



TUGAS AKHIR - TF 181801

**STUDI PENGARUH KERR *EFFECT* PADA SERAT OPTIK
SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) SEBAGAI
SENSOR REGANGAN**

PRITA YENNY OKTAVIANI
NRP. 02311640000002

Dosen Pembimbing:
Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D.
Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini memang dikosongkan



TUGAS AKHIR - TF 181801

**STUDI PENGARUH KERR *EFFECT* PADA SERAT OPTIK
SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) SEBAGAI
SENSOR REGANGAN**

PRITA YENNY OKTAVIANI
NRP. 0231164000002

Dosen Pembimbing:
Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D
Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***STUDY OF THE KERR EFFECT ON SINGLEMODE-
MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) OPTICAL FIBERS AS A
STRAIN SENSOR***

PRITA YENNY OKTAVIANI
NRP. 02311640000002

Supervisors:

Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D
Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Prita Yenny Oktavianti
NRP : 02311640000002
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**STUDI PENGARUH KERR EFFECT PADA SERAT OPTIK SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) SEBAGAI SENSOR REGANGAN**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Prita Yenny Oktavianti

NRP. 02311640000002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**STUDI PENGARUH KERR *EFFECT* PADA SERAT OPTIK
SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) SEBAGAI
SENSOR REGANGAN**

Oleh:

Prita Yenny Oktavianti

NRP. 0231164000002

Surabaya, 6 Agustus 2020

Menyetujui,
Pembimbing I



Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D

NIP. 197809022003121002

Menyetujui,
Pembimbing II



Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc

NIP. 198401012012121002

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS - ITS



Dr. Suyanto, S.T., M.T

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH KERR *EFFECT* PADA SERAT OPTIK *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE* (SMS) SEBAGAI SENSOR REGANGAN

TUGAS AKHIR

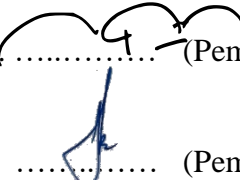
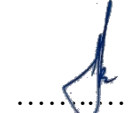



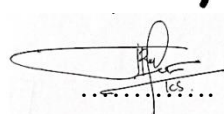
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PRITA YENNY OKTAVIANI

NRP. 0231164000002

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc.  (Pembimbing II)
3. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M.Sc.  (Ketua Penguji)
4. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.  (Penguji I)
5. Dr. -Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.  (Penguji II)
6. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T.  (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI PENGARUH KERR *EFFECT* PADA SERAT OPTIK
SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS)
SEBAGAI SENSOR REGANGAN**

Nama : Prita Yenny Oktavianti
NRP : 0231164000002
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS - ITS
Dosen Pembimbing : Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D.
Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc.

ABSTRAK

Studi pengaruh efek Kerr pada serat optik SMS sebagai sensor *strain* telah dilakukan secara simulasi. Penambahan efek Kerr pada sensor *strain* serat optik SMS dilakukan dengan memberikan intensitas tinggi dan *doping* material dengan indeks nonlinear pada serat optik *multimode*. Pemberian efek Kerr dengan variasi intensitas pada sensor *strain* serat optik mempengaruhi indeks bias serat optik yang menjadi semakin besar yang dapat diamati pada grafik spektrum panjang gelombang yang bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil pada saat perubahan nilai indeks bias semakin besar, dan juga mempengaruhi sensitivitasnya sebagai sensor. Dari analisa karakteristik statis, sensitivitas sensor *strain* serat optik SMS paling tinggi diperoleh oleh serat optik *multimode* sepanjang 6 cm sebesar 0.001844 dBm/ $\mu\epsilon$. Sedangkan sensitivitas tertinggi sensor *strain* dengan efek Kerr diperoleh oleh *multimode* 6 cm dengan *doping* CaF₂ pada intensitas 10¹⁷ W/m² yaitu sebesar 0.008867 dBm/ $\mu\epsilon$.

Kata Kunci: *Strain*, serat optik SMS, efek Kerr, spektrum

Halaman ini sengaja dikosongkan

***STUDY OF THE KERR EFFECT ON SINGLEMODE-
MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) OPTICAL FIBERS AS A
STRAIN SENSOR***

Name : Prita Yenny Oktavianti
NRP : 0231164000002
Department : *Engineering Physics FT-IRS - ITS*
Supervisors : Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D.
Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc.

ABSTRACT

Study of the Kerr effect on SMS fiber optics as a strain sensor has been carried out by simulation. The addition of the Kerr effect to the SMS optical fiber strain sensor is done by providing high intensity and doping material with a nonlinear index on multimode optical fibers. The addition of the Kerr effect to variations in the optical fiber strain sensor increases the refractive index of the optical fiber which becomes larger which can be corrected on a wavelength spectrum graph that shifts towards a smaller wavelength when the index changes in the refractive value is greater, and also increases its sensitivity as the sensor. From the analysis of statistical characteristics, the highest sensitivity of the SMS optical fiber sensor was obtained by a 6 cm multimode optical fiber of 0.001844 dBm/ $\mu\epsilon$. While the highest sensitivity of the strain sensor with the Kerr effect was obtained by multimode 6 cm with doping CaF₂ at an intensity of 10¹⁷ W/m² which was equal to 0.008867 dBm/ $\mu\epsilon$.

Keywords: Strain, SMS optical fiber, Kerr effect, spectrum

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, berkat karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul “**STUDI PENGARUH KERR EFFECT PADA SERAT OPTIK SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) SEBAGAI SENSOR REGANGAN**” sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Tugas akhir ini dapat penulis selesaikan berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Orangtua dan keluarga yang selalu memberi doa dan dukungan kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir ini.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D. dan bapak Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS .
4. Bapak dan Ibu dosen penguji tugas akhir yang memotivasi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Karyawan/i Teknik Fisika ITS atas pelayanannya kepada mahasiswa selama masa perkuliahan.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 8 Juni 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
LEMBAR PENGESAHAN	xi
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI.....	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Prinsip Kerja Serat Optik	5
2.2 Serat Optik <i>Singlemode</i>	5
2.3 Serat Optik <i>Multimode Graded Index</i>	6
2.4 Serat Optik <i>Singlemode – Multimode – Singlemode</i>	8
2.5 <i>Multimode Interference</i> (MMI).....	10
2.6 Pengaruh <i>Strain</i> pada Serat Optik SMS	10

2.7	<i>Optical Kerr Effect</i>	12
2.8	Sensor.....	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		15
3.1	Studi literatur	16
3.2	Penentuan Parameter Serat Optik SMS	16
3.3	Penentuan Material <i>Doping</i> untuk Efek Kerr	17
3.4	Simulasi <i>Strain</i> dan efek Kerr pada Serat Optik SMS.....	18
3.5	Grafik Daya <i>Output</i> yang Dihasilkan dapat Dihitung Karakteristik Statisnya.....	20
3.6	Analisa Data dan Pembahasan	20
3.7	Penyusunan Laporan.....	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		21
4.1	Hasil Simulasi <i>Strain</i> pada Serat Optik	21
4.2	Uji Spektrum Panjang Gelombang Serat Optik yang Diberi Efek Kerr .	26
4.3	Perubahan Daya Keluaran Sensor <i>Strain</i> yang diberi Efek Kerr.....	31
4.4	Spektrum Pengaruh <i>Strain</i> dan Efek Kerr pada Tiap Material.....	40
4.5	Pembahasan	45
BAB V PENUTUP		49
5.1	Kesimpulan	49
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN		53
BIODATA PENULIS.....		81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur serat optik <i>singlemode</i>	6
Gambar 2.2	Struktur serat optik <i>multimode graded index</i>	6
Gambar 2.3	Kurva profil indeks bias serat optik <i>multimode graded index</i>	7
Gambar 2.4	Skema transmisi cahaya pada serat optik <i>multimode graded index</i>	8
Gambar 2.5	Skema serat optik SMS	8
Gambar 2.6	Fenomena <i>multimode interference</i> pada serat optik SMS.....	10
Gambar 2.7	Kurva <i>stress-strain</i> pada serat optik.....	12
Gambar 2.8	Hubungan indeks bias terhadap medan listrik pada medium Kerr	13
Gambar 3.1	Diagram alir pengerjaan tugas akhir.....	15
Gambar 3.2	Diagram alir simulasi <i>strain</i> dan efek Kerr serat optik	18
Gambar 3.3	Skema pemberian <i>strain</i> pada serat optik SMS	19
Gambar 4.1	Grafik daya terhadap <i>strain</i> pada L MMF 4 cm.....	21
Gambar 4.2	Grafik daya terhadap <i>strain</i> pada L MMF 5 cm.....	22
Gambar 4.3	Grafik daya terhadap <i>strain</i> pada L MMF 6 cm.....	22
Gambar 4.4	Spektrum MMF setelah diberi <i>strain</i>	25
Gambar 4.5	Spektrum variasi intensitas pada material CaF ₂ 4 cm.....	27
Gambar 4.6	Spektrum variasi intensitas pada material CaF ₂ 5 cm.....	27
Gambar 4.7	Spektrum variasi intensitas pada material CaF ₂ 6 cm.....	28
Gambar 4.8	Spektrum variasi intensitas pada material CaCO ₃ 4 cm.....	28
Gambar 4.9	Spektrum variasi intensitas pada material CaCO ₃ 5 cm.....	29
Gambar 4.10	Spektrum variasi intensitas pada material CaCO ₃ 6 cm.....	29
Gambar 4.11	Spektrum variasi intensitas pada material <i>Sapphire</i> 4 cm.....	30
Gambar 4.12	Spektrum variasi intensitas pada material <i>Sapphire</i> 5 cm.....	30
Gambar 4.13	Spektrum variasi intensitas pada material <i>Sapphire</i> 6 cm.....	31
Gambar 4.14	Perubahan daya pada CaF ₂ 4 cm dengan variasi intensitas	34
Gambar 4.15	Perubahan daya pada CaF ₂ 5 cm dengan variasi intensitas	34
Gambar 4.16	Perubahan daya pada CaF ₂ 6 cm dengan variasi intensitas	35
Gambar 4.17	Perubahan daya pada CaCO ₃ 4 cm dengan variasi intensitas	36
Gambar 4.18	Perubahan daya pada CaCO ₃ 5 cm dengan variasi intensitas	36

Gambar 4.19	Perubahan daya pada CaCO_3 6 cm dengan variasi intensitas	37
Gambar 4.20	Perubahan daya pada <i>Sapphire</i> 4 cm dengan variasi intensitas ...	38
Gambar 4.21	Perubahan daya pada <i>Sapphire</i> 5 cm dengan variasi intensitas....	38
Gambar 4.22	Perubahan daya pada <i>Sapphire</i> 4 cm dengan variasi intensitas ...	39
Gambar 4.23	Spektrum <i>strain</i> dan efek Kerr pada CaF_2 <i>doped silica</i>	43
Gambar 4.24	Spektrum <i>strain</i> dan efek Kerr pada CaCO_3 <i>doped silica</i>	43
Gambar 4.25	Spektrum <i>strain</i> dan efek Kerr pada <i>Sapphire doped silica</i>	44
Gambar 4.26	Spektrum pergeseran pada L MMF 4 cm	45
Gambar 4.27	Spektrum pergeseran pada L MMF 5 cm	45
Gambar 4.28	Spektrum pergeseran pada L MMF 6 cm	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter serat optik SMS untuk simulasi.....	16
Tabel 3.2	Indeks nonlinear dari beberapa jenis material	17
Tabel 4.1	Karakteristik statis <i>strain</i> serat optik L MMF 4 cm	23
Tabel 4.2	Karakteristik statis <i>strain</i> serat optik L MMF 5 cm	23
Tabel 4.3	Karakteristik statis <i>strain</i> serat optik L MMF 6 cm.....	24
Tabel 4.4	Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{16} W/m ²	26
Tabel 4.5	Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m ²	26
Tabel 4.6	Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{18} W/m ²	26
Tabel 4.7	Karakteristik statis sensor <i>strain</i> MMF 6 cm CaF ₂ dengan variasi intensitas	40
Tabel 4.8	Karakteristik statis sensor <i>strain</i> MMF 6 cm CaCO ₃ dengan variasi intensitas	40
Tabel 4.9	Karakteristik statis sensor <i>strain</i> MMF 6 cm <i>sapphire</i> dengan variasi intensitas	41
Tabel 4.10	Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 4 cm.....	46
Tabel 4.11	Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 5 cm.....	47
Tabel 4.12	Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 6 cm.....	47

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Regangan adalah respons dimensi yang diberikan oleh material terhadap pemuatan atau beban mekanis, yaitu deformasi yang dihasilkan per satuan panjang. Regangan atau *strain* dapat diartikan sebagai perbandingan perubahan panjang (Δl) dengan panjang mula-mula (L_0) (M. N. Avadhanulu, 2018). Pengukuran regangan dapat diaplikasikan untuk mengukur berat badan digital, alat pengukur keretakan pada pondasi dan dinding bangunan, monitoring struktur bangunan, deformasi material, dan dapat diaplikasikan di dunia industri.

Perkembangan teknologi mengenai sensor regangan telah berkembang dengan menggunakan sensor serat optik. Teknologi serat optik banyak digunakan sebagai sensor regangan karena memiliki kelebihan antara lain tahan terhadap interferensi gelombang elektromagnetik, *bandwidth* lebar, sensitivitas yang sangat tinggi, memiliki akurasi yang tinggi, tidak mudah korosi, tidak menimbulkan ledakan akibat loncatan elektron seperti pada sensor elektrik (Hatta A. M., 2010).

Serat optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) banyak diaplikasikan karena memiliki keunggulan seperti proses fabrikasi yang mudah dan biaya yang murah. Proses pembuatan serat optik *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) yaitu dengan menyambungkan bagian kedua ujung serat optik *multimode* dengan dua buah serat optik *singlemode* menggunakan *fusion splicer*. Beberapa aplikasi untuk serat optik SMS sudah didemonstrasikan, termasuk sebagai refractometer, filter, dan sensor suhu (Q. Wang, 2006). Karakteristik dari respon pergeseran panjang gelombang spectral SMS akibat *strain* dan suhu yang kemudian diterapkan kepada struktur fiber SMS *step-index* telah diteliti sebelumnya (Li, 2007). Serat optik berstruktur SMS yang menggunakan *multimode graded index* telah diteliti mengenai penerapan *sensing* dari pergeseran panjang gelombang akibat pengaruh regangan dan suhu.

Serat optik dapat dipengaruhi oleh efek lain selain regangan dan suhu, salah satunya efek Kerr. Efek Kerr menyebabkan indeks bias efektif berubah-ubah akibat

adanya indeks nonlinear suatu medium dan intensitas yang tinggi sehingga mempengaruhi interaksi daya yang terjadi pada medium bias (Optoelectronics, 2004) dimana perubahan pada indeks bias berbanding lurus dengan intensitas, dan menyebabkan adanya sinyal pada fasa. Pada tugas akhir ini akan dikaji tentang serat optik SMS sebagai sensor regangan yang diberikan efek Kerr dengan beberapa jenis material dan variasi intensitas menggunakan simulasi untuk mengamati pergeseran spektrum dan grafik daya keluarannya sehingga dapat diketahui serat optik dengan variasi apa yang paling ideal untuk dijadikan sensor regangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini yaitu bagaimana pengaruh efek Kerr pada serat optik SMS sebagai sensor regangan berdasarkan simulasi?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari tugas akhir ini yaitu mengetahui pengaruh efek Kerr pada serat optik SMS sebagai sensor regangan berdasarkan simulasi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini, antara lain:

- a) Serat optik yang disimulasikan berstruktur *singlemode – multimode graded index – singlemode*.
- b) Serat optik *multimode graded index* didoping dengan material CaF_2 , CaCO_3 , dan *Sapphire* untuk mengamati efek Kerr dengan variasi intensitas 10^{16} W/m^2 , 10^{17} W/m^2 , dan 10^{18} W/m^2
- c) Simulasi dilakukan menggunakan *software* Matlab.

1.5 Sistematika Laporan

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini terdiri dari Bab I yang menjelaskan permasalahan yang akan dibahas secara umum dengan memperhatikan latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan praktikum, dan sistematika laporan. Bab II berisi tentang tinjauan pustaka dan dasar teori yang berkaitan dengan judul tugas akhir. Bab III menjelaskan tentang metodologi penelitian tugas akhir. Bab IV berisi analisa data dan pembahasan. Bab V berisi kesimpulan dan saran.

Halaman ini memang dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Prinsip Kerja Serat Optik

Prinsip pemanduan cahaya pada serat optik memanfaatkan *Total Internal Reflection* (TIR). TIR terjadi pada saat cahaya yang menjalar pada serat optik yang memiliki perbedaan indeks bias antara *core* dan *cladding* sehingga menyebabkan sebagian cahaya dipantulkan dan sebagian yang lain diteruskan ke dalam material transparan kedua. Cahaya yang diteruskan mengalami pembiasan ketika memasuki material kedua dan membentuk sudut dari garis normal. Hal ini disebabkan karena pembiasan bergantung pada kecepatan cahaya yang berbeda pada indeks bias yang berbeda (Bahaa E. A. Saleh, 1991). Pembiasan cahaya dinyatakan dalam Hukum Snellius dengan persamaan:

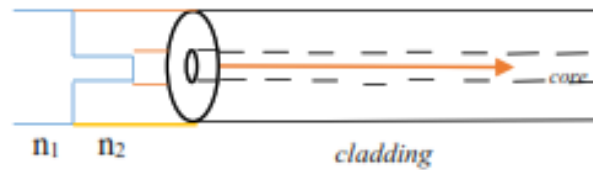
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

TIR terjadi apabila sudut datang lebih besar dari sudut kritis sehingga cahaya dapat dipandu dalam serat optik. Sudut kritis dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\theta_{kritis} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

2.2 Serat Optik *Singlemode*

Serat optik jenis *singlemode* merupakan serat optik yang hanya menggunakan satu moda dengan diameter inti atau *core* antara 8-12 mikrometer. Serat optik *singlemode* mampu membawa data dengan *bandwidth* yang lebih besar dan kecepatan 50 kali lebih cepat dibandingkan dengan struktur serat optik *multimode* (Arun Kumar, 2003).



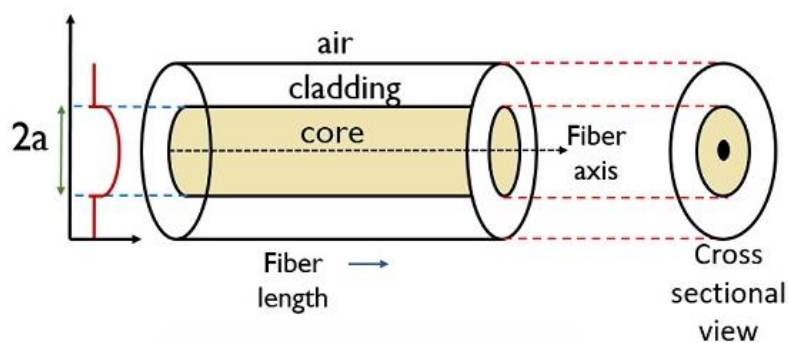
Gambar 2.1. Struktur serat optik *singlemode* (David R. Sánchez Montero, 2013)

Kekurangan dari serat optik *singlemode* yaitu membutuhkan cahaya dengan lebar spektral yang sangat kecil dan harganya relatif mahal. Serat optik *singlemode* kurang tepat jika digunakan sebagai sensor karena jari-jari *core* yang sangat kecil dan hanya terdiri dari satu moda saja sehingga pada saat diberikan perlakuan maka loss yang dihasilkan sangat sedikit, akibatnya sensitivitas dari serat optik *singlemode* sangat rendah.

2.3 Serat Optik *Multimode Graded Index*

Serat optik adalah suatu pemandu gelombang dielektrik yang berbentuk silinder terbuat dari material *low-loss* seperti kaca silika (Bahaa E. A. Saleh, 1991). Bagian utama dari serat optik terdiri dari *core* dan *cladding* yang dilindungi oleh *coating*. Kedua bagian utama tersebut memiliki indeks bias yang berbeda.

Serat optik *multimode graded index* adalah jenis serat optik yang memiliki indeks bias *core* tidak seragam. Ketidakteraturan ini hadir karena indeks bias lebih tinggi pada sumbu *core* dan terus berkurang dengan gerakan radial menjauh dari sumbu, sedangkan indeks bias pada *cladding* konstan (David R. Sánchez Montero, 2013).



Gambar 2.2. Struktur serat optik *multimode graded index* (David R. Sánchez Montero, 2013)

Refractive index pada serat optik *graded index*

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad 0 \leq r \leq a \quad (2.3)$$

$$n(r) = n_1(1 - 2\Delta)^{1/2} \approx n_1(1 - \Delta) = n_2 \quad r \geq a \quad (2.4)$$

Dimana;

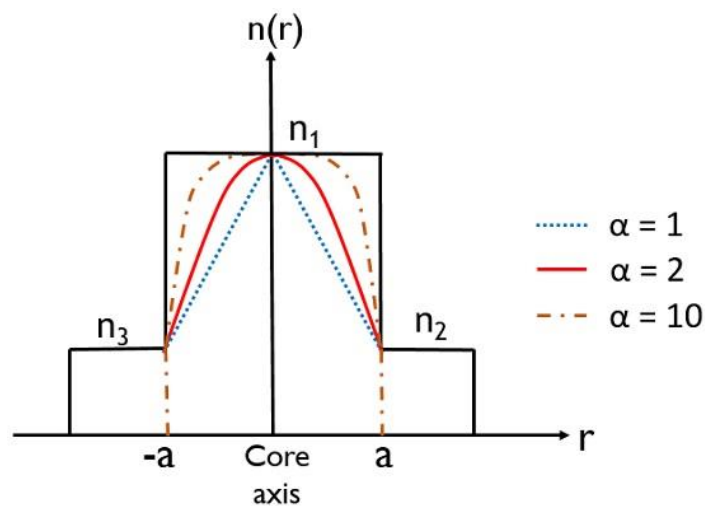
a = *radius core*

r = jarak radial dari *core axis*

α = karakteristik profil *refractive index*

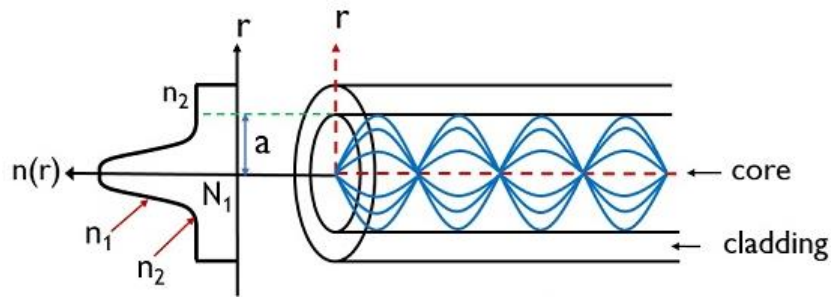
n_1 dan n_2 = indeks bias *core* dan *cladding*

Kurva yang mewakili variasi dalam profil indeks bias dengan berbagai nilai α .



Gambar 2.3. Kurva profil indeks bias serat optik *multimode graded index* (David R. Sánchez Montero, 2013)

Diameter *core* dari serat optik *multimode graded index* berkisar antara 50-100 mikrometer. Diameter *core* yang besar memungkinkan banyak sinar yang merambat didalamnya. Ketika cahaya merambat di dalam serat optik dari medium yang kurang padat ke medium yang lebih padat. Cahaya meskipun dipantulkan akan dibiaskan di dalam *core*, mengikuti jalur parabola karena ketidakseragaman dalam indeks bias *core* (David R. Sánchez Montero, 2013).

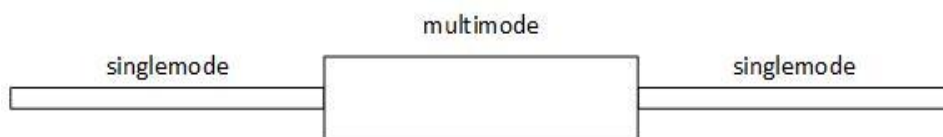


Gambar 2.4. Skema transmisi cahaya pada serat optik *multimode graded index*

(David R. Sánchez Montero, 2013)

2.4 Serat Optik *Singlemode – Multimode – Singlemode*

Serat optik berstruktur SMS (*singlemode – multimode – singlemode*) merupakan suatu struktur yang terdiri dari serat optik *singlemode* identik yang secara aksial disambung di kedua ujung serat optik *multimode*. Sambungan antar serat optik perlu tersambung secara aksial, agar menghindari adanya eksitasi moda dengan orde lebih tinggi pada daerah sambungan masih (*lead-in*) antara serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode*. Karena ukuran diameter *core* serat optik *multimode* jauh lebih besar daripada serat optik *singlemode*, maka hanya moda-moda *fundamental* dengan orde lebih rendah yang dapat dibangkitkan dan dipandu di dalam serat optik (Arun Kumar, 2003).



Gambar 2.5. Skema serat optik SMS

Fenomena pandu gelombang di dalam serat optik berstruktur SMS dapat dijelaskan melalui *modal propagation analysis* (MPA). Ketika sambungan serat optik *singlemode* dan *multimode* diasumsikan tersambung secara sempurna, maka daya *output* pada sambungan *lead-out* merupakan eksitasi dari beberapa moda sirkular simetri yang pertama. Pada *input* cahaya *multimode* ($z=0$) diasumsikan mempunyai distribusi medan $\psi(r,0)$ yang sebanding dengan moda fundamental pada *singlemode* dengan moda dasar yang terpandu adalah LPom. Sedangkan profil medan d dalam *multimode* diasumsikan sebagai $\psi_M(r)$.

Bidang moda dari serat optik *singlemode*:

$$\psi_s(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_s} e^{\left(\frac{-r^2}{w_s^2}\right)} \quad (2.5)$$

Serat optik *multimode* dalam struktur SMS diasumsikan sebagai serat parabola-inti dengan profil indeks bias berikut:

$$\psi_m(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_M} L_m \left(\frac{2r^2}{w_M^2} \right) e^{\left(\frac{-r^2}{w_M^2}\right)} \quad (2.6)$$

Persamaan profil medan

$$\psi(z=0) = \psi_s = \sum A_m \psi_m(r) \quad (2.7)$$

Dimana A_m merupakan koefisien eksitasi setiap moda atau amplitude penjalaran cahaya pada setiap moda yang dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$A_m = \frac{\int_0^\infty \psi_s \psi_m r dr}{\int_0^\infty |\psi_m|^2 r dr} \quad (2.8)$$

Dalam serat optik multimode pada jarak tertentu ($z=L$) maka distribusi gelombang cahaya dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$\psi(z=L) = \sum A_m \psi_m e^{-i\beta_m L} \quad (2.9)$$

Nilai daya output dari serat optik SMS dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_{SM} = \left| \int_0^\infty \psi_s \psi(z=L) r dr \right|^2 \quad (2.10)$$

Dimana :

$\psi(r,L)$ = profil distribusi medan ($z=L$)

L = panjang serat optik *multimode*

A_m = koefisien eksitasi tiap moda

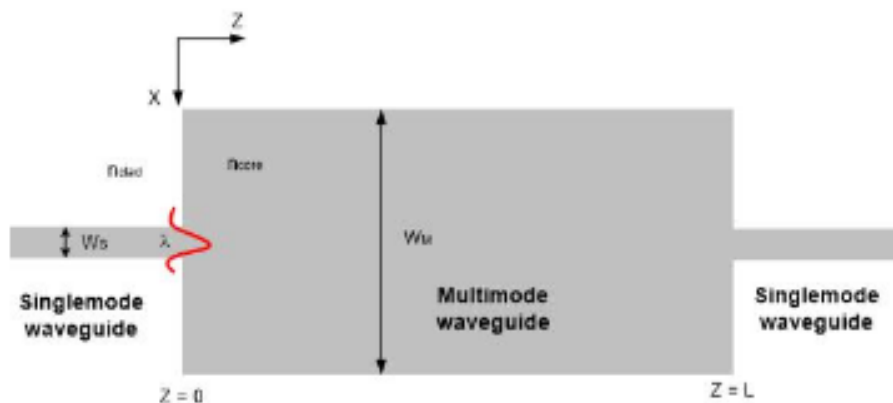
ψ_m = profil distribusi medan *multimode*

i = bilangan imajiner

β_m = konstanta propagasi moda ke- m

2.5 Multimode Interference (MMI)

Multimode Interference (MMI) merupakan fenomena yang terjadi akibat pemantulan cahaya berulang di dalam susunan *core* dan *cladding* pandu gelombang. Pemantulan cahaya yang berulang dalam *core* menyebabkan terjadinya interferensi secara internal, sehingga akan menyebabkan pola perambatan cahaya yang keluar dari *core* berubah secara periodik. Serat optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* dapat digunakan sebagai sensor karena perbedaan jari-jari antara serat optik *singlemode* dengan serat optik *multimode* cukup besar, dimana jari-jari *singlemode* lebih kecil daripada *multimode*. Saat cahaya ditransmisikan pada serat optik *lead-in singlemode* menuju ke *multimode*, ada cahaya yang *loss* sehingga hanya moda fundamental saja yang ter-*couple* menuju serat optik *multimode* dan akan terjadi interferensi destruktif atau konstruktif yang bergantung pada jari-jari, panjang gelombang operasi yang digunakan, dan profil indeks bias. Interferensi antar moda terjadi sepanjang *multimode*, membentuk titik-titik interferensi maksimum dan minimum pada jarak tertentu. Interferensi konstruktif yang terjadi secara periodik disebut dengan fenomena *self imaging* (Hatta A. M., 2009).



Gambar 2.6. Fenomena *multimode interference* pada serat optik SMS
(Hatta A. M., 2009)

2.6 Pengaruh *Strain* pada Serat Optik SMS

Pada saat diberi *strain* maka jari-jari, indeks bias *core* dan *cladding*, dan panjang pada serat optik *singlemode* dan *multimode* akan mengalami perubahan.

Perubahan jari-jari, panjang serat optik dan perubahan indeks bias serat optik SMS saat diberi *strain* dinyatakan dengan persamaan berikut (Hatta A. M., 2010):

Perubahan panjang *multimode*:

$$\Delta l = l\varepsilon \quad (2.11)$$

Panjang MMF setelah dipengaruhi *strain*

$$L_{MMF} = L_0 + \Delta l \quad (2.12)$$

Perubahan jari-jari

$$\Delta a = -av\varepsilon \quad (2.13)$$

Perubahan indeks bias

$$\Delta n = -\frac{n_i^3}{2} [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})]\varepsilon = -p_e\varepsilon \quad (2.14)$$

Dimana;

Δl = perubahan panjang

ε = *strain* pada serat optik

Δa = perubahan jari-jari serat optik

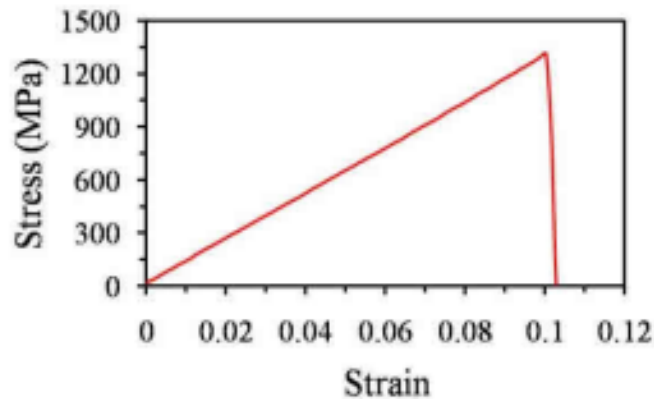
Δn = perubahan indeks bias serat optik

n_i = indeks bias *core* atau *cladding*

v = Poisson *ratio* 0.16

p_{11} dan p_{12} = komponen *strain*-optik; $p_{11} = 0.113$; $p_{12} = 0.252$

p_e = koefisien *strain*-optik efektif



Gambar 2.7. Kurva *stress-strain* pada serat optik (Goel, 2011)

Pada kurva *stress-strain* pada serat optik dapat dilihat bahwa *fracture point* atau titik patah dari serat optik adalah pada 0.11 yang berarti serat optik akan patah jika diregangkan diatas 0.11. Strain maksimum yang dapat diberikan pada serat optik adalah 0.11 (Goel, 2011).

2.7 Optical Kerr Effect

Efek nonlinear pada jaringan komunikasi optik terjadi ketika indeks bias dalam serat optik berinteraksi dengan cahaya transmisi. Interaksi daya yang terjadi pada pada medium bias berhubungan dengan *Kerr effect*, yang disebabkan karena indeks bias yang berubah-ubah akibat adanya intensitas daya optik (Optoelectronics, 2004). Efek Kerr merupakan fenomena dimana indeks bias suatu material berubah karena kuadrat medan listrik yang diterapkan, dimana kuadrat medan listrik sebanding dengan intensitas daya optik (W/m^2).

Perubahan indeks bias yang terjadi pada *Kerr effect* ditunjukkan pada persamaan:

$$n(E) = n_0 + n_2 E^2 \quad (2.15)$$

$$E^2 \propto I = \frac{P}{A_{eff}} \quad (2.16)$$

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2.17)$$

Dimana;

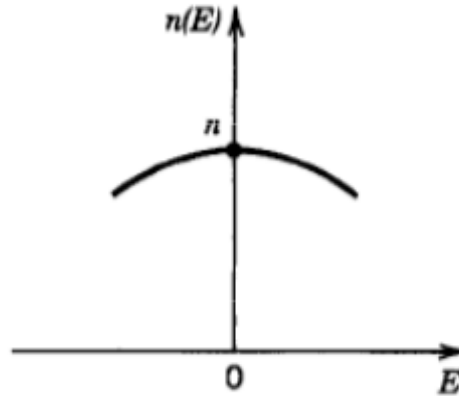
n_{eff} = indeks bias efektif

n_0 = indeks bias serat optik

n_2 = indeks nonlinear material

E = medan listrik

I = intensitas daya optik (W/m^2)



Gambar 2.8. Hubungan indeks bias terhadap medan listrik pada medium Kerr
(Muriel, 2015)

Perubahan dari indeks bias yang berasal dari efek Kerr optik menyebabkan perubahan panjang gelombang *self-imaging* dalam serat optik *multimode*. Spektrum transmisi dari perangkat serat SMS akan berubah karena efek Kerr dan *multimode interference*. Akibatnya, transmisi perangkat serat SMS pada panjang gelombang tertentu menunjukkan peningkatan transmisi pada daya laser yang tinggi (Shijie Fu, 2015). Dengan adanya efek Kerr, indeks bias serat optik dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan dapat dinyatakan pada persamaan berikut

$$\Delta n_{eff,n}(I)L = m_n \lambda \quad (2.18)$$

$m_n = \text{integer}$

Panjang gelombang *self-imaging* pada intensitas laser yang tinggi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\lambda_{SI} = \frac{\Delta n_{eff,n}(I \text{ high})}{\Delta n_{eff,n}(I \text{ low})} \quad (2.19)$$

Sistem dengan efek Kerr merupakan topik pada penelitian tugas akhir ini. Efek yang ditimbulkan dengan merubah parameter n_2 yang mempengaruhi kondisi serat optik. n_2 merupakan indeks nonlinear pada material serat optik.

2.8 Sensor

Sensor adalah suatu perangkat dari salah satu bagian *transducer* yang memberikan sinyal keluaran sebagai fungsi dari masukan besaran fisis tertentu. Sensor berfungsi untuk menangkap adanya perubahan energi eksternal yang masuk pada bagian *input transducer* untuk dikirim ke konverter agar bisa diubah menjadi energi listrik. Nilai karakteristik statik dari setiap elemen dinyatakan sebagai berikut (Bentley, 1995):

a. Range

Range adalah nilai minimum dan maksimum masukan (I_{\min} , I_{\max}) dan keluaran (O_{\min} , O_{\max}) sensor.

b. Span

Span adalah variasi maksimum *input* atau *output* suatu sistem pengukuran.

Span dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$Input\ span = input_{maks} - input_{min} \quad (2.20)$$

$$Output\ span = output_{maks} - output_{min} \quad (2.21)$$

c. Sensitivitas

Sensitivitas merupakan perbandingan antara perubahan *output* dengan perubahan *input* dari suatu sistem pengukuran. Sensitivitas menunjukkan seberapa jauh kepekaan sensor terhadap kuantitas yang diukur. Sensitivitas dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$K = \frac{output_{maks} - output_{min}}{input_{maks} - input_{min}} \quad (2.22)$$

d. Linearitas

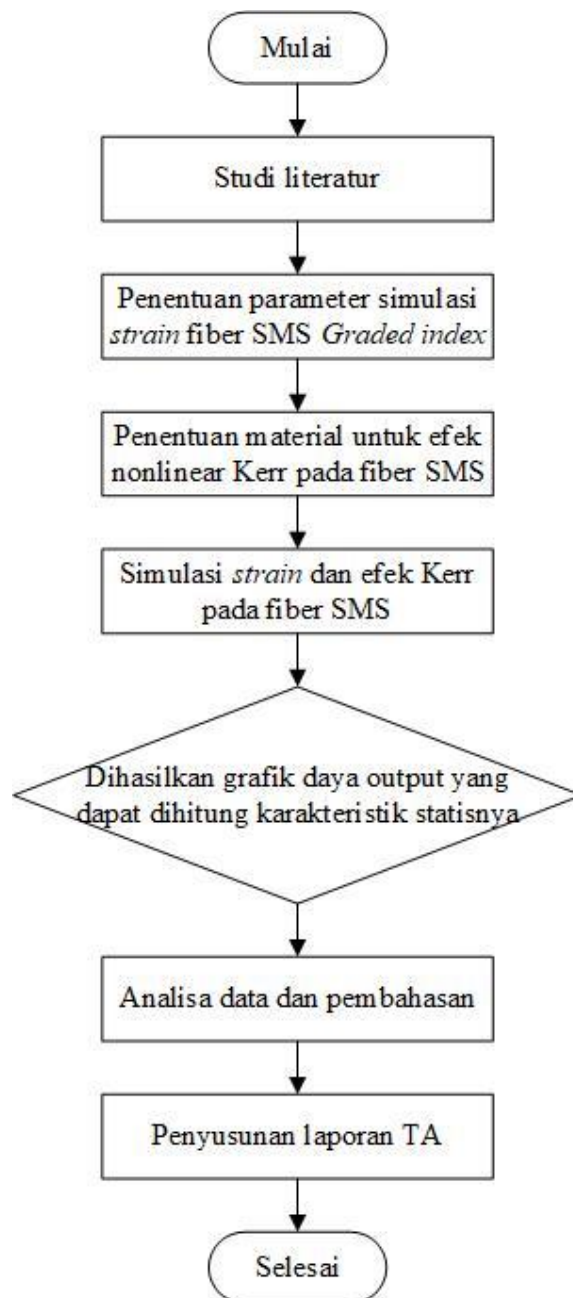
Suatu sistem dikatakan linear jika hubungan *input* dengan *output* merupakan suatu garis lurus. Nilai *output* linear pada suatu sistem dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$Output\ ideal = K \times input + a \quad (2.23)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan mulai dari awal hingga akhir untuk ketercapaian tujuan tugas akhir. Metodologi penelitian secara simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini dinyatakan dalam gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir

3.1 Studi literatur

Pengerjaan tugas akhir diawali dengan melakukan studi literatur untuk mengetahui konsep dasar pengaruh *strain* pada serat optik berstruktur SMF-GIMF-SMF, mengetahui parameter yang dibutuhkan dalam simulasi, mengetahui cara menghitung dan menganalisa hasil dari simulasi dengan mempelajari jurnal-jurnal terkait penelitian yang kemudian akan digunakan sebagai referensi untuk validasi simulasi

3.2 Penentuan Parameter Serat Optik SMS

Setelah studi literatur dilakukan maka dapat ditentukan parameter serat optik *singlemode* dan *multimode graded index* yang akan disimulasikan menggunakan *software* Matlab. Variasi panjang serat optik *multimode* 4 cm, 5 cm, dan 6 cm diuji dalam simulasi sebagai sensor *strain* untuk mencari parameter yang optimal. Berdasarkan rumus empiris Sellemier, indeks bias *doped silica* direpresentasikan sebagai berikut (A.K. Ghatak, 1998).

$$n_{cl}^2(\lambda_0) - 1 = \frac{b_1\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - a_1} + \frac{b_2\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - a_2} + \frac{b_3\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - a_3} = 1.444 \quad (3.1)$$

Sehingga indeks bias *core* dari serat optik dapat dihitung dengan rumus berikut.

Indeks bias *core singlemode*

$$n_{co} = \sqrt{\frac{n_{cl}^2}{1 - 2D_s}} = 1.447 \quad (3.2)$$

Indeks bias *core multimode*

$$n_{co} = \sqrt{\frac{n_{cl}^2}{1 - 2D_M}} = 1.4557 \quad (3.3)$$

Parameter yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 3.1. Parameter serat optik SMS untuk simulasi

No.	Parameter	Simbol	Nilai
1	Lambda	λ	1.55
2	<i>Core radius SM</i>	a_s	4.15 μm
3	<i>Core radius MM</i>	a_M	62.5 μm
4	Panjang MMF	Lmmf	4 cm
			5 cm
			6 cm
5	<i>Refractive index difference SM</i>	D_s	0.002379
6	<i>Refractive index difference MM</i>	D_M	0.008
7	Indeks bias <i>singlemode</i>	nco	1.447
		ncl	1.444
8	Indeks bias <i>multimode</i>	nco	1.4557
		ncl	1.444

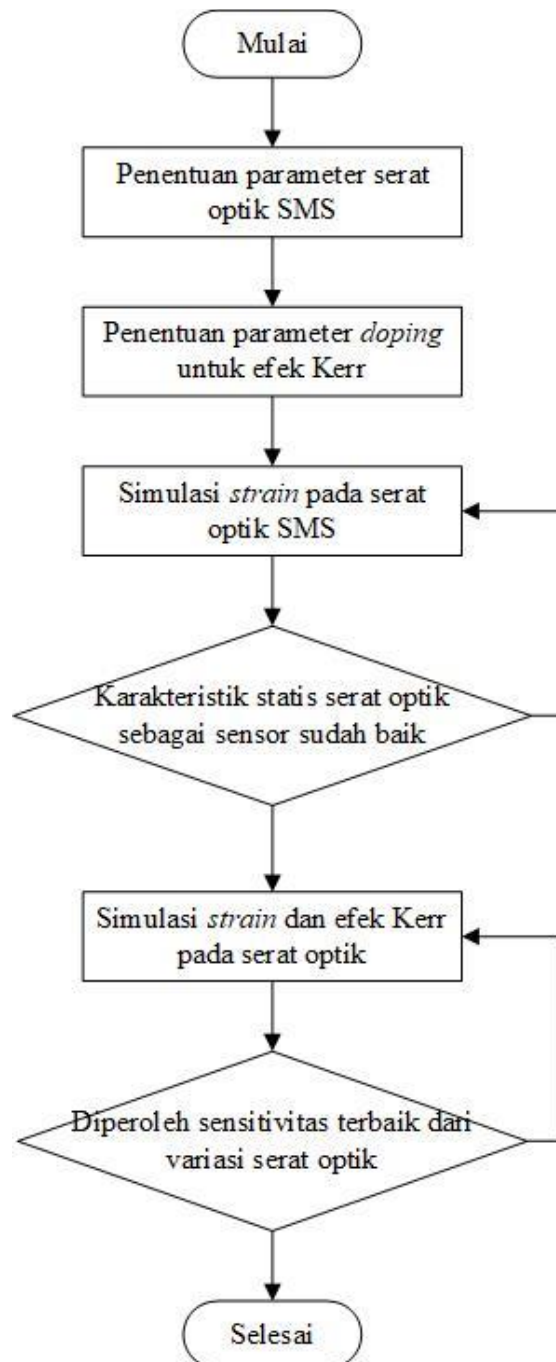
3.3 Penentuan Material *Doping* untuk Efek Kerr

Setelah dilakukan studi literatur, dapat ditentukan beberapa jenis material dengan indeks nonlinear yang berbeda-beda yang diasumsikan akan di-*doping* pada serat optik *multimode graded index* sehingga mempengaruhi parameter dari serat optik seperti energi band-gap dan indeks bias (Moh Yasin, 2015). *Doping* pada *core* serat optik bertujuan untuk melihat pengaruh efek Kerr pada serat optik berdasarkan simulasi. Material yang digunakan adalah sebagai berikut (Kabacinski, 2019) (Major, 2004).

Tabel 3.2. Indeks nonlinear dari beberapa jenis material

No.	n_2 (m^2/W)	Material
1	1.71×10^{-20}	<i>Calcium Fluoride</i> (CaF_2)
2	2.12×10^{-20}	<i>Calcite</i> (CaCO_3)
3	2.80×10^{-20}	<i>Sapphire</i>

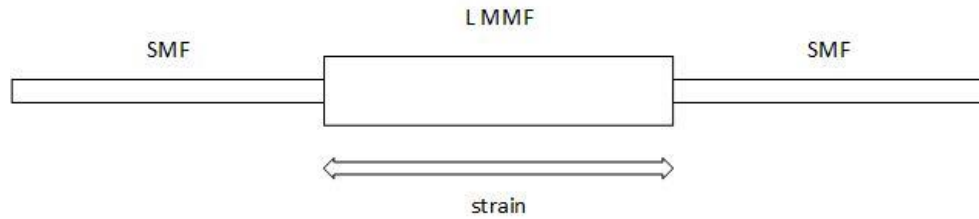
3.4 Simulasi *Strain* dan efek Kerr pada Serat Optik SMS



Gambar 3.2. Diagram alir simulasi *strain* dan efek Kerr serat optik

Simulasi menggunakan *software* Matlab dilakukan setelah parameter-parameter ditentukan dengan memberi pengaruh *strain* sebesar 0 - 1100 *microstrain*. Hal ini bertujuan untuk mengamati perubahan daya keluaran akibat

perubahan *strain* yang diberikan pada tiap variasi panjang serat optik *multimode* sehingga dapat ditentukan mana yang paling sensitif.



Gambar 3.3. Skema pemberian *strain* pada serat optik SMS

Ketika serat optik dengan panjang L diregangkan dengan gaya yang diterapkan, perubahan panjang (ΔL) umumnya sebanding dengan L , dengan rasio $\Delta L/L$ sebagai *strain* atau regangan. Karena $\Delta L/L$ biasanya cukup kecil, unit *microstrain* sering digunakan yang sesuai dengan ekstensi fraksional $\Delta L/L = 10^{-6}$ (Quimby, 2006). Pergeseran puncak panjang gelombang ($\Delta\lambda$) untuk perpanjangan 1 *microstrain* dengan ekstensi fraksional $\Delta L/L = 10^{-6}$, maka perubahan fraksional pada panjang gelombang (λ) juga sebesar 10^{-6} dengan panjang gelombang (λ) dalam satuan pikometer, dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta\lambda = 10^{-6}(\lambda \times 10^{-6}) \quad (3.4)$$

Sehingga diperoleh pergeseran *strain* dalam satuan pm/microstrain.

Setelah menentukan parameter serat optik, material, dan intensitas untuk simulasi, selanjutnya disimulasikan grafik spektrum transmisi dan grafik daya *output* serat optik sebagai sensor *strain* untuk mengetahui serat optik *multimode* dengan panjang berapa cm yang paling sensitivitasnya paling tinggi. Setelah itu dapat disimulasikan grafik spektrum transmisi dan grafik daya *output* serat optik sebagai sensor *strain* dengan efek Kerr dengan variasi intensitas, sehingga dapat dilakukan perhitungan karakteristik statis pada serat optik sebagai sensor *strain* untuk mengetahui serat optik dengan variasi apa yang sensitivitasnya paling tinggi untuk dijadikan sensor *strain*.

3.5 Grafik Daya *Output* yang Dihasilkan dapat Dihitung Karakteristik Statisnya

Dari hasil simulasi maka dapat dilihat karakteristik statisnya meliputi *span* dan sensitivitasnya berdasarkan grafik daya *output* dari sensor *strain* serat optik SMS dengan efek Kerr dengan variasi material dan intensitas.

3.6 Analisa Data dan Pembahasan

Dilakukan analisa dan pembahasan dari spektrum dan grafik yang telah dihasilkan. Dari hasil simulasi dapat diperoleh karakteristik statis serat optik SMS sebagai sensor akibat pengaruh *strain* dan efek Kerr pada berbagai material dengan variasi intensitas, sehingga dapat dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil simulasi.

3.7 Penyusunan Laporan

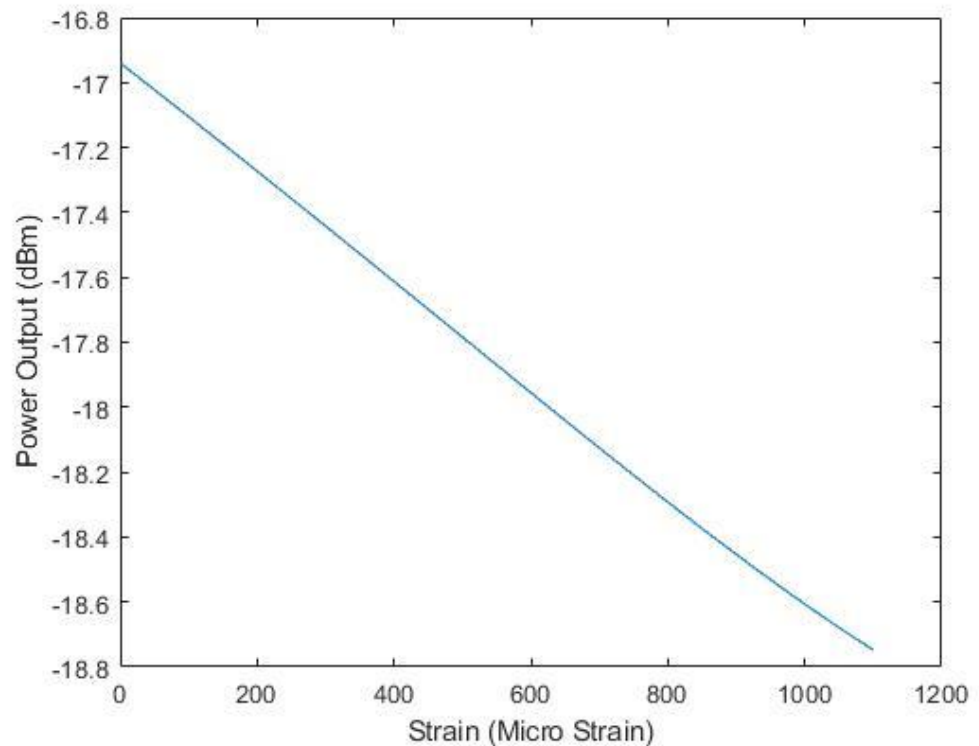
Penulisan laporan mengenai penyampaian hasil simulasi dapat dilakukan setelah seluruh tahapan pada diagram alir telah dilakukan, dimulai dari studi literatur sampai penarikan kesimpulan dari hasil penelitian berdasarkan simulasi.

BAB IV

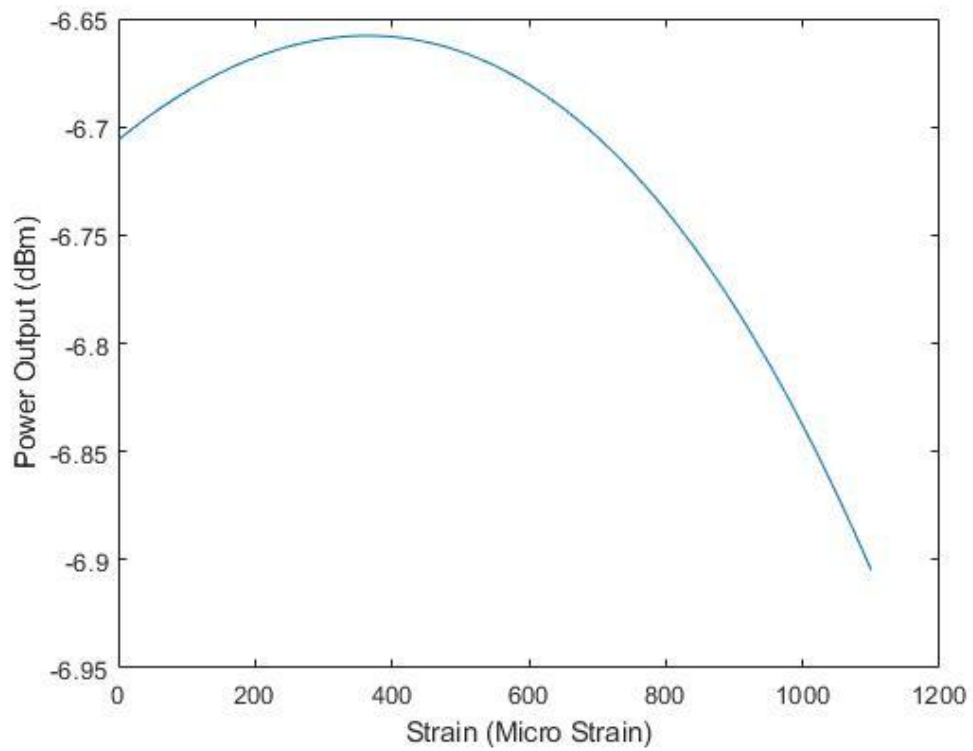
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi *Strain* pada Serat Optik

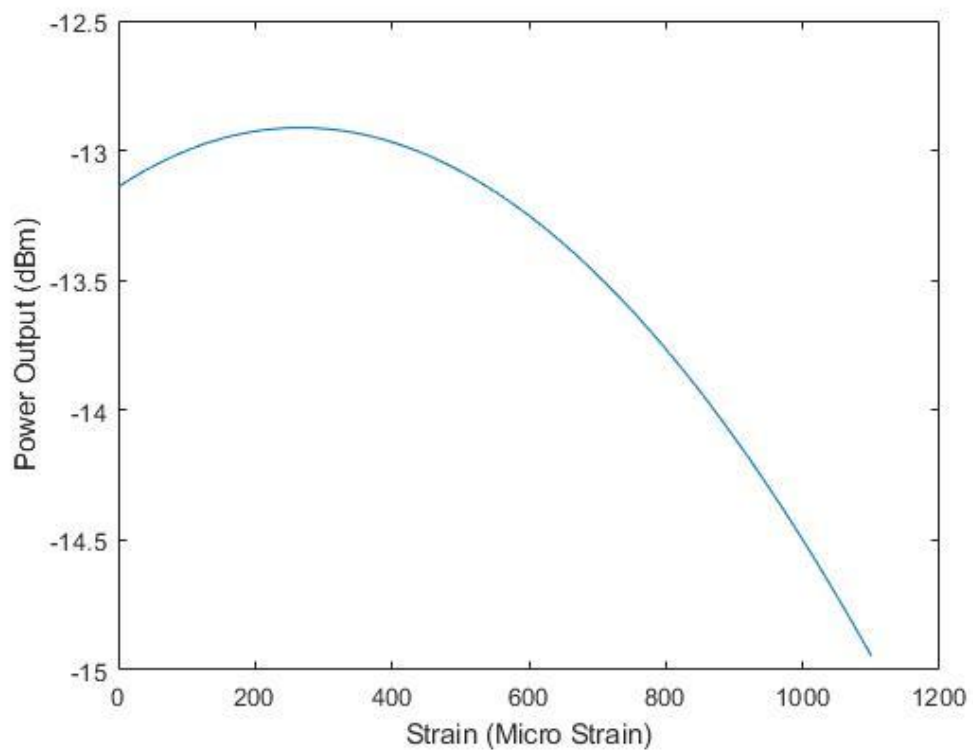
Telah dilakukan pengujian *strain* pada serat optik SMS menggunakan *software* Matlab. Dipilih variasi panjang serat optik serat optik *multimode graded index* 4 cm, 5 cm, dan 6 cm untuk melihat pengaruh *strain* pada serat optik berukuran pendek hingga panjang. Hasil simulasi *strain* pada serat optik sebelum diberikan doping



Gambar 4.1. Grafik daya terhadap *strain* pada L MMF 4 cm



Gambar 4.2. Grafik daya terhadap *strain* pada L MMF 5 cm



Gambar 4.3. Grafik daya terhadap *strain* pada L MMF 6 cm

Simulasi pengaruh *strain* diasumsikan serat optik SMS berada pada kondisi ideal dimana tidak terdapat pengaruh *loss* pada sambungan serat optik. Kecenderungan grafik daya keluaran tidak selalu menurun karena moda-moda yang berinterferensi akan berulang pada jarak tertentu berdasarkan panjang serat optik *multimode*. Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 menunjukkan grafik daya *output* yang semakin menurun ketika *strain* semakin besar, yang secara teoritis disebabkan karena daya *output* pada sambungan *lead-out* serat optik *multimode* yang terdeteksi oleh detektor menjauhi titik *self-imaging* pada setiap perubahan *strain* yang diberikan sehingga daya *output* yang dihasilkan semakin rendah dan *loss* yang dihasilkan semakin besar.

Setelah dilakukan simulasi pengaruh *strain* pada serat optik SMS, dapat dilakukan perhitungan karakteristik statik yang berfungsi untuk mengetahui performansi dari serat optik SMS apabila diaplikasikan sebagai sensor *strain*.

Tabel 4.1. Karakteristik statis *strain* serat optik L MMF 4 cm

Karakteristik statis			Hasil simulasi
<i>Range</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	Min.	0
		Max.	1100
	Daya <i>output</i> (dBm)	Min.	-18.7475
		Max.	-16.9462
<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	1100	
	Daya <i>output</i> (dBm)	1.8013	
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.00163

Tabel 4.2. Karakteristik statis *strain* serat optik L MMF 5 cm

Karakteristik statis			Hasil simulasi
<i>Range</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	Min.	0
		Max.	1100
	Daya <i>output</i> (dBm)	Min.	-6.9048
		Max.	-6.658
<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	1100	

Karakteristik statis		Hasil simulasi
	Daya output (dBm)	0.2468
	Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)	0.0002243

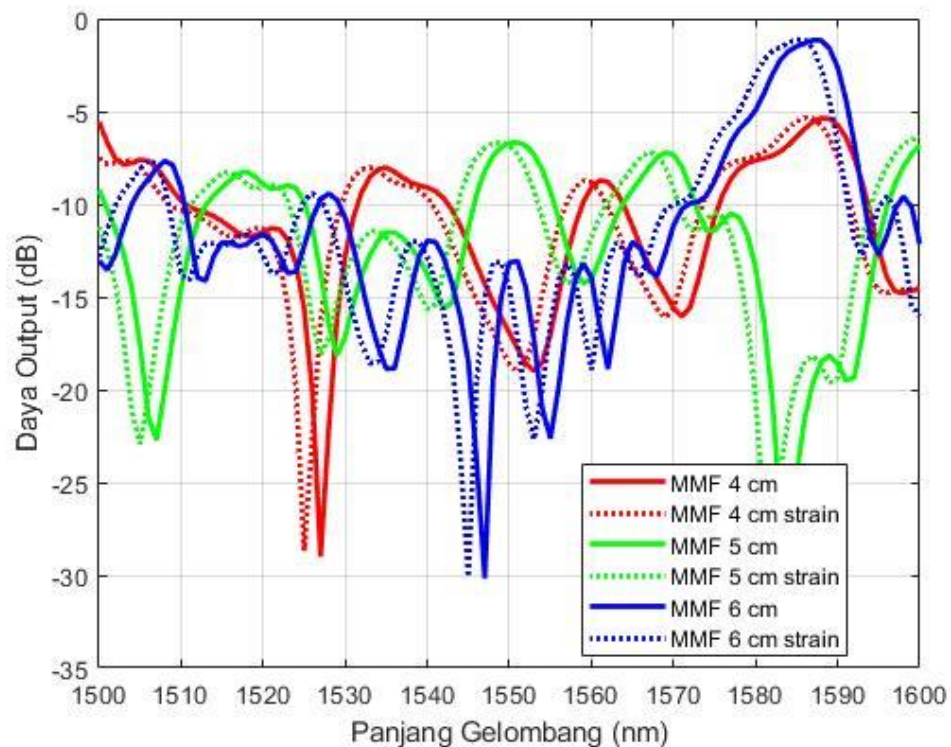
Tabel 4.3. Karakteristik statis *strain* serat optik L MMF 6 cm

Karakteristik statis		Hasil simulasi	
<i>Range</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	Min.	0
		Max.	1100
	Daya output (dBm)	Min.	-14.9412
		Max.	-12.9125
<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	1100	
	Daya output (dBm)	2.0287	
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)		0.001844	

Dari hasil perhitungan karakteristik statis, diperoleh nilai sensitivitas pada *multimode graded index* dengan panjang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm masing-masing sebesar 0.00163 dBm/ $\mu\epsilon$, 0.0002243 dBm/ $\mu\epsilon$, dan 0.001844 dBm/ $\mu\epsilon$. Serat optik *multimode graded index* dengan panjang 6 cm memiliki sensitivitas paling tinggi akibat dari selisih daya output yang besar yaitu 2.0287 dBm.

Berdasarkan persamaan (2.11), (2.13), dan (2.14), *strain* yang diberikan pada serat optik dapat mempengaruhi nilai indeks bias *core* dan *cladding*, dan jari-jari serat optik semakin menurun karena terjadi peregangan. Ketika diberi pengaruh *strain*, jari-jari dan indeks bias *core* dan *cladding* pada serat optik *multimode* mengalami perubahan yang lebih besar dibandingkan serat optik *singlemode*. Serat optik *multimode* lebih sensitif dibandingkan serat optik *singlemode*, karena serat optik *multimode graded index* memiliki banyak moda dan jari-jari yang lebih besar. Selain itu, indeks bias *core* serat optik *multimode* lebih besar dari pada *singlemode* sehingga lebih banyak terjadi *loss* pada serat optik *multimode*.

Strain pada serat optik juga mempengaruhi spektrum gelombang cahaya yang dihasilkan. Simulasi *strain* pada serat optik *multimode graded index* menghasilkan spektrum seperti pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Spektrum MMF setelah diberi *strain*

Serat optik SMS dengan *multimode graded index* dengan ketiga variasi panjang diberi pengaruh *strain* sebesar 0.001 terlebih dahulu sehingga simulasinya menghasilkan spektrum transmisi serat optik sebagai sensor *strain* dengan rentang panjang gelombang 1500 sampai 1600 nm, dimana puncak panjang gelombang serat optik yang telah diberi pengaruh *strain* terlihat bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil. Kondisi awal serat optik ditunjukkan oleh garis solid, sedangkan kondisi setelah serat optik diberikan *strain* ditunjukkan oleh garis putus-putus. MMF dengan panjang 4 cm ditunjukkan oleh garis berwarna merah, dengan kondisi awal puncak spektrum berada pada $\lambda=1589$ nm, bergeser ke $\lambda=1587$ nm. MMF dengan panjang 5 cm ditunjukkan oleh garis berwarna hijau dengan kondisi awal puncak spektrum berada pada $\lambda=1551$ nm, bergeser ke $\lambda=1549$ nm. MMF dengan panjang 6 cm ditunjukkan oleh garis berwarna biru dengan kondisi awal puncak spektrum berada pada $\lambda=1588$ nm, bergeser ke $\lambda=1586$ nm.

4.2 Uji Spektrum Panjang Gelombang Serat Optik yang Diberi Efek Kerr

Setelah serat optik disimulasikan menggunakan pengaruh *strain*, selanjutnya dilakukan simulasi efek Kerr, dimana serat optik diberi *doping* beberapa jenis material seperti *Calcium Fluoride* (CaF_2), *Calcite* (CaCO_3), dan *Sapphire* pada tiap panjang serat optik *multimode graded index* 4 cm, 5 cm, dan 6 cm tanpa pengaruh *strain*. *Doping* material CaF_2 , CaCO_3 , dan *Sapphire* yang memiliki indeks nonlinear n_2 dan diasumsikan menggunakan sumber cahaya LASER dengan variasi intensitas sebesar 10^{16} W/m^2 , dan intensitas tinggi 10^{17} W/m^2 dan 10^{18} W/m^2 (Phillip Sprangle, 2014) sehingga mempengaruhi indeks bias efektif dari serat optik *multimode*.

Tabel 4.4. Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{16} W/m^2

No.	$n_2 \text{ (m}^2/\text{W)}$	Material	Intensitas	n
1	1.71×10^{-20}	<i>Calcium Fluoride</i> (CaF_2)	10^{16} W/m^2	1.45587
2	2.12×10^{-20}	<i>Calcite</i> (CaCO_3)		1.45591
3	2.80×10^{-20}	<i>Sapphire</i>		1.45598

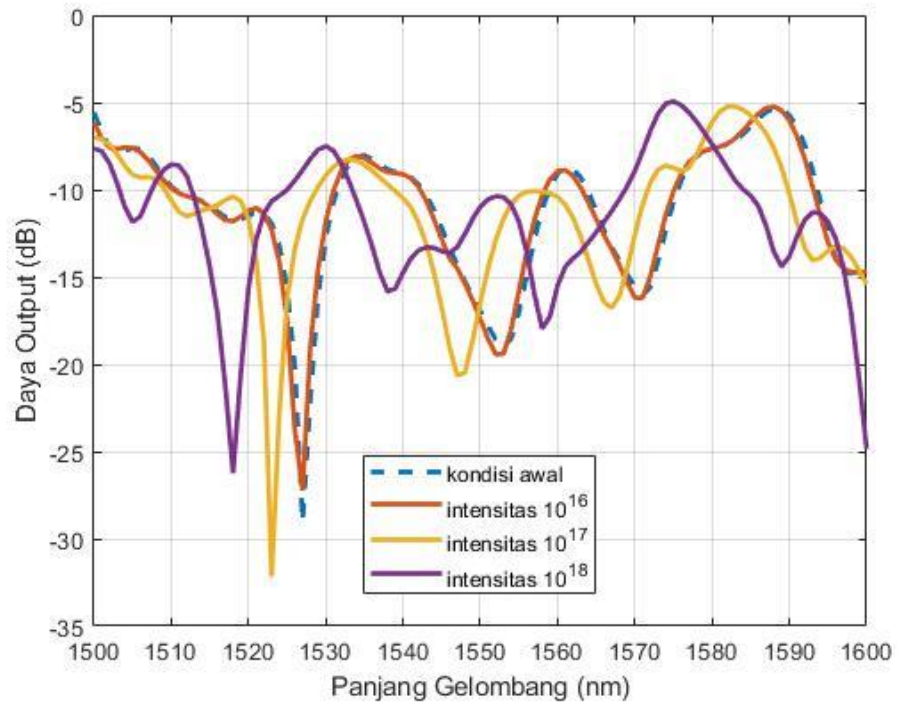
Tabel 4.5. Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m^2

No.	$n_2 \text{ (m}^2/\text{W)}$	Material	Intensitas	n
1	1.71×10^{-20}	<i>Calcium Fluoride</i> (CaF_2)	10^{17} W/m^2	1.4574
2	2.12×10^{-20}	<i>Calcite</i> (CaCO_3)		1.4578
3	2.80×10^{-20}	<i>Sapphire</i>		1.4585

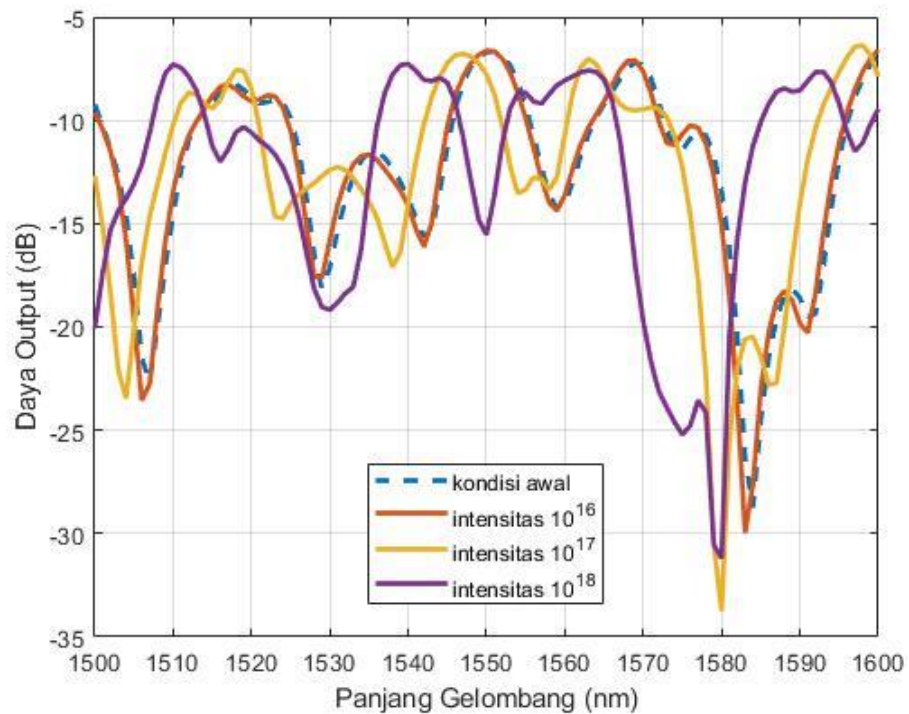
Tabel 4.6. Perubahan indeks bias efektif efek Kerr dengan intensitas 10^{18} W/m^2

No.	$n_2 \text{ (m}^2/\text{W)}$	Material	Intensitas	n
1	1.71×10^{-20}	<i>Calcium Fluoride</i> (CaF_2)	10^{18} W/m^2	1.4728
2	2.12×10^{-20}	<i>Calcite</i> (CaCO_3)		1.4769
3	2.80×10^{-20}	<i>Sapphire</i>		1.4837

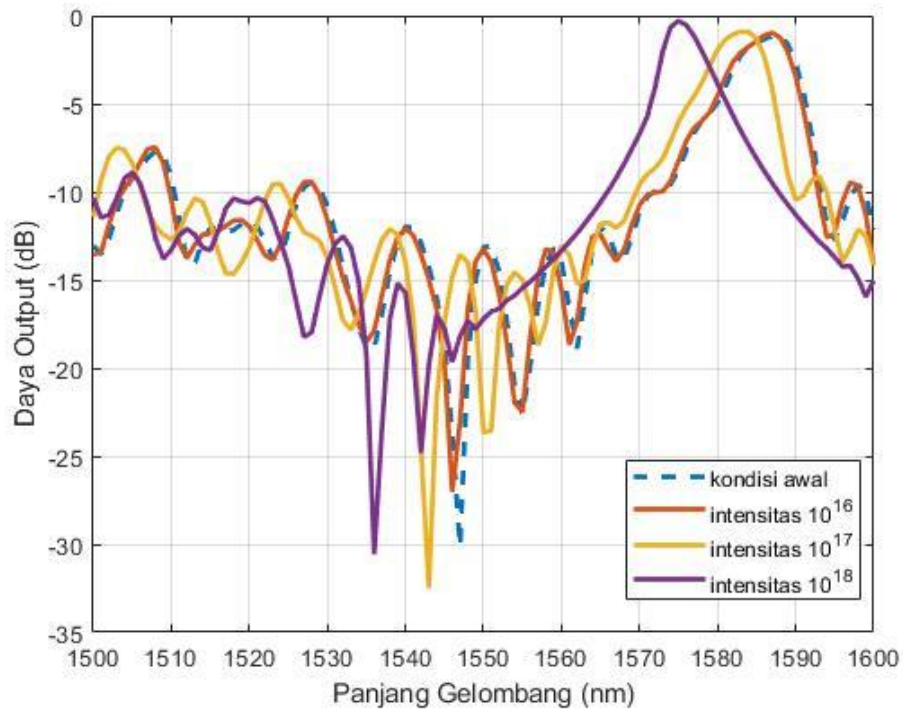
Simulasi dilakukan untuk menghasilkan spektrum transmisi pada tiap intensitas pada material yang sama pada sensor *strain* serat optik dengan efek Kerr, dihasilkan oleh gambar berikut ini.



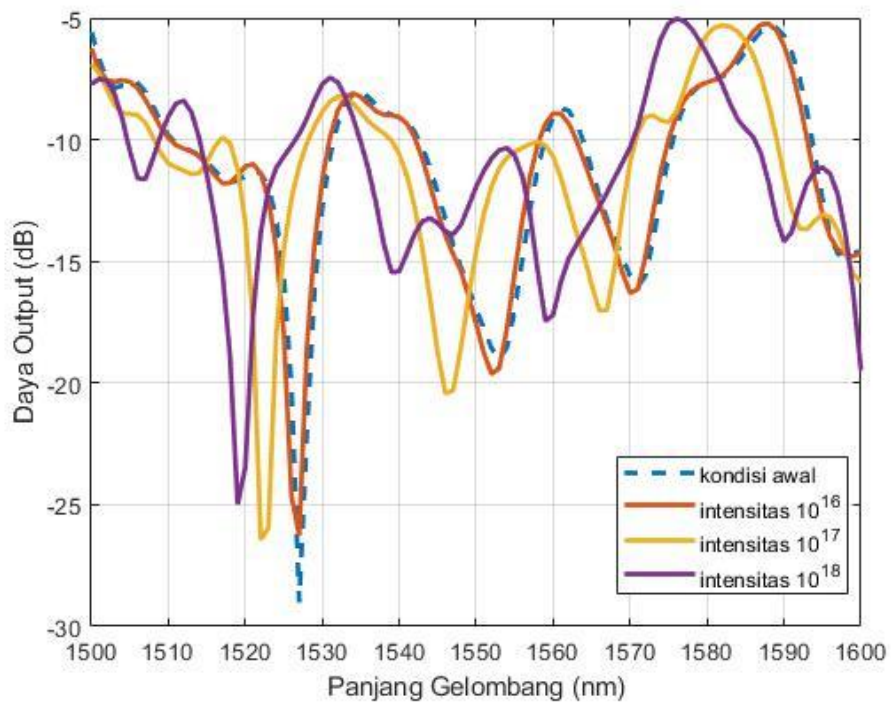
Gambar 4.5. Spektrum variasi intensitas pada material CaF_2 4 cm



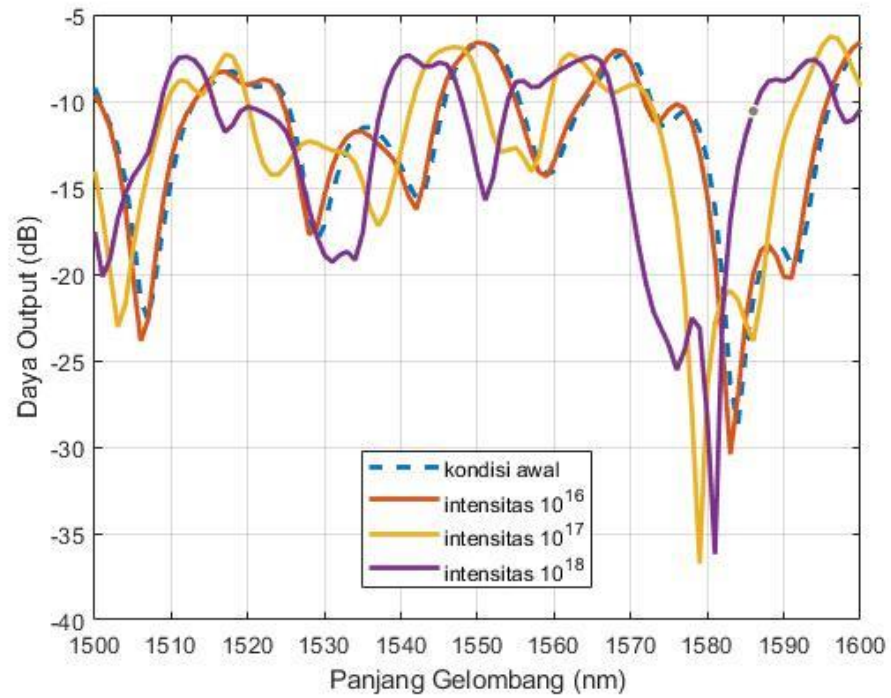
Gambar 4.6. Spektrum variasi intensitas pada material CaF_2 5 cm



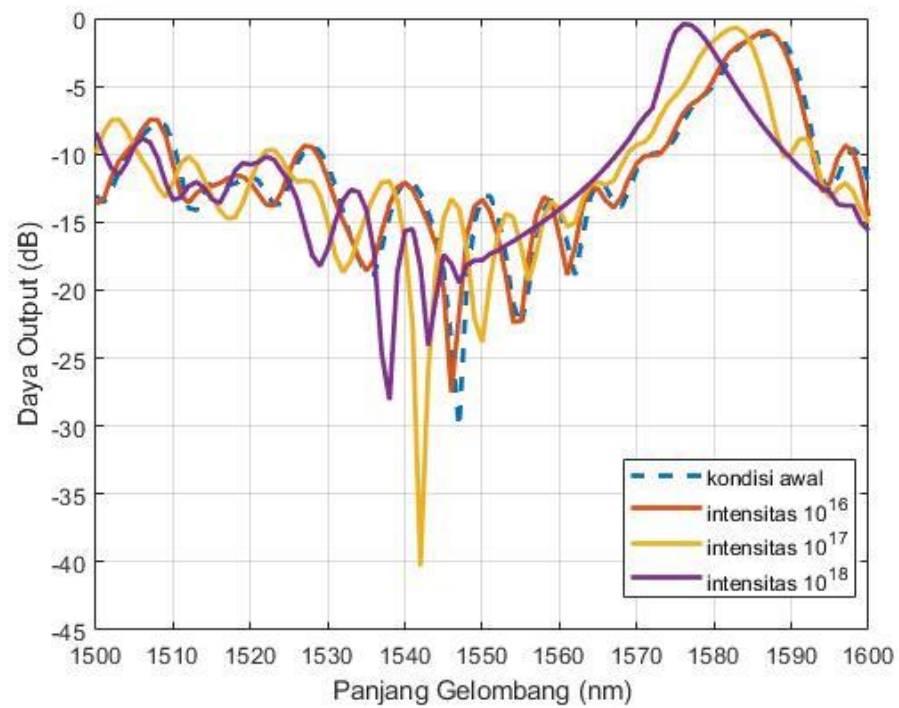
Gambar 4.7. Spektrum variasi intensitas pada material CaF_2 6 cm



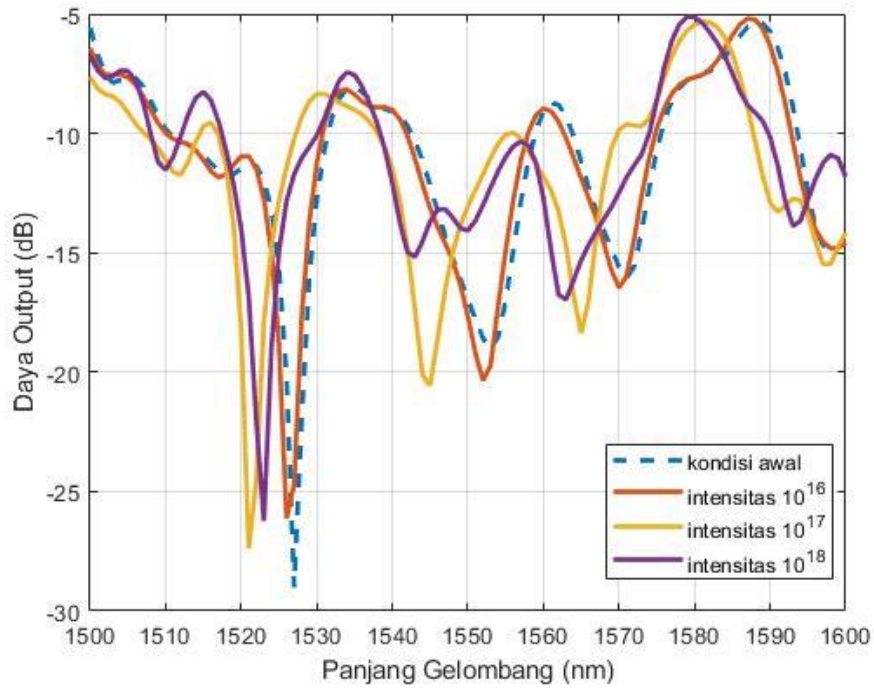
Gambar 4.8. Spektrum variasi intensitas pada material CaCO_3 4 cm



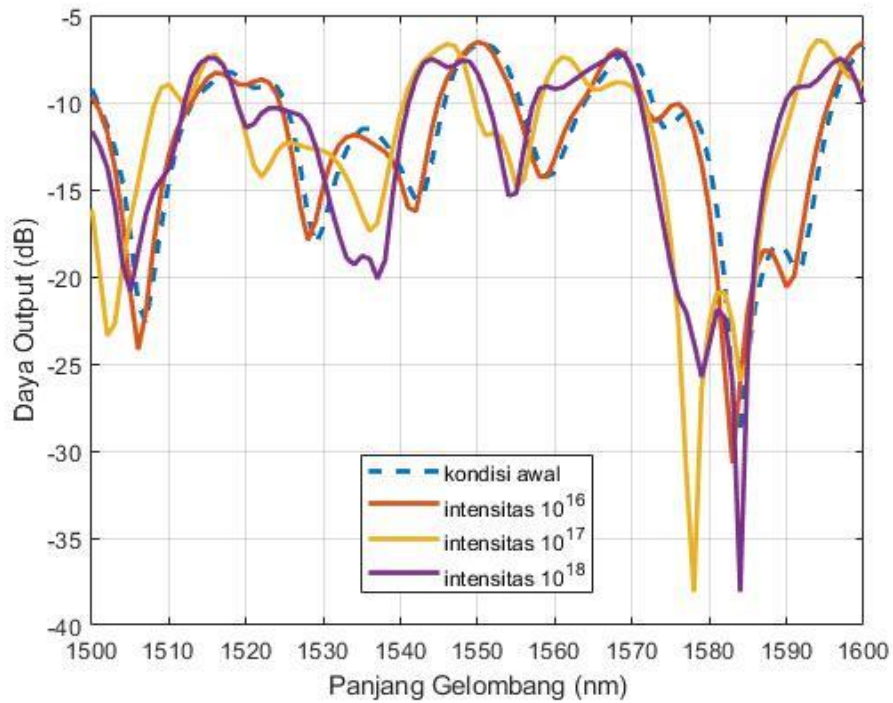
Gambar 4.9. Spektrum variasi intensitas pada material CaCO_3 5 cm



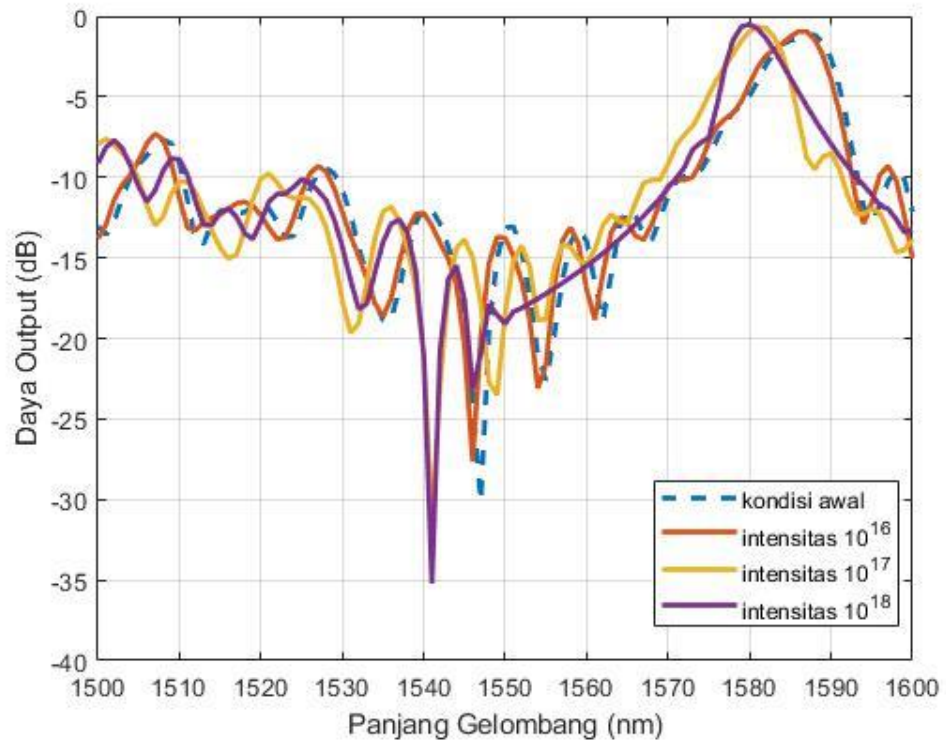
Gambar 4.10. Spektrum variasi intensitas pada material CaCO_3 6 cm



Gambar 4.11. Spektrum variasi intensitas pada material *Sapphire* 4 cm



Gambar 4.12. Spektrum variasi intensitas pada material *Sapphire* 5 cm

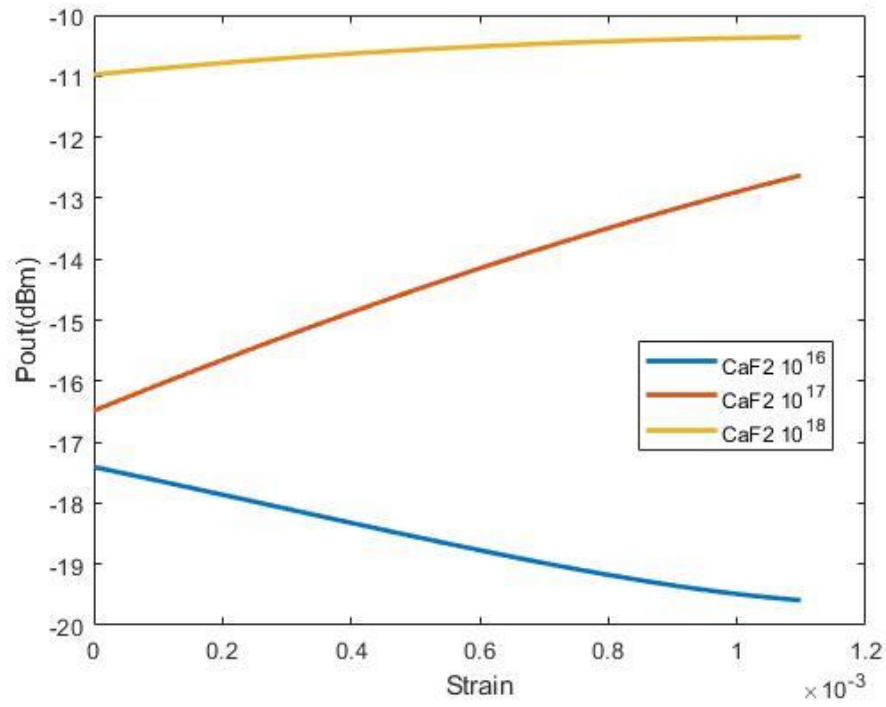


Gambar 4.13. Spektrum variasi intensitas pada material *Sapphire* 6 cm

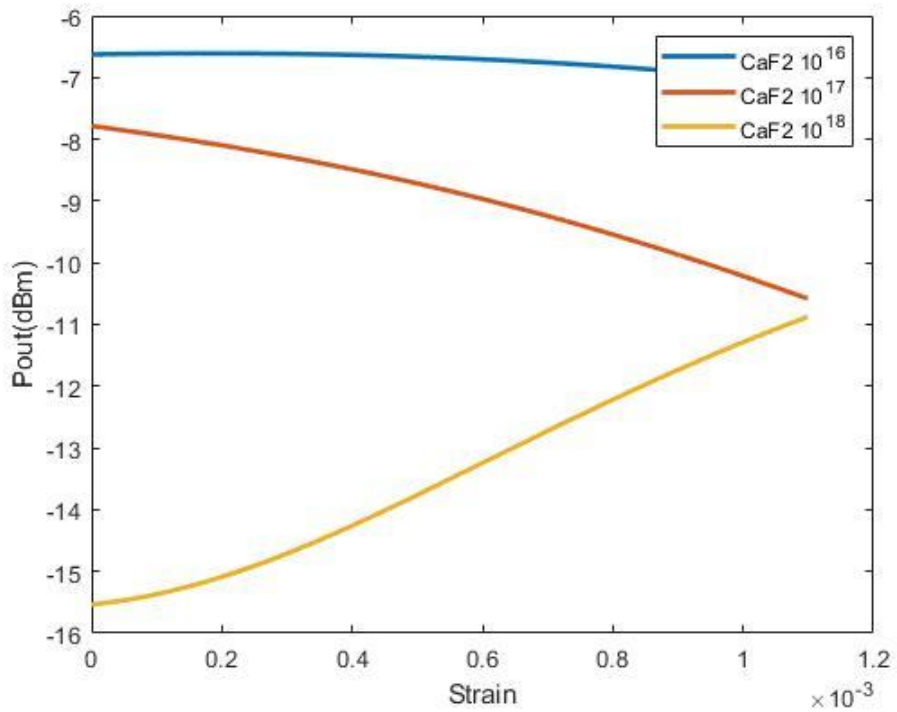
Kondisi awal serat optik ditunjukkan oleh garis putus-putus berwarna biru, sedangkan kondisi serat optik yang diberi efek Kerr dengan intensitas 10^{16} W/m², 10^{17} W/m², dan 10^{18} W/m² masing-masing ditunjukkan oleh garis berwarna merah, kuning, dan ungu. Karakteristik statis dari tiap variasi serat optik sebagai sensor *strain* dengan efek Kerr dapat dihitung berdasarkan grafik daya *output* pada sub bab 4.3.

4.3 Perubahan Daya Keluaran Sensor *Strain* yang diberi Efek Kerr

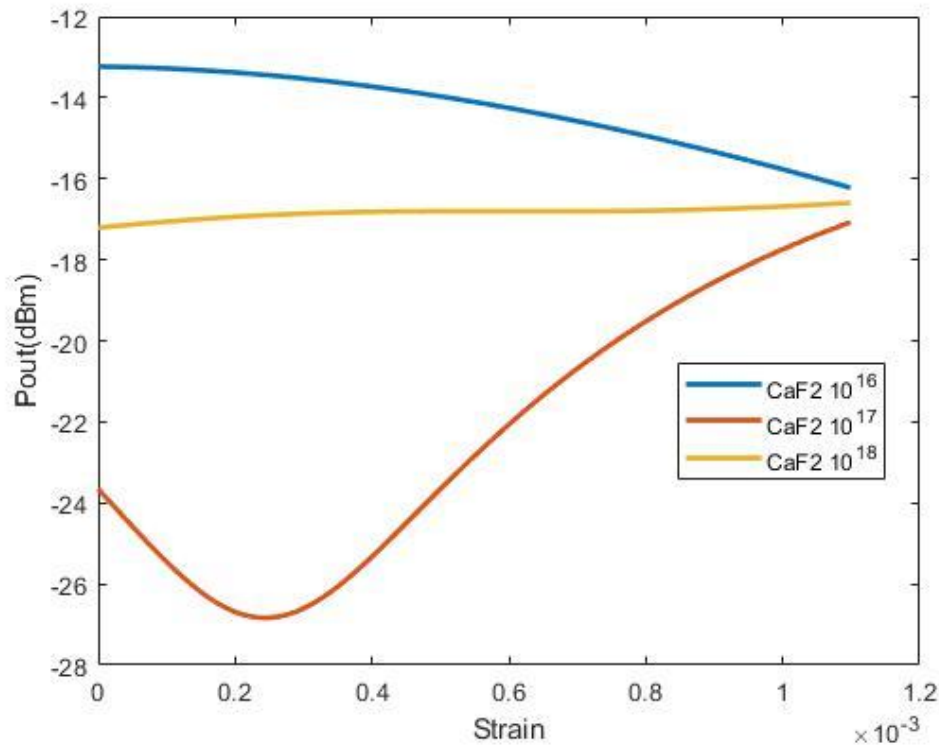
Strain dan pemberian efek Kerr dengan intensitas yang berbeda-beda pada serat optik SMS dapat mempengaruhi daya *output* yang dihasilkan oleh serat optik. Simulasi daya *output* terhadap *strain* pada serat optik yang diberi efek Kerr ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 4.14. Perubahan daya pada CaF₂ 4 cm dengan variasi intensitas

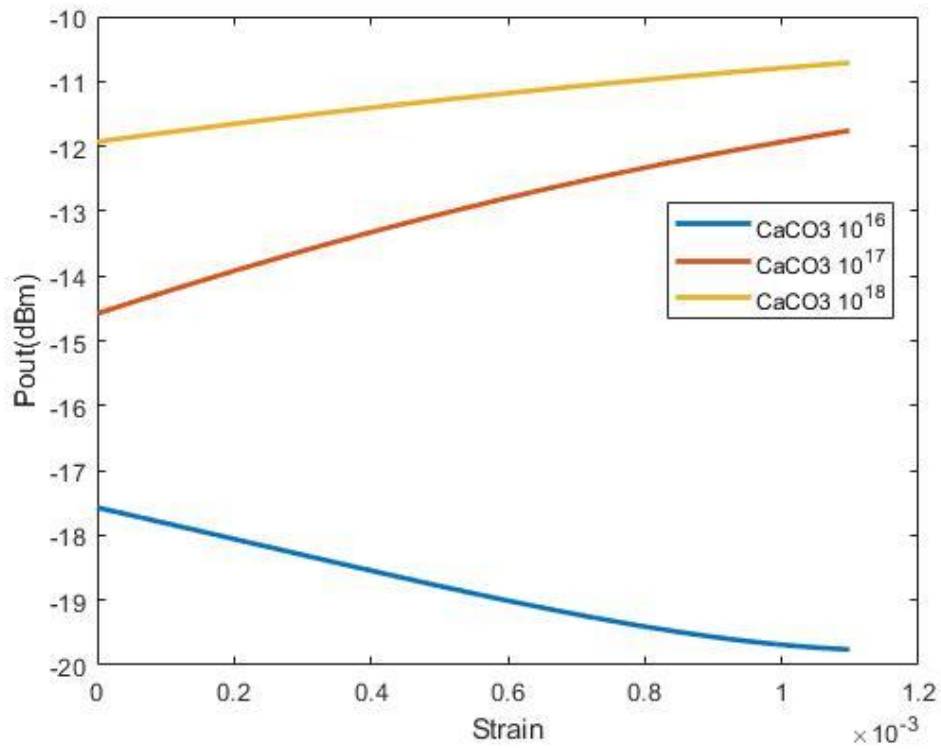


Gambar 4.15. Perubahan daya pada CaF₂ 5 cm dengan variasi intensitas

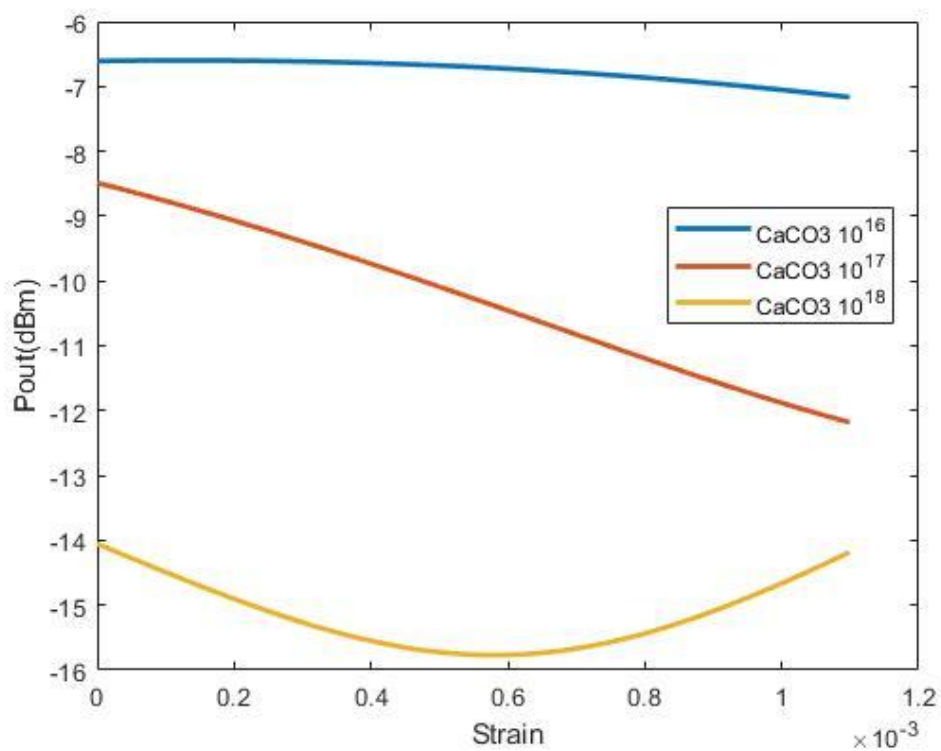


Gambar 4.16. Perubahan daya pada CaF₂ 6 cm dengan variasi intensitas

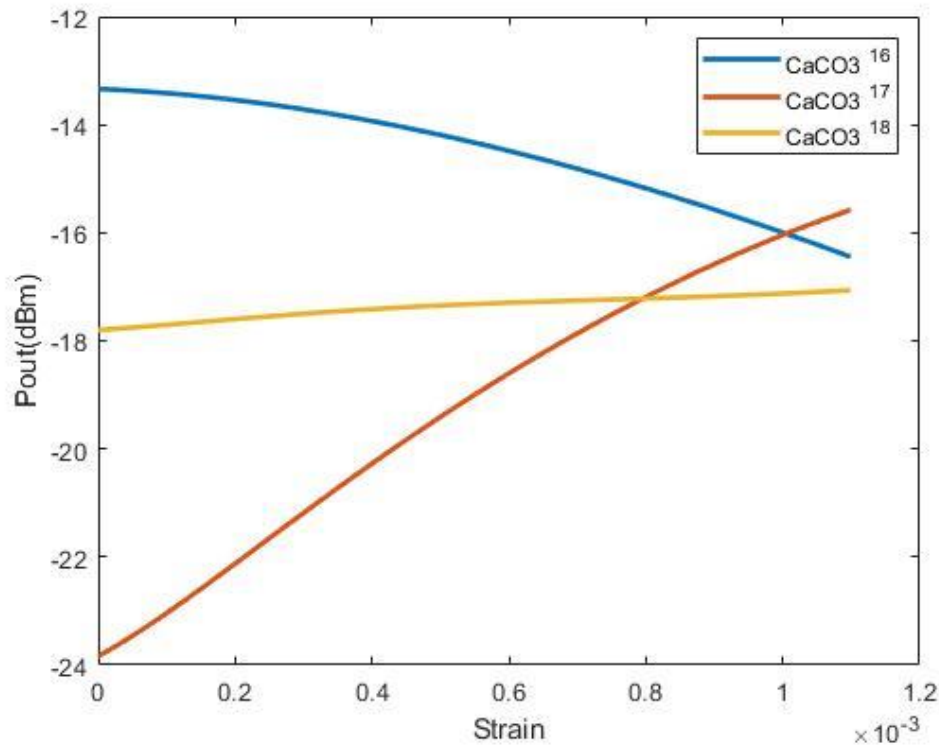
Hasil simulasi sensor *strain* dengan efek Kerr pada material CaF₂ menunjukkan *trend* grafik daya *output* yang beragam. Pada intensitas 10^{16} W/m² menghasilkan daya *output* yang cenderung menurun, dimana rugi daya semakin kecil saat *strain* semakin besar. Pada intensitas 10^{17} W/m², trend daya output meningkat pada MMF 4 cm, menurun pada MMF 5 cm, dan mengalami fluktuasi pada MMF 6 cm dengan *span* paling tinggi yaitu 9.754 dBm. Pada intensitas 10^{18} W/m² menghasilkan daya *output* yang cenderung meningkat.



Gambar 4.17. Perubahan daya pada CaCO₃ 4 cm dengan variasi intensitas

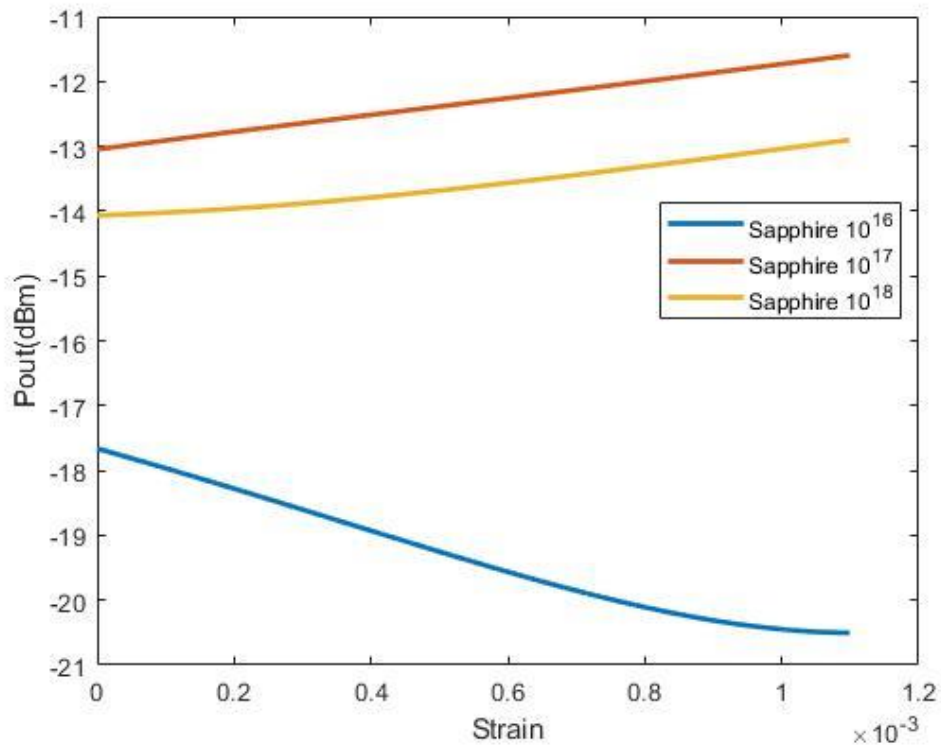


Gambar 4.18. Perubahan daya pada CaCO₃ 5 cm dengan variasi intensitas

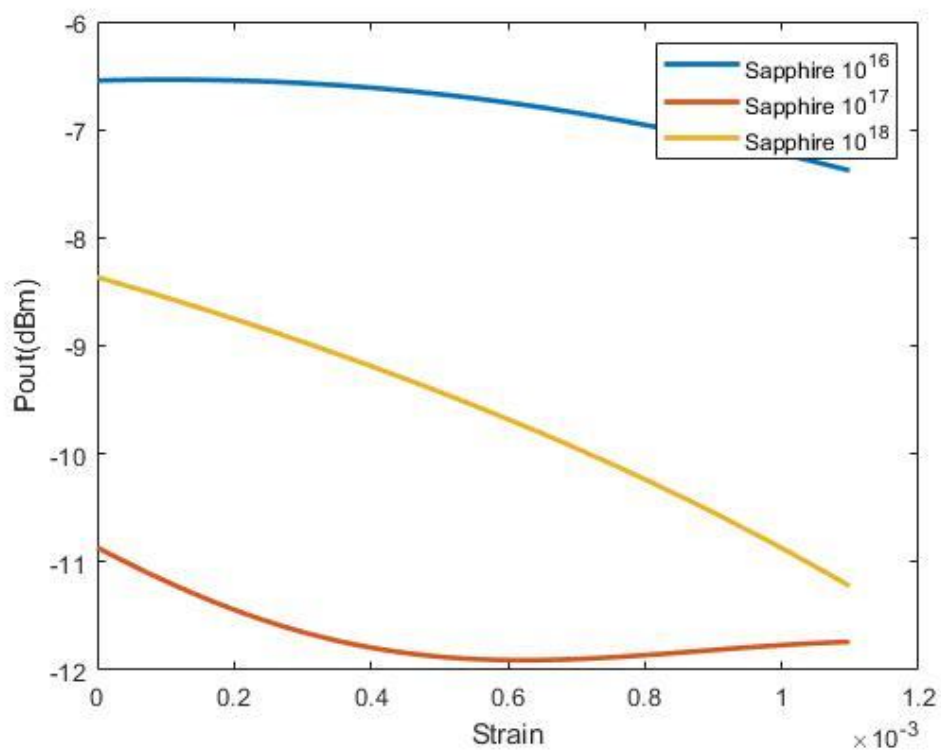


Gambar 4.19. Perubahan daya pada CaCO₃ 6 cm dengan variasi intensitas

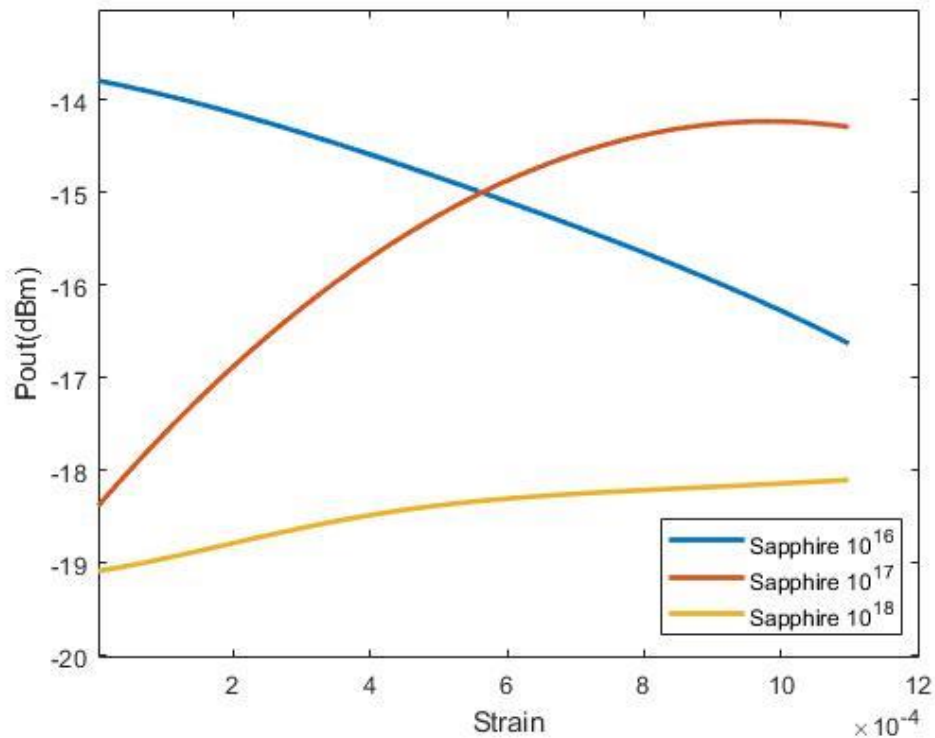
Pada sensor *strain* dengan efek Kerr CaCO₃, *trend* grafik daya *output* pada intensitas 10^{16} W/m² semakin meningkat pada MMF 4 cm, sedangkan pada MMF 5 cm dan 6 cm semakin menurun. Pada intensitas 10^{17} W/m², *trend* grafik daya *output* pada MMF 4 cm dan 6 cm semakin meningkat dengan *span* tertinggi sebesar 8.234 dBm pada MMF 6 cm, sedangkan pada MMF 5 cm semakin menurun. Pada intensitas 10^{18} W/m² *trend* grafik daya *output* pada MMF 4 cm dan 6 cm semakin meningkat, sedangkan pada MMF 5 cm semakin menurun.



Gambar 4.20. Perubahan daya pada *Sapphire* 4 cm dengan variasi intensitas



Gambar 4.21. Perubahan daya pada *Sapphire* 5 cm dengan variasi intensitas



Gambar 4.22. Perubahan daya pada *Sapphire* 6 cm dengan variasi intensitas

Sensor *strain* dengan efek Kerr *Sapphire* juga menghasilkan *trend* grafik daya *output* yang beragam. Pada intensitas 10^{16} W/m² menunjukkan grafik yang semakin menurun. Pada intensitas 10^{17} W/m² menunjukkan grafik yang semakin meningkat pada MMF 4 cm dan 6 cm dengan *span* tertinggi sebesar 4.056 dBm pada MMF 6 cm, sedangkan pada MMF 5 cm menunjukkan *trend* grafik daya *output* mengalami fluktuasi. Pada intensitas 10^{18} W/m² menunjukkan grafik yang semakin meningkat pada MMF 4 cm dan 6 cm, sedangkan pada MMF 5 cm grafik yang semakin menurun. Perbedaan grafik yang naik maupun turun dikarenakan adanya titik *re-imaging* pada panjang *multimode* tertentu.

Berdasarkan perhitungan karakteristik statis sensor *strain*, *multimode* dengan panjang 6 cm memiliki sensitivitas yang paling besar, sehingga perhitungan karakteristik statis sensor *strain* serat optik yang diberi efek Kerr dengan variasi intensitas dilakukan pada panjang *multimode* 6 cm.

Tabel 4.7. Karakteristik statis sensor *strain* MMF 6 cm CaF₂ dengan variasi intensitas

Intensitas	Karakteristik statis			Hasil simulasi
10 ¹⁶ W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> (με)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-16.2204
			Max.	-13.3253
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> (με)		1100
		Daya output (dBm)		2.8951
	Sensitivitas (dBm/με)			0.002631
10 ¹⁷ W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> (με)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-26.8339
			Max.	-17.0796
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> (με)		1100
		Daya output (dBm)		9.7543
	Sensitivitas (dBm/με)			0.008867
10 ¹⁸ W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> (με)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-17.1894
			Max.	-16.5999
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> (με)		1100
		Daya output (dBm)		0.5895
	Sensitivitas (dBm/με)			0.000535

Tabel 4.8. Karakteristik statis sensor *strain* MMF 6 cm CaCO₃ dengan variasi intensitas

Intensitas	Karakteristik statis			Hasil simulasi
10 ¹⁶ W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> (με)	Min.	0

Intensitas	Karakteristik statis			Hasil simulasi
		Daya output (dBm)	Max.	1100
			Min.	-16.432
		Max.	-13.4241	
	Span	Input strain ($\mu\epsilon$)		1100
		Daya output (dBm)		3.0079
	Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.002734
10^{17} W/m ²	Range	Input strain ($\mu\epsilon$)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-23.8162
			Max.	-15.5817
	Span	Input strain ($\mu\epsilon$)		1100
		Daya output (dBm)		8.2345
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.007485	
10^{18} W/m ²	Range	Input strain ($\mu\epsilon$)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-17.7915
			Max.	-17.065
	Span	Input strain ($\mu\epsilon$)		1100
		Daya output (dBm)		0.7265
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.00066	

Tabel 4.9. Karakteristik statis sensor *strain* MMF 6 cm *Sapphire* dengan variasi intensitas

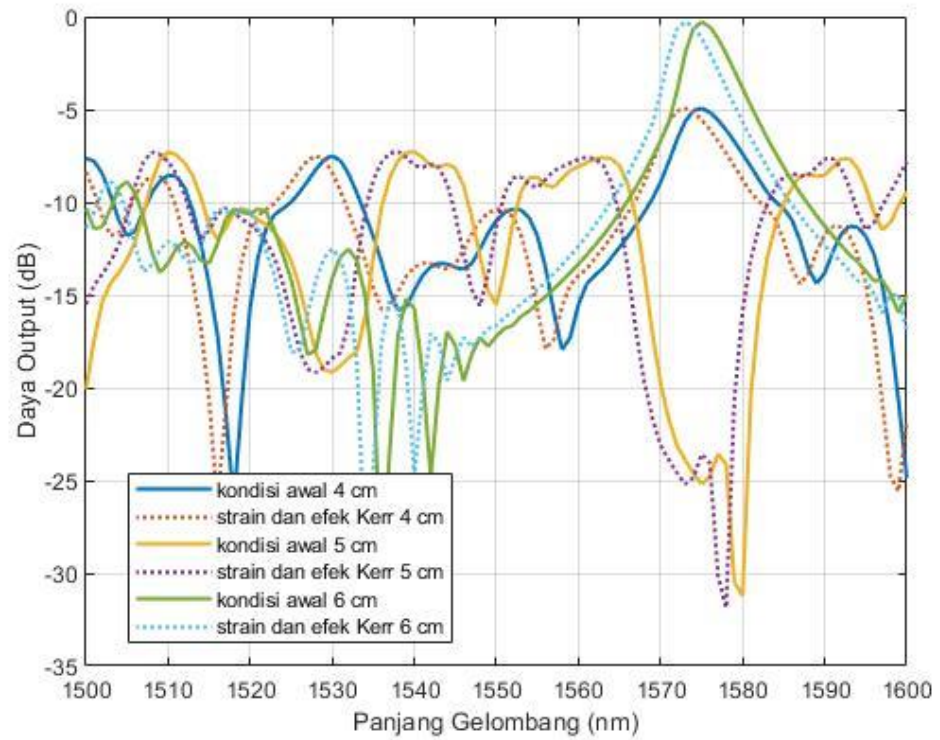
Intensitas	Karakteristik statis			Hasil simulasi
10^{16} W/m ²	Range	Input strain ($\mu\epsilon$)	Min.	0
			Max.	1100
		Daya output (dBm)	Min.	-16.6113
			Max.	-13.7982

Intensitas	Karakteristik statis			Hasil simulasi
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)		1100
		<i>Daya output</i> (dBm)		2.8131
	Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.00066
10^{17} W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	Min.	0
			Max.	1100
		<i>Daya output</i> (dBm)	Min.	-18.342
			Max.	-14.2855
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)		1100
		<i>Daya output</i> (dBm)		4.0565
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.00368	
10^{18} W/m ²	<i>Range</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)	Min.	0
			Max.	1100
		<i>Daya output</i> (dBm)	Min.	-19.0721
			Max.	-18.1011
	<i>Span</i>	<i>Input strain</i> ($\mu\epsilon$)		1100
		<i>Daya output</i> (dBm)		0.971
Sensitivitas (dBm/ $\mu\epsilon$)			0.00088	

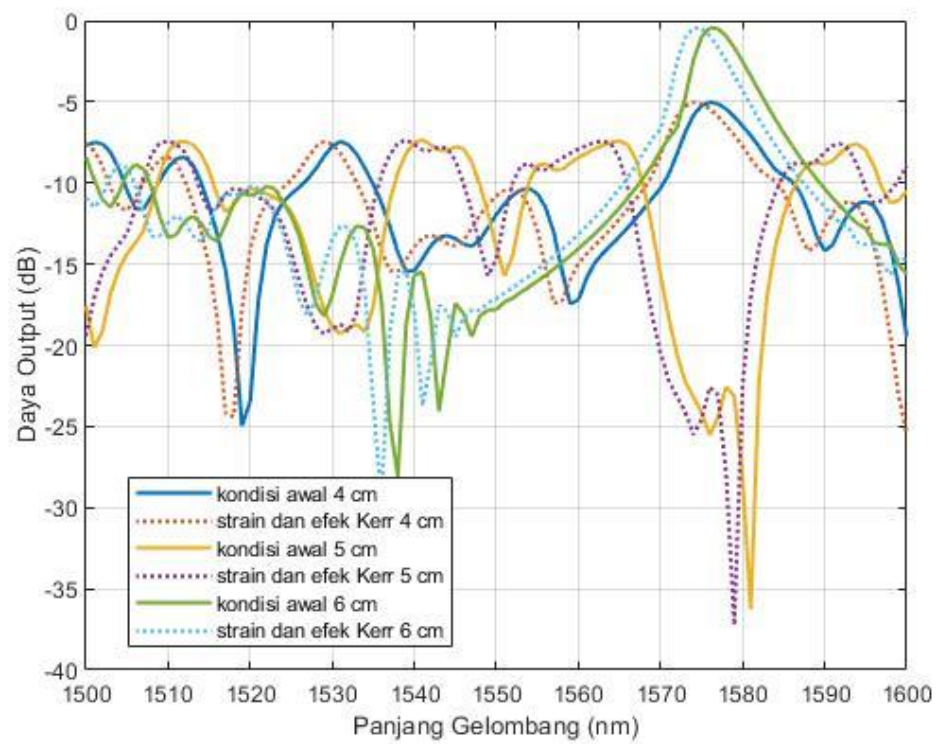
Dari hasil perhitungan karakteristik statis pada tiap material dengan variasi intensitas, diketahui bahwa sensitivitas paling tinggi diperoleh oleh serat optik MMF yang diberi efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m² karena memiliki selisih daya *output* paling besar dibandingkan variasi intensitas lainnya. Pada intensitas 10^{17} W/m², sensitivitas pada material CaF₂ sebesar 0.008867 dBm/ $\mu\epsilon$, CaCO₃ sebesar 0.007485 dBm/ $\mu\epsilon$, dan *Sapphire* sebesar 0.00368 dBm/ $\mu\epsilon$.

4.4 Spektrum Pengaruh *Strain* dan Efek Kerr pada Tiap Material

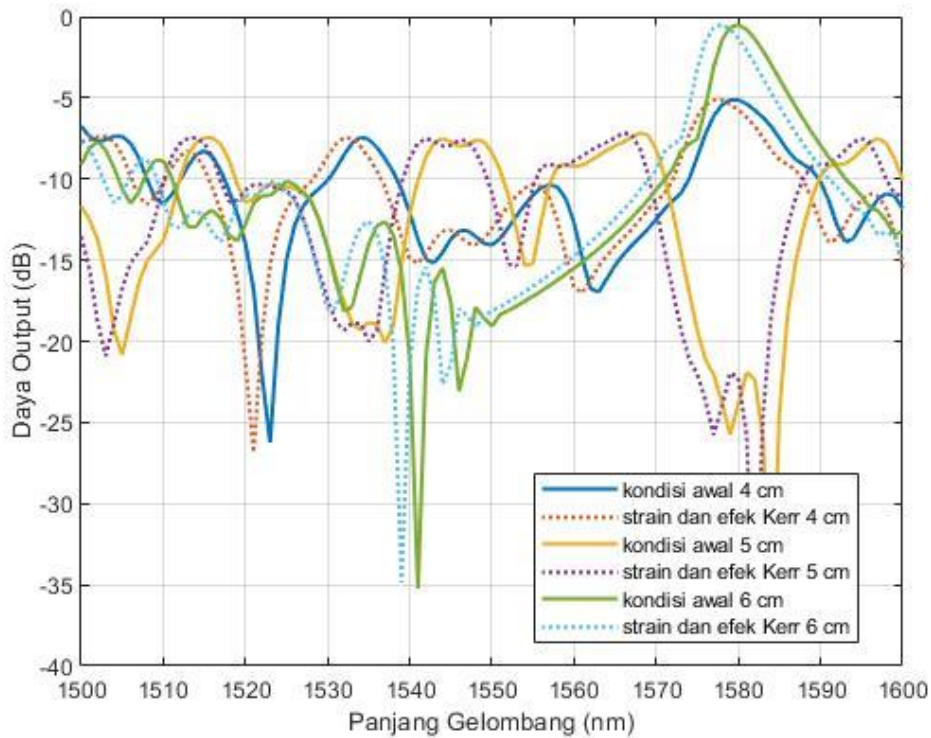
Simulasi selanjutnya yaitu untuk menghasilkan spektrum panjang gelombang pada serat optik SMS dari kondisi awal dan kondisi setelah diberi *strain* dan efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m² pada tiap panjang *multimode*.



Gambar 4.23. Spektrum *strain* dan efek Kerr pada CaF_2 doped silica

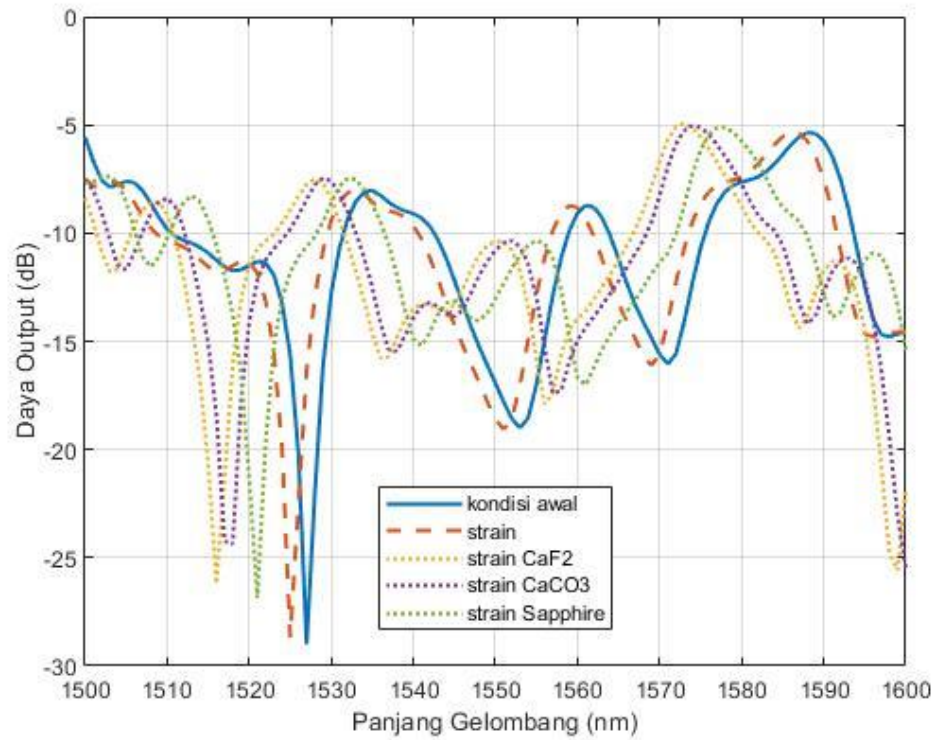


Gambar 4.24. Spektrum *strain* dan efek Kerr pada CaCO_3 doped silica

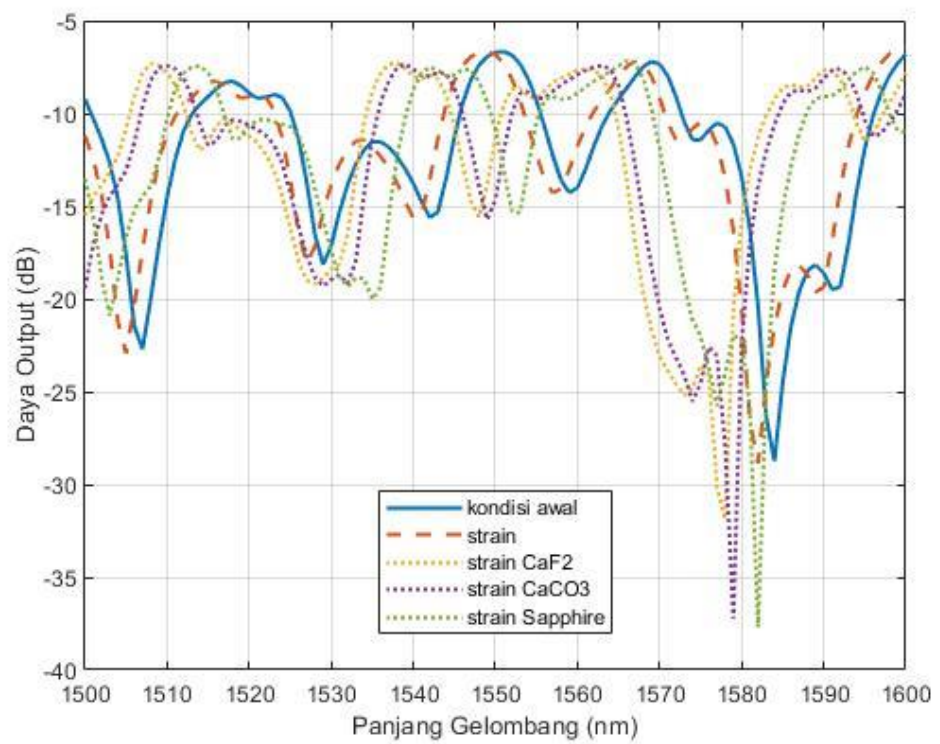


Gambar 4.25. Spektrum *strain* dan efek Kerr pada *Sapphire doped silica*

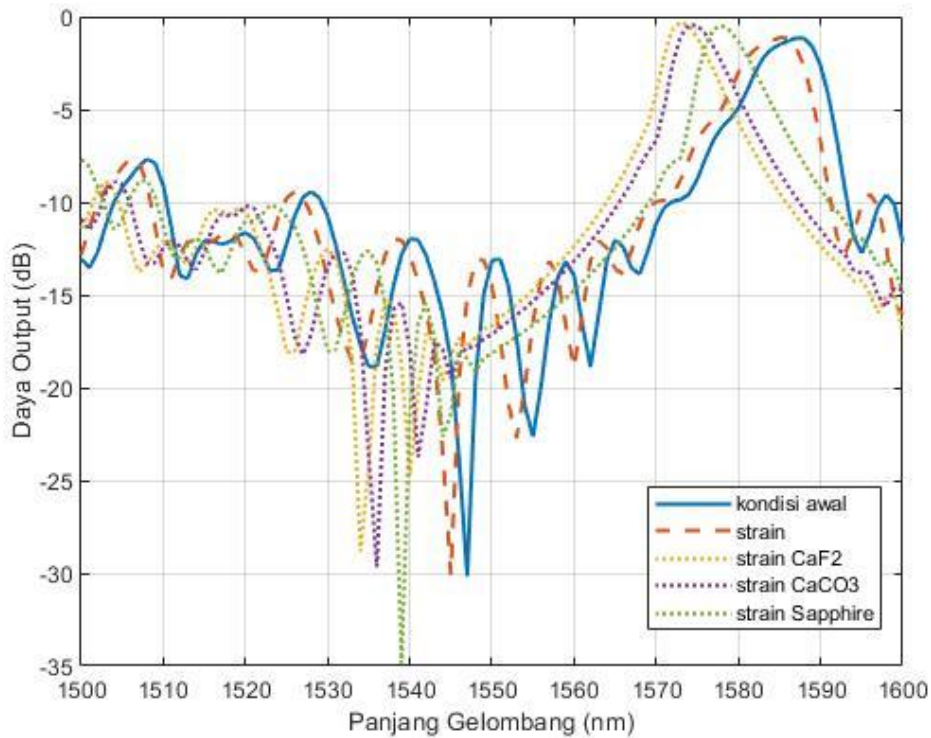
Pada spektrum panjang gelombang pada serat optik SMS dari kondisi awal dan kondisi setelah diberi *strain* dan efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m², spektrum terlihat bergeser ke arah anjang gelombang yang lebih kecil. Selanjutnya dapat disimulasikan spektrum panjang gelombang serat optik pada kondisi awal, setelah diberi *strain*, dan setelah diberi *strain* sekaligus efek Kerr dengan tiga jenis material pada tiap panjang *multimode*.



Gambar 4.26. Spektrum pergeseran pada L MMF 4 cm



Gambar 4.27. Spektrum pergeseran pada L MMF 5 cm



Gambar 4.28. Spektrum pergeseran pada L MMF 6 cm

Pengaruh *strain* dan efek Kerr pada serat optik dapat diamati melalui pergeseran pada spektrum panjang gelombang diatas. Dari spektrum yang telah dihasilkan oleh tiap panjang MMF, diketahui bahwa kondisi awal serat optik yang ditunjukkan oleh garis berwarna biru, serat optik dengan pengaruh *strain* oleh garis berwarna merah, dan serat optik dengan pengaruh *strain* dan efek Kerr dengan *doping* CaF₂, CaCO₃, dan *Sapphire* masing-masing ditunjukkan oleh garis putus-putus berwarna kuning, hijau, dan ungu. Pergeseran puncak panjang gelombang pada spektrum tertera pada tabel berikut (Quimby, 2006).

Tabel 4.10. Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 4 cm

Material	Pengaruh	Pergeseran (pm/ $\mu\epsilon$)
Serat optik silika	Kondisi awal	1.588
Serat optik silika	<i>Strain</i>	1.585
<i>Doping</i> CaF ₂	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.575
<i>Doping</i> CaCO ₃	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.576

Material	Pengaruh	Pergeseran (pm/ $\mu\epsilon$)
<i>Doping Sapphire</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.579

Tabel 4.11. Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 5 cm

Material	Pengaruh	Pergeseran (pm/ $\mu\epsilon$)
Serat optik silika	Kondisi awal	1.584
Serat optik silika	<i>Strain</i>	1.582
<i>Doping CaF₂</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.580
<i>Doping CaCO₃</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.581
<i>Doping Sapphire</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.584

Tabel 4.12. Pergeseran spektrum panjang gelombang pada MMF 6 cm

Material	Pengaruh	Pergeseran (pm/ $\mu\epsilon$)
Serat optik silika	Kondisi awal	1.588
Serat optik silika	<i>Strain</i>	1.585
<i>Doping CaF₂</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.580
<i>Doping CaCO₃</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.577
<i>Doping Sapphire</i>	<i>Strain</i> dan efek Kerr	1.575

4.5 Pembahasan

Serat optik *singlemode* – *multimode graded index* – *singlemode* disimulasikan terlebih dahulu dengan diberi pengaruh *strain* sebesar 0-1100 $\mu\epsilon$ pada panjang *multimode* 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Ketiga variasi panjang serat optik *multimode* pada sensor SMS menghasilkan grafik daya *output* yang cenderung menurun. Dari perhitungan karakteristik statis serat optik sebagai sensor *strain*, diperoleh sensitivitas sebesar 0.00163 dBm/ $\mu\epsilon$ pada *multimode* 4 cm, 0.0002243 dBm/ $\mu\epsilon$ pada *multimode* 5 cm, dan 0.001844 dBm/ $\mu\epsilon$ pada *multimode* 6 cm. Sensitivitas paling tinggi ditunjukkan oleh *multimode* 6 cm. Setelah memperoleh grafik daya *output*, selanjutnya disimulasikan spektrum pergeseran gelombang pada serat optik silika akibat pengaruh *strain* sebesar 0.001 yang tertera pada

gambar 4.4. dimana puncak gelombang pada spektrum tampak bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil dengan rata-rata pergeseran sejauh -2 nm.

Serat optik selanjutnya disimulasikan dengan variasi material dan variasi intensitas laser sebesar 10^{16} W/m², 10^{17} W/m², dan 10^{18} W/m² untuk menyelidiki fenomena optik nonlinear, dalam hal ini efek Kerr, yang dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan menggunakan variasi intensitas sebesar 6.4×10^{13} W/cm² dan 1.4×10^{14} W/cm² (Muhammad Nurhuda, 2008). Perhitungan perubahan indeks bias efektif akibat pemberian intensitas yang tinggi dapat dilihat pada tabel 4.4, 4.5, dan 4.6. Semakin besar nilai indeks n_2 dan tingginya intensitas, nilai indeks bias efektif juga semakin meningkat. Material yang digunakan untuk simulasi efek Kerr antara lain CaF₂, CaCO₃, dan *Sapphire*. Berdasarkan perhitungan, serat optik dengan *doping* material *Sapphire* menghasilkan indeks bias efektif yang paling besar. Simulasi dilakukan untuk menghasilkan spektrum pergeseran panjang gelombang pada tiap variasi intensitas pada material yang sama. Spektrum variasi intensitas pada *multimode* 4 cm ditunjukkan oleh gambar 4.5, 4.6, dan 4.7. Spektrum variasi intensitas pada *multimode* 5 cm ditunjukkan oleh gambar 4.8, 4.9, dan 4.10. Spektrum variasi intensitas pada *multimode* 6 cm ditunjukkan oleh gambar 4.11, 4.12, dan 4.13. dari masing-masing spektrum yang dihasilkan, dapat diamati bahwa semakin tinggi perubahan nilai indeks bias, pergeseran spektrum semakin mengarah ke panjang gelombang yang lebih kecil pada rentang 1500 – 1600 nm, dimana efek Kerr pada serat optik yang menggunakan intensitas paling tinggi sebesar 10^{18} W/m² menghasilkan perubahan indeks bias yang paling besar

Setelah memperoleh spektrum, selanjutnya dapat disimulasikan grafik daya *output* pada sensor *strain* serat optik yang telah diberi efek Kerr dengan variasi intensitas pada tiap material seperti tertera pada gambar 4.14, 4.15, dan 4.16 untuk material CaF₂, gambar 4.17, 4.18, dan 4.19 untuk material CaCO₃, dan gambar 4.20, 4.21, dan 4.22 untuk material *Sapphire*. *Trend* grafik daya *output* yang dihasilkan beragam. Selisih daya *output* atau *span* tertinggi diperoleh oleh *multimode* dengan panjang 6 cm dengan material CaF₂ sebesar 9.754 dBm, sedangkan pada CaCO₃ sebesar 8.234 dBm, dan *Sapphire* sebesar 4.056 dBm.

Selanjutnya dapat dihitung karakteristik statis serat optik sebagai sensor *strain* dengan efek Kerr. Dapat diamati bahwa pada tiap material, selisih daya

output atau *span* paling besar dihasilkan oleh sensor *strain* serat optik yang diberi efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m², sehingga menghasilkan sensitivitas yang paling besar. Sensitivitas pada material CaF₂ dengan indeks bias 1.4574 sebesar 0.008867 dBm/με, CaCO₃ dengan indeks bias 1.4578 sebesar 0.007485 dBm/με, dan *Sapphire* dengan indeks bias 1.4585 sebesar 0.00368 dBm/με. Dari rata-rata selisih daya *output* atau *span* yang dihasilkan juga dapat diamati bahwa nilai paling besar diperoleh oleh material CaF₂ dengan rata-rata *span* sebesar 4.4 dBm, sedangkan CaCO₃ 1.3 dBm dan *Sapphire* 2.57 dBm.

Setelah memperoleh karakteristik sensor *strain* pada serat optik yang diberikan efek Kerr dengan variasi intensitas, selanjutnya dapat disimulasikan spektrum panjang gelombang serat optik yang telah diberi pengaruh *strain* sekaligus efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m² pada tiap material dengan variasi panjang *multimode* yang tertera pada gambar 4.23, 4.24, dan 4.25. Garis solid pada grafik menunjukkan kondisi awal serat optik, sedangkan garis putus-putus menunjukkan kondisi serat optik setelah diberi *strain* dan efek Kerr.

Selanjutnya dapat disimulasikan spektrum panjang gelombang serat optik yang telah diberi pengaruh *strain* sekaligus efek Kerr dengan intensitas 10^{17} W/m² dengan variasi material pada tiap panjang *multimode* seperti tertera pada gambar 4.26, 4.27, dan 4.28. Garis solid biru pada grafik menunjukkan kondisi awal serat optik, garis putus-putus berwarna merah menunjukkan serat optik yang diberi *strain*, garis putus-putus berwarna kuning, ungu, dan hijau masing-masing menunjukkan serat optik yang telah diberi efek Kerr dan *strain* pada material CaF₂, CaCO₃, dan *Sapphire*. Pada rentang panjang gelombang simulasi 1500-1600 nm, *multimode* dengan panjang 6 cm menghasilkan pergeseran *strain* sebesar 1.573 pm/microstrain pada CaF₂, 1.575 pm/microstrain pada CaCO₃, dan 1.578 pm/microstrain pada *Sapphire*, dengan perhitungan berdasarkan persamaan (3.4).

Halaman ini memang dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil simulasi dan Analisa yang telah dilakukan yaitu efek Kerr pada serat optik SMS sebagai sensor *strain* dilakukan dengan memberikan intensitas tinggi dan *doping* material dengan indeks nonlinear pada serat optik *multimode*. Efek Kerr dengan variasi intensitas pada sensor *strain* serat optik SMS mempengaruhi nilai indeks bias serat optik yang menjadi semakin besar, sehingga juga mempengaruhi sensitivitasnya sebagai sensor. Penambahan efek Kerr pada sensor *strain* serat optik membuat spektrum panjang gelombang bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih kecil seiring dengan semakin besar perubahan indeks bias. Berdasarkan analisa karakteristik statis, sensitivitas sensor *strain* serat optik SMS paling tinggi diperoleh oleh *multimode* sepanjang 6 cm sebesar 0.001844 dBm/ $\mu\epsilon$. Sedangkan sensitivitas tertinggi sensor *strain* serat optik dengan efek Kerr diperoleh oleh *multimode* 6 cm dengan *doping* CaF₂ pada intensitas 10^{17} W/m² yaitu sebesar 0.008867 dBm/ $\mu\epsilon$ dengan *trend* grafik daya *output* yang semakin meningkat dengan *span* sebesar 9.7543 dBm.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- A. Mafi, P. H. (2011). Low-loss coupling between two single-mode optical fibers with different mode-field diameters using a graded-index multimode optical fiber. *Optics Letters* 36, 3596-3598.
- A. Mehta, W. S. (2003). Multimode interference based fiber optic displacement sensor. *IEEE Photon. Tech. Lett.* 15, 1129-1131.
- A.K. Ghatak, K. T. (1998). *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Agrawal, G. P. (2011). *Fiber-Optic Communication Systems 4th ed.* Wiley.
- Arun Kumar, R. K. (2003). Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures. *Optics Communications* 219, 215-219.
- Bahaa E. A. Saleh, M. C. (1991). *Fundamental of Photonics*. John Wiley.
- Bentley, J. P. (1995). *Principles of measurement systems*. India: Pearson Education.
- David R. Sánchez Montero, C. V. (2013). *Current Developments in Optical Fiber Technology*. Intech Open.
- Fan Yang, D. N.-L. (2018). Saturable Absorber Based On a Single Mode Fiber – Graded Index Fiber – Single Mode Fiber Structure With Inner Micro-Cavity. *Optics Express*.
- Goel, A. (2011). *Estimating the Mechanical Reliability of Optical Fiber*. India: Sterlite Technologies Ltd.
- Hatta, A. M. (2009). Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures for Optical Sensing. *Doctoral*.
- Hatta, A. M. (2010). Strain sensor based on a pair of single-mode–multimode–single-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme. *APPLIED OPTICS*.
- Kabacinski, P. (2019). Nonlinear refractive index measurement by SPM-induced phase regression. *Opt. Express* 27.
- Li, E. (2007). Temperature compensation of multimode-interference based fiber devices. *Optics Letters* 32, 2064-2066.

- M. N. Avadhanulu, T. V. (2018). *A Textbook of Engineering Physics*. New Delhi, India: S Chand and Company Limited.
- Major, A. (2004). Dispersion of the nonlinear refractive index in sapphire. *Opt. Lett.* 29, 602.
- Moh Yasin, H. A. (2015). *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. Books on Demand.
- Muhammad Nurhuda, A. S. (2008). Generalization of the Kerr effect for high intensity, ultrashort laser pulses. *New Journal of Physics*.
- Muriel, M. A. (2015). Nonlinear effects in optical fibers.
- Okamoto, K. (2006). *Fundamentals of optical waveguides 2nd ed.* Academic Press.
- Optoelectronics. (2004). *1310 nm, 1550 nm, and CWDM Analog Reverse Optical Transmitters For Model 6940, 6942, 6944 & Ginmaker Optoelectronic Station*. Georgia: Scientific-Atlanta.Inc.
- P. Hofmann, A. M. (2012). Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode interference in graded index fibers. *Lightwave Technology* 30, 2289–2297.
- Phillip Sprangle, B. H. (2014). High-power, high-intensity laser propagation and interactions. *Physics of Plasmas*.
- Q. Wang, G. F. (2006). All-fiber multimode-interference based refractometer sensor: proposal and design. *Optics Letters* 31, 317-319.
- Quimby, R. S. (2006). *Photonics and Lasers: An Introduction*. John Wiley and Sons.
- Shijie Fu, X. Z. (2015). Passive Q-switching of an all-fiber laser induced by the Kerr effect of multimode interference. *Optics Express* 23(13), 17255-17262.
- Y. O. Yilmaz, A. M. (2007). Fiber-optic beam shaper based on multimode interference. *Optics Letters* 32, 3170-3172.

LAMPIRAN

Daya output sensor strain MMF 4 cm

Strain	Daya output
0	-16.9413
100	-17.1054
196	-17.2661
315	-17.4677
407	-17.6248
512	-17.8048
606	-17.9659
714	-18.1491
803	-18.2972
900	-18.4536
1002	-18.6094
1100	-18.7475

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari multimode 4 cm

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0
100	-0.000026482	-0.000025848	-0.0001
196	-0.000051905	-0.000050663	-0.000196
315	-0.000083418	-0.000081423	-0.000315
407	-0.000107782	-0.000105204	-0.000497
512	-0.000135588	-0.000132346	-0.000512
606	-0.000160481	-0.000156644	-0.000606
714	-0.000189098	-0.000184561	-0.000714
803	-0.000212651	-0.000207566	-0.000803
900	-0.000238339	-0.000232639	-0.0009

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
1002	-0.000265351	-0.000259005	-0.001002
1100	-0.000291303	-0.000284337	-0.0011

Daya output sensor strain MMF 5 cm

Strain	Daya output
0	-6.7058
108	-6.6821
211	-6.6667
322	-6.6585
404	-6.6585
525	-6.6682
604	-6.6812
710	-6.7077
804	-6.7402
909	-6.7873
999	-6.8374
1100	-6.9048

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari multimode 5 cm

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0
108	-0.00002860	-0.000027916	-0.000108
211	-0.0055877	-0.000054541	-0.000211
322	-0.000085272	-0.000083233	-0.000322
404	-0.000106987	-0.000104429	-0.000404
525	-0.000139031	-0.000135706	-0.000525

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
604	-0.000159952	-0.000156127	-0.000604
710	-0.000188023	-0.000183527	-0.00071
804	-0.000212916	-0.000207825	-0.000804
909	-0.000240722	-0.000234966	-0.000909
999	-0.000264556	-0.000258230	-0.000999
1100	-0.000291303	-0.000284337	-0.0011

Daya output sensor strain MMF 6 cm

Strain	Daya output
0	-13.1387
106	-12.9938
215	-12.9205
308	-12.9178
407	-12.9736
506	-13.0884
614	-13.2793
714	-13.516
801	-13.7677
903	-14.116
1003	-14.5119
1100	-14.946

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari multimode 6 cm

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
106	-0.000028071	-0.000027399	-0.000106
215	-0.000056936	-0.000055575	-0.000215
308	-0.000081565	-0.000079614	-0.000308
407	-0.000107782	-0.000105204	-0.000407
506	-0.000133999	-0.000130795	-0.000506
614	-0.00016260	-0.000158712	-0.000614
714	-0.000189082	-0.000184561	-0.000714
801	-0.000212122	-0.000207049	-0.000801
903	-0.000239133	-0.000233415	-0.000903
1003	-0.000265615	-0.000259264	-0.001003
1100	-0.000291303	-0.000284337	-0.0011

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari serat optik singlemode pada multimode 6 cm

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0
106	-0.00002757	-0.000027399	-0.000096
215	-0.00005592	-0.000055575	-0.000196
308	-0.00008011	-0.000079614	-0.000281
407	-0.00010586	-0.000105204	-0.000371
506	-0.00013161	-0.000130795	-0.000461
614	-0.0001597	-0.000158712	-0.00056
714	-0.00018571	-0.000184561	-0.000651
801	-0.00020834	-0.000207049	-0.000731
903	-0.00023487	-0.000233415	-0.000824
1003	-0.00026088	-0.000259264	-0.000915

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
1100	-0.00028611	-0.000284337	-0.001004

Daya output sensor strain MMF 6 cm dengan efek Kerr 10^{17} W/m².

CaF₂

Strain	Daya output
0	-23.6945
105	-25.5372
200	-26.6819
307	-26.5425
402	-25.2943
504	-23.5892
607	-21.9605
703	-20.6463
802	-19.5002
902	-18.5324
1005	-17.7039
1094	-17.1043

CaCO₃

Strain	Daya output
0	-23.8302
101	-23.0306
201	-22.1149
305	-21.1387
402	-20.2539
504	-19.374
601	-18.595

Strain	Daya output
702	-17.8481
805	-17.1559
904	-16.5581
1004	-16.0222
1094	-15.5992

Sapphire

Strain	Daya output
0	-18.4015
104	-17.5629
202	-16.8611
304	-16.2205
406	-15.67
501	-15.2373
605	-14.8514
701	-14.5776
801	-14.3738
903	-14.2559
1004	-14.2292
1099	-14.2876

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari multimode 6 cm dengan doping CaF₂ dengan intensitas 10^{17} W/m²

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0
105	-0.0000279	-0.000027399	-0.000105
200	-0.00005315	-0.000055575	-0.0002
307	-0.00008158	-0.000079614	-0.000307

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
402	-0.00010683	-0.000105204	-0.000402
504	-0.00013393	-0.000130795	-0.000504
607	-0.00016131	-0.000158712	-0.000607
703	-0.00018682	-0.000184561	-0.000703
802	-0.00021313	-0.000207049	-0.000802
902	-0.0002397	-0.000233415	-0.000902
1005	-0.00026708	-0.000259264	-0.001005
1094	-0.00029073	-0.000284337	-0.001094

Perhitungan perubahan indeks bias dan jari-jari singlemode pada multimode 6 cm dengan doping CaF2 dengan intensitas 10^{17} W/m²

Strain	Perubahan indeks bias core	Perubahan indeks bias cladding	Perubahan jari-jari
0	0	0	0
105	-0.00002731	-0.00002714	-0.0000958
200	-0.00005202	-0.00005169	-0.0001826
307	-0.00007985	-0.00007935	-0.0002802
402	-0.0001045	-0.0001039	-0.000367
504	-0.000131	-0.0001327	-0.0004601
607	-0.0001578	-0.0001569	-0.0005541
703	-0.0001828	-0.0001817	-0.0006418
802	-0.0002086	-0.0002073	-0.0007322
902	-0.0002346	-0.0002331	-0.0008235
1005	-0.0002614	-0.0002597	-0.0009175
1094	-0.0002845	-0.0002827	-0.0009988

Daftar m-file dalam simulasi sensor *strain* dan efek Kerr serat optik

Judul m-file	Fungsi
efek_strain	Pembuat spektrum daya output terhadap panjang gelombang pada tiap LMMF saat diberi <i>strain</i>
strain_4cm	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada LMMF 4 cm
strain_5cm	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada LMMF 5 cm
strain_6cm	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada LMMF 6 cm
daya456_caf2	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada efek Kerr caf2 dengan variasi intensitas
daya456_caco3	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada efek Kerr caco3 dengan variasi intensitas
daya456_sapp	Pembuat grafik daya keluaran terhadap <i>strain</i> pada efek Kerr sapphire dengan variasi intensitas
all_spektrum40000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal hingga diberi <i>strain</i> dan efek Kerr pada MMF 4 cm
all_spektrum50000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal hingga diberi <i>strain</i> dan efek Kerr pada MMF 5 cm
all_spektrum60000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal hingga diberi <i>strain</i> dan efek Kerr pada MMF 6 cm
lambda_power_40000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal dan saat diberi efek Kerr pada MMF 4 cm
lambda_power_50000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal dan saat diberi efek Kerr pada MMF 5 cm

Judul m-file	Fungsi
lambda_power_60000	Pembuat spektrum daya keluaran terhadap panjang gelombang pada serat optik pada kondisi awal dan saat diberi efek Kerr pada MMF 6 cm
wavelength_strain	Perhitungan coupling loss akibat pengaruh strain
mshmmf1	Perhitungan konstanta propagasi dan profil medan tiap moda pada serat optik multimode
mshsmf	Perhitungan konstanta propagasi dan profil medan pada serat optik singlemode

wavelength_strain

```
function
[LS]=wavelength_strain(nco0,ncl0,am,z0,pe,poisson,ustrain,lambda);
dn=-pe*ustrain;
nco=nco0+ (nco0*dn);
ncl=ncl0+ (ncl0*dn);
% core radius, a
dam=-poisson*ustrain;
am=am;
%am=ceil((am+ (dam*am))*100)/100;

k=2*pi/lambda;
v=k*am*sqrt(nco2-ncl2);
mm=fix(v/pi);
dr=0.05;alm=7.5;

[betam,psim]=mshmmf1(nco,ncl,am,alm,k,v,mm,dr);

%%Single mode Fiber
as=4.15;
%as=ceil((as+ (dam*as))*100)/100;
as1=(am+alm)-as;
nco=1.447+(1.447*dn);ncl=1.440+(1.440*dn);
v=k*as*sqrt(nco2-ncl2);
ms=fix(v/pi);
if ms<1,
    ms=1;
end

%[betas,psis]=modesolverfibersingle(nco,ncl,as,as1,k,v,ms,dr);
[betas,psis]=mshsmf(nco,ncl,as,as1,k,v,ms,dr);

Sc=size(psim);
%%Coefficients, Cm

for jj=1:mm,
    psimm=psim(jj,:);
```

```

    [C]=EC(psis,psimm,dr,Sc);
    Cm(jj)=C;
end

loss0=0;z=0;
for jj=1:mm,
    loss0=loss0+Cm(jj)^2*exp(j*betam(jj)*z);
    loss0=loss0;
end

```

```

%Coupling Loss
loss=0;

```

```

dz=ustrain;
z1=z0+(z0*dz);
for jj=1:mm,
    loss=loss+Cm(jj)^2*exp(j*betam(jj)*z1);
    loss=loss;
end
loss=loss/loss0;
Ls=10*log10((abs(loss))^2);

```

efek_strain

```

clear;clc;
tic;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);

ncl=1.444;
nco=1.4557;

am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
%sebelum strain 4 cm
z=40000;
ustrain=0;
for m=1:xx,
    lambda=1.5+((m-1)/1000);
    [L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
    LL1(m)=L;
    w(m)=lambda*1000;
end

%strain 4cm
z=40000;
ustrain=1e-3;
for m=1:xx,
    lambda=1.5+((m-1)/1000);
    [L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
    LL2(m)=L;

```

```

w(m)=lambda*1000;
end

%sebelum strain 5 centi
z=50000;
ustrain=0;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nc0,nc1,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%strain 5 cm
z=50000;
ustrain=1e-3;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nc0,nc1,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sebelum strain 6cm
z=60000;
ustrain=0;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nc0,nc1,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%strain 6cm
z=60000;
ustrain=1e-3;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nc0,nc1,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL6(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,'r',w,LL2,'r',w,LL3,'g',w,LL4,'g',w,LL5,'b',w,LL6,'b:','LineWidth',2);set(gca,'FontSize',10);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('MMF 4 cm','MMF 4 cm strain','MMF 5 cm','MMF 5 cm strain','MMF 6 cm','MMF 6 cm strain')

strain_4cm

clear;clc;
tic;

```

```

xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);

%NA=0.275
nco=1.4557;ncl=1.444;
z=40000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL(m)=L;
end

plot(LL);
xlabel('Strain (Micro Strain)')
ylabel('Power Output (dBm)')
t=toc

```

strain_5cm

```

clear;clc;
tic;
xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);

%NA=0.275
nco=1.4557;ncl=1.444;
z=50000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL(m)=L;
end

plot(LL);
xlabel('Strain (Micro Strain)')
ylabel('Power Output (dBm)')
t=toc

```

strain_6cm

```

clear;clc;
tic;
xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);

```



```

%NA=0.275
nco=1.4557;ncl=1.444;
z=60000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL(m)=L;
end

plot(LL);
xlabel('Strain (Micro Strain)')
ylabel('Power Output (dBm)')
t=toc

```

daya456_caf2

```

clear;clc;
tic;
xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
LL=zeros(1,xx);

%4cm
%caf2 1016
nco=1.45587;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caf2 1017
nco=1.4574;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

```

```

end
%caf2 1018
nco=1.4728;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%5cm
%caf2 1016
nco=1.45587;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caf2 1017
nco=1.4574;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caf2 1018
nco=1.4728;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL6(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%6cm
%caf2 1016
nco=1.45587;
ustrain=0;
z=60000;

```

```

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL7(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caf2 1017
nco=1.4574;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL8(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caf2 1018
nco=1.4728;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL9(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

figure(1);
plot(Tmp,LL1,'r',Tmp,LL2,'g',Tmp,LL3,'b',Tmp,LL4,'r--',Tmp,LL5,'g-
-',Tmp,LL6,'b--
',Tmp,LL7,'r:',Tmp,LL8,'g:',Tmp,LL9,'b:', 'LineWidth',1.5);set(gca,
'FontSize',10);
xlabel('Strain');
ylabel('Pout (dBm)');
legend('CaF2 10^1^6 4cm','CaF2 10^1^7','CaF2 10^1^8','CaF2 10^1^6
5cm','CaF2 10^1^7','CaF2 10^1^8','CaF2 10^1^6 6cm','CaF2
10^1^7','CaF2 10^1^8')
daya456_caco3

clear;clc;
tic;
xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
LL=zeros(1,xx);

%4cm
%caco3 1016
nco=1.45591;

```

```

ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1017
nco=1.4578;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1018
nco=1.4769;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%5cm
%caco3 1016
nco=1.45591;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1017
nco=1.4578;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;

```

```

Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1018
nco=1.4769;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+( (m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL6(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%6cm
%caco3 1016
nco=1.45591;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+( (m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL7(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1017
nco=1.4578;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+( (m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL8(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%caco3 1018
nco=1.4769;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+( (m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL9(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

figure(1);
plot(Tmp,LL1,'r',Tmp,LL2,'g',Tmp,LL3,'b',Tmp,LL4,'r--',Tmp,LL5,'g-
-',Tmp,LL6,'b--

```

```

', Tmp, LL7, 'r:', Tmp, LL8, 'g:', Tmp, LL9, 'b:', 'LineWidth', 1.5); set(gca,
'FontSize', 10);
xlabel('Strain');
ylabel('Pout (dBm)');
legend('CaCO3 10^1^6 4cm', 'CaCO3 10^1^7', 'CaCO3 10^1^8', 'CaCO3
10^1^6 5cm', 'CaCO3 10^1^7', 'CaCO3 10^1^8', 'CaCO3 10^1^6
6cm', 'CaCO3 10^1^7', 'CaCO3 10^1^8')

```

daya456_sapp

```

clear; clc;
tic;
xx=1100;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;
pockel=0.22;
poisson=0.16;
lambda=1.550;
LL=zeros(1,xx);

%4cm
%sapp 1016
nco=1.45598;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1017
nco=1.4585;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1018
nco=1.4837;
ustrain=0;
z=40000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);

```

```

LL3(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%5cm
%sapp 1016
nco=1.45598;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+(m-1)*1e-6;
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1017
nco=1.4585;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+(m-1)*1e-6;
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1018
nco=1.4837;
ustrain=0;
z=50000;

for m=1:xx,
ustrain=0+(m-1)*1e-6;
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL6(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%6cm
%sapp 1016
nco=1.45598;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+(m-1)*1e-6;
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL7(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1017
nco=1.4585;

```

```

ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL8(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

%sapp 1018
nco=1.4837;
ustrain=0;
z=60000;

for m=1:xx,
ustrain=0+((m-1)*1e-6);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL9(m)=L;
Tmp(m)=ustrain;
end

figure(1);
plot(Tmp,LL1,'r',Tmp,LL2,'g',Tmp,LL3,'b',Tmp,LL4,'r--',Tmp,LL5,'g-
-',Tmp,LL6,'b--
',Tmp,LL7,'r:',Tmp,LL8,'g:',Tmp,LL9,'b:', 'LineWidth',1.5);set(gca,
'FontSize',10);
xlabel('Strain');
ylabel('Pout(dBm)');
legend('Sapphire 10^1^6 4cm','Sapphire 10^1^7','Sapphire
10^1^8','Sapphire 10^1^6 5cm','Sapphire 10^1^7','Sapphire
10^1^8','Sapphire 10^1^6 6cm','Sapphire 10^1^7','Sapphire 10^1^8')

```

all_spektrum40000

```

clear;clc;
tic;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
z=40000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=0;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;

```



```

end

%awal strain
ustrain=1e-3;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caf2
ustrain=1e-3;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caco3
ustrain=1e-3;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapp
ustrain=1e-3;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,w,LL2,'--
',w,LL3,':',w,LL4,':',w,LL5,':', 'LineWidth',1.5);set(gca, 'FontSize
',9);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','strain','strain CaF2','strain
CaCO3','strain Sapphire')

all_spektrum50000
clear;clc;

```

```

tic;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
z=50000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=0;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%awal strain
ustrain=1e-3;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caf2
ustrain=1e-3;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caco3
ustrain=1e-3;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapp
ustrain=1e-3;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);

```

```

LL5 (m)=L;
w (m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,w,LL2,'--
',w,LL3,':',w,LL4,':',w,LL5,':','LineWidth',1.5);set(gca,'FontSize
',9);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','strain','strain CaF2','strain
CaCO3','strain Sapphire')

```

all_spektrum60000

```

clear;clc;
tic;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
z=60000;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=0;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%awal strain
ustrain=1e-3;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caf2
ustrain=1e-3;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;

```

```

end

%caco3
ustrain=1e-3;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapp
ustrain=1e-3;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL5(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,w,LL2,'--
',w,LL3,':',w,LL4,':',w,LL5,':', 'LineWidth',1.5);set(gca,'FontSize
',9);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','strain','strain CaF2','strain
CaCO3','strain Sapphire')

```

lambda_power_40000

```

clear;clc;
tic;
z=40000;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=1e-6;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

```

```

%caf2
ustrain=1e-6;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caco3
ustrain=1e-6;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapp
ustrain=1e-6;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,'--
',w,LL2,w,LL3,w,LL4,'LineWidth',2);set(gca,'FontSize',10);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','CaF2','CaCO3','Sapphire')

```

lambda_power_50000

```

clear;clc;
tic;
z=50000;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;
LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=1e-6;
nco=1.4557;

```

```

for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caf2
ustrain=1e-6;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caco3
ustrain=1e-6;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapphire
ustrain=1e-6;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+((m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,'--
',w,LL2,w,LL3,w,LL4,'LineWidth',2);set(gca,'FontSize',10);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','CaF2','CaCO3','Sapphire')

```

lambda_power_60000

```

clear;clc;
tic;
z=60000;
xx=101;
Ls=zeros(1,xx);
ncl=1.444;
am=62.5;

```

```

LL=zeros(1,xx);
pe=0.16;
poisson=0.16;
lambda=1.550;

%awal
ustrain=1e-6;
nco=1.4557;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL1(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%caf2
ustrain=1e-6;
nco=1.4728;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL2(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%cac03
ustrain=1e-6;
nco=1.4769;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL3(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

%sapp
ustrain=1e-6;
nco=1.4837;
for m=1:xx,
lambda=1.5+(m-1)/1000);
[L]=wavelength_strain(nco,ncl,am,z,pe,poisson,ustrain,lambda);
LL4(m)=L;
w(m)=lambda*1000;
end

figure(1);
plot(w,LL1,'--
',w,LL2,w,LL3,w,LL4,'LineWidth',2);set(gca,'FontSize',10);
grid
xlabel('Panjang Gelombang (nm)');
ylabel('Daya Output (dB)');
legend('kondisi awal','CaF2','CaCO3','Sapphire')

```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Prita Yenny Oktavianti lahir di Jakarta pada tanggal 12 Oktober 1998. Penulis menempuh pendidikan di SD Santo Markus II Jakarta (2004-2010), SMP Santo Markus II Jakarta (2010-2013), dan SMA Negeri 62 Jakarta (2013-2016). Penulis melanjutkan studinya pada tahun 2016 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, ITS, Surabaya, dan mengambil bidang minat rekayasa fotonika. Selama masa perkuliahan, penulis pernah mengikuti berbagai pelatihan dalam rangka pengembangan diri, dan aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan seperti UKM Paduan Suara Mahasiswa (2016-2017), HMTF ITS (2017-2019), dan Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS. Penulis juga memiliki pengalaman Kerja Praktik dengan topik kontrol PID pada pengendalian level *ammonia separator* di Pabrik I PT Petrokimia Gresik selama satu bulan. Penulis dapat dihubungi melalui *email* prtynnokt@gmail.com.