

ANALISIS PERHITUNGAN KERUGIAN DAYA PADA LENDUTAN SERAT OPTIK DENGAN SIMULASI MATLAB

Joni Welman Simatupang¹

Program Studi Teknik Elektro, President University
Email: joniwsmt@president.ac.id

Faisal Samsuri¹

Program Studi Teknik Elektro, President University
Email: faisal.samsuri@student.president.ac.id

Ria Bramasto¹

Program Studi Teknik Elektro, President University
Email: ryabrmst@gmail.com

Fajar Choirul Anam¹

Program Studi Teknik Elektro, President University
Email: fajar.choirul.anam89@gmail.com

R. Hilary Yoga Ardanta¹

Program Studi Teknik Elektro, President University
Email: hilary.yoga29@gmail.com

ABSTRACT: Bending is one of the causes of signal transmission loss through the electromagnetic wave medium in the optical fiber. There are two types of bending loss: microbending and macrobending. Both of them occur when the surface of the optical fiber cable experiences external pressure which causes deformation in the core of the optical fiber. Bending causes the loss of the optical transmission power affected by decreased light intensity, therefore the output ratio becomes degraded to the input one. This kind of condition assumed can be utilized for designing the optical fiber-based sensor by observing the response of the optical fiber against the external disturbances or stimulation. One example is the mechanical force that causes the deformation to the optical fiber. Based on the simulation result through the Matlab programming for macrobending loss, it was obtained that the highest power loss at 1.817×10^{-4} dB/mm on the 10 mm bending radius for the 1650 nm wavelength, and the lowest at 2.683×10^{-8} dB/mm on the 20 mm bending radius for the 1250 nm wavelength. Meanwhile for microbending loss, it obtained the largest change of transmission coefficient at 59.070% for 100 mm spacer length with applied mechanical force as large as 10^6 dynes or 10 N, and the smallest change at 0.591% for 10 mm spacer length with applied mechanical force as large as 10^5 dynes or 1 N. These significant changes of the measured values show that the optical fiber, by simulation, is pretty responsive against the external stimulations, either on the macroscopic scale or the microscopic scale. So that based on its responsiveness, we can assume that optical fiber is most likely possible to be utilized in various modern fiber optic sensor for many applied technologies.

Keyword: microbending, macrobending, fiber optic, Matlab simulation, sensor system, Rayleigh backscattering

ABSTRAK: Lendutan atau *bending* merupakan salah satu penyebab kerugian transmisi sinyal melalui medium gelombang elektromagnetik berupa cahaya melalui pada serat optik. Terdapat dua jenis *bending*, yaitu *macrobending* dan *microbending*. Keduanya adalah tipe lendutan yang terjadi ketika permukaan serat optik mendapat tekanan eksternal yang menyebabkan terjadinya deformasi pada inti serat optik. Lendutan mengakibatkan berkurangnya daya transmisi optik dikarenakan berkurangnya intensitas cahaya, sehingga nilai keluarannya menjadi terdegradasi. Kondisi tersebut diasumsikan dapat dimanfaatkan untuk perancangan sensor berbasis serat optik dengan mengamati respon serat optik terhadap gangguan eksternal. Sebagai contoh berupa gaya mekanis yang menyebabkan serat optik terdeformasi. Berdasarkan hasil simulasi melalui Matlab untuk *macrobending*, diperoleh kerugian daya tertinggi sebesar 1.817×10^{-4} dB/mm pada radius *bending* 10 mm untuk panjang gelombang 1650 nm, dan terendah sebesar 2.683×10^{-8} dB/mm pada radius *bending* 20 mm untuk panjang gelombang 1250 nm. Sementara untuk *microbending*, diperoleh perubahan koefisien transmisi tertinggi sebesar 59.070% untuk panjang penyekat 100 mm dengan gaya mekanis sebesar 10^6 dyne atau 10 N, dan terendah sebesar 0.591% untuk panjang penyekat 10 mm dengan gaya mekanis sebesar 10^5 dyne atau 1 N. Perubahan nilai yang sangat signifikan tersebut menunjukkan bahwa serat optik secara simulasi cukup responsif terhadap stimulasi eksternal, baik dalam skala makro maupun mikro. Berdasarkan sifatnya yang cukup responsif, dapat disimpulkan bahwa serat optik sangat mungkin untuk dimanfaatkan dalam perancangan sistem sensor moderen untuk berbagai aplikasi teknologi.

Kata Kunci: *microbending*, *macrobending*, serat optik, simulasi Matlab, sistem sensor, hamburan balik Rayleigh

PENDAHULUAN

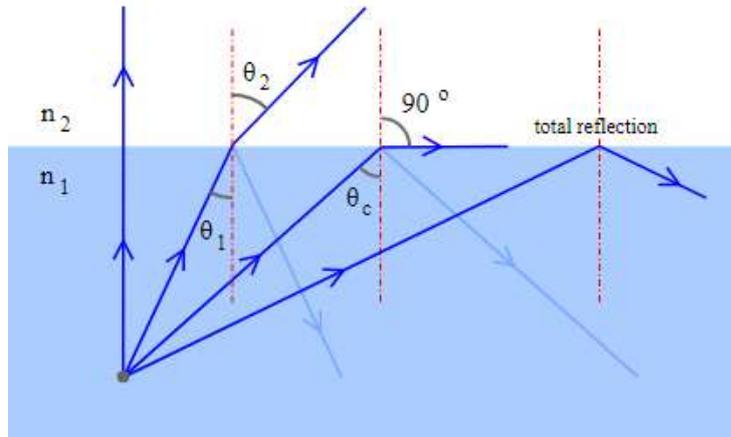
Serat optik merupakan saluran transmisi yang terbuat dari silika (kaca) atau plastik (polimer) yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal dari suatu tempat ke tempat lain [1]. Saat ini,

¹ Program Studi Teknik Elektro, President University

penggunaannya sudah cukup banyak ditemukan secara meluas, terutama dalam bidang transmisi sinyal telekomunikasi.

Kemampuan serat optik sebagai media transmisi memungkinkannya untuk menghantarkan sinyal melalui gelombang elektromagnetik berupa cahaya dengan fenomena *Total Internal Reflection* seperti diilustrasikan pada Gambar 1, yaitu cahaya mengalami pantulan kembali ke dalam medium yang dilaluinya apabila cahaya melewati medium tersebut pada sudut kritis [2], seperti yang diberikan melalui persamaan (1) berikut, di mana

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \dots \dots \dots (1)$$



■ **Gambar 1.** *Total Internal Reflection* terjadi pada sudut kritis [3]

Dari persamaan (1), n_1 merupakan indeks refraktif medium penghantar cahaya dan n_2 merupakan indeks refraktif lapisan proteksinya, dengan ketentuan seperti pada persamaan (2) berikut:

$$n_2 \leq n_1 \dots \dots \dots (2)$$

Fenomena di atas memungkinkan cahaya ditransmisikan sepanjang medium, terlepas dari kontur yang dilaluinya, bahkan lendutan ekstrim sekali pun.

Namun demikian, efisiensi transmisi sudah tentu bergantung kepada mediumnya. Karenanya, dipastikan terdapat kerugian yang mengakibatkan sinyal terdegradasi atau *power loss* (kerugian daya) yang disebabkan oleh sifat material dari medium penghantarnya. Penyebab terjadinya degradasi sinyal atau kerugian daya pada serat optik diantaranya adalah karena atenuasi (*attenuation*) atau pelemahan yang bergantung pada panjang medium (*transmission distance*), penyerapan cahaya oleh medium (*absorption*), penghamburan (*scattering*), dan pembelokan atau lendutan pada medium (*bending*). Karena beberapa penyebab tersebut, maka daya transmisi optik mungkin akan mengalami interferensi dan melemah sepanjang medium, menyebabkan adanya rasio antara intensitas input dan output pada saat transmisi.

Di sisi lain, kerugian daya optik tersebut telah dijadikan menjadi dasar penelitian oleh sebagian ilmuwan untuk mengembangkan sistem sensor yang memanfaatkan stimulasi atau gangguan pada serat optik [4]. Sebagai contoh adalah parameter pembelokan atau lendutan. Pembelokan atau lendutan terjadi disebabkan karena terdapat perbedaan geometri dan kontur pada suatu bidang sehingga membentuk perbedaan posisi, ketinggian, dan kedataran suatu area, yang mana apabila suatu serat optik dilewatkan pada area tersebut dan cahaya ditransmisikan, maka *power loss* akan terjadi dan data-data yang muncul dapat dikalkulasi untuk dijadikan bahan analisis perancangan sistem sensor.

Berdasarkan pemahaman tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan gambaran bagaimana suatu penyebab kerugian atau *loss* dapat mempengaruhi efisiensi daya transmisi. Metode penelitian adalah melalui simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. Kerugian serat optik (*optical fiber loss*) yang dimaksudkan dibatasi hanya untuk pembelokan atau lendutan pada medium (*bending*) beserta variannya, yaitu pembelokan makro (*macrobending*) dan pembelokan mikro (*microbending*) pada serat optik mode tunggal (*single-mode fiber*).

Ada beberapa proses yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu studi literatur untuk memperkuat analisis berdasarkan data yang telah diperoleh oleh para peneliti dan juga simulasi dengan memasukkan persamaan matematika ke dalam model yang disusun dengan pemrograman Matlab untuk kemudian data yang dihasilkan akan dianalisis secara detail dan komprehensif.

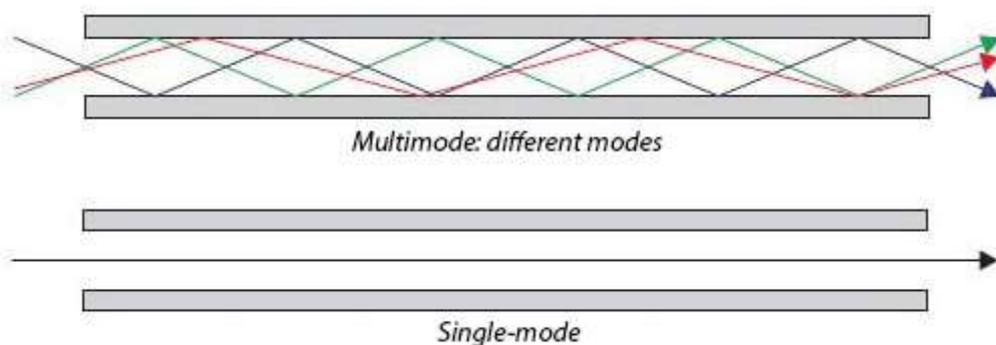
LANDASAN TEORI

2.1. Moda Operasi Serat Optik

Berdasarkan moda operasinya, terdapat dua jenis moda standar yang umum digunakan, yaitu moda-tunggal (*single-mode*) dan moda-jamak (*multi-mode*) [5], sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.

Serat optik moda-tunggal memiliki inti kabel dengan diameter kecil (antara 8 μm – 9 μm) yang didesain untuk mentransmisikan cahaya tunggal pada medium dengan jarak yang jauh [6]. Moda ini memiliki kapasitas pembawa informasi yang relatif besar dan atenuasi sinyal yang relatif kecil, dan juga merupakan moda yang paling banyak dimanfaatkan dan dikembangkan secara luas di seluruh dunia.

Sementara itu, serat optik moda-jamak memiliki inti kabel dengan diameter relatif lebih besar (antara 50 μm – 62.5 μm), yang memungkinkan beberapa cahaya dapat ditransmisikan pada banyak jalur transmisi secara bersamaan [7]. Serat optik moda-jamak memiliki kekhususan untuk dioperasikan pada jarak dekat (kabel yang relatif pendek), seperti misalnya pusat data dan jaringan lokal atau LAN, yang secara aplikatif lebih efektif untuk keperluan-keperluan tersebut dibandingkan dengan moda-tunggal.



■ **Gambar 2.** Ilustrasi perbandingan propagasi gelombang pada serat optik moda-jamak indeks tangga (*step-index multimode*) dan moda-tunggal (*single-mode*) [8]

Pada serat optik mode-tunggal, terdapat *cut-off wavelength* [9], yaitu panjang gelombang minimum yang dapat dilewatkan pada inti serat optik tertentu yang membuatnya tetap beroperasi pada moda-tunggal. *Cut-off wavelength* dipengaruhi oleh “*V-number*”, yaitu frekuensi optik yang dinormalkan berdasarkan spesifikasi yang terdapat pada serat optik. *V-number* digunakan untuk menentukan dukungan suatu kabel serat optik pada mode-tunggal dan mode-jamak, dan tidak memiliki dimensi fisika (*dimensionless*).

Secara standar, apabila nilai $V < 2.405$, maka serat optik tersebut hanya memiliki dukungan terhadap mode-tunggal, sedangkan untuk mode-jamak, nilai V dapat dipastikan lebih besar. *V-number* diperoleh dari spesifikasi serat optik yang dituliskan secara matematis pada persamaan (3) sebagai berikut:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan a adalah radius inti serat optik, n_1 adalah indeks refraktif inti serat optik, dan n_2 adalah indeks refraktif lapisan proteksi atau *cladding* pada serat optik.

Dengan memindahkan λ ke ruas kiri dan V ke ruas kanan, dan $V = V_c = 2.405$ yang merupakan angka kritis antara moda-tunggal dan moda-jamak, maka *cut-off wavelength* diperoleh dengan persamaan (4) sebagai berikut:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{V_c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots \dots \dots (4)$$

Apabila cahaya dengan panjang gelombang melebihi dari *cut-off wavelength* ditransmisikan melalui suatu serat optik, maka serat optik tersebut hanya akan melewatkan suatu cahaya dengan polarisasi linear tertentu (LP₀₁), dan serat optik berada pada moda-tunggal. Sementara itu apabila cahaya yang ditransmisikan memiliki panjang gelombang kurang dari *cut-off wavelength*, maka berbagai jenis cahaya yang terpolarisasi secara linear (LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂) juga akan dilewatkan oleh serat optik tersebut, dan serat optik berada pada moda-jamak.

2.2. Pembelokan Makro (Macrobending)

Macrobending merupakan pembelokan serat optik kasat mata di mana jari-jari lengkungan yang terbentuk lebih besar daripada diameter serat optiknya. Lengkungan yang terjadi pada serat optik menyebabkan cahaya yang melewatinya mengalami *power loss* pada bagian inti.

Macrobending dapat diinterpretasikan dengan *Marcuse's Loss Formula* yang diimprovisasi [10], yaitu suatu persamaan yang digunakan untuk menentukan besaran *power loss* yang terjadi akibat lengkungan berdasarkan jari-jari efektif yang terbentuk. Secara matematis dituliskan pada persamaan (5) berikut.

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi}\kappa^2}{2\sqrt{\gamma^3 V^2 \sqrt{R} K_{+1}^2(\gamma\alpha)}} \times \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R}{3\beta^2}\right) \dots \dots \dots (5)$$

Dimana $K_{+1}(\gamma\alpha)$ adalah modifikasi dari fungsi Bessel atau Hanckel, κ (dibaca 'kappa') adalah konstanta radial yang dinormalkan, γ adalah konstanta redaman dari radial yang dinormalkan, β adalah konstanta perambatan aksial yang diperoleh melalui teknik simulasi numerik pada serat optik lurus, atau secara sederhana merupakan hasil kali antara indeks refraktif-efektif dengan bilangan gelombang pada ruang hampa seperti pada persamaan (6), dan V adalah frekuensi yang dinormalkan sebagaimana pada persamaan (3). Penjabaran dari persamaan (5) diuraikan sebagai berikut [11]:

$$\beta = n_{eff}k \dots \dots \dots (6)$$

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k^2} \dots \dots \dots (8)$$

Ditentukan bahwa K adalah bilangan gelombang dengan persamaan $K = 2\pi/\lambda$. Berdasarkan penguraian di atas, dapat disimpulkan bahwa semua parameter akan bersifat konstan ketika moda operasi dari serat optik dan panjang gelombang dari cahaya yang ditransmisikan sudah ditentukan, sehingga koefisien *power loss* yang disebabkan oleh lekukan (untuk selanjutnya akan disebut sebagai *bending loss*) pada persamaan (5) dapat disederhanakan menjadi:

$$2\alpha = \frac{A_1}{\sqrt{R}} \exp(-BR) \dots \dots \dots (9)$$

Penting untuk diperhatikan bahwa persamaan tersebut hanya dapat diaplikasikan pada cahaya yang terpolarisasi secara linear (LP_{lm}) pada serat optik moda-tunggal [12].

Untuk mendapatkan koefisien *bending loss* dalam dB/mm, persamaan tersebut kemudian dikalikan dengan faktor 4.343 [13] menjadi seperti pada persamaan (10), (11), dan (12) berikut:

$$\alpha_p = 4.343 \times 2\alpha \dots \dots \dots (10)$$

$$\alpha_p = \frac{4.343A_1}{\sqrt{R}} \exp(-BR) \dots \dots \dots (11)$$

$$\alpha_p = \frac{A}{\sqrt{R}} \exp(-BR) \dots \dots \dots (12)$$

Dari persamaan (12), telah ditetapkan bahwa nilai (besaran) dari $A = 4.343A_1$. Sebagaimana kita ketahui, untuk serat optik moda-tunggal pada suatu panjang gelombang tertentu, koefisien *bending loss* per satuan panjang (α_p) dapat kita anggap sebagai fungsi dari radius *bending*. Hubungan antara *power loss* yang diakibatkan *bending* (L_s) dengan panjang gelombang yang ditransmisikan (L) dan radius *bending* (R) dinyatakan pada persamaan (13) sebagai berikut:

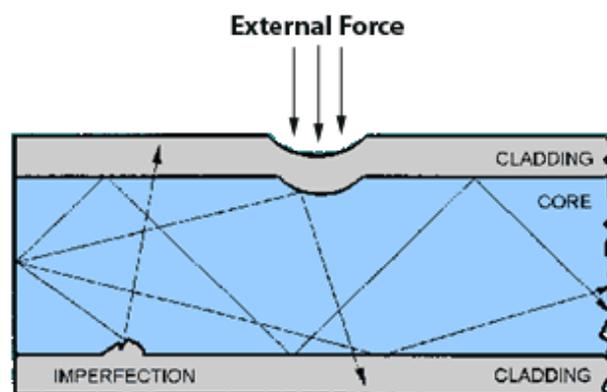
$$L_s = \frac{AL}{\sqrt{R}} \exp(-BR) = \alpha_p L \dots \dots \dots (13)$$

2.3. Pembelokan Mikro (*Microbending*)

Microbending merupakan pembelokan serat optik tak kasat mata, namun memberikan dampak yang cukup signifikan pada *power loss* dari cahaya yang dilewatkan. Selain itu, *microbending* juga dapat mengganggu frekuensi sinyal diakibatkan tumbukan pada lengkungan mikro yang terdapat pada inti serat optik, sehingga menyebabkan *error* pada data yang ditransmisikan [14].

Microbending cukup sulit untuk dihindari karena diantaranya disebabkan oleh faktor internal dari serat optik itu sendiri, diantaranya kualitas material dan proses saat fabrikasi, dan juga faktor eksternal seperti kesalahan pada saat instalasi.

Microbending terjadi karena gaya luar yang diberikan kepada permukaan lapisan *cladding* serat optik. Gaya tersebut menembus *cladding* sehingga mampu menimbulkan lendutan yang berakibat pada terjadinya deformasi skala mikro pada inti serat optik, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3 berikut.



■ **Gambar 3.** *Microbending* yang diakibatkan oleh deformasi mikroskopik [15]

Microbending juga berpotensi sangat signifikan dalam menghasilkan fenomena Rayleigh *backscattering*, yaitu suatu fenomena yang memungkinkan cahaya terpendar dan dipantulkan kembali ke tempat cahaya itu berasal, diantaranya disebabkan oleh distribusi acak dari indeks refraktif partikel karena ketidaksempurnaan manufaktur pada saat fabrikasi [16-22] dan ketidakrataan permukaan (*surface non-uniformity*) yang disebabkan oleh gaya mekanis eksternal [12].

Diberikan suatu gangguan eksternal pada serat optik sebesar ΔE , gangguan tersebut diterjemahkan sebagai gaya yang menyebabkan deformasi pada inti serat optik sebesar ΔF . Karenanya, terbentuk lendutan dengan puncak ΔX terhadap garis normal. Sehingga, koefisien transmisi T untuk rambatan cahaya mengalami perubahan dikarenakan gangguan tersebut [23], dijelaskan oleh persamaan (14) berikut:

$$\Delta T = \left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right) D \Delta E \dots \dots \dots (14)$$

Dengan D adalah konstanta yang bergantung pada gangguan eksternal ΔE , dan $D \Delta E = \Delta X$. Dan karena gangguan eksternal berupa gaya mekanis, maka berlaku ketentuan sebagai berikut.

$$\Delta T = \left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right) \Delta F \left(K_f + \frac{A_s Y_s}{l_s} \right)^{-1} \dots \dots \dots (15)$$

Pada persamaan (15), K_f adalah konstanta gaya yang mengakibatkan lengkungan pada serat optik, A_s , Y_s , dan l_s berturut-turut adalah luas penampang deformasi, modulus Young, dan panjang penyekat dari penekuk. Konstanta K_f cukup erat kaitannya dengan gaya eksternal dan puncak yang dihasilkan oleh gaya tersebut. Misalkan serat optik adalah suatu lempeng yang diberikan gaya diantara ujungnya yang terjepit, maka berlaku hukum gaya elastisitas sebagai berikut.

$$\Delta F = K_f \Delta X \dots\dots\dots(16)$$

K_f diperoleh dari persamaan (17) berikut.

$$K_f^{-1} = \frac{\Lambda^3}{3\pi Y d^4 \eta} \dots\dots\dots(17)$$

dengan d adalah diameter inti serat optik, Y adalah modulus Young, η adalah jumlah lekukan pada rentang tertentu yang diobservasi, dan Λ adalah panjang gelombang yang diakibatkan oleh ketidakrataan mikroskopik yang terjadi pada inti serat optik, sebagaimana dijelaskan pada persamaan (18) berikut.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_1 - n_2} \dots\dots\dots(18)$$

Lambda (Λ) dijelaskan dalam *Coupled Mode Theory* [14], yang mana secara ringkas dijelaskan pada persamaan (18), yang intinya adalah nilai dari Λ sebanding dengan rasio antara panjang gelombang yang dilewatkan pada inti dengan selisih antara indeks refraktif inti serat optik (*core*) dengan indeks refraktif pelapisnya (*cladding*).

Lambda (Λ) juga dapat diterjemahkan sebagai periodisitas [24], yaitu lekukan yang terbentuk secara periodik diakibatkan ketidakrataan kontur lengkungan yang membuat serat optik terdeformasi membentuk seperti gelombang dengan panjang tertentu.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dipakai bersifat kualitatif-kuantitatif, yaitu penelitian yang cenderung bersifat deskriptif-analitik, dan mengedepankan proses dan makna berdasarkan perhitungan. Landasan teori menjadi pemandu yang sangat krusial agar hasil penelitian diharapkan bisa mendekati fakta yang ada di lapangan. Dan simulasi yang dilakukan berdasarkan formula (model) matematis yang telah diturunkan. Karenanya, penelitian ini menggunakan instrumen berupa studi literatur dan simulasi pemrograman Matlab.

Studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengolah bahan penelitian. Metode penelitian ini diperlukan untuk memperkuat pijakan penelitian dengan menelusuri berbagai macam referensi yang berkaitan dengan topik penelitian yang dimaksud. Hasil dari studi literatur kemudian diterapkan pada model matematis dengan menentukan beberapa parameter yang dikondisikan untuk dua simulasi: *macrobanding* dan *microbanding*.

3.1. Simulasi *Macrobanding*

Pada penelitian kali ini, digunakan serat optik dengan tipe SMF-28e+[®] standar Corning[®]. Koefisien A dan B diperoleh melalui persamaan (19) dan (20) berikut berdasarkan angka-angka yang diperoleh dari *datasheet* [25] untuk serat optik yang dimaksud.

$$A = 4.343 \times \frac{\sqrt{\pi} \kappa^2}{2\sqrt{\gamma^3 V^2 K_{+1}^2 (\gamma \alpha)}} \dots\dots\dots(19)$$

$$B = \frac{2\gamma^3}{3\beta^2} \dots\dots\dots(20)$$

Koefisien A dan B berubah-ubah dikarenakan perubahan panjang gelombang yang beragam. Misalkan pada radius kritis 13mm dan 15mm, digunakan panjang gelombang yang disesuaikan yaitu 1310 nm dan 1550 nm (panjang gelombang untuk serat optik moda-tunggal), maka koefisien A dan B yang dihasilkan adalah tercantum pada Tabel 1 sebagai berikut.

■ **Tabel 1.** Ragam koefisien A dan B berdasarkan panjang gelombang [26]

Panjang Gelombang (nm)	Koefisien Penyelaras		Koefisien Korelasi	Deviasi Koefisien Penyelaras
	A	B		
1310	4.1328	0.4621	0.9465	0.0623
1550	10.2684	0.3374	0.9657	0.1135

Oleh karena itu, koefisien A dan B tersedia untuk panjang gelombang yang beragam. Dalam penelitian kali ini digunakan panjang gelombang dalam rentang 650 nm – 1650 nm sehingga dihasilkan koefisien penyelaras seperti pada Tabel 2 sebagai berikut.

■ **Tabel 2.** Ragam koefisien A dan B untuk eksperimen

Panjang Gelombang (nm)	Koefisien Penyelaras	
	A	B
650	-7.42	2.46
850	-5.14	1.054
950	-3.63	0.823
1050	-1.95	0.671
1150	-0.101	0.568
1250	1.913	0.495
1310	4.123	0.462
1490	8.63	0.39
1550	10.963	0.374
1650	11.649	0.351

Koefisien penyelaras yang terdapat pada Tabel 2 kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (13) melalui bahasa pemrograman Matlab. Sebagai contoh, sintaksis dasar untuk panjang gelombang 1310 nm dijelaskan pada Gambar 4 berikut.

```
>> R = 10:1:20; %mm
>> A = 4.123;
>> B = 0.462;
>> L = 1310e-06; %mm
>> Ls = ((A*L)./sqrt(R)).*exp(-(B.*R)); %dB/mm
```

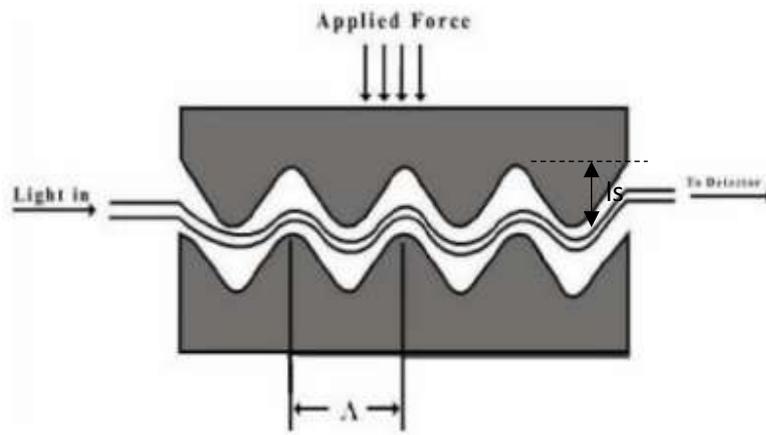
■ **Gambar 4.** Sintaksis dasar pemrograman Matlab untuk *macro bending*

Skala dasar pada pemodelan adalah milimeter, sehingga untuk skala nanometer tidak lagi menggunakan 10^{-9} , tetapi 10^{-6} . Radius *bending* yang digunakan pada pemodelan kali ini berada pada rentang 10 mm – 20 mm dengan segmentasi 10 mm.

3.2. Simulasi *Microbending*

Simulasi *microbending* pada penelitian ini menggunakan persamaan (15), dan untuk K_f dikalkulasi dengan persamaan (17) berdasarkan spesifikasi dari serat optik. Persamaan (15) diinterpretasikan sebagai perubahan koefisien transmisi dari gelombang optik yang diakibatkan oleh lekukan yang dihasilkan oleh tekanan pada serat optik.

Ilustrasi dari pemodelan *microbending* ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.



■ Gambar 5. Mekanisme uji *microbending* [22]

Pada Gambar 5, terlihat bahwa gaya yang diaplikasikan pada penekuk membuat serat optik yang melaluinya terdeformasi dan menghasilkan periodisitas (Δ) dengan panjang tertentu. Besaran periodisitas dalam skala mikro sekalipun secara signifikan dapat mempengaruhi transmisi. Selain itu, panjang penyekat (l_s) membentuk tinggi amplitudo dari lekukan yang terbentuk sehingga menyulitkan cahaya merambat. Contoh serat optik yang digunakan pada pemodelan kali ini adalah standar Corning[®] dengan spesifikasi yang terdapat pada Tabel 3.

■ Tabel 3. Sensitivitas *Microbending* menurut standar Corning[®] [23]

Pembuat	N.A.	Radius Inti (μm)	Radius Pelapis (μm)	$\Delta T/\Delta F$ pada Λ_c (% T/N)	$\Delta T/\Delta X$ pada Λ_c (% T/ μm)
Corning [®]	0.168	50	62.0	210	2.0
Corning [®]	0.2	26	62.5	13	2.0

Sementara untuk modulus Young, terdapat tabel standar yang disajikan pada Tabel 4 sebagai berikut:

■ Tabel 4. Standar Modulus Young [24]

Jenis serat optik	Y (GPa)
Serat optik standar dengan pelapis	16.56±0.39
Serat optik standar tanpa pelapis	69.22±0.42
Serat optik sensitif cahaya tanpa pelapis	68.56±1.47

Berdasarkan data-data di atas, panjang penekuk dan besar gaya yang diaplikasikan pada penekuk dijadikan objek pengamatan sebagai input (variabel bebas), sementara koefisien transmisi untuk perambatan gelombang optik dijadikan sebagai output (variabel terikat). Dengan demikian maka dapat ditentukan nilai periodisitas sepanjang 2.0 mm, panjang penekuk (l_s) antara 10 mm sampai 100 mm dengan segmentasi setiap 10 mm, dan besaran gaya adalah 10^5 dyne sampai 10^6 dyne dengan segmentasi sebesar 10^5 dyne. Dari perhitungan, nilai K_f^{-1} berdasarkan persamaan (17) adalah 0.2307 mm/dyne dengan η dipilih secara sembarang sebesar 5. Kemudian berdasarkan persamaan (15), $\Delta T/\Delta X$ dipilih dari Tabel 3 yaitu 2000 %T/mm dari nilai asli sebesar 2.0 %T/ μm , A_s dipilih secara sembarang sebesar 2 mm², dan $Y_s = 1.656 \times 10^9$ dyne/mm² dari Tabel 4 di atas.

Parameter tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (15) melalui bahasa pemrograman Matlab. Sebagai contoh, sintaksis dasar untuk panjang penyekat sepanjang 30 mm dijelaskan pada Gambar 6 sebagai berikut.

```
>> Del_F = 1e+5:1e+5:1e+6; %dyne
>> Del_T_per_Del_X = 2000; %(%T/milimeter from 2%T/micrometer)
>> Kf_inv = 0.2307; %mm/dyne
>> As = 2; %mm2
>> Ys = 1.656e+9; %dyne/mm2
>> ls = 30; %mm
>> Del_T = (Del_T_per_Del_X)*Del_F./(Kf_inv+(As*Ys/ls)) %(%T)
```

■ **Gambar 6.** Sintaksis dasar pemrograman Matlab untuk *microbending*

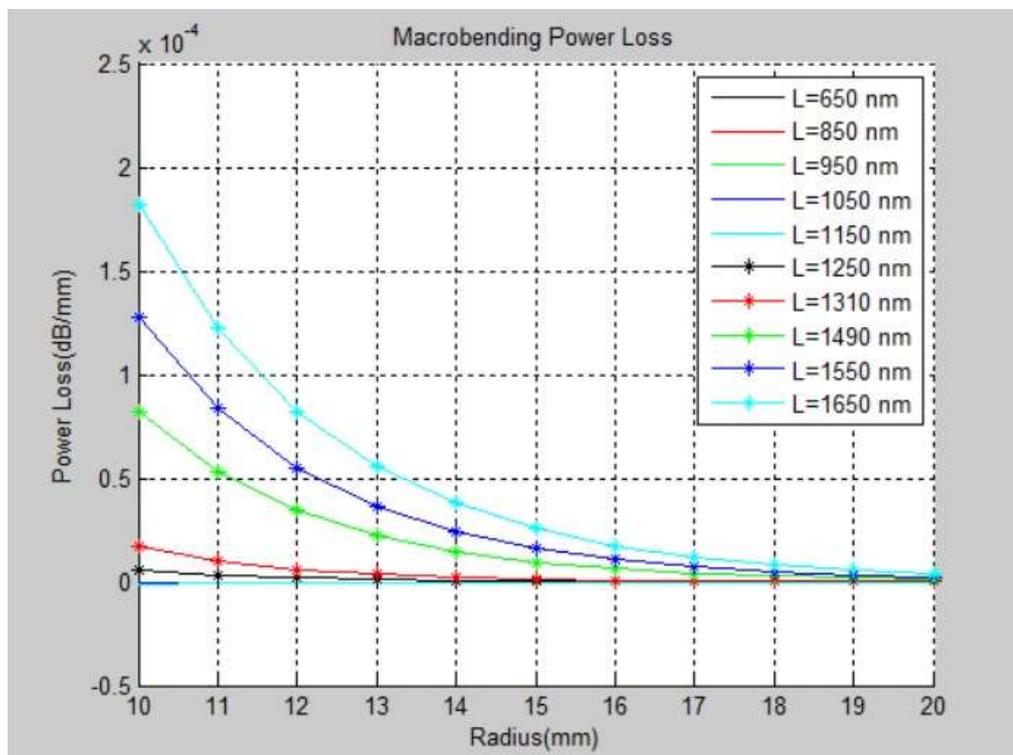
Salah satu hal yang penting untuk diperhatikan adalah konversi dari suatu satuan ke satuan lain harus tepat sehingga akurasi dari model tetap terjaga dengan baik.

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Hasil Simulasi *Macrobending*

Berdasarkan simulasi melalui Matlab dengan menggunakan persamaan (13), diperoleh hasil sebagaimana grafik pada Gambar 7. Diketahui bahwa panjang gelombang berbanding terbalik dengan frekuensi, sehingga dengan demikian berbanding terbalik pula dengan energi. Berdasarkan grafik tersebut, semakin besar panjang gelombang yang ditransmisikan, semakin besar energi yang hilang ketika pembelokan terjadi. Demikian juga dengan radius dari pembelokan yang terjadi. Semakin kecil radius dari pembelokan, semakin besar pula energi yang hilang.

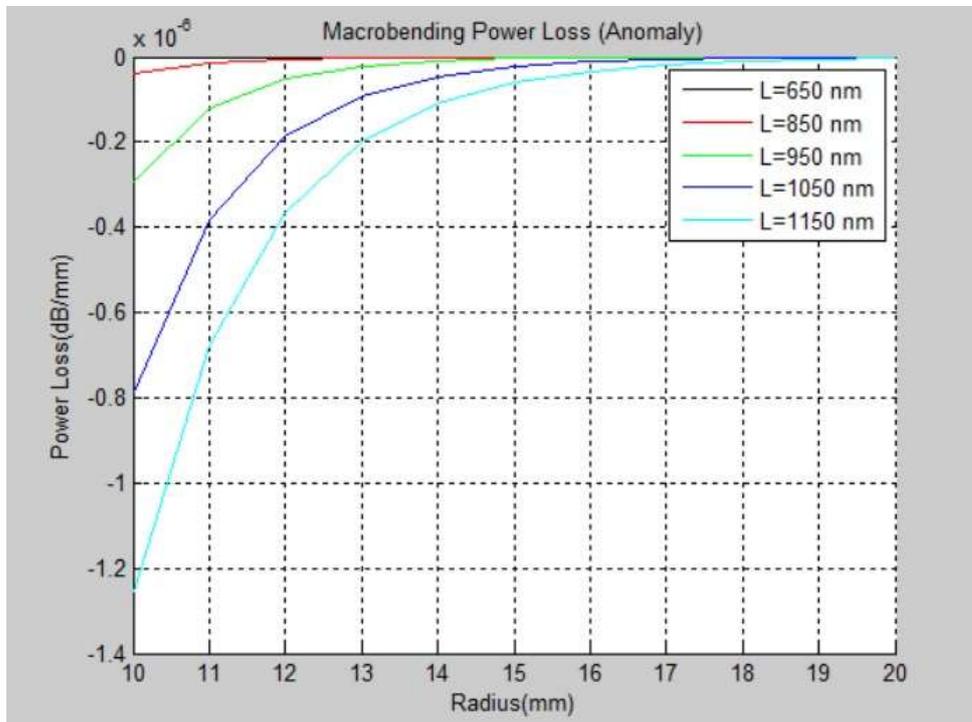
Power loss terbesar terjadi pada panjang gelombang 1650 nm pada radius *bending* 10 mm, yaitu sebesar 1.817×10^{-4} dB/mm, sementara *power loss* terkecil terjadi pada panjang gelombang 1250 nm pada radius *bending* 20 mm, yaitu sebesar 2.683×10^{-8} dB/mm.



■ **Gambar 7.** Hasil simulasi *macrobending* pada pemrograman Matlab.

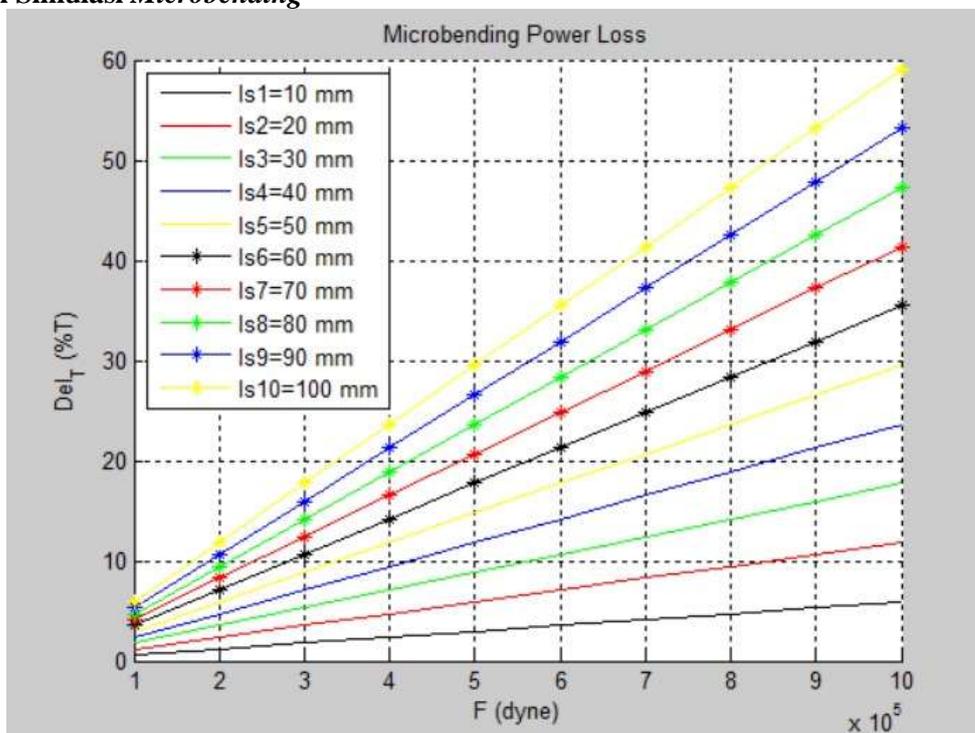
Sementara itu, untuk gelombang dengan panjang 650 nm – 1150 nm, sebagaimana ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 8, hasil dari *power loss* bernilai negatif sehingga membutuhkan peninjauan kembali sebelum diinterpretasikan. Hasil dari *power loss* negatif disebabkan oleh koefisien A yang

bernilai negatif, dan nilai negatif pada koefisien tersebut berasal dari κ yang memiliki nilai negatif pada persamaan (7), yang mana seharusnya hasil negatif dari persamaan (7) merupakan bilangan imajiner, akan tetapi *magnitude* dari bilangan imajiner tersebut diambil untuk melengkapi koefisien yang bernilai negatif tersebut. Anomali ini tidak berarti bahwa *power loss* di sini bernilai negatif. Melainkan, bahwa hal ini menyatakan bahwa untuk nilai $A < 0$, perhitungan besaran *power loss* dapat diabaikan (menjadi kurang/tidak signifikan).



■ Gambar 8. Anomali *power loss* koefisien A bernilai negatif.

4.2. Hasil Simulasi *Microbending*



■ Gambar 9. Hasil simulasi *macrobending* pada pemrograman Matlab.

Pada Gambar 9 diberikan grafik hasil simulasi *microbending* berdasarkan persamaan (15) pada pemrograman Matlab. Berbeda dengan *macrobending*, hasil simulasi pada *microbending* berbentuk

linier. Hal ini dikarenakan bentuk dari persamaan (15) tidak memiliki faktor eksponensial sebagaimana pada persamaan yang digunakan untuk mengaproksimasi *macrobending loss*.

Pada grafik tersebut, terlihat bahwa koefisien transmisi untuk perambatan pada gelombang optik (ΔT) merupakan respon dari gangguan mikroskopik yang diciptakan. Semakin besar gangguan yang diberikan, dalam hal ini gaya mekanis, maka semakin besar koefisien transmisinya, semakin besar koefisiennya maka semakin sulit cahaya untuk merambat pada serat optik tersebut.

Hal ini dibuktikan dengan memodifikasi nilai dari panjang penyekat (l_s). Penyekat tersebut dibutuhkan untuk memperbesar amplitudo lekukan, dan semakin besar amplitudo lekukan, semakin sulit untuk cahaya merambat. Demikianlah grafik menunjukkan bahwa semakin kecil nilai panjang penyekat, semakin kecil pula koefisien transmisi yang dihasilkan, dan semakin besar nilai dari panjang penyekat, semakin besar pula koefisien transmisi yang dihasilkan.

Demikian juga dengan gaya mekanis yang diberikan pada serat optik, seiring dengan bertambahnya gaya mekanis, koefisien transmisi juga meningkat dikarenakan beban yang dialami oleh serat optik menyebabkan ketidakrataan pada permukaan serat optik bagian dalam, dan ini tentu menambah kesulitan cahaya untuk merambat. Bahkan pada keadaan tertentu, gaya mekanis dapat menyebabkan deformasi secara ekstrim sehingga cahaya tidak lagi dapat merambat pada serat optik yang terdeformasi tersebut.

Koefisien transmisi terbesar berada pada serat optik dengan panjang penyekat 100 mm, dengan peningkatan terbesarnya senilai 59.070% untuk gaya mekanis sebesar 10^6 dyne atau 10 N, dan peningkatan terkecilnya senilai 5.907% untuk gaya mekanis sebesar 10^5 dyne atau 1 N. Sedangkan untuk koefisien transmisi terkecil berada pada serat optik dengan panjang penyekat 10 mm, dengan peningkatan terbesarnya senilai 5.907% untuk gaya mekanis sebesar 10^6 dyne atau 10 N, dan peningkatan terkecilnya senilai 0.591% untuk gaya mekanis sebesar 10^5 dyne atau 1 N.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian melalui pemodelan matematis dan simulasi untuk kerugian serat optik pada *macrobending* ini, terjadi *power loss* yang cukup signifikan berdasarkan beberapa parameter penelitian yang ditetapkan, diantaranya adalah panjang gelombang dan juga radius *bending*. *Power loss* tertinggi adalah 1.817×10^{-4} dB/mm pada radius *bending* 10 mm untuk panjang gelombang 1650 nm, dan terendah adalah 2.683×10^{-8} dB/mm pada radius *bending* 20 mm. Demikian juga dengan *microbending*, peningkatan koefisien transmisi tertinggi berada pada angka 59.070% untuk panjang penyekat 100 mm dengan gaya mekanis sebesar 10^6 dyne atau 10 N, dan terendah berada pada angka 0.591% untuk panjang penyekat 10 mm dengan gaya mekanis sebesar 10^5 dyne atau 1 N. Perubahan nilai yang sangat signifikan ini menunjukkan bahwa serat optik secara simulasi cukup responsif terhadap stimulasi eksternal, baik dalam skala makro maupun mikro. Dan berdasarkan sifatnya yang cukup responsif tersebut, dapat diasumsikan bahwa serat optik sangat mungkin untuk dimanfaatkan dalam perancangan sistem sensor. Meskipun demikian, terdapat beberapa faktor yang patut diperhatikan pada simulasi dalam penelitian ini, diantaranya adalah beberapa parameter yang dipilih secara acak, analisis dimensi dan juga kapasitas dari Matlab itu sendiri. Sehingga, diharapkan hasil penelitian kali ini memiliki pembandingan berupa penelitian melalui percobaan yang bersifat praktis untuk mengevaluasi maupun menguatkan hasil penelitian yang telah dilakukan, atau dengan mengubah beberapa variabel bebas dan variabel terikat yang terdapat pada penelitian ini dengan variabel lain, seperti misalnya periodisitas (Λ) dan interval *bending* (η) seperti yang terdapat pada persamaan (17).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G.P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems," ed. 3, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [2] N. Kristoffel, "Total Internal Reflection and the Related Effects," Proceedings of Tartu State University, No. 42, pp. 94-112, 1956 (Source: <https://arxiv.org/pdf/1403.4468.pdf>).
- [3] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/ReflexionTotal_en.svg [1 Oktober 2021].
- [4] B. Widiyatmoko et al., "Study of Microbending Loss Single Mode Optic Fiber in Sand Powder Against Pressure," Journal of Technomaterials Physics, vol. 3, no. 1, pp. 65-73, Talenta Publisher, 2021.
- [5] "Single Mode vs. Multi-Mode Fiber Optic Cable," Connectix Cabling System Handbook, Connectix® E&OE, 2016.
- [6] Fiber Optic Cable Types – Multimode and Single Mode, RF Industries, San Diego, 2019.
- [7] K. Solanki, "Single Mode vs. Multi-Mode Optical Fibre," Datatronix®, 2018.

- [8] <https://www.blackbox.co.uk/gb-gb/page/28533/Resources/Technical-Resources/Black-Box-Explains/Fibre-Optic-Cable/Multimode-vs-Singlemode-Fibre> [1 September 2021].
- [9] Photonics Technical Note #21, Fiber Optics: Fiber Basics, MKS Newport™, 1970.
- [10] D. Marcuse, "Curvature loss formula for optical fibers," *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 66, pp. 216–220, Mar. 1976.
- [11] R.T. Schermer dan J.H. Cole, "Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 43, no. 10, Oct. 2007.
- [12] D. Marcuse, "Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 66, no. 1, pp. 311–320, Apr. 1976.
- [13] D. Bayuwati dan T.B. Waluyo, "Macro-Bending Loss of Single-Mode Fiber Beyond Its Operating Wavelength," *TELKOMNIKA*, vol.16, no.1, pp. 142-150, Feb. 2018.
- [14] J.A. Jay, "An Overview of Macrobending and Microbending of Optical Fibers," Corning Incorporated, Dec. 2010.
- [15] https://sp-ao.shortpixel.ai/client/q_glossy,ret_img/https://www.timbercon.com/wp-content/uploads/2018/09/Microbends.gif [2 September 2021].
- [16] J.W. Simatupang dan S.-L. Lee, "Transfer Matrix Analysis of Backscattering and Reflection Effects on WDM-PON Systems," *Optics Express*, vol. 21, no. 23, pp. 27565-27577, 2013.
- [17] J.W. Simatupang dan S.-L. Lee, "Theoretical and Simulation Analysis on Potential Impairments in Bidirectional WDM-PONs," 2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics, pp. 61-65, Penang, Malaysia, 1-3 October 2012.
- [18] J.W. Simatupang dan S.-C. Lin, "A Study on Rayleigh Backscattering Noise in Single Fiber Transmission PON," *Int. J. Innov. Res. Technol. Sci.* vol. 4, no. 3, pp.11-15, 2016.
- [19] J.W. Simatupang, "Theoretical Analysis of Backreflections in Bidirectional Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Networks," *Buletin Teknik Elektro dan Informatika (Bulletin of Electrical Engineering and Informatics)*, vol. 2, no.1, March 2013, pp. 45-52, ISSN: 2089-3191.
- [20] J.W. Simatupang, "Simulation and Analysis of Rayleigh Backscattering Effects in 105 Km Long-Reach RSOA-based Hybrid WDM/TDM PON Transmissions," *Teknologi Indonesia*, vol. 36, no. 1, pp.1-9, LIPI Press, 2013.
- [21] J.W. Simatupang dan P.D. Pukhrambang, "Theoretical Analysis of Single-Fiber Transmission over WDM-PON Systems," *Teknologi Indonesia*, vol. 40, no. 2, pp. 87-96, LIPI Press, 2017.
- [22] J.W. Simatupang, P.D. Pukhrambang, dan Y.-R. Huang, "Performance analysis of cross-seeding WDM-PON system using transfer matrix method," *Optical Fiber Technology*, vol. 32, pp. 50-57, Academic Press, 2016.
- [23] N. Lagakos et al., "Microbend Fiber-Optic Sensor," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 11, pp. 2171-2180, 1987.
- [24] R.K. Ula et al., "Design of micro bending deformer for optical fiber weight sensor," 2nd International Symposium on Frontier of Applied Physics (ISFAP 2016), IOP Publishing, 2017.
- [25] Corning® SMF-28e+® Optical Fiber Product Information, Corning Incorporated, 2019.
- [26] Paulo Antunes et al., "Mechanical Properties of Optical Fibers," Instituto de Telecomunicacoes and Departamento de Fisica, Universidade de Aveiro, 2012.