

KONTRIBUSI KERUGIAN AKIBAT SAMBUNGAN PADA SALURAN TRANSMISI SERAT OPTIK SINGLE MODE

Slamet Riyadi

Program Studi Teknik Mekatronika
Politeknik Enjinering Indorama
Email: slamet@pei.ac.id

Mudrik Alaydrus

Teknik Elektro
Universitas Mercu Buana
Email: mudrikalaydrus@mercubuana.ac.id

ABSTRAK

Serat optik merupakan media transmisi yang banyak digunakan untuk menunjang jaringan internet berkecepatan tinggi. Pada serat optik sebagai media transmisi terdapat berbagai macam rugi-rugi, diantaranya : Rugi-rugi penyebaran *Rayleigh*, Rugi-rugi penggandengan, rugi-rugi penyambungan, rugi-rugi pembengkokan dan rugi-rugi redaman pada konektor. Pada tulisan ini dilakukan penelitian tentang rugi-rugi sambungan dan analisa model sambungan untuk jenis serat mode tunggal (*single mode*). Penelitian menggunakan alat *Splicer Machine*, dengan tampilan berupa nilai perkiraan rugi-rugi sambungan dan tampilan visual kondisi sambungan. Analisa dilakukan dengan memanfaatkan formula yang telah dikembangkan oleh *Marcus* dan Teori *Fresnell*. Hasil dari penelitian diperoleh bentuk parametrik grafis sambungan yang sama untuk beberapa jenis serat yang dipergunakan pada penelitian dan ditemukan cacat pada sambungan yang mengakibatkan kehilangan sebagian energi pada titik sambungan.

Kata kunci: fusi, rugi-rugi, serat optik, *splices*.

ABSTRACT

Fiber optics are used intensively for supporting the back-bone of high-speed internet connections. In order to assess the power budget, information about losses in fiber optics is essential. The losses are losses due to Rayleigh scattering, joint losses, bend losses, splice losses and due to connectors. In this paper we observed splice losses between single mode fibers. For measurements we used a splicer machine, with the display in the form of estimated value of losses connection and visual connection conditions. The analysis was done by using a formula that has been developed by Marcus and Fresnell Theory. The results of the study showed graphic parametric form the same connection for multiple types of fibers used in the research and found defects in connection with loss of most of the energy at the connection point.

Keywords: *Fiber Optics, Fusion, Loss, Splices.*

1. PENDAHULUAN

Sistem transmisi serat optik merupakan pengiriman sinyal-sinyal informasi dalam bentuk energi cahaya melalui media serat optik. Untuk memastikan sistem transmisi serat optik bekerja dengan optimal, perlu diperhitungkan besarnya daya yang dipancarkan pada saluran. Pasif dan aktif komponen pada sistem saluran serat optik merupakan komponen yang sangat menentukan jumlah kerugian saluran. Kerugian pasif disebabkan akibat kerugian serat, kerugian pada konektor, kerugian akibat sambungan dan kerugian karena penggabungan.

Sedangkan kerugian aktif yaitu sistem penguatan, panjang gelombang cahaya yang digunakan, daya yang ditransmisikan, sensitivitas penerima dan *dynamic range*. Pada saluran serat optik rugi-rugi akibat efek sambungan merupakan hal khusus yang perlu diperhatikan, ketidak sempurnaan penyambungan akan berakibat besarnya rugi-rugi sambungan. Analisa rugi-rugi pada saluran akan dapat memperkirakan rugi-rugi yang timbul pada saluran serat optik guna keperluan instalasi, efisiensi dan distribusi daya dalam saluran.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian dan analisa rugi-rugi saluran adalah :

- a. Melakukan pembahasan terhadap jurnal,

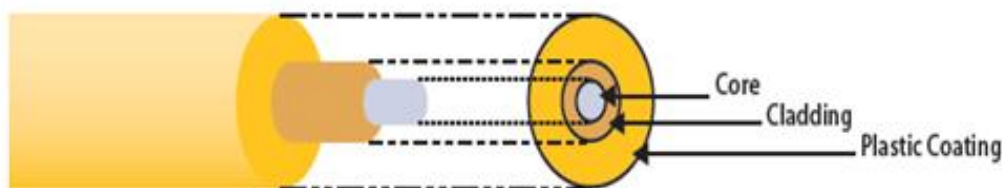
Jurnal 1, *Analysis fresnel Loss at Splice Between Single-Mode Fibers and Photonic Crystal Fiber*

Jurnal 2, *Power Budget for Single Mode Fiber*

- b. Melakukan pengujian dan penelitian pada kantor OPMC PT.Telkom Jakarta Timur.

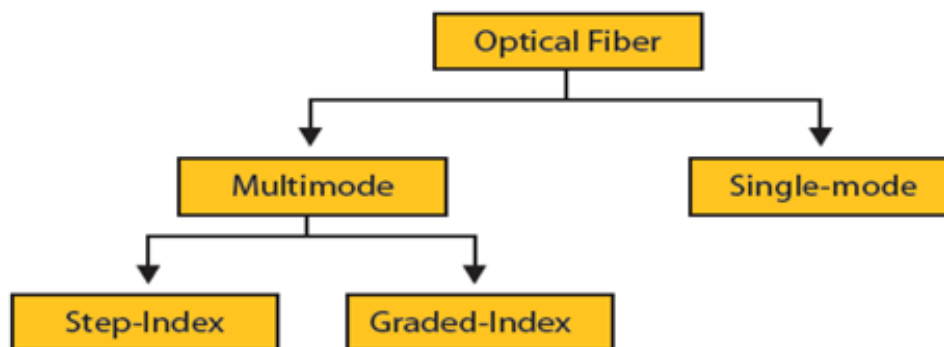
2.1 Teori Dasar

Serat yang dipergunakan pada sistem komunikasi serat optik merupakan pemandu gelombang yang terbuat dari bahan dielektrik transparan. Pada bagian dalam serat terdapat silinder glass, yang disebut dengan inti serat yang selanjutnya disebut dengan *core*, yang dikelilingi oleh silinder penutup yang terbuat dari bahan gelas atau plastik yang disebut dengan *cladding* (Gambar 1)



Gambar 1. Struktur Serat Optik [10]

Serat optik dikelompokkan berdasarkan distribusi kerapatan yang disebut indeks bias pada inti serat atau *core* dan lintasan gelombang cahaya yang disebut dengan *mode*.



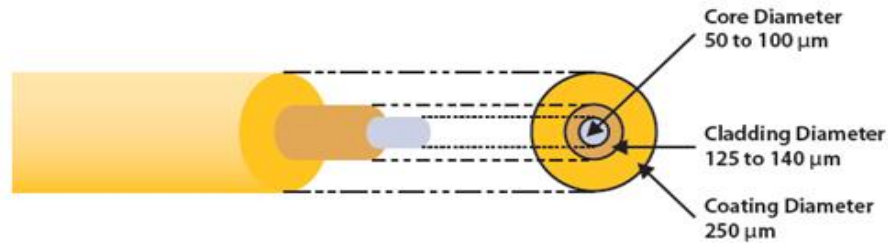
Gambar 2. Jenis Serat Optik [10]

2.2 Serat Step Indeks Single-Mode

Kelebihan dari serat optik mode tunggal (*single mode*) adalah memiliki performansi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedua jenis serat optik yang lain, terutama dalam penggunaan bandwidth dan redaman saluran. Pengurangan diameter inti pada serat optik single mode membatasi lintasan cahaya hanya satu lintasan.

Sebuah serat mode tunggal dapat membawa sinyal 10 s/d 40 Gbps atau lebih dalam satu saluran yang cukup panjang. Kapasitas sinyal yang dibawa dapat ditingkatkan dengan meningkatkan sinyal yang ditransmisikan pada panjang gelombang yang berbeda.

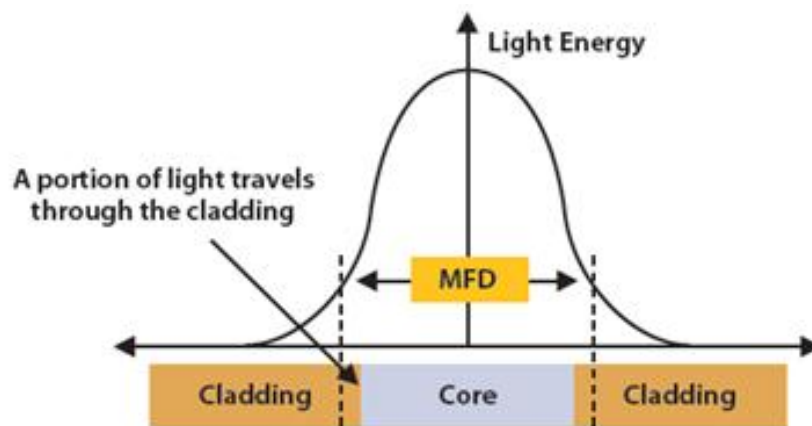
Dengan ukuran inti serat yang sangat kecil umumnya diperlukan sumber cahaya dengan intensitas cukup tinggi untuk memperoleh efisiensi akibat penggabungan, seperti halnya penyambungan tetap (*splicing*) dan konektor. Ukuran diameter inti pada serat single mode memiliki range 8 s/d 12 μm dengan diameter pembungkus (*cladding*) 125 μm . Indeks bias serat mode tunggal tipikal adalah 1,465.



Gambar 3. Komposisi Serat Single Mode [10]

2.3 Mode Field Diameter (MFD)

Mode field diameter (MFD) pada serat mode tunggal dapat diekspresikan sebagai bagian pada serat dimana mayoritas energi cahaya dilewatkan.



Gambar 4. Mode Field Diameter [10]

2.4 Penyambungan Serat Optik dan Performansinya

Penyambungan serat optik adalah menggabungkan dua ujung serat yang meliputi penggabungan antara inti secara permanen. Sambungan yang ideal adalah bila pada sambungan tersebut terjadi kontinuitas serat sebagai media pemandu.

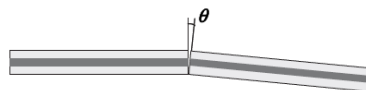
Rugi-rugi penyambungan pada serat timbul akibat adanya ketidaksempurnaan dalam melakukan penyambungan. Perkiraan perhitungan rugi-rugi akibat sambungan pada serat single mode dapat dihitung dengan pendekatan formula seperti yang telah dikemukakan oleh D.Marcus, 1976 [6], yang ekspresi pendekatannya dalam bentuk fungsi Gaussian, dimana koefisien transmisi (T) dapat dihitung berdasarkan empat faktor utama dibawah ini :

- a. Terdapat jarak diantara serat



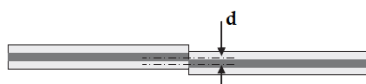
$$T = \frac{1}{Z^2 + 1} \quad ; \quad Z = \frac{\lambda S}{2\pi\omega^2} \quad (1)$$

- b. Terdapat sudut diantara serat



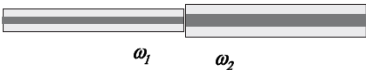
$$T = \exp \left[-\frac{(\pi\omega)}{\lambda^2} \right] \quad (2)$$

- c. Pergeseran Lateral



$$T = \exp \left[-\frac{d^2}{\omega^2} \right] \quad (3)$$

d. Ketidakseragaman MFD



$$T = \exp \left[- \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1\omega_2} \right]^2 \quad (4)$$

2.5 Penyambungan Fusi (Fusion Splicers)

Salah satu teknik yang umum dipakai dalam penyambungan serat optik secara permanen adalah dengan teknik fusi. Penyambungan dengan teknik fusi dapat dilakukan dengan mempergunakan alat yang disebut *Fusion Splicer*.

Pada splicer kedua ujung serat yang akan disambung diletakkan bersamaan pada tempat yang disebut *V-groove* untuk kemudian dilakukan pemanasan atau pengelasan secara bersamaan. Parameter-parameter serat yang mempengaruhi penyambungan mode tunggal dengan teknik fusi adalah *Mode Field Diameter (MFD)*.

Perkiraan rugi-rugi akibat ketidakseragaman *MFD* dapat dihitung dengan persamaan :

$$Loss(dB) = -20 \log \left[(2 \times MFD_1 \times MFD_2) / (MFD_1^2 + MFD_2^2) \right] \quad (5)$$

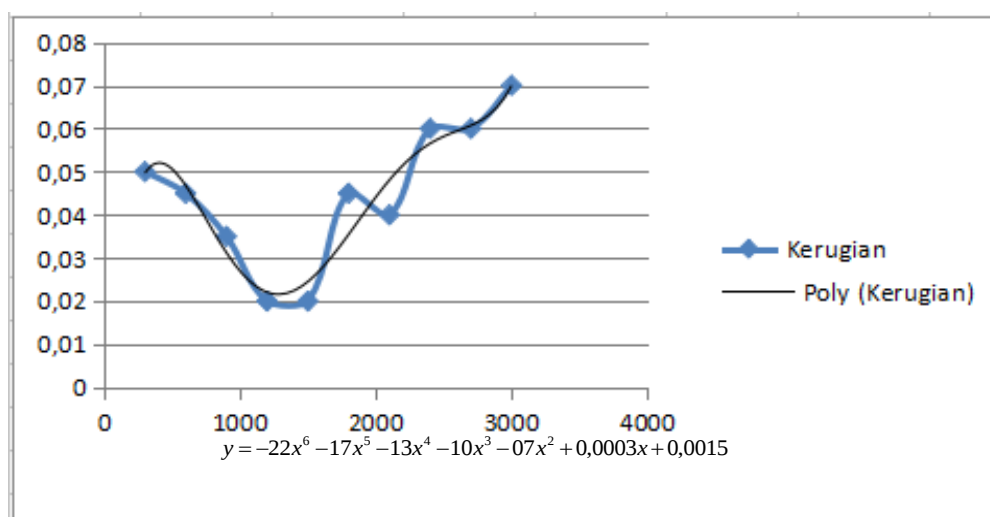
3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan tiga jenis serat optik yaitu SM G652, SM G655 dan NZD.

3.1 Data dan Grafik

Tabel 1. Hasil Penelitian Kerugian Sambungan SM G.655

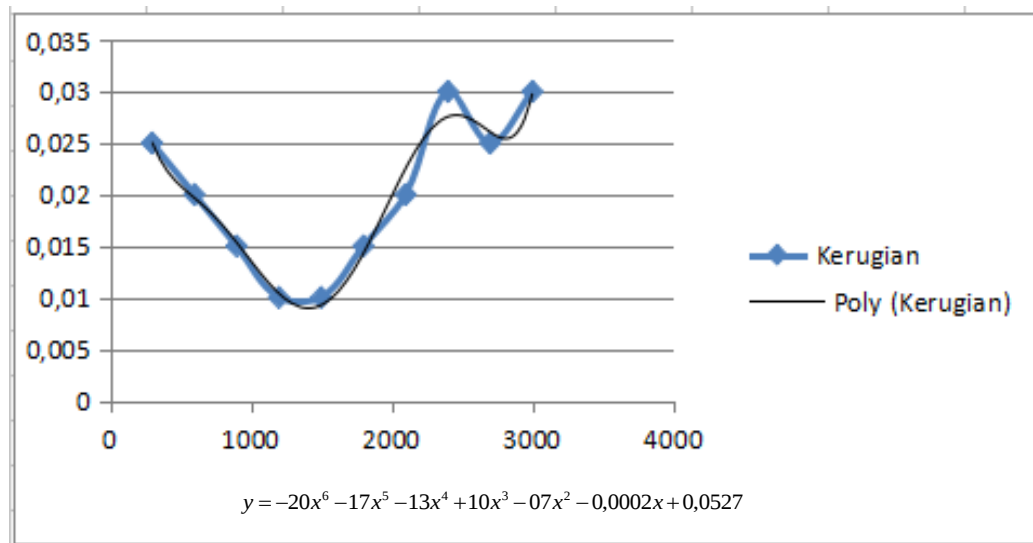
No	Waktu (ms)	Kerugian Sambungan (dB)	Status
1	300	0,050	NG
2	600	0,045	G
3	900	0,035	G
4	1200	0,020	G
5	1500	0,020	G
6	1800	0,045	G
7	2100	0,040	G
8	2400	0,060	NG
9	2700	0,060	NG
10	3000	0,070	NG



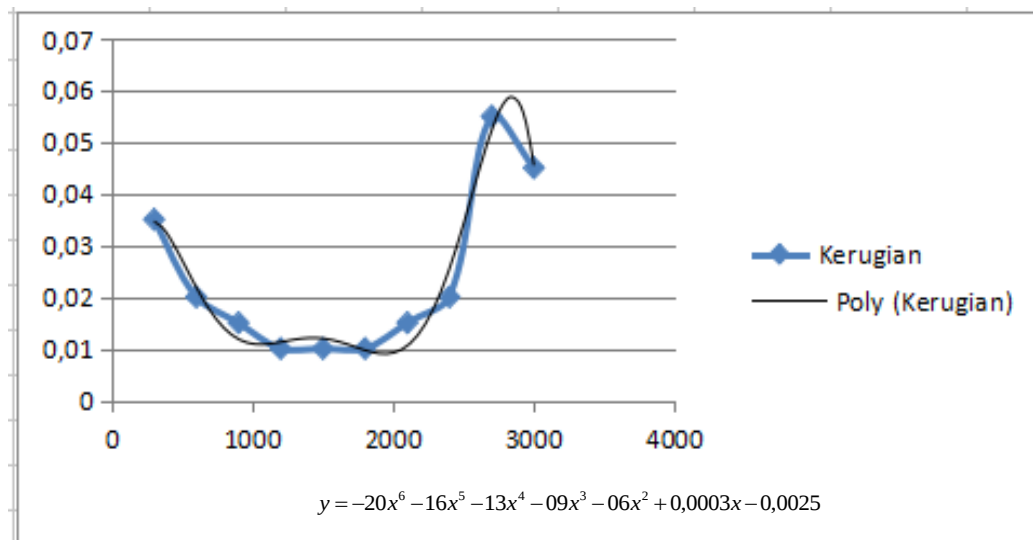
Gambar 5. Grafik Kerugian Sambungan SM G.655

Tabel 2. Hasil Penelitian Kerugian Sambungan SM G.652

No	Waktu (ms)	Kerugian Sambungan (dB)	Status
1	300	0,025	G
2	600	0,020	G
3	900	0,015	G
4	1200	0,010	NG
5	1500	0,010	G
6	1800	0,015	G
7	2100	0,020	G
8	2400	0,030	G
9	2700	0,025	G
10	3000	0,030	NG



Gambar 6. Grafik Kerugian Sambungan SM G.652



Gambar 7. Grafik Kerugian Sambungan SM NZD

Tabel 3. Hasil Penelitian Kerugian Sambungan SM NZD

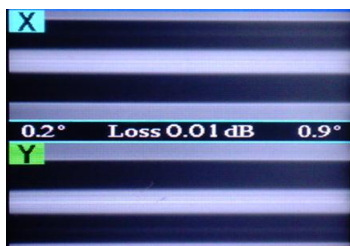
No	Waktu(ms)	Kerugian Sambungan (dB)	Status
1	300	0,035	NG
2	600	0,020	G
3	900	0,015	G
4	1200	0,010	G
5	1500	0,010	NG
6	1800	0,010	G
7	2100	0,015	G
8	2400	0,020	G
9	2700	0,055	NG
10	3000	0,045	NG

Gambar 5 s/d gambar 7 memperlihatkan perbandingan antara ke tiga hasil penyambungan dengan tiga tipe serat optik yang berbeda dengan data penelitian seperti tabel 1 s/d 3, dimana pada gambar tersebut diperlihatkan bahwa serat optik SM G652 , G655 dan NZD memiliki profil rugi-rugi hasil penyambungan yang hampir sama, walaupun dengan lama waktu penyambungan terbaik dan rata-rata kerugian yang ditimbulkannya berbeda; 1200 – 1500 ms untuk G655 dan dengan rata-rata kerugian penyambungan 0,02 dB; 600 – 2100 ms untuk G652 dengan rata-rata kerugian penyambungan 0,015 dB ; dan 600 – 2400 ms untuk NZD dengan rata-rata kerugian penyambungan 0,012 dB.

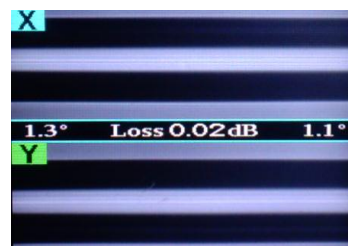
Kesamaan profil grafis rugi-rugi hasil penyambungan tersebut dapat dianalisa dengan melihat model grafis *polynomial* dan persamaannya seperti tertera pada gambar 5 s/d 7, dengan sumbu x = waktu dan sumbu y = kerugian.

3.2 Hasil Sambungan

3.2.1 Sempurna (G)



Gambar 8. Sambungan sempurna



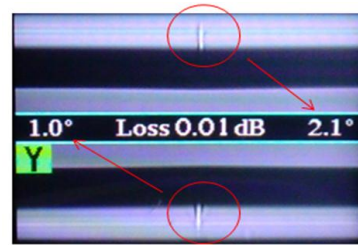
Gambar 9. Sambungan sempurna

Pada gambar 8 dan gambar 9 diperlihatkan hasil penelitian sambungan yang baik yang harus dipenuhi pada proses penyambungan. Penyambungan yang sempurna pada titik sambungan tidak terlihat cacat atau dapat dikatakan bahwa seluruh permukaan kedua ujung serat yang disambung menyatu dengan sempurna

3.2.2 Tidak Sempurna (NG)



Gambar 10. Sambungan tidak sempurna



Gambar 11. Sambungan tidak sempurna

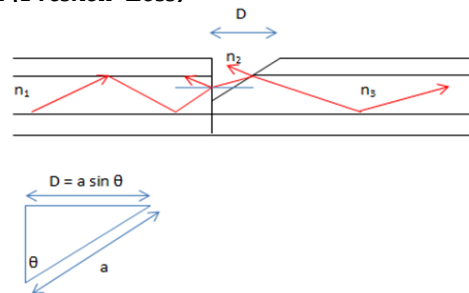
Gambar 10 dan gambar 11 memperlihatkan hasil penelitian sambungan yang tidak sempurna, dimana pada titik sambungan tersebut cacat atau memiliki sudut diantara kedua ujung serat, walaupun nilai kerugian akibat penyambungannya rendah. Perkiraan kerugian sambungan yang timbul akibat penyambungan dengan metode fusi, dihitung dengan formula [5]. Oleh karena itu untuk kasus pada gambar 10 dan gambar 11, terlihat bahwa sambungan terjadi pada separuh bagian serat. Dengan

memanfaatkan formula diatas dan dengan mengasumsikan nilai-nilai $MFD1$ dan $MFD2$ diperoleh perkiraan kerugian sambungan seperti pada tabel 4.

Tabel 4. Perkiraan kerugian sambungan akibat ketidakseragaman MFD

No	MFD1 (μm)	MFD2 (μm)	Kerugian (dB)
1	4,4	4,8	0,03
2	4,5	4,7	0,01
3	4,6	4,6	0,00
4	4,7	4,5	0,01
5	4,8	4,4	0,03

3.3 Kerugian Fresnell (Fresnell Loss)



Gambar 12. Fresnell Loss pada sambungan

Gambar 12, menerangkan fenomena kerugian sambungan yang terjadi hasil penelitian pada gambar 10 & gambar 11 melalui teori *Fresnell*^[13], yang implementasinya di pergunakan pada teknik pengukuran rugi-rugi sambungan pada saluran dengan menggunakan *OTDR*.

Saat gelombang cahaya merambat dari medium dengan indeks bias n_1 ke medium dengan indeks bias n_2 , Fresnel berpendapat bahwa gelombang cahaya mengalami refleksi dan refraksi bersamaan. Intensitas fraksi gelombang cahaya yang mengalami refleksi dari antar muka oleh ditentukan Intensitas *Reflektansi* “ R ” dan fraksi gelombang cahaya yang mengalami refraksi dari antar muka ditentukan oleh Intensitas *Transmitansi* “ T ”

$$R = \frac{(R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \beta)}{(1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \beta)} \quad [13] \quad (6)$$

$$T = \frac{(1 + R_1 R_2 - R_1 - R_2)}{(1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \beta)} \quad [13] \quad (7)$$

Dimana : $R_1 = r_{12}^2$ dan $R_2 = r_{23}^2$ adalah *reflektansi* antara serat 1 dan celah udara dan anantara celah udara dan serat 2, dengan :

$$r_{12}^2 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad [13] \quad r_{23}^2 = \frac{(n_2 - n_3)^2}{(n_2 + n_3)^2} \quad [13] \quad (8)$$

Untuk keadaan normal $D \neq 0$, *reflektansi* pada polarisasi s - dan p - serta perbedaan fase nya adalah ,^[13]

$$\beta = 2Dn_2 \frac{v}{c} \quad (9)$$

Sesuai dengan Gb.14, hubungannya dengan kerugian Fresnell (*Fresnell Loss*) dapat ditulis :

$$\text{Fresnel Loss} = -1 - \log(1 - R) \quad [13] \quad (10)$$

D ≠ 0

dan beda fase :

$$\beta = 2(a \sin \theta)n_2 \frac{v}{c} \quad (11)$$

Bila diasumsikan $n_1 = n_3 = 1,464$ dan $n_2 = 1$ untuk $c = 3 \times 10^8$ m/s serta $v = 2,049 \times 10^8$ m/s, maka dengan memanfaatkan formula *reflektansi* R diperoleh hasil seperti pada tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Rugi-rugi fresnel akibat sudut ($\theta = 1,5^\circ$)

θ ($^\circ$)	a (μm)	D (μm)	β (μm)	R (dB)	T (dB)	$Loss$ (dB)
1,5	0,1	0,0997	0,1363	0,0721	0,9279	0,3248
1,5	0,5	0,4987	0,6813	0,0718	0,9282	0,3237
1,5	1,0	0,9975	1,3626	0,0712	0,9288	0,3206
1,5	1,5	1,4962	2,0439	0,0704	0,9269	0,3169
1,5	2,0	1,9950	2,7252	0,0698	0,9302	0,3144

Tabel 6. Rugi-rugi fresnel akibat sudut ($\theta = 2,1^\circ$)

θ ($^\circ$)	a (μm)	D (μm)	β (μm)	R (dB)	T (dB)	$Loss$ (dB)
2,1	0,1	0,0863	0,1179	0,0721	0,9279	0,3249
2,1	0,5	0,4316	0,5896	0,0719	0,9281	0,3240
2,1	1,0	0,8632	1,1791	0,0714	0,9286	0,3215
2,1	1,5	1,2948	1,7687	0,0707	0,9293	0,3184
2,1	2,0	1,7264	2,3583	0,0701	0,9299	0,3156

Dari hasil analisa pada tabel 5 & 6, untuk kasus yang terjadi pada gambar 10 & 11 diperoleh rata-rata kerugian Fresnel (*Fresnell Loss*) nya masing-masing adalah 0,3201 dB dan 0,3208 dB. Dan pada tabel 7 diperlihatkan hasil perhitungan kontribusi kerugian pada sambungan akibat adanya pergeseran lateral dan sudut (*tilt angle*), dengan menggunakan formula yang dikembangkan oleh *D.Marcuse*^[6].

Untuk kasus pada gambar 10 & 11, dimana hasil penelitian pada sambungan menunjukkan adanya pergeseran sudut ($\theta = 1,5^\circ$ & $\theta = 2,1^\circ$), maka berdasarkan formula *D.Marcuse* daya yang ditransmisikan pada titik sambung tersebut akan berkurang hingga 0,691 dB untuk $\theta = 2,1^\circ$ dan 0,352 dB untuk $\theta = 1,5^\circ$.

Bila dihubungkan dengan kerugian fresnel seperti analisa diatas, dapat dikatakan bahwa akibat penyambungan yang tidak sempurna dimana pada sambungan terdapat pergeseran sudut sebesar $\theta = 2,1^\circ$, hasil perhitungan pada analisa fresnel di peroleh kerugian fresnel (*fresnell loss*) pada sambungan tersebut adalah 0,3208 dB dan terjadi kehilangan daya yang ditransmisikan sebesar 0,691 dB. Disini terlihat bahwa untuk $\theta = 2,1^\circ$ tidak ada daya yang tersisa yang dapat diteruskan ke serat beikutnya. Sedangkan untuk $\theta = 1,5^\circ$ kerugian fresnel yang terjadi adalah 0,3201 dB dengan kehilangan daya yang ditransmisikan sebesar 0,352 dB, maka daya yang tersisa sebesar 0,3279 dB akan diteruskan kembali ke serat optik berikutnya.

Tabel 7. Perhitungan rugi-rugi sambungan

No	n	d (μm)	λ (μm)	w (μm)	θ ($^\circ$)	Pergeseran Lateral (dB)	Terdapat Sudut (dB)
4,10	1	1,3	0,0	4,5	2,1	0,000	0,691
4,12	1	1,3	0,0	4,5	1,5	0,000	0,352
1	1	1,3	0,0	4,5	1,0	0,000	0,157
2	1	1,3	0,1	4,5	0,9	0,002	0,126
3	1	1,3	0,2	4,5	0,8	0,009	0,101
4	1	1,3	0,3	4,5	0,7	0,019	0,074
5	1	1,3	0,4	4,5	0,6	0,034	0,057
6	1	1,3	0,5	4,5	0,5	0,054	0,039
7	1	1,3	0,6	4,5	0,4	0,077	0,025
8	1	1,3	0,7	4,5	0,3	0,106	0,014
9	1	1,3	0,8	4,5	0,2	0,137	0,006
10	1	1,3	0,9	4,5	0,1	0,174	0,001
11	1	1,3	1,0	4,5	0,0	0,214	0,000

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Hasil yang ditemukan pada penelitian ini adalah ditemukannya cacat pada sambungan, yaitu terdapat sudut diantara permukaan sambungan meskipun memiliki nilai perkiraan kerugian akibat sambungan yang rendah. Hal ini dapat terjadi akibat ketidaksempurnaan penyambungan dalam rentang waktu yang telah ditentukan, dan untuk nilai kerugiannya yang rendah diperoleh dari tersambungannya separuh *mode filed diameter (MFD)* serat.

Adanya sudut pada sambungan akan menimbulkan perubahan phase pada cahaya yang dipancarkan, yang mengakibatkan kehilangan sebagian energi cahaya pada titik sambungan tersebut.

Metode fusi yang dilakukan pada penelitian ini memberikan hasil perkiraan kerugian sambungan terendah yaitu dengan rentang nilai 0,01 – 0,02 dB tanpa cacat, dengan model grafis *polynomial* hasil penelitian memberikan gambaran kesamaan bentuk *parametrik* grafis pada titik sambungan.

4.2 Saran

Kesempurnaan penyambungan serat baik dari nilai maupun performannya akan sangat menentukan besar kecilnya kerugian sambungan yang timbul pada saluran komunikasi serat optik. Oleh karenanya diperlukan kemampuan analisa kualitatif dan kuantitatif bagi seorang teknisi untuk dapat melakukan penyambungan serat optik dengan metode fusi.

Analisa kualitatif dimaksudkan agar penyambungan dilakukan dengan benar dan memberikan hasil sempurna yaitu dengan nilai perkiraan kerugian yang rendah sesuai dengan rentang waktu penyambungan yang telah ditentukan tanpa cacat.

Pelatihan teknik penyambungan metode fusi disertai dengan teori pendukung yang sesuai dengan subyek pekerjaan perlu dilakukan secara berkelanjutan untuk mengetahui fenomena-fenomena lain yang timbul akibat proses penyambungan.

Dan analisa kuantitatif dimaksudkan agar serat optik yang tersedia dipergunakan se-efisien mungkin untuk menghindari pemborosan dan biaya tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ajay Kumar. *Power Budget for Single mode Optical Fiber*. International Journal of Soft Computing and Engineering (ISJCE) ISSN : 2231-2307 , Volume-3, Issue-6, January 2014.
- [2] Arthur H. Hatog and Martin P. Gold. *On the Theory of Backscattering in Single-Mode Optical Fibers*. Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 2, April 1984
- [3] Allen H. Cherin. *An Introduction to Optical Fibers*. McGraw-Hill International Book Company, Edisi ke dua , Tahun 1985.
- [4] Coolen. John and Dennis Roddy. *Electronic Communication*. Third Edition, Reston Pbl. Com. inc, 1984.
- [5] Charles K. Kao. *Optical Fiber System : Technology , Design And Application*. McGraw-Hill International Edition. Edisi ke dua , Tahun 1987.
- [6] D. Marcuse. *Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices*. The Bell System Technical Journal Vol 56 , No 5 , May-June 1977. Printed in USA.
- [7] Divisi Riset Teknologi. *Telecommunication System Standard Optical Acces Network Based On Passive Optical Network Technology*, 1997. Kantor Perusahaan PT Telkom.
- [8] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. *Low-Loss Splice in Microstructured Fibre Using a Conventional Fusion Splicer*. Rua Doutor Roberto Frias s/n 4200-465 Porto, Portugal , Received 10 Januari 2005
- [9] Freeman. Roger L. *Telecommunication handbook*. Fourth Edition, John Wiley And Sons inc, 1998.
- [10] J. Laverriere, G. Liataert, R. Taws, S. Wolszczak. *Reference Guide to Fibe Optic Testing*. Second Edition , Volume 1. Author , JDSU 34 rue nacker 42000 Saint-Etienne France.
- [11] Limin Xiao, Wei Jin. *Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Conventioanal Single-Mode Fibers: Microhole Collapse Effect*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 11, November 2007
- [12] OFS Furukawa. *Fusion Splicing Single mode Fibers*. Superior Essex Inc, Copyright 2007.

- [13] Samira Farsinezhad , Faramuze E.Seraji. *Analysis of Fresnel Loss at Splice Joint Between Single-Mode Fibers and Photonic Crystal Fiber*. International Journal of Optics and Applications 2012, 2(1): 17-21 DOI: 10.5923/j.optics.20120201.02