. Pengujian *strain* dilakukan dengan memberikan pergeseran dari 0 - 1000 μm dengan variasi kenaikan setiap 100 μm . Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh bahwa panjang multimode 5,5 cm dan 6 cm terjadi grafik kenaikan. Semakin bertambahnya *strain*, maka rugi daya yang ditimbulkan semakin besar. Sedangkan panjang multimode 6,5 cm dan 7 cm menunjukkan bahwa terjadi grafik penurunan. Berdasarkan hasil penghitungan dengan menggunakan metode Interpolasi Lagrange, *error* yang dihasilkan pada panjang multimode 6 cm mempunyai *error* yang paling kecil. Contohnya, pada *strain* 1500 μe *error* yang terjadi dari hasil penghitungan dengan menggunakan metode interpolasi lagrange untuk panjang multimode 6 cm adalah 0,049 %.

Kata Kunci: Serat optik SMS, OTDR, Strain, Interpolasi Lagrange.

1. Pendahuluan

Strain sebuah material menunjukkan besarnya tingkat ketahanan dari gaya-gaya luar yang mempengaruhi perubahan bentuk atau volume dari material tersebut. Dalam penelitian ini, dibuat sebuah sensor strain yang berbasis serat optik berstruktur SMS yang dapat digunakan pada suatu sistem monitor struktur bangunan. Serat optik digunakan karena memiliki berbagai keunggulan yaitu karena ukurannya yang kecil, dapat melewati cahaya, tahan terhadap interferensi elektromagnetik (EMI), pasif secara kimiawi, bandwidth yang lebar, sensitivitas yang tinggi, tidak terkontaminasi lingkungan, dan kemampuannya sebagai sensor terdistribusi maupun multipoint [1].

Beberapa teknik pengukuran *strain* dengan menggunakan serat optik berstruktur Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS), telah digunakan teknik pengukuran pergeseran panjang gelombang akibat pemberian *strain* menggunakan *Optical Spectrum Analyzer* (OSA), dan teknik pengukuran intensitas menggunakan *optical power meter* [2]. Akan tetapi, teknik tersebut hanya dapat digunakan untuk mengukur *strain* pada satu titik saja. Padahal dalam sistem monitor struktur bangunan diperlukan pengukuran *strain* pada banyak titik (multi-point). Teknik ini berpotensi untuk mengukur *strain* pada beberapa titik.

Agar dapat mengetahui sembarang nilai pada rugi daya sensor serat optik berstruktur SMS akibat pengukuran *strain* dalam rentang tertentu, maka dibutuhkan suatu metode interpolasi. Metode interpolasi yang digunakan pada pengukuran ini adalah Interpolasi Lagrange. Interpolasi Lagrange digunakan karena bersifat aplikatif untuk kasus *equispaced* (selisih input pengukuran konstan)

maupun *non- equispaced* (selisih input pengukuran tidak konstan). Untuk menghitung Interpolasi Lagrange digunakan program berbasis borland delphi 7.

Dengan adanya metode pengukuran ini, diharapkan dapat digunakan untuk pengukuran *strain* dengan biaya yang lebih murah serta adanya kemudahan fabrikasinya, sehingga dapat mempunyai nilai pemanfaatan yang lebih tinggi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Serat Optik Berstruktur SMS

Serat optik SMS (Single mode–Multimode–Single mode) merupakan suatu struktur yang terdiri dari serat optik singlemode yang identik yang secara aksial disambung di kedua ujung serat optik multimode seperti ditunjukkan Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Serat optik berstruktur SMS (Single mode–Multimode–Single mode)

Pada serat optik berstruktur SMS hanya *fundamental mode* yang ter-*couple* masuk pada input dan ter-*couple* keluar pada ujung serat optik multimode. Kondisi tersebut dapat terjadi ketika *spot size* dari *fundamental mode* dari serat optik singlemode dan multimode benar-benar cocok dan juga tidak ada *misalignment* aksial pada *splice* (sambungan). Jika kondisi tersebut tidak dapat dipenuhi, *high order mode* dari serat optik multimode akan tereksitasi atau ter-coupling keluar pada input/output ujung serat optik multimode. Sedangkan kinerja atau performansi dari serat optik berstruktur SMS sangatlah tergantung pada panjang gelombang operasi dan juga panjang dari serat optik multimode [3].

2.2. OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)

OTDR merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengevaluasi suatu serat optik pada domain waktu. OTDR dapat menganalisis setiap jarak dari *insertion loss*, *reflection*, dan *loss* yang muncul pada setiap titik, serta dapat menampilkan informasi pada layar tampilan berupa respon logaritmik. Selain itu, OTDR dapat mengukur redaman sebelum dan setelah instalasi sehingga dapat memeriksa adanya ketidaknormalan seperti bengkokan (*bend*) atau beban yang tidak diinginkan [5].

3. Metode Penelitian

3.1 Alat dan Bahan

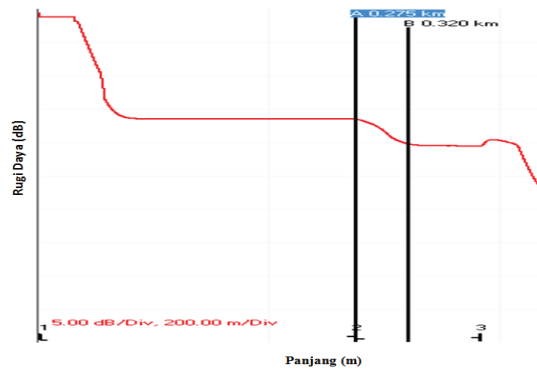
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah Serat optik singlemode *step index* (ITU-T Recommendation G652), multimode *graded index* (ITU-T Recommendation G651), lem altec, dan empat buah lampu 5 W. Sedangkan alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah *Fusion Splicer* Fujikura FSM-505), *Microdisplacement*, HP E6000A Mini –OTDR, *Fiber Cleaver FITEC Nc S324*, *Fiber Stripper Cromwell ct USA*, termometer digital, dan jangka sorong digital.

3.2 Langkah-langkah Penelitian

Pembuatan serat optik berstruktur SMS dilakukan dengan cara menyambungkan kedua ujung serat optik multimode dengan serat optik singlemode. Pada ujung serat optik yang akan disambung, dilakukan pengupasan dengan menggunakan *Fiber Stripper Cromwell ct USA* pada lapisan *cladding*. Kemudian lapisan serat optik yang telah terkupas dibersihkan dengan menggunakan larutan alkohol, agar sisa hasil pengupasan tidak mengganggu saat proses penyambungan. Lapisan serat optik yang telah dibersihkan, akan dilakukan pemotongan dengan menggunakan *Fiber Cleaver FITEC Nc S324*, agar ujung serat optik menjadi rapi dan tidak terjadi *misalignment* aksial saat penyambungan serat optik singlemode dan multimode. Setelah itu, antara dua ujung serat optik (baik Singlemode maupun Multimode) akan dilakukan penyambungan dengan menggunakan *Fusion Splicer* Fujikura FSM-505. Kedua ujung serat optik akan terlihat pada layar yang ditampilkan oleh *Fusion Splicer* Fujikura FSM-505 dalam skala mikroskopis. Apabila ujung serat optik rapi dan sesuai dengan batas *range* yang telah di tentukan, maka penyambungan dapat dilakukan dengan baik dan akan diperoleh hasil yang lebih baik.

Setelah itu, dilakukan pengujian *strain* pada serat optik yang berstruktur SMS. Uji *strain* dilakukan dengan memberikan *strain* pada daerah serat optik yang berstruktur SMS yang kedua ujungnya direkatkan pada *microdisplacement* dan *statif* dengan menggunakan lem alteco dengan pengujian *range* pergeseran sebesar 0-1000 μm . Pada setiap kenaikan pergeseran sebesar 100 μm (spesifikasi dari setiap *grade* pada *microdisplacement*), kemudian dibagi panjang mula-mula dari serat optik berstruktur SMS yang akan diuji *strain*. Setelah itu, dilakukan pengambilan data respon dan rugi daya yang terbaca pada OTDR. Rugi daya yang dianalisa pada penelitian ini adalah rugi daya dari serat optik berstruktur SMS. Sedangkan parameter-parameter pengukuran OTDR yang digunakan dalam pengukuran ini dipilih sebagai berikut :

OTDR Type	: Agilent Mini OTDR
	E6000C
Wavelength	: 1314 nm
Pulsewidth	: 300 ns
Range	: 0-2 km
Marking	: A = 275,0 m
	B = 320,8 km
	B-A = 45.8 m
Optimize	: Dynamic
Averaging Time	: 10 s
Sampling Distance	: 15,90 cm
index of refraction	: 1,47180



Gambar 3.1. Bentuk Tampilan pada OTDR

3.3 Metode Analisa Data

Data hasil penelitian berupa rugi daya ditimbulkan akibat adanya *strain* yang terjadi pada serat optik yang terbaca pada OTDR, maka dapat digunakan persamaan Interpolasi Lagrange sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 f(x_s) = & \frac{(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)(x_0 - x_3) \dots (x_0 - x_n)} \cdot f_0 \\
 & + \frac{(x - x_0)(x - x_2)(x - x_3) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) \dots (x_1 - x_n)} \cdot f_1 \\
 & + \dots \\
 & + \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_1)(x_n - x_2)(x_n - x_3) \dots (x_n - x_{n-1})} \cdot f_n
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Dimana x adalah nilai sembarang *strain* dalam rentang 0 sampai 3704 $\mu\epsilon$, $f(x)$ adalah nilai rugi daya yang di timbulkan pada serat optik SMS pada x tertentu, $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ adalah nilai hasil pengukuran *strain* pada serat optik berstruktur SMS dari *strain* ke-0, *strain* ke-1, *strain* ke-2, sampai *strain* ke-n, dan $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ adalah nilai hasil rugi daya yang terbaca pada OTDR akibat pengaruh *strain* dari *strain* ke-0, *strain* ke-1, *strain* ke-2, sampai *strain* ke-n Untuk bahasa pemograman yang menggunakan Borland Delphi 7 adalah sebagai berikut :

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
i,j,n:integer; L,Xinput,Ydata,atas,bawah:real;
begin
L:=0;
n:=StrToInt(Edit1.Text); Xinput:=StrToFloat(Edit2.Text);
for i:=0 to n-1 do
begin
atas:=1; bawah:=1;

```

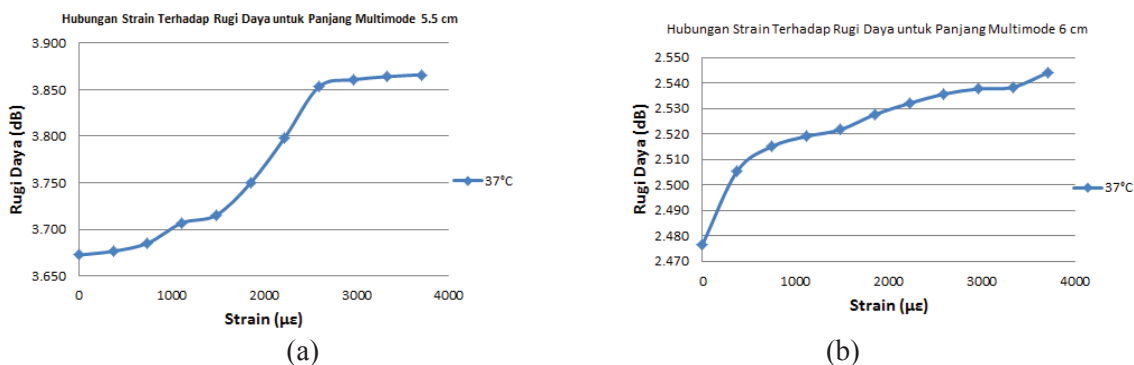
```

Ydata:=StrToFloat(StringGrid1.Cells[i+1,2]);
for j:=0 to n-1 do
begin
if j<>i then
begin
atas:=(Xinput-StrToFloat(StringGrid1.Cells[j+1,1]));
bawah:=(StrToFloat(StringGrid1.Cells[i+1,1])-StrToFloat(StringGrid1.Cells[j+1,1]));
end; end;
L:=L+(Ydata*atas/bawah); end;

```

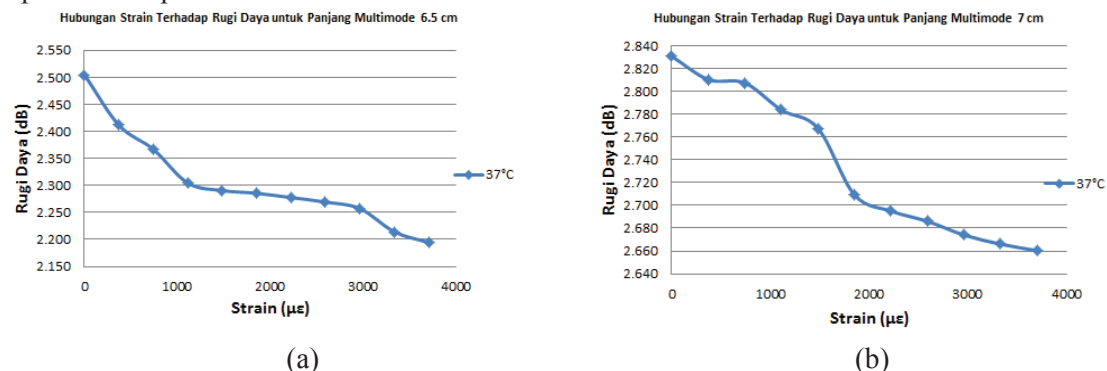
4. Hasil dan Pembahasan

Hubungan rugi daya pada serat optik berstruktur SMS sebagai sensor *strain* pada suhu 37°C dengan panjang serat optik multimode 5,5 cm dan 6 cm pada panjang gelombang 1310 nm diperlihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Grafik hubungan rugi daya pada serat optik berstruktur SMS sebagai sensor *strain* pada panjang gelombang 1310 nm pada panjang serat optik multimode (a) 5,5 cm dan (b) 6 cm.

Sedangkan Hubungan rugi daya pada serat optik berstruktur SMS sebagai sensor *strain* pada suhu 37°C dengan panjang serat optik multimode 6,5 cm dan 7 cm pada panjang gelombang 1310 nm diperlihatkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2. Grafik hubungan rugi daya pada serat optik berstruktur SMS sebagai sensor *strain* pada panjang gelombang 1310 nm pada panjang serat optik multimode (a) 6,5 cm dan (b) 7 cm.

Untuk menentukan besaran *strain* dapat dilakukan dengan cara membagi besaran pergeseran dari hasil pengukuran dengan panjang mula-mula dari serat optik berstruktur SMS yaitu sebesar 27 cm, yang ditentukan dari jarak antara dua ujung serat optik berstruktur SMS yang direkatkan dengan lem alteco.

Berdasarkan Gambar 4.1, menunjukkan bahwa pada panjang multimode 5,5 cm dan 6 cm terjadi grafik kenaikan. Semakin bertambahnya *strain*, maka rugi daya yang ditimbulkan semakin besar. Sedangkan pada Gambar 4.2, panjang multimode 6,5 cm dan 7 cm menunjukkan bahwa terjadi grafik penurunan. Semakin bertambahnya *strain*, maka rugi daya yang ditimbulkan semakin mengecil.

Perbedaan grafik seperti ini, dikarenakan adanya titik *re-imaging* pada panjang multimode tertentu. Besarnya titik *re-imaging* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut [4] :

$$\bar{L}_Z = 16n_{co}a^2/\lambda \quad (4.1)$$

Dimana $\bar{L}_Z$ merupakan ukuran panjang multimode yang mengalami titik *re-imaging*, n_{co} merupakan besarnya nilai indeks bias pada lapisan *core* dari serat optik yang berstruktur multimode dalam hal ini besarnya adalah 1.445, a merupakan besarnya jari-jari pada lapisan *core* dari serat optik multimode 62,5 μm , dan λ merupakan panjang gelombang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebesar 1310 nm, nilai panjang gelombang tersebut digunakan karena memiliki rugi daya yang kecil untuk jenis bahan silica yang merupakan bahan dari serat optik. Berdasarkan nilai-nilai di atas, didapatkan bahwa besarnya titik *re-imaging* pada jenis serat optik multimode yang digunakan dalam penelitian ini adalah 6,89 cm. Dimana pada titik ini terjadi interferensi minimum terhadap banyaknya moda yang dilewatkan pada serat optik multimode tersebut, sehingga dapat menyebabkan penurunan pada rugi daya serat optik.

Perbedaan antara grafik pada panjang multimode 5,5 cm dan 6 cm terletak pada besarnya rugi daya yang ditimbulkannya. Pada panjang multimode 5,5 cm mempunyai rugi daya yang lebih besar daripada panjang multimode 6 cm. Hal ini disebabkan karena adanya penurunan intensitas pada panjang multimode 6 cm sampai menuju titik *re-imaging* pada panjang 6,89 cm.

Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 semua pengukuran dapat digunakan sebagai sensor *strain*. Akan tetapi, daerah yang paling linear terletak pada sensor serat optik berstruktur SMS dengan panjang multimode 5,5 cm dan 7 cm.

Berikut ini ditampilkan suatu tabel hasil perhitungan sensor *strain* berstruktur SMS dengan menggunakan metode Interpolasi Lagrange berbasis Borland Delphi. Untuk data yang dicetak tebal menunjukkan sebagai data hasil pengukuran dan Untuk data yang dicetak miring menunjukkan sebagai data hasil penghitungan dengan menggunakan metode Interpolasi Lagrange.

Untuk masing-masing hasil perhitungan sensor *strain* berstruktur SMS pada panjang multimode 5,5 cm dan 6 cm dapat ditampilkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil penghitungan dengan menggunakan Interpolasi Lagrange pada panjang multimode (a) 5,5 cm dan (b) 6 cm.

x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)
0	3.673	1852	3.750	0	2.477	1852	2.528
250	3.715	2000	3.768	250	2.503	2000	2.530
370	3.677	2222	3.798	370	2.505	2222	2.532
500	3.663	2500	3.840	500	2.508	2500	2.535
741	3.685	2593	3.853	741	2.515	2593	2.536
750	3.686	2750	3.866	750	2.515	2750	2.538
1000	3.705	2963	3.861	1000	2.518	2963	2.538
1111	3.707	3000	3.858	1111	2.519	(b)000	2.538
1250	3.708	3333	3.864	1250	2.520	3333	2.538
1481	3.715	3500	3.937	1481	2.522	3500	2.544
1500	3.716	3704	3.866	1500	2.522	3704	2.544

Sedangkan untuk masing-masing hasil perhitungan sensor *strain* berstruktur SMS pada panjang multimode 6,5 cm dan 7 cm dapat ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan dengan menggunakan Interpolasi Lagrange pada panjang multimode (a) 6,5 cm dan (b) 7 cm.

x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)
0	2.505	1852	2.286	0	2.831	1852	2.709
250	2.399	2000	2.283	250	2.729	2000	2.697
370	2.412	2222	2.278	370	2.810	2222	2.695
500	2.410	2500	2.217	500	2.841	2500	2.692
741	2.367	2593	2.269	741	2.807	2593	2.686
750	2.365	2750	2.265	750	2.805	2750	2.675
1000	2.318	2963	2.257	1000	2.782	2963	2.674
1111	2.305	3000	2.255	1111	2.784	3000	2.676
1250	2.296	3333	2.214	1250	2.786	3333	2.666
1481	2.291	3500	2.176	1481	2.768	3500	2.585
1500	2.290	3704	2.194	1500	2.765	3704	2.660

Berdasarkan dari tabel-tabel di atas, untuk sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 6 cm mempunyai keteraturan data yang lebih baik dibandingkan sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode yang lain. Hal ini dikarenakan perubahan *strain* yang diberikan sensor serat optik berstruktur SMS hampir sebanding dengan perubahan rugi daya yang terbaca pada OTDR.

Untuk sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 5,5 cm mempunyai keteraturan data mulai dari *strain* ke-2 (data ke-3) sampai *strain* ke-7 (data ke-8) dari hasil penghitungan. Hal ini dikarenakan pada rentang daerah tersebut perubahan rugi daya yang terbaca pada OTDR hampir sebanding dengan perubahan *strain* yang diberikan sensor serat optik berstruktur SMS. Sedangkan untuk data yang sebelumnya atau sesudahnya, perubahan rugi daya yang terbaca pada OTDR relatif lebih kecil dari perubahan *strain* yang diberikan sensor serat optik berstruktur SMS, akibatnya nilai perhitungan yang dihasilkan menjadi tidak teratur.

Sedangkan pada sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 6,5 cm mempunyai keteraturan data yang lebih baik daripada sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 5,5 cm. Rentang keteraturan data pada sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 6,5 cm terletak pada *strain* ke-1 (data ke-2) sampai *strain* ke-9 (data ke-10). Hal ini dikarenakan rentang perubahan perubahan rugi daya yang terbaca pada OTDR yang hampir sebanding dengan perubahan *strain* yang diberikan sensor serat optik berstruktur SMS lebih panjang dibandingkan sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 5,5 cm.

Untuk sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 7 cm, data hasil penghitungan bersifat fluktuatif atau tidak teratur. Hal ini dikarenakan rentang perubahan rugi daya yang terbaca pada OTDR tidak teratur dibanding dengan perubahan *strain* yang diberikan sensor serat optik berstruktur SMS, sehingga sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 7 cm tidak bisa digunakan untuk penghitungan dengan metode Interpolasi Lagrange.

Berdasarkan Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan bahwa *range* daerah yang paling linear terletak pada *strain* ke-3 (data ke-4) sampai *strain* ke-7 (data ke-8). Oleh karena itu, untuk menentukan adanya *error* pada pengukuran *strain* dapat dilihat pada *range* daerah tersebut. Hal ini dikarenakan pada *range* daerah yang paling linear, *error* yang dihasilkan dari hasil penghitungan menjadi lebih kecil. Contohnya, pada *strain* 1500 $\mu\epsilon$ *error* yang terjadi dari hasil penghitungan dengan menggunakan metode interpolasi lagrange diperlihatkan pada Tabel 4.1. berikut.

Tabel 4.1. Hubungan *error* pengukuran *strain* terhadap hasil penghitungan dengan menggunakan metode interpolasi lagrange

Pengukuran (dB)	3.729	2.523	2.294	2.754
Penghitungan (dB)	3.716	2.522	2.290	2.765
Error (%)	0,347	0,049	0,169	0,399

Berdasarkan tabel 4.1 di atas, menunjukkan bahwa adanya *error* yang berbeda pada pengukuran *strain* hasil penghitungan dengan menggunakan metode interpolasi lagrange. Hal ini dikarenakan tingkat keteraturan data yang dihasilkan dari hasil penghitungan juga berbeda-beda. Untuk sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode 6 cm mempunyai *error* paling kecil karena mempunyai keteraturan data yang lebih baik dibandingkan sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode yang lain.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian, pengamatan, serta hasil dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil pengukuran, panjang multimode 5,5 cm dan 6 cm terjadi grafik kenaikan. Semakin bertambahnya *strain*, maka rugi daya yang ditimbulkan semakin besar. Sedangkan panjang multimode 6,5 cm dan 7 cm menunjukkan bahwa terjadi grafik penurunan. Perbedaan grafik seperti ini, dikarenakan adanya titik *re-imaging* pada panjang multimode 6,89 cm.
2. Berdasarkan hasil penghitungan dengan metode Interpolasi Lagrange dari setiap panjang *multimode* yang berbeda-beda, didapatkan bahwa pada panjang *multimode* 6 cm mempunyai keteraturan data yang lebih baik dibandingkan sensor *strain* berstruktur SMS dengan panjang multimode yang lain, sehingga *error* yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Contohnya, pada *strain* 1500 $\mu\epsilon$ *error* yang terjadi dari hasil penghitungan dengan menggunakan metode interpolasi lagrange untuk panjang multimode 6 cm adalah 0,049 %.

6. Pustaka

- [1] Gholamzadeh, Bahareh and Nabovati, Hooman. 2008. *Fiber Optic Sensors*. World Academy of Science, Engineer. and Technol. 42.
- [2] Hatta, Agus M. et al. 2010 . *Strain sensor based on a pair of singlemode-multimode-singlemode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme*. Appl. Opt. Vol. 49. No. 3, 536 – 541.
- [3] Kumar, Arun et al. 2003. *Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures*. Opt. Communicat. 219, 215 – 219.
- [4] Wang, Qian, Farrell, Gerald and Yan, Wei .2008. *Investigation on Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure*. J. Lightwave Technol. Vol.. 26, No. 5. 512-518.
- [5] Ziemann, Olaf et al. 2008 . *POF Handbook-Optical Short Range Transmission Systems*. Springer : Berlin.