

**Simulasi Waveguide  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  untuk Mengurangi Loss Daya dengan Python**

**Galih Ridho Utomo\*, Fanti, Upik Nurbaiti**

Prodi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang,  
Kampus UNNES Sekaran Gunungpati Semarang, Indonesia 50229

E-mail: [g4libru@students.unnes.ac.id](mailto:g4libru@students.unnes.ac.id)

Diterima 7 Mei 2024 Disetujui 07 Maret 2025

**Abstrak**

*Waveguide* adalah komponen penting dalam sensor optik yang memerlukan material dengan karakteristik indeks bias yang tepat untuk menghasilkan akurasi tinggi dan sensitivitas yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan *loss* daya pada material  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  dalam *waveguide*, serta menganalisis faktor penyebab tingginya *loss* daya dan cara mengatasinya. Riset ini dilakukan dengan tahap analisis permasalahan dan tahap pemrograman komputer. Hasil riset menunjukkan bahwa menunjukkan bahwa *waveguide loss* berbeda tergantung pada material dan nilai sudut alpha yang digunakan: (a) Pada nilai alpha 0.05, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 1.11%, sedangkan untuk material  $\text{TiO}_2$  sebesar 2.90%. (b) Pada nilai alpha 0.10, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 1.16% dan untuk  $\text{TiO}_2$  sebesar 4.35%. (c) Pada nilai alpha 0.15, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 2.22% dan untuk  $\text{TiO}_2$  sebesar 5.80%. (d) Pada nilai alpha 0.20, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 2.78% dan untuk  $\text{TiO}_2$  sebesar 7.25%. (e) Pada nilai alpha 0.25, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 3.33% dan untuk  $\text{TiO}_2$  sebesar 8.70%. (f) Pada nilai alpha 0.30, *loss* daya untuk material  $\text{SiO}_2$  sebesar 3.89% dan untuk  $\text{TiO}_2$  sebesar 10.15%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa untuk meminimalkan kehilangan daya, sudut alpha harus dijaga sekecil mungkin dibandingkan dengan sudut kritis. Dengan demikian, gelombang cahaya yang dipantulkan akan tetap berada dalam jalur propagasinya dan tidak keluar dari *waveguide*-nya.

Kata kunci: python, simulasi,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , *waveguide*

**Abstract**

*Waveguides are essential components in optical sensors, enabling high accuracy and sensitivity through materials with appropriate refractive index characteristics. This study aims to compare the power loss in waveguides made from  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ , while also identifying the factors contributing to high power loss and proposing solutions to mitigate it. The research follows two stages: problem analysis and computer-based simulation. The results show that waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  1.11% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  2.90% new value of alpha 0.05; waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  1.16% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  4.35%; waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  2.22% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  5.80% new value of alpha 0.15; new value of alpha 0.10; waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  2.78% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  7.25% new value of alpha 0.20; waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  3.33% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  8.70% new value of alpha 0.25; waveguide loss use material  $\text{SiO}_2$  3.89% waveguide loss use material  $\text{TiO}_2$  10.15% new value of alpha 0.30. The conclusion is to reduce power loss by reducing the alpha angle compared to the critical angle so that the reflected light waves do not come out on their path.*

Keywords: python, simulation,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , *waveguide*

**How to cite:**

Utomo, G.R., Fanti, F., Nurbaiti, U. (2025). Simulasi waveguide  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  untuk mengurangi loss daya dengan python. *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, 48(1), 22-29.

**PENDAHULUAN**

Simulasi adalah sebuah pemodelan secara sederhana yang dirancang untuk mengetahui dan memahami suatu permasalahan yang akan diselesaikan (Wang *et al.*, 2023). Simulasi dapat dikatakan

sebagai persiapan sebelum dilakukan riset. Sebuah simulasi dapat dilakukan dengan cara pemodelan dengan menggunakan komputasi dan pemodelan dengan menggunakan analitis.

Untuk memodelkan suatu permasalahan diperlukan simulasi salah satunya yaitu pemodelan menggunakan analitik. Pemodelan menggunakan analitik mempunyai kelebihan yaitu akurasi yang tinggi, pemahaman terhadap permasalahan yang lebih baik, efisiensi waktu dalam kasus yang sederhana. Selain kelebihan yang didapat dari pemodelan secara analitik, pemodelan ini juga mempunyai kekurangan yaitu keterbatasan model (Bi *et al.*, 2023), ketergantungan pada asumsi persamaan matematis (Liu *et al.*, 2023), kesulitan dalam menganalisis permasalahan yang kompleks dan memerlukan data yang besar (Su *et al.*, 2023). Untuk mengatasi kekurangan pemodelan analitik diperlukan pemodelan secara komputasi. Pemodelan secara komputasi dapat mengatasi kekurangan yaitu fleksibilitas (Koshakji *et al.*, 2023) dalam mengatasi permasalahan kompleks, penghitungan data dalam jumlah yang besar dengan cepat (Kejzlar *et al.*, 2023), dapat mengatasi dan memberi variasi dan kompleksitas data yang lebih besar (Gonen *et al.*, 2023). Pemodelan secara komputasi diperlukan, untuk mengetahui dan mengurangi kesalahan yang fatal sesudah melakukan eksperimen seperti penggunaan material inti dalam sebuah riset dan tidak dilakukan eksperimen seperti pengujian nuklir. Pada penggunaan material inti dalam sebuah riset seperti penggunaan material inti untuk membuat sensor, diperlukan mengetahui indeks bias yang tepat dan mengetahui karakterisasi material tersebut.

Sebagai peranan teknologi modern, sensor fiber optik (FO) menjadi hal yang penting terutama dalam kelancaran berkomunikasi di bidang telekomunikasi, hingga aplikasi bidang kesehatan menggunakan biosensor. Salah satu sensor FO yang sedang dikembangkan yaitu pandu gelombang (*waveguide*). Puja *et al.* (2019) mengatakan *waveguide* merupakan saluran tunggal yang berfungsi untuk menghantarkan gelombang elektromagnetik (microwave) dengan frekuensi 300 MHz-300 GHz. Komponen *waveguide* terdiri dari cladding dan material inti (*core*) dengan mempunyai prinsip bahwa lapisan *cladding* harus mempunyai indeks bias yang lebih tinggi dari indeks bias *core*. Pada umumnya material yang sering digunakan sebagai *core* yaitu silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) disebabkan mudah dalam proses fabrikasi.

Material  $\text{SiO}_2$  merupakan material yang sering dijumpai pada pembuatan inti material *waveguide* (Hitaishi *et al.*, 2023, seperti *photoelectric biosensor* (Liu *et al.*, 2023; Tang, 2023), *carbon dioxide gas sensors* (Song *et al.*, 2023) dan *optical turbidity biosensors* (Toma *et al.*, 2023). Riset yang dilakukan tersebut tentunya telah melewati serangkaian prosedur seperti mengetahui *refractive index air*, diameter *core*, panjang *waveguide*,  $\lambda$  yang digunakan, *absorbsiption coefficient* material, dan *refractive index* material yang digunakan. Serangkaian prosedur tersebut dapat disimulasikan untuk mendapatkan *loss* daya seminimal mungkin dengan mengetahui penyebab utama *loss* daya yang didapat. *Loss* daya adalah parameter dari *waveguide* yang memancarkan  $\lambda 1$  sebagai input dan  $\lambda 2$  sebagai output, dengan input yang dimasukan sama dengan output yang dikeluarkan. Pada riset ini juga dilakukan variasi material simulasi menggunakan  $\text{TiO}_2$  (Abdulkareem *et al.*, 2023). Variasi dilakukan untuk mengetahui indeks bias dari setiap material yang digunakan. Untuk mengetahui indeks bias pada material diperlukan penyusunan algoritma yang tepat, yaitu Python. Python merupakan pemrograman bahasa tinggi yang mudah dipahami, dan banyak digunakan untuk mengembangkan module material.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan loss daya pada material  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  dalam *waveguide*, serta menganalisis faktor penyebab tingginya loss daya dan cara mengatasinya. Hasil penelitian ini memberikan simulasi secara ilmiah penyebab tingginya loss daya pada *waveguide* menggunakan material  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ .

## METODE

### Tahapan Analisis Permasalahan

Analisis permasalahan pada riset dirancang untuk mengetahui *loss* daya pada material  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ . Pada riset ini menggunakan analisis Leyman's menggunakan pemrograman Python module Opticalmaterials.py. Pada module tersebut dilakukan perhitungan molekul dan komposisi senyawa. Tahapan perhitungan molekul dan komposisi senyawa dilakukan dengan pemodelan diantara memisahkan molekul dan komposisi yang digunakan. Pada tahap ini didapat Si dan O untuk molekul  $\text{SiO}_2$  dan komposisi senyawa  $\text{SiO}_2$ , dan Ti dan O untuk molekul  $\text{TiO}_2$ . Setelah dilakukan perhitungan didapat nilai yang ditunjukan pada Tabel 1. Nilai dari molekul  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{SiO}_2$  diukur dalam satuan Atomic Mass Units (amu). Untuk menghitung amu dapat dituliskan dalam persamaan 1.

$$1 \text{ amu} = 1.66054 \times 10^{-27} \quad (1)$$

**Tabel 1.** Hasil output analisis Leyman's

Atomic		Melting Point	Weight of Composition
Si	O <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> 15,994 amu	8
28,0855 amu	14		

Atomic		Melting Point	Weight of Composition
Ti	O <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> 15,994 amu	8
47,867 amu	22		

Untuk menghitung amu dapat ditulis kedalam Tabel 3.1 didapat dari penulisan kode program komputer menggunakan pemrograman Python. Sebelum membuat kode program terlebih dahulu membuat algoritma, seperti ditunjukkan pada Algoritma 1 (Tabel 2).

**Tabel 2.** Algoritma 1 Pseudocode

---

Input:  
Import library pymatgen.core as pg  
Mat = User input for Material Element

Proses:  
Assign 'fe' to pg.Element(mat) to fetch element details  
Print atomic mass and atomic number of the element using fe.atomic mass and fe.Z respectively  
Print the melting point of the element using fe.melting\_point  
Assign 'cmps' to pg.Composition("TiO<sub>2</sub>") to fetch composition details  
Print the weight of the composition using cmps.weight  
Access the number of O<sub>2</sub> atoms present in the composition and print it using cmps["O<sub>2</sub>"]

Output:  
Print the results of the processes mentioned above

---

**Tahapan Pemrograman Komputer**

Pada riset ini digunakan bahasa pemrograman Python. Sebelum ditulis kode program menggunakan pemrograman Python, terlebih dahulu dilakukan penulisan algoritma seperti ditunjukkan pada Algoritma 2 (Tabel 3). Setelah penulisan algoritma kemudian dilakukan penulisan kode program seperti ditunjukkan pada Program 1. Pada tahap ini didapat output dari program yaitu pastikan pekerjaan dapat diulang sesuai dengan rincian yang diberikan.

**Tabel 3.** Algoritma 2 Pseudocode

---

Input:  
Import necessary modules: numpy, matplotlib, and opticalmaterials

Proses:  
Define a class SiO<sub>2</sub>Extended that extends the SiO<sub>2</sub> class from the opticalmaterials module  
Define a function nDer2 that takes a wavelength as input and returns the second derivative of the refractive index with respect to wavelength at that point  
Define a function eps that takes a wavelength as input and returns the complex dielectric constant of SiO<sub>2</sub> at that wavelength  
Define a class TiO<sub>2</sub>Extended that extends the TiO<sub>2</sub> class from the opticalmaterials module  
Define a constructor that takes an axis as input and initializes the nValues dictionary with a set of wavelength-n pairs  
Define a function nDer2 that takes a wavelength as input and returns the second derivative of the refractive index with respect to wavelength at that point  
Define a function eps that takes a wavelength as input and returns the complex dielectric constant of TiO<sub>2</sub> at that wavelength  
Define the properties of the waveguide and water

---

---

Get the refractive index of  $\text{SiO}_2$  at 532 nm using the `SiO2Extended` class and store it in `ncore`  
 $\text{SiO}_2$   
Get the refractive index of  $\text{TiO}_2$  at 532 nm using the `TiO2Extended` class and store it in  
`ncoreTiO2`  
Get the refractive index of water using the `Air` class from the `opticalmaterials` module and store  
it in `nwater`  
Set the diameter of the core to 10 micrometers and store it in `dcore`  
Set the length of the waveguide to 1 and store it in `length`  
Set the wavelength of the light used to 532 nm and store it in `wavelength`  
Set the absorption coefficient of the core material to 0.1 and store it in  $\alpha$   
Set the  $\delta$  of the water to 10 micrometers and store it in `turbidity`  
Calculate the scattering coefficient of the water using the following formula:  
Set  $k_{ext}$  to  $4 \times \pi \times \frac{n_{water}}{\lambda}$   
Set  $k_{sca}$  to  $(2 \times \pi / \lambda)^2 \times \delta \times (n_{water}^2 - 1)$   
Set  $k_{abs}$  to  $k_{ext}^2 / (4 \times \pi) \times \alpha$   
Set  $k_{eff}$  to  $k_{abs} + k_{sca}$   
Output:  
Print the value of  $k_{eff}$

---

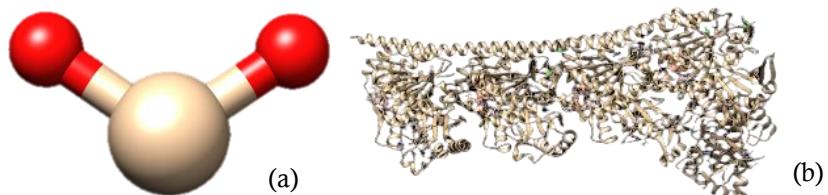
#### **Tahapan Analisis Material menggunakan Aplikasi Chimera 1.16**

Fisika material merupakan cabang dari fisika yang terdiri material untuk dikarakterisasi dalam penggunaan konvensional dan industri. Pada kehidupan, tidak terlepas dari penggunaan material dalam memenuhi kebutuhan sehari-hari seperti aktivitas industri. Pada riset ini digunakan material  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$ . Pada material tersebut memiliki indeks yang tinggi dibandingkan dengan *cladding*. Pada konsep fisika material yang digunakan meliputi indeks bias, koefisiensi disperse, dan rendaman dalam material tersebut.

Indeks bias adalah suatu ukuran yang digunakan pada kecepatan cahaya dalam material. Koefisiensi disperse adalah ukuran perubahan indeks bias dengan perubahan panjang gelombang melalui medium, dan akan mempengaruhi efisiensi transmisi cahaya dalam *waveguide*. Pada riset ini mengoptimalkan dan mengetahui parameter yang menjadi penyebab terjadinya *loss* daya pada *waveguide*.

Pada bagian ini dilakukan tahap fetching  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{TiO}_2$  menggunakan aplikasi Chimera 1.16 yaitu:

1. Membuka aplikasi Chimera 1.16 kemudian klik File pilih menu Fetch by ID
2. Pilih PDB kemudian ketik 2V1W klik Fetch, sehingga akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 1a.



**Gambar 1.** Fetch  $\text{SiO}_2$ (a) dan  $\text{TiO}_2$  (b)

3. Close section kemudian ulangi langkah 2 dan akan menunjukkan seperti pada Gambar 1b.

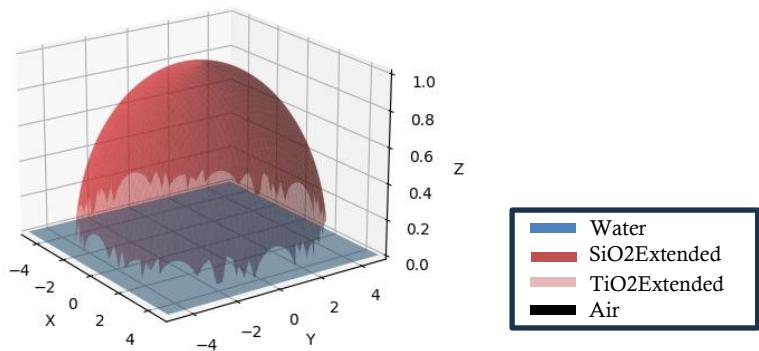
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Perbandingan Loss Daya pada Material $\text{SiO}_2$ dan $\text{TiO}_2$**

Pada Gambar 2 menunjukkan linearitas dari *loss* yang didapat baik secara  $\text{SiO}_2$  maupun  $\text{TiO}_2$ . Hal ini dipengaruhi perbedaan antara sudut kritis dan sudut alpha pada saat disimulasikan penembakan ke bagian *core* pada *waveguide* tersebut. Untuk melihat sudut kritis dan sudut alpha pada *waveguide* dapat dimodelkan pada Gambar 3.

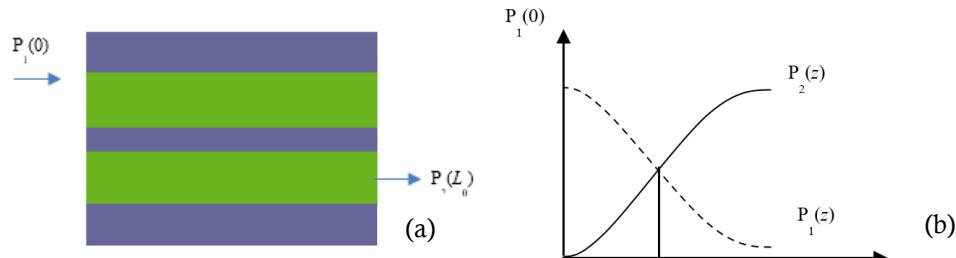


**Gambar 2.** Perbandingan *loss* daya material SiO<sub>2</sub> dan TiO<sub>2</sub>, menunjukkan garis lurus pada sudut alpha 0,10 sampai 0,35



**Gambar 3.** Percobaan dengan sudut alpha 0,10

Pada saat sudut alpha 0,10 maka tidak dapat diamati karena sudah terpolarasi di dalam *core* pada *waveguide*. Semakin kecil sudut alpha maka semakin terpolarisasi, dibuktikan bahwa suatu gelombang cahaya mempunyai energi *directional couplers*. *Directional couplers* adalah kontrol kopling antara dua paralel *waveguide* dalam perangkat optik terintegrasi. Kopling cahaya antara dua mode tunggal paralel *waveguide* planar. *Directional coupler* dapat digambar pada Gambar 4.

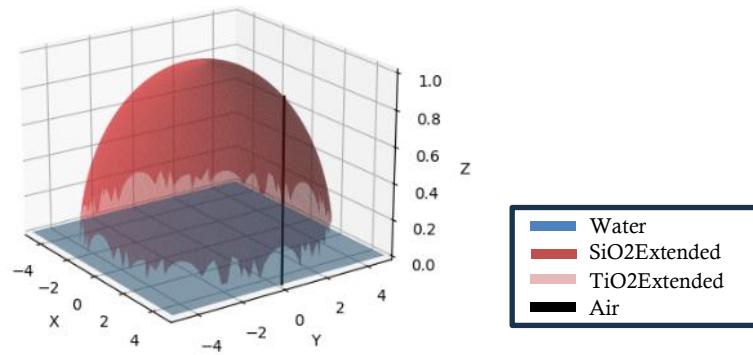


**Gambar 4.** *Diractional cupler* (a) dan *ploting diractional couplers* (b)

Pada Gambar 4a apabila diplot maka seperti ditunjukkan pada Gambar 4b. Dapat diamati bahwa semakin panjang suatu lintasan gelombang maka semakin besar energi yang digunakan untuk melalui lintasan tersebut. Hal ini dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut:

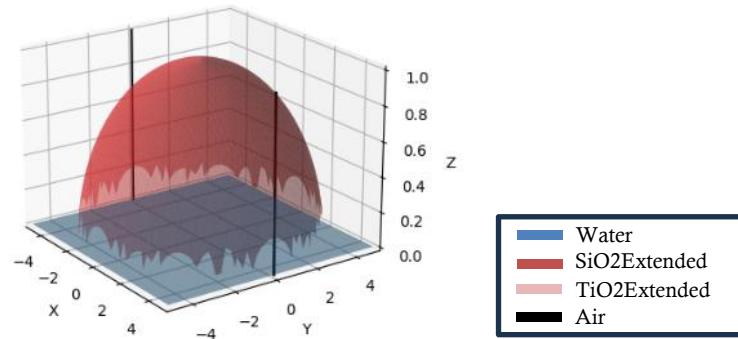
$$\Delta\beta = 0 \Rightarrow \text{transfer distance } L_0 \quad (2)$$

Dimana  $\Delta\beta$  dapat dikontrol oleh tegangan yang diberikan. Untuk pandu gelombang dengan panjang  $L_0$  dan  $\Delta\beta \neq 0$ ,  $T$  adalah sebuah fungsi ketidaksesuaian fasa. Untuk percobaan dengan sudut alpha 0,15 dapat diamati pada Gambar 5.



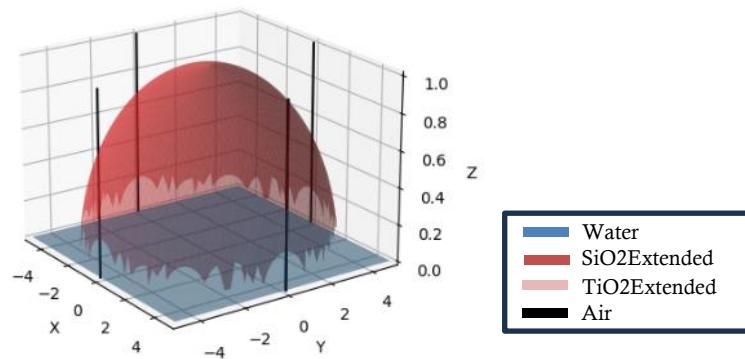
**Gambar 5.** Percobaan dengan sudut alpha 0,15

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa ada garis yang tegak lurus dengan bidang. Garis tegak lurus ini adalah sudut alpha sebesar 0,15. Sudut tersebut tegak lurus karena membawa gelombang magnetic atau gelombang elektromagnetik TM/TE. Suatu gelombang cahaya dapat mempunyai 2 gelombang yaitu gelombang magnetic (TM) dan gelombang elektromagnetik (TE) atau salah satu gelombang tersebut. Jika diamati pada Gambar 3.5 mempunyai hanya mempunyai 1 sudut alpha, sehingga dapat disimpulkan sudut tersebut membawa muatan kedua gelombang TM/TE. Semakin panjang suatu gelombang maka TM/TE dapat diamati dengan jelas seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

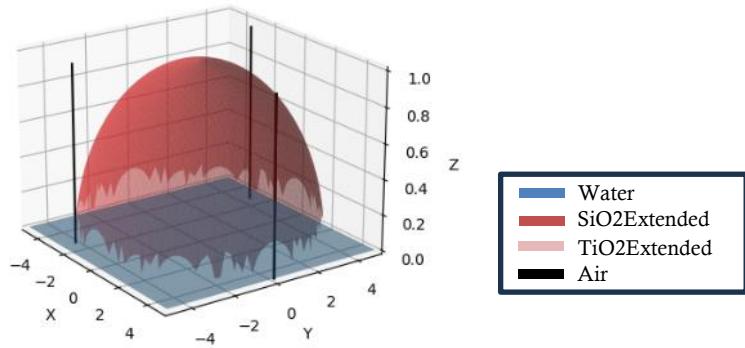


**Gambar 6.** Percobaan dengan sudut alpha 0,20

Pada Gambar 6 menunjukkan ada dua garis yang tegak lurus, garis tersebut mempunyai arah yang saling tolak belakang. Semakin besar sudut alpha maka dapat diamati pada Gambar 7 dan Gambar 8.



**Gambar 7.** Percobaan dengan sudut alpha 0,25



**Gambar 8.** Percobaan dengan sudut alpha 0,30

Berdasarkan semua pengamatan yang dilakukan melalui simulasi, semakin ada kenaikan sudut 0,05 dengan pada sudut yang mempunyai bilangan genap maka jumlah garis yang ditunjukkan sebanyak bilangan ganjil. Hal ini disebabkan pada sudut yang bilangan genap ada salah satu sudut yang mengalami *cut off* ataupun terpolarisasi selama gelombang terpantul-pantul pada *core waveguide*. Selain itu prinsip pemantulan pada *waveguide* adalah prinsip pemantulan sempurna.

#### **Paramater Penyebab Tinggi nya Loss Daya pada Waveguide**

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan melalui simulasi, penyebab tingginya *loss* daya pada *waveguide* adalah parameter sudut alpha atau sudut pantul. Apabila sudut alpha lebih dari sudut kritis maka akan mengalami *loss*. Ini sebanding dengan prinsip bahwa indeks bias pada *core* harus mempunyai nilai yang lebih besar dari index pada *cladding*. Sudut kritis yang umum digunakan pada *waveguide* mempunyai nilai rentang  $\sim 80^\circ$ .

#### **Mengatasi Tinggi Loss Daya pada Waveguide dengan Material $SiO_2$ dan $TiO_2$**

Dengan mengetahui nilai parameter penyebab tingginya *loss* daya pada *waveguide* maka harus diperhatikan sudut alpha saat melakukan percobaan di laboratorium. Selain sudut alpha, harus diperhatikan juga jenis gelombang dan panjang *cladding* dalam percobaan *waveguide*. Semakin panjang *cladding* maka semakin banyak perbedaan antara cahaya yang masuk dan yang keluar. Nilai ini juga dapat mempengaruhi besarnya *loss* dan sudut alpha yang ditembakkan pada *cladding waveguide*.

#### **SIMPULAN**

Perbandingan *loss* daya pada material  $SiO_2$  dan  $TiO_2$  mempunyai perbandingan yang sama yaitu linearitas. Semakin besar sudut alpha yang terpancarkan pada *waveguide* maka semakin besar *loss* daya yang dihasilkan. Hal ini juga menjadi parameter penyebab terjadinya *loss* daya pada *waveguide* pada saat pengujian. Arah sudut alpha dapat diubah agar mempunyai nilai yang kecil terhadap sudut kritis pada *waveguide*. Dengan simulasi python analisis Leyman's dapat mengurangi kesalahan dalam eksperimen.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Abdulkareem, M. A., López-Rayón, F., Sosa-Sánchez, C. T., Bautista González, R. E., Arroyo Carrasco, M. L., Peña-Gomar, M., Coello, V., & Téllez-Limón, R. (2023). Integrated optical filters with hyperbolic metamaterials. *Nanomaterials*, 13(4), 759.
- Bi, R., Pi, M., Zheng, C., Zhao, H., Liang, L., Song, F., Wang, D., Zhang, Y., Wang, Y., & Tittel, F. K. (2023). A niobium pentoxide waveguide sensor for on-chip mid-infrared absorption spectroscopic methane measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 382, 133567.
- Gonen, S., Pulatsu, B., Lourenço, P. B., Lemos, J. V., Tuncay, K., & Erduran, E. (2023). Analysis and prediction of masonry wallette strength under combined compression-bending via stochastic computational modeling. *Engineering Structures*, 278, 115492.
- Hitaishi, V., & Ashok, N. (2023). Broadband supercontinuum generation using dispersion engineered As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-GeAsSe-GeAsS waveguide at 6  $\mu$ m. *IEEE Access*.
- Kejzlar, V., & Maiti, T. (2023). Variational inference with vine copulas: An efficient approach for Bayesian computer model calibration. *Statistics and Computing*, 33(1), 1-23.
- Koshakji, A., Chomette, G., Turner, J., Jablonski, J., Haynes, A., Carlucci, D., Giovanardi, B., &

- Radovitzky, R. A. (2023). A robust computational framework for simulating the dynamics of large assemblies of highly-flexible fibers immersed in viscous flow. *Journal of Computational Physics*, 474, 111774.
- Liu, F., Yang, W., & Li, J. (2023). A FETD scheme and analysis for photonic crystal waveguides comprising third-order nonlinear and linear materials. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 424, 115005.
- Song, Y., Li, B., Zhang, H., Li, M., Li, Q., & He, J.-J. (2023). Silicon waveguide sensors for carbon dioxide gas sensing in the mid-infrared region. *Photonics*, 10(2), 120.
- Su, Y., He, Y., Guo, X., Xie, W., Ji, X., Wang, H., Cai, X., Tong, L., & Yu, S. (2022). Scalability of large-scale photonic integrated circuits. *ACS Photonics*.
- Tang, Y., Luo, Q., Chen, Y., & Xu, K. (2023). All-silicon photoelectric biosensor on chip based on silicon nitride waveguide with low loss. *Nanomaterials*, 13(5), 914.
- Toma, K., Satomura, Y., Iitani, K., Arakawa, T., & Mitsubayashi, K. (2023). Long-range surface plasmon aptasensor for label-free monitoring of vancomycin. *Biosensors and Bioelectronics*, 222, 114959.
- Wang, S., Shen, Y., Liao, C., Jing, J., & Liu, C. (2023). A novel injection-locked S-band oven magnetron system without waveguide isolators. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1-8.