

Stress Analysis of Mach-Zehnder Interferometer fiber optic Sensor Using Finite Element Method

Ojo Kurdi^{1,2*}, Rusnaldy^{1,2}, Susilo Adi Widyanto¹, Ian Yulianti³ dan Amirul Firdaus A.¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²National Center for Sustainable Transportation Technology, Indonesia

³Jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang

*Corresponding author: ojokurdi@ft.undip.ac.id

Abstract. Plastic optical fiber (POF) with Mach-Zehnder interferometer (MZI) structure is interesting to be applied as temperature sensor due to its low cost and simple fabrication process as well as simple detection process. However, due to thermal expansion and stress as the effect from temperature, it is important to optimize the MZI dimension which are length and taper angle to obtain a reliable sensor. This work presents stress analysis in POF MZI which subject to various temperature values using finite element method by employing commercial software ABAQUS. The angle and length was varied for three values which are 20°, 25°, 30° and 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm, respectively. The results showed that all models were safe when they were loaded with temperature of less than 160°C. The optimum angle and length for the model were 30° and 0.5mm, respectively, with maximum load of 130°C. The maximum von Misses stress and strain were 48.08 mPa and 0.015, respectively.

Abstrak. Serat optik plastik (*plastic optical fiber*, POF) dengan struktur Mach-Zehnder interferometer (MZI) menarik untuk dikembangkan sebagai sensor suhu karena proses fabrikasi yang mudah, proses deteksi yang sederhana dan biaya yang murah. Namun, mengingat adanya pemuaian dan tegangan akibat kenaikan suhu, optimasi dimensi MZI berupa panjang dan sudut lekukan perlu dilakukan untuk mendapatkan sensor yang handal. Dalam makalah ini disajikan analisa tegangan dan regangan pada POF MZI yang dibebani oleh perubahan suhu menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak komersial ABAQUS. POF MZI yang digunakan dalam simulasi terdiri dari berbagai model dengan variasi sudut sebesar 20°, 25°, dan 30° serta panjang taper sebesar 0.5 mm, 0.75 mm dan 1 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap model POF MZI berada dalam keadaan aman ketika dibebani dengan perubahan suhu yang tidak melebihi titik leleh PMMA (160°C). Model yang paling optimum adalah model dengan sudut taper 30°, panjang 0,5 mm dan beban suhu maksimal 130 °C. Tegangan von Misses maksimum adalah sebesar 48,08 mPa dan nilai regangan 0,015.

Kata kunci: serat optik plastic, suhu, tegangan, regangan.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved.

Pendahuluan

Serat optik polymer (*plastic optical fiber*- POF) merupakan serat optik berbahan dasar polimer yang dewasa ini banyak digunakan untuk berbagai aplikasi sensor optik, seperti biosensor [1][2], sensor retakan [3], sensor kimia [4], indeks bias [5] dan suhu [6]. Dibandingkan dengan serat optik silica yang merupakan serat optik yang pertama kali dikembangkan, POF menarik untuk diaplikasikan sebagai sensor karena sifatnya yang lebih ulet, tidak mudah patah dan diameter yang lebih besar [7]. Dalam aplikasinya sebagai sensor, POF dapat berfungsi sebagai transduser yang berperan dalam mendeteksi atau mengukur perubahan

besaran yang akan diukur (sensor optik intrinsic) atau hanya berfungsi sebagai media penghantar cahaya ke transduser (sensor optik ekstrinsik). Untuk memfungsikan POF sebagai sensor optik intrinsic, POF perlu dimodifikasi sehingga POF peka terhadap factor yang akan diukur. Modifikasi POF dapat berupa penggantian material selubung ataupun modifikasi struktur geometri POF seperti bentuk D [8] dan fiber berbentuk U [9].

Modifikasi struktur POF dapat dilakukan dengan memberikan berbagai perlakuan seperti pemanasan, memberi bahan sambungan, tekanan atau lekukan. Salah satu modifikasi struktur POF yang menarik dikembangkan

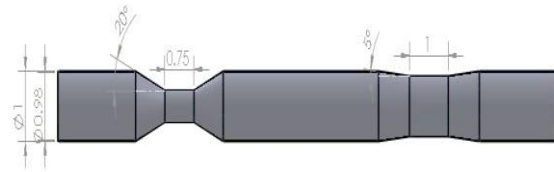
adalah struktur Mach Zender Interferometer (MZI) intrinsik karena struktur ini memungkinkan dilakukannya pendeteksian berbasis panjang gelombang, sehingga memiliki tingkat ketelitian yang tinggi. Selain itu, proses fabrikasi MZI cukup sederhana dan murah serta proses deteksi yang sederhana. Struktur MZI pada POF dibangun dengan cara membentuk dua buah lekukan (taper) yang dipisahkan pada jarak tertentu [10]. Pada lekukan pertama, cahaya yang tadinya menjalar di dalam inti POF, sebagian dibiaskan dan kemudian menjalar di dalam bagian selubung. Kemudian, pada lekukan kedua, cahaya yang menjalar di dalam selubung bergabung kembali dengan cahaya yang menjalar di dalam inti sehingga terjadi interferensi.

Sensor dengan konfigurasi MZI yang terbuat dari POF ini telah digunakan dalam aplikasi sensor indeks bias [10]. Mengingat polimer merupakan material yang memiliki nilai koefisien threooptic yang tinggi [11], maka selain penggunaan MZI POF untuk aplikasi- aplikasi diatas, MZI POF juga berpotensi untuk digunakan sebagai sensor suhu. Namun, peningkatan suhu juga akan menyebabkan terjadinya pemuaihan yang selanjutnya akan menimbulkan tegangan pada POF. Dengan adanya lekukan, maka kekuatan mekanis POF akan berkurang. Oleh karena itu, diperlukan optimasi panjang dan sudut lekukan pada struktur MZI agar struktur ini handal jika digunakan sebagai sensor suhu. Maka, pada penelitian ini dilakukan analisis tegangan pada POF dengan struktur MZI pada beberapa nilai suhu dengan beberapa sudut lekukan. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga yang diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS.

Simulasi Metode Elemen Hingga

Model MZI fiber optic

Model FPO MZI dibuat dengan perangkat lunak Solidworks. Salah satu model ditunjukkan pada Gambar 1. Model ini memiliki sudut taper 25 dan Panjang bagian landainya 0,75 mm.



Gambar 1. Model POF MZI

Properti Material

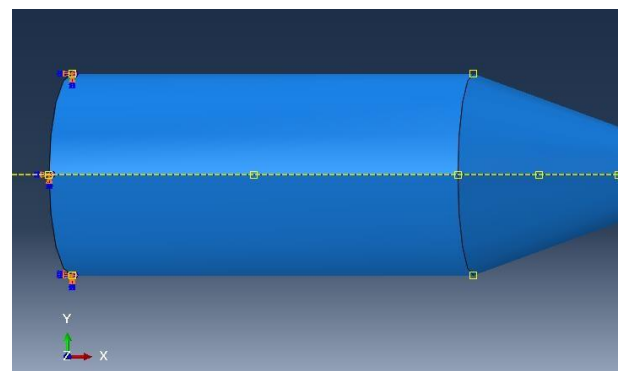
Material yang digunakan adalah PMMA (akrilik), sifat sifat mekaniknya ditampilkan pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Sifat sifat mekanik akrilik

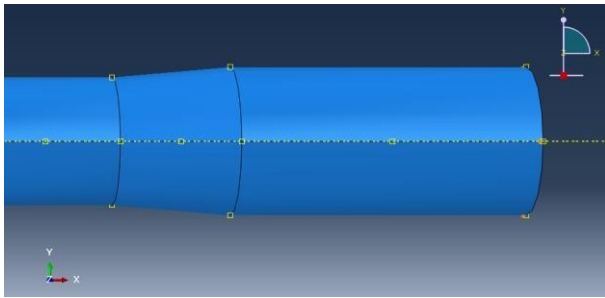
Density	$1,18 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
Ultimate Tensile Strength	98 MPa
Tensile Yield Strength	64,8 MPa
Modulus of Elasticity	27120 MPa
Poisson's Ratio	0,37
Koefisien Ekspansi Termal	$7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas diperlukan agar simulasi dapat berjalan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Dalam penelitian ini kondisi batas diletakkan di kedua ujung dari Pof MZI dan jenisnya adalah sambungan jepit, di mana rotasi dan perpindahan tranlasi tidak diijinkan pada kedua ujung tersebut. Hal ini berdasarkan kondisi lapangan dari POF MZI yang terletak di tengah tengah fiber optik dan diasumsikan bagian yang mengalami penirusan dipotoing pada kedua ujung yang disitu diletakan kondisi batas. Letak kondisi batas pada model ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

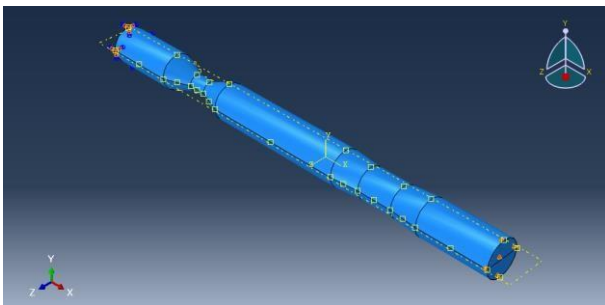


Gambar 2. Kondisi batas 1



Gambar 3. Kondisi batas 2

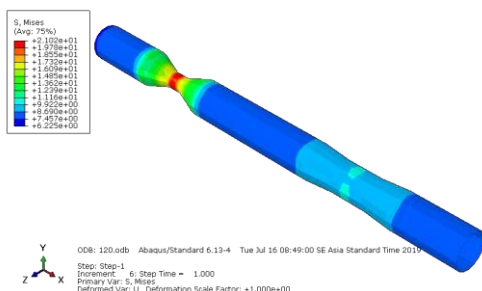
Pembebanan yang diberikan kepada model adalah berupa beberapa nilai perubahan temperature, yaitu sebesar 110 ° C, 120 ° C dan 130 ° C. Nilai perubahan temperature ini didasarkan pada nilai tempertaur leleh dari material sebesar 160 dengan tempertaur ruangan sebesar 25⁰ C. Pembebanan pada model ditunjukkan pada Gambar 4.



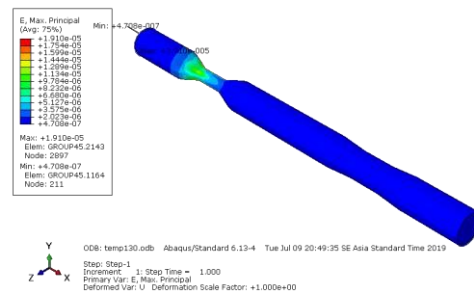
Gambar 4. Pembebanan berupa perubahan temperatur

Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi berupa tegangan dan regangan ditampilkan pada gambar gambar dibawah ini. Gambar 5 dan Gambar 6 masing masing menunjukkan nilai von Mises stress dan regangan pada *cladding* dengan panjang *tapered* 0,5 dan beban perubahan temperatur 110 ° C, sudut taper 20⁰. pada *cladding* dengan panjang *tapered* 0,5 dan beban perubahan temperatur 110 ° C, sudut taper 20⁰



Gambar 5. Von Mises Stress pada *cladding* dengan panjang *tapered* 0,5 dan beban perubahan temperatur 110 ° C, sudut taper 20⁰.



Gambar 6. Regangan pada *cladding* dengan panjang *tapered* 0,5 dan beban perubahan temperatur 110 ° C, sudut taper 20⁰.

Berdasarkan data dari kedua Gambar diatas terlihat bahwa tegangan maksimum sebesar 21 MPa dan regangan sebesar 1,9 x 10⁻⁵. Hasil simulasi berupa tegangan von Mises kemudian dihitung factor keamanannya untuk mendapatkan model yang terbaik yang memiliki factor keamanan yang paling tinggi. Hasil perhitungan factor keamanannya ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Faktor keamanan berbagai model POF MZI

Panjang (mm)	Beban gradien temperatur (°C)	Tegangan Von Mises (MPa)	Faktor Keamanan		
			Sudut 20°	Sudut 25°	Sudut 30°
0,5	110	25.59	3.08	2.53	1.59
0,5	120	27.91	2.83	2.32	1.46
0,5	130	30.23	2.61	2.14	1.35
0,75	110	24.47	3.31	2.65	1.99
0,75	120	26.69	3.03	2.43	1.83
0,75	130	28.9	2.80	2.24	1.69
1	110	23.27	3.35	2.78	2.12
1	120	25.37	3.07	2.55	1.94
1	130	27.47	2.83	2.36	1.80

Berdasarkan data dalam Tabel 2, terlihat bahwa model POF MZI dengan panjang taper sebesar 1 mm, sudut taper 20⁰, dan beban perubahan suhu sebesar 110⁰ memiliki nilai factor keamanan yang paling tinggi, yaitu sebesar 3,35.

Kesimpulan

Analisa tegangan pada serat optik POF MZI telah dilaksanakan dengan menggunakan

perangkat lunak komersial Abaqus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semua model aman ketika dibebani oleh perubahan temperature yang tidak melebihi temperature leleh material akrilik. Model yang paling aman adalah model yang paling aman adalah panjang taper sebesar 1 mm, sudut taper 20° .

Penghargaan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro dan NCSTT, SHERA yang telah mendanai penelitian ini.

Referensi

- [1] D. M. C. Rodrigues, R. N. Lopes, M. A. R. Franco, and M. M. Werneck, "Sensitivity Analysis of Different Shapes of a Plastic Optical Fiber-Based Immunosensor for Escherichia coli: Simulation and Experimental Results," pp. 1–16, 2017.
- [2] N. Cennamo *et al.*, "An innovative plastic optical fiber-based biosensor for new bio/applications. The case of celiac disease," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 176, pp. 1008–1014, 2013.
- [3] K. S. C. Kuang, "Distributed damage detection of offshore steel structures using plastic optical fibre sensors," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 229, pp. 59–67, 2015.
- [4] A. Kulkarni, J.-H. Lee, J.-D. Nam, and T. Kim, "Thin film-coated plastic optical fiber probe for aerosol chemical sensing applications," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 150, no. 1, pp. 154–159, 2010.
- [5] Y. Al-Qazwini, A. S. M. Noor, Z. Al-Qazwini, M. H. Yaacob, S. W. Harun, and M. A. Mahdi, "Refractive index sensor based on SPR in symmetrically etched plastic optical fibers," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 246, pp. 163–169, 2016.
- [6] A. T. Moraleda, C. V. García, J. Z. Zaballa, and J. Arrue, "A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend," *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 10, pp. 13076–13089, Sep. 2013.
- [7] C. A. F. Marques, D. J. Webb, and P. Andre, "Polymer optical fiber sensors in human life safety," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 36, pp. 144–154, 2017.
- [8] Y. Ying, G. Si, F. Luan, K. Xu, Y. Qi, and H. Li, "Recent research progress of optical fiber sensors based on D-shaped structure," *Opt. Laser Technol.*, vol. 90, pp. 149–157, 2017.
- [9] A. Gowri and V. V. R. Sai, "Development of LSPR based U-bent plastic optical fiber sensors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 230, pp. 536–543, Jul. 2016.
- [10] A. A. Jasim *et al.*, "Refractive index and strain sensing using inline Mach-Zehnder interferometer comprising perfluorinated graded-index plastic optical fiber," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 219, pp. 94–99, 2014.
- [11] Y. Luo, B. Yan, Q. Zhang, G.-D. Peng, J. Wen, and J. Zhang, "Fabrication of Polymer Optical Fibre (POF) Gratings," *Sensors*, vol. 17, no. 3, p. 511, 2017.