



**FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *BURIED WAVEGUIDE*
MENGUNAKAN *POLYMETHYL METHACRYLATE* UNTUK
OPERASI PADA DAERAH CAHAYA TAMPAK**

SKRIPSI

**disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika**

Oleh

Kukuh Eka Kurniansyah

4211415026

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2019

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi yang berjudul “Fabrikasi dan Karakterisasi *Buried Waveguide* Menggunakan *Polymethyl Methacrylate* Untuk Operasi Pada Daerah Cahaya Tampak” ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 16 Agustus 2019

Pembimbing



Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng.

NIP. 197707012005012001

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi berjudul “Fabrikasi dan Karakterisasi *Buried Waveguide* Menggunakan *Polymethyl Methacrylate* Untuk Operasi Pada Daerah Cahaya Tampak” benar-benar asli dan bebas plagiat. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 16 Agustus 2019



Kukuh Eka Kurniansyah

4211415026

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Fabrikasi dan Karakterisasi *Buried Waveguide* Menggunakan *Polymethyl Methacrylate* Untuk Operasi Pada Daerah Cahaya Tampak

disusun oleh

Kukuh Eka Kurniansyah

4211415026

telah dipertahankan dalam Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada hari Jumat tanggal 16 Agustus 2019.

Pantia:



Ketua

Dr. Sugianto, M.Si.

NIP. 196102191993031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP. 196807141996031005

Penguji I

Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D.

NIP. 196702171992031002

Penguji II

Suglyanto, S.Pd., M.Si.

NIP. 198111102003121001

Anggota Penguji/Pembimbing

Dr. Ian Yulianti, S.Si. M.Eng.

NIP. 197707012005012001

MOTTO

“Jangan suka mengeluh ya dek, selalu bersyukur, berdoa selalu sama Allah”

(Emak Endang Dwikora Ningrum)

PERSEMBAHAN

Untuk Bidadariku Tercinta Emak Endang Dwikora Ningrum

Ibu Ian Yulianti Ibuku dikampus

Prodi Fisika UNNES Kebanggaanku

PRAKATA

Alhamdulillah rabbil'alamin atas segala nikmat iman, Islam, kesempatan, kesehatan, serta kekuatan yang telah diberikan Allah Subhanahuwata'ala sehingga dapat menyelesaikan skripsi sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana sains di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada tuntunan dan suri tauladan Rasulullah Shallallahu'alaihiwasallam beserta keluarga, sahabat, dan umat beliau yang senantiasa menjunjung tinggi nilai-nilai Islam yang sampai saat ini dapat dinikmati oleh seluruh manusia di penjuru dunia. terselesaikannya skripsi dengan judul "Fabrikasi dan Karakterisasi *Buried Waveguide* Menggunakan *Poly Methyl Methacrylate* Untuk Operasi Pada Daerah Cahaya Tampak" tidak terlepas dari bimbingan, masukan, saran, dan bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan yang berbahagia ini penulis ucapkan terimakasih kepada:

1. Emakku tercinta yang sudah membesarkanku, yang selalu mendoakanku, selalu melindungiku, selalu menyayangiku melebihi apapun, selalu sabar menghadapiku, dan sudah memberikan segala usahanya kepadaku untuk aku menuntut ilmu guna kelak aku menjadi orang sukses yang membanggakan nama Emak.
2. Dr. Sugianto, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

4. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si. selaku Kepala Program Studi Fisika Universitas Negeri Semarang.
5. Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang dan dosen pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
6. Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng. selaku dosen pembimbing serta Ibu saya saat di kampus yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
7. Asisten Laboratorium Fisika: R. Muttaqin, S.Si., Wasi Sakti Wiwit P., S.Pd., dan Natalia Erna S., S.Pd., dan Mas Alvin yang telah membantu selama proses penelitian skripsi ini.
8. Keluarga besarku yang selalu memberikan semangat, berbagi pengalaman dan membantuku untuk melanjutkan kuliah khususnya Tante Indah, Tante Tutik, dan Om Agus yang sudah menjadi orang tuaku setelah Emak meninggal.
9. Sahabatku sekaligus perempuan yang kuharapkan kelak menjadi pendamping hidupku, Zunita Aryani Fahma Latif yang selalu menemaniku dan menjadi motivasi terbesarku.
10. Orang tua dari Zunita, Om Imam dan Tante Imam, yang sudah ramah, baik dan peduli kepada saya selama ini.

11. Teman-teman *Photonic Research Group*: Mbak Ida, Mas Azka, Mbak Mae, Mbak Helvi, dan Junita yang telah memberi dukungan dan membantu dalam mengerjakan penelitian ini.
12. Teman-teman generasi micin, Junita, Rosi, Wening, Eva, Jijah dan Sifa yang selalu memberikan informasi yang menyenangkan.
13. Teman-teman yang selalu aku dambakan kedatangannya untuk bermain denganku, Ariawan Wawan, Oki, Wahyu, Niko, Habib, Tegteg, dan Amar.
14. Teman-teman rombel Fisika 2015 (Sughoi) yang selalu memberi suka, duka, semangat dan pengalaman yang luar biasa.

Semoga Allah yang membalas seluruh kebaikan kalian, Allahumaamin. Dalam penulisan skripsi ini menyadari bahwa masih banyak kekurangan, oleh sebab itu dibutuhkan saran, masukan, serta kritikan dalam bentuk apapun yang dapat membangun ke depannya. Semoga laporan penelitian yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi masyarakat, pembaca, dan siapapun secara langsung maupun tidak langsung.

Semarang,

Kukuh Eka Kurniansyah

ABSTRAK

K. E. Kurniansyah. 2019. Fabrikasi dan Karakterisasi *Buried Waveguide* Menggunakan *Poly Methyl Methacrylate* Untuk Operasi Pada Daerah Cahaya Tampak. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Ian Yulianti, S.Si.,M.Eng.

Kata Kunci: *Polymethyl Methacrylate*, *waveguide*, rugi daya, suhu.

Dalam penelitian ini dilakukan fabrikasi dan karakterisasi *buried waveguide* berbasis *polymethyl methacrylate* (PMMA) yang beroperasi pada daerah cahaya tampak. Fabrikasi *waveguide* dilakukan dengan cara membuat selubung *waveguide* yang terbuat dari PMMA yang dipahat pada bagian tengah menggunakan mesin pahat computer numerical control (CNC) untuk diisi dengan material inti *waveguide*, lalu ditutup dengan PMMA tanpa pahatan. Material yang digunakan sebagai inti *waveguide* adalah Unsaturated Polyester Resin (UPR) dengan merek Yukalac C108B (sampel) A dan Eternal 2441IP (sampel B). Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui rugi daya keluaran *waveguide* dan mengetahui ketahanan *waveguide* terhadap perubahan suhu saat memandu cahaya. Karakterisasi rugi daya keluaran *waveguide* dilakukan dengan cara melewatkan cahaya dari LED dengan panjang gelombang 660 nm ke dalam *waveguide*. Karakterisasi terhadap perubahan suhu dilakukan dengan meletakkan *waveguide* kedalam *chamber* dan melewatkan cahaya dari LED dengan panjang gelombang 660 nm ke dalam *waveguide*. Spektrum keluaran dari karakterisasi *waveguide* diamati pada spektrometer *Ocean Optic USB4000* pada rentang suhu 35°C - 85°C dengan kenaikan 10°C. Hasil dari karakterisasi rugi daya *waveguide* menunjukkan bahwa rugi daya untuk sampel *waveguide* A dan B berturut-turut adalah -7,89 dB dan -13,85 dB, sedangkan hasil dari karakterisasi terhadap perubahan suhu untuk sampel *waveguide* A dan B berturut – turut menunjukkan rugi daya keluaran berubah sebesar $5,8 \times 10^{-3}$ dB/°C dan $5,5 \times 10^{-3}$ dB/°C.

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN.....	iv
MOTTO.....	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2.....	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Waveguide</i>	7
2.1.1 Struktur Dasar <i>Waveguide</i>	7
2.1.2 Jenis – Jenis <i>Waveguide</i>	8
2.1.2.1 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan bidang bias inti <i>waveguide</i>	8

2.1.2.2	Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan profil indeks bias.....	9
2.1.2.3	Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan jumlah mode yang dipandu...	10
2.1.2.4	Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan struktur geometrinya.....	10
2.1.3.	Penjalaran Gelombang Pada <i>Waveguide</i>	12
2.1.4.	<i>Numerical Aperture</i>	14
2.1.5.	Penjalaran Gelombang Elektromagnetik.....	15
2.2	<i>Thermo-Optic Coefficient (TOC)</i>	20
2.3	<i>Polymethyl methacrylate (PMMA)</i>	21
2.4	<i>Unsaturated Polyester Resin</i>	21
BAB 3	23
METODE PENELITIAN	23
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.2	Alat dan Bahan.....	24
3.3	Tahap Fabrikasi.....	26
3.3.1.	Pembuatan Selubung PMMA	26
3.3.2.	Optimasi Inti <i>Waveguide</i>	27
3.4	Tahap Karakterisasi.....	29
3.4.1.	Karakterisasi Terhadap Rugi Daya Keluaran	29
3.4.2.	Karakterisasi Terhadap Pengaruh Perubahan Suhu.....	30
3.5	Data dan Analisis Data.....	31
BAB 4	32
HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1	Fabrikasi <i>Waveguide</i>	32
4.2	Karakterisasi Terhadap Rugi Daya <i>Waveguide</i>	36
4.3	Karakterisasi Terhadap Perubahan Suhu	39

BAB 5	43
PENUTUP.....	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan bidang bias inti <i>waveguide</i>	8
Gambar 2.2 Profil indeks bias <i>waveguide</i>	9
Gambar 2.3 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan struktur geometrinya.....	11
Gambar 2.4 Perambatan cahaya dalam <i>waveguide</i>	12
Gambar 2.5 Segitiga vektor- <i>k</i>	13
Gambar 2.6 Penjalaran gelombang elektromagnetik	15
Gambar 2.7 <i>Waveguide planar</i>	17
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	23
Gambar 3.2 Mesin pahan CNC	24
Gambar 3.3 <i>Stripper three hole</i> (H-119CC).	24
Gambar 3.4 Spektrometer Ocean Optic USB4000	25
Gambar 3.5 Mikroskop <i>Charge Coupled Device</i> (CCD).....	25
Gambar 3.6 <i>Splice fiber optic</i>	25
Gambar 3.7 Selubung bawah dan selubung atas pada	27
Gambar 3.8 Akrilik yang sudah disambung dengan POF.....	27
Gambar 3.9 Akrilik yang sudah diisi dengan material inti <i>waveguide</i>	28
Gambar 3.10 Akrilik yang sudah diisi dengan material inti <i>waveguide</i> dan disambung dengan POF	28
Gambar 3.11 Menutup akrilik yang telah diisi dengan material inti <i>waveguide</i> dengan selubung atas	29
Gambar 3.12 Rangkaian alat karakterisasi rugi daya keluaran	30
Gambar 3.13 <i>Waveguide</i> yang sudah disambung dengan <i>splice fiber optic</i>	30
Gambar 3.14 Rangkaian alat karakterisasi pengaruh perubahan suhu.....	31

Gambar 4.1 Struktur permukaan selubung bawah yang sudah diisi dengan material inti <i>waveguide</i>	33
Gambar 4.2 Material inti <i>waveguide</i> yang dilewati sumber cahaya	34
Gambar 4.3 Pemantulan cahaya di dalam inti <i>waveguide</i> akibat <i>scattering loss surface</i>	35
Gambar 4.4 Hasil dari fabrikasi sampel <i>waveguide</i>	36
Gambar 4.5 Spektrum keluaran sampel <i>waveguide</i> dan rugi daya pada panjang gelombang 640 nm – 680 nm	37
Gambar 4.6 Sepktrum keluaran sampel <i>waveguide</i> pada suhu 35°C - 85°C	40
Gambar 4.7 Grafik perubahan rugi daya keluaran terhadap perubahan suhu pada daerah panjang gelombang 660 nm	41

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil uji nilai indeks bias material inti <i>waveguide</i>	32
Tabel 4.2 Sepsifikasi sampel <i>waveguide</i>	35

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu komponen penting yang umum dan sering digunakan diberbagai aplikasi adalah sensor. Hingga saat ini sensor sering kita jumpai dikehidupan sehari-hari. Sensor adalah perangkat yang dapat merespon suatu rangsangan atau kualitas input dengan menghasilkan output yang dapat diproses. Output ini secara fungsional terkait dengan rangsangan input yang umumnya digunakan sebagai pengukuran (Kalantar-zadeh, 2013). Hingga saat ini banyak jenis sensor yang telah dikembangkan, salah satunya adalah sensor optik. Sensor optik memiliki beberapa kelebihan yaitu ringan, sensitivitas yang tinggi, kebal terhadap interferensi elektromagnetik, dan ukurannya yang kecil (Hameed & Obayya, 2018).

Seiring dengan perkembangan teknologi sensor optik, penggunaan serat optik juga dapat digunakan sebagai sensor di berbagai aplikasi. Sebagai sensor, serat optik memiliki banyak keunggulan, diantaranya sensitivitas yang tinggi, ukuran yang kecil, dan memiliki skala integrasi yang tinggi (Liu *et al.*, 2013). Dalam pemanfaatannya, sensor serat optik diaplikasikan sebagai pemantau indeks bias, suhu, tekanan, dan regangan (Jiang *et al.*, 2011). Hingga saat ini penelitian sensor serat optik sudah banyak dikembangkan seperti penggunaan metode *Fiber Bragg Grating (FBG)* disekitar ujung serat optik untuk sensor indeks bias (Ferreira *et al.*, 2017). Selain itu terdapat juga pemantauan suhu suatu bahan kimia dengan fabrikasi dan karakterisasi serat optik multi mode menggunakan *optical time domain reflectometer* (Younus *et al.*, 2017). Perubahan parameter kimia dalam teknologi sensor optik diidentifikasi dengan mengukur perubahan indeks bias lingkungan di sekitar sensor. Dalam bidang medis, serat optik dapat digunakan juga sebagai sensor pernafasan (Suana *et al.*, 2015).

Secara umum, serat optik disebut sebagai *waveguide cylindrical*. Sementara itu, *waveguide* merujuk pada *waveguide planar* dan *waveguide nonplanar*. *Waveguide* memiliki beberapa kelebihan, diantaranya kuat, memiliki sensitivitas tinggi, pengukuran intensitas cahaya yang mudah dan dapat direalisasikan dalam bentuk chip (Yulianti *et al.*, 2018).

Sensor optik berbasis *waveguide* dikembangkan dengan menggunakan berbagai metode, seperti menggunakan prisma *waveguide* untuk mendeteksi indeks bias pada suatu cairan (Yadav *et al.*, 2017), menggunakan metode *Bragg grating* untuk meningkatkan sensitivitas sensor indeks bias berbasis *waveguide* dengan menggunakan logam pada bagian selongsong sensor (Saha *et al.*, 2017), dan menggunakan metode efek *photo elastic* untuk sensor tekanan (Ali *et al.*, 2018). Sumber cahaya yang digunakan pada sensor indeks bias berbasis *waveguide* pada teknik tersebut masih menggunakan panjang gelombang yang digunakan pada telekomunikasi dengan panjang gelombang 1330 - 1550 nm, namun jika sumber cahaya tersebut diaplikasikan pada pengukuran indeks bias dalam medium air dan dalam jaringan tubuh, maka sumber cahaya tersebut akan mengalami absorpsi (Du & Zhao, 2014), maka sensor optik berbasis *waveguide* diharapkan dapat menggunakan sumber cahaya tampak, dengan panjang gelombang 380 – 780 nm. Hooda & Rastogi (2017) telah membuat sensor indeks bias berbasis *waveguide* dengan menggunakan lapisan *cytop* dan teflon sebagai lapisan selubung yang menggunakan sumber cahaya tampak. Namun proses penelitian tersebut hanya sebatas simulasi, karena dalam proses fabrikasinya cukup sulit dan memerlukan peralatan dengan teknologi tinggi.

Kinerja dari *waveguide* dipengaruhi oleh struktur *waveguide* diantaranya adalah jenis material penyusun, struktur geometri dan dimensi *waveguide* (Taya & Elwasife, 2012). Ada berbagai macam struktur geometri *waveguide*, beberapa di antaranya yaitu *buried waveguide*, *strip loaded waveguide*, *rib waveguide*, *ridge waveguide*, dan *diffused waveguide*. Jika dibandingkan dengan struktur geometri yang lain, *buried waveguide* memiliki keunggulan yaitu rugi daya yang rendah (Yulianti *et al.*, 2018). Oleh karena itu, *buried waveguide* berpotensi dimanfaatkan sebagai sensor.

Waveguide terdiri dari inti dan selubung. Material yang sering di gunakan untuk inti dan selubung adalah silika dan polimer. Jenis dari polimer sangat beragam, salah satunya adalah *Poly-methyl methacrylate* (PMMA) atau akrilik. Akrilik merupakan bahan yang sering digunakan di masyarakat dengan harga yang relatif murah dan dapat difabrikasi dengan mudah. Salah satu kelebihan akrilik adalah memiliki nilai indeks bias yang terkontrol dan loss optik yang rendah (Prajzler *et al.*, 2014), sehingga akrilik dapat digunakan sebagai material selubung pada *waveguide*. Bahan dasar akrilik sama dengan bahan dasar serat optik polimer, sehingga penggunaan serat optik polimer sebagai koneksi dalam proses penyambungan dengan sumber cahaya pada *waveguide* tidak menimbulkan banyak rugi daya. Akrilik PMMA memiliki titik leleh pada suhu 160°C (Kumar *et al.*, 2015), sehingga akrilik PMMA kuat terhadap suhu tinggi saat dimasukkan kedalam *chamber* pada proses karakterisasi.

Jenis polimer selain *Poly-methyl methacrylate* (PMMA) adalah *Poly ethylene terephthalate* (PET) atau sering disebut polyester, polyester berjenis resin sering digunakan sebagai bahan dasar fiber, plastik, komposit dan digunakan sebagai pelapis diberbagai aplikasi (Bharat Dholakiya, 2012). Harga resin polyester relatif lebih murah jika dibandingkan dengan resin epoxy. *Unsaturated polyester resin* (UPR) memiliki nilai indeks bias yang lebih tinggi dari nilai indeks bias resin epoxy (Hegedus *et al.*, 2017). UPR dapat digunakan sebagai material inti dari *waveguide* karena memiliki nilai indeks bias yang lebih tinggi dari PMMA atau akrilik.

Material jenis polymer memiliki nilai *Thermal Optic Coefficient* (TOC) negatif, yang menandakan bahwa material jenis polymer jika diberi perlakuan perubahan suhu maka masa jenis polymer akan turun dengan meningkatnya suhu, hal ini menyebabkan penurunan nilai suatu jenis unsur yang terpolarisasi per satuan volume dan mengakibatkan penurunan indeks bias sehingga dapat meningkatkan intensitas keluaran dari *waveguide* dengan meningkatnya suhu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan fabrikasi dan karakterisasi *waveguide* dalam hal rugi daya dan pengaruh suhu terhadap rugi daya berbasis PMMA dengan material inti UPR untuk operasi pada daerah cahaya tampak.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang dikaji berdasarkan latar belakang diatas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kinerja *waveguide* berbasis *poly methyl methacrylate* (PMMA) untuk memandu cahaya dalam hal rugi daya?
2. Bagaimana kinerja *waveguide* berbasis *poly methyl methacrylate* (PMMA) untuk memandu cahaya dalam hal ketahanannya terhadap perubahan suhu ?

1.3. Batasan Masalah

Permasalahan penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut :

1. Selubung yang digunakan adalah *Poly-methyl methacrylate* (PMMA) atau akrilik.
2. Serat optik yang digunakan adalah *Polymer Optical Fiber* (POF) multimode PMMA.
3. Sumber cahaya yang digunakan adalah LED berwarna merah dengan panjang gelombang 660 nm .
4. Isi dari material inti desain sensor optik berbasis *waveguide* adalah *Unsaturated Polyester Resin* .
5. Jenis geometri *waveguide* yang digunakan adalah *buried waveguide*.
6. Parameter *waveguide* yang dioptimalkan adalah rugi daya dan pengaruh suhu.

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendapatkan kinerja *waveguide* berbasis *poly-methyl methacrylate* (PMMA) untuk memandu cahaya dalam hal intensitas.
2. Mendapatkan kinerja *waveguide* berbasis *poly-methyl methacrylate* (PMMA) untuk memandu cahaya dalam hal ketahanannya terhadap perubahan suhu.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan desain *waveguide* berbasis *poly-methyl methacrylate* (PMMA) dengan rugi daya keluaran yang rendah serta tahan terhadap perubahan suhu yang beroperasi pada cahaya tampak sehingga dapat digunakan lebih lanjut untuk aplikasi sensor optik. Selain itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan atau referensi untuk digunakan pada riset selanjutnya, khususnya untuk riset dalam bidang sensor optik.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi dibagi menjadi tiga bagian, yaitu bagian awal, bagian isi, dan bagian akhir. Sistematika tersebut dipilih dengan tujuan untuk memudahkan dalam pemahaman mengenai struktur dan isi skripsi.

1. Bagian awal skripsi, terdiri dari halaman judul, halaman persetujuan pembimbing, halaman pernyataan, halaman pengesahan, halaman motto dan persembahan, prakata, abstrak, daftar isi, daftar gambar, dan daftar tabel.
2. Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang tersusun dengan sistematika sebagai berikut.

- BAB 1. Pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
 - BAB 2. Tinjauan Pustaka, berisi teori – teori yang mendukung penelitian.
 - BAB 3. Metode Penelitian, berisi alur penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, dan metode analisis data.
 - BAB 4. Hasil dan Pembahasan, berisi tentang hasil beserta pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan.
 - BAB 5. Penutup, berisi tentang kesimpulan dan hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian yang selanjutnya.
3. Bagian akhir laporan, memuat daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dalam penulisan laporan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Waveguide

Waveguide merupakan suatu struktur yang dapat memandu gelombang elektromagnetik dalam sistem optik (Al-azzawi, 2016). Sebagaimana serat optik, *waveguide* terdiri dari inti (*core*) dan selubung (*cladding*). Perambatan cahaya dalam *waveguide* sangat bergantung pada nilai indeks bias material selubung dan material inti pada *waveguide* karena bagian inti bagian *waveguide* merupakan tempat menjalarnya cahaya dengan indeks bias tinggi, sedangkan selubung merupakan bagian *waveguide* dengan indeks bias yang lebih rendah. Hingga saat ini *waveguide* sudah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti filter (Li *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2013), sensor (Pi *et al.*, 2019; Teotia & Kaler, 2017), *splitter* (Huang *et al.*, 2018; Ren *et al.*, 2018) dan *coupler* (Dong *et al.*, 2012; Wahidah, 2018).

2.1.1 Struktur Dasar Waveguide

Pada dasarnya *waveguide* merupakan pandu gelombang dielektrik yang dapat memandu cahaya dari satu tempat ke tempat lain. *Waveguide* merupakan bagian mendasar dari suatu sistem komunikasi optik dan sirkuit optik yang terintegrasi. Struktur dasar dari *waveguide* dielektrik terdiri dari sebuah inti yang diperpanjang secara longitudinal dengan nilai indeks bias tinggi dan dikelilingi secara melintang oleh selubung berindeks bias rendah. Gelombang optik pada *waveguide* merambat dari medium dengan nilai indeks bias tinggi ke medium dengan nilai indeks bias rendah di sepanjang arah longitudinal dari *waveguide*. Secara umum, karakteristik dari *waveguide* ditentukan oleh profil transversal konstanta dielektrik $\varepsilon(x, y)/\varepsilon_0$ *waveguide* yang tidak bergantung pada arah perambatannya (Hameed & Obayya, 2018).

2.1.2 Jenis-Jenis *waveguide*

2.1.2.1 Jenis *waveguide* berdasarkan bidang bias inti *waveguide*

Terdapat tiga jenis *waveguide* berdasarkan bidang batas inti *waveguide* yaitu *waveguide planar*, *cylindrical channel*, dan *waveguide nonplanar*.

1. *Waveguide Planar*

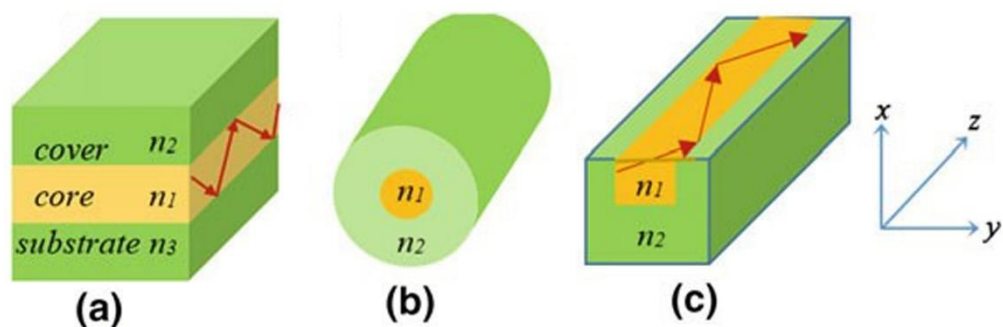
Inti *waveguide planar* terdapat di antara lapisan selubung dalam satu arah x , dengan profil indeks $n_1(x) > n_2(x), n_3(x)$. Inti *waveguide planar* harus memiliki nilai indeks bias yang lebih tinggi dari nilai indeks bias selubung dan substrat, agar cahaya terperangkap dalam inti dengan pemantulan internal total, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1(a).

2. *Cylindrical channel*

Cylindrical channel memiliki inti yang dikelilingi lapisan mantel. Untuk membatasi cahaya dalam inti, nilai indeks bias inti harus lebih besar daripada nilai indeks bias lapisan mantel, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1(b.)

3. *Waveguide nonplanar*

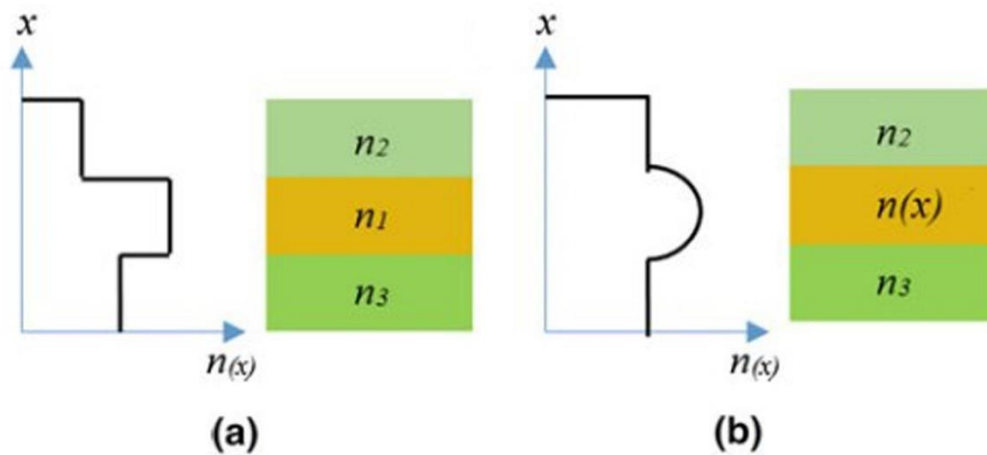
Waveguide nonplanar memiliki inti yang diapit oleh selubung dan pada bagian atas inti tidak dilapisi selubung. Inti *waveguide nonplanar* juga memiliki nilai indeks bias yang lebih besar dari selubung agar terjebak didalam inti *waveguide*. Fungsi koordinat x dan y untuk mantel tersebut yaitu $n(x, y)$ seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1(c).



Gambar 2.1. Jenis *waveguide* berdasarkan bidang batas inti *waveguide* (a) *waveguide planar* (b) *cylindrical channel* dan (c) *waveguide nonplanar* (Hameed & Obayya, 2018).

2.1.2.2 Jenis *waveguide* berdasarkan profil indeks bias

Klasifikasi *waveguide* berdasarkan distribusi profil indeks bias menghasilkan dua struktur *waveguide*. *Waveguide* yang memiliki perubahan profil indeks bias yang mendadak antara inti dan selubung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (a) disebut dengan *step index waveguide*. Namun profil indeks bias *waveguide* bergradasi dan bervariasi secara bertahap sepanjang arah longitudinal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (b) disebut dengan *graded index waveguide*, dimana indeks bias dari inti bervariasi sebagai fungsi jarak radial.



Gambar 2.2 Profil indeks bias (a) *step index* dan (b) *graded index* (Hameed & Obayya, 2018).

2.1.2.3 Jenis *waveguide* berdasarkan jumlah mode yang dipandu

Berdasarkan jumlah mode yang dipandu, jenis *waveguide* dibedakan menjadi *singlemode* dan *multimode*. *Waveguide singlemode* merupakan *waveguide* dengan jumlah mode yang dipandu tunggal. Berdasarkan struktur dan fungsinya, jenis *waveguide singlemode* lebih menguntungkan dibandingkan jenis *multimode*. Hal ini dikarenakan jenis *waveguide singlemode* memiliki *bandwidth* dan tingkat transmisi lebih tinggi, serta jarak jangkauan lebih jauh daripada *multimode* sehingga lebih reliabel, lebih stabil, dan lebih cepat dalam mentransmisikan data. Selain itu, *waveguide singlemode* memiliki distorsi dan *overlapping* cahaya yang kecil karena ukuran inti yang kecil.

2.1.2.4 Jenis *waveguide* berdasarkan struktur geometrinya

Jenis-jenis *waveguide* berdasarkan struktur geometrinya sebagai berikut:

1. *Strip-loaded waveguide*

Strip-loaded waveguide yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (a) dibentuk berdasarkan bidang bias inti *waveguide planar* dengan strip dielektrik atau strip logam bernilai indeks bias $n_2, n_3 < n_1$, dengan n_1 adalah indeks bias inti. Pada *strip-loaded waveguide*, strip hanya berupa potongan dengan lebar yang lebih kecil dibandingkan lebar inti dan lebar substrat.

2. *Rib waveguide*

Rib waveguide memiliki struktur geometri yang sama dengan *strip waveguide*. Namun *rib waveguide* memiliki strip yang memiliki nilai indeks bias yang sama dengan nilai indeks bias inti dan merupakan bagian inti dari *rib waveguide* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b).

3. *Buried waveguide*

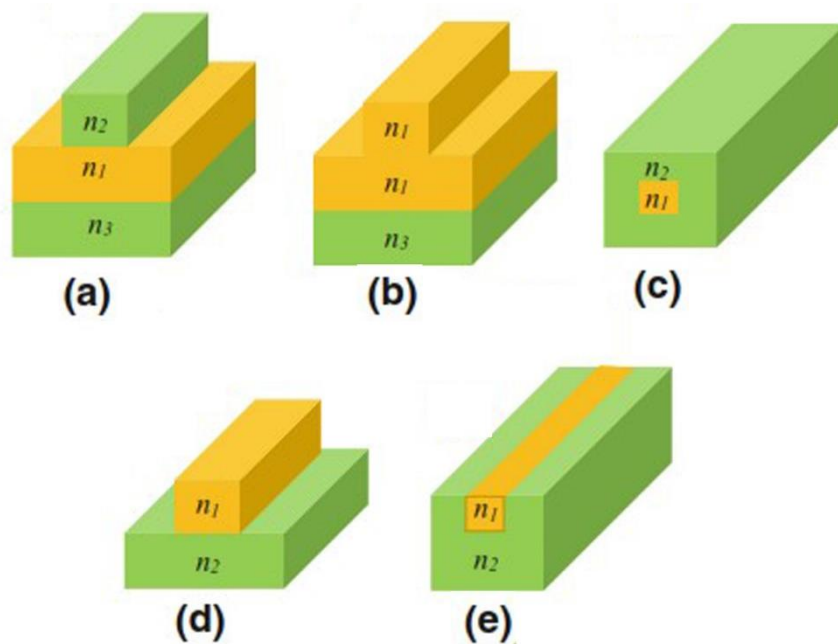
Struktur geometri ini dibentuk dengan lapisan inti berindeks bias tinggi yang menyisip di dalam mantel dengan indeks bias yang lebih rendah. Struktur geometri *buried waveguide* dapat diproduksi dengan meningkatkan indeks bias zona tertentu dari substrat dengan metode difusi. Inti dari *buried waveguide* memiliki berbagai geometri *cross-sectional* terutama *buried waveguide* yang berbentuk persegi panjang seperti pada Gambar 2.3 (c).

4. *Ridge waveguide*

Ridge waveguide memiliki struktur geometri seperti *strip waveguide*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (d). Tetapi pada bagian atas lapisan planar memiliki nilai indeks bias yang lebih tinggi dan bagian tersebut merupakan bagian inti dari *ridge waveguide*. *Ridge waveguide* memiliki ikatan optik yang kuat karena dikelilingi di tiga sisi oleh wilayah udara dengan indeks bias rendah.

5. *Diffused waveguide*

Diffused waveguide dibentuk dengan inti dibentuk di dalam mantel melalui proses difusi, seperti *waveguide* LiNbO₃ dengan inti dibentuk dengan difusi Ti, dimana batas inti di dalam mantel tidak terdefinisi secara jelas. Karena proses difusi oleh inti, batas bagian pada inti substrat *diffused waveguide* sulit untuk didefinisikan, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.3 (e).



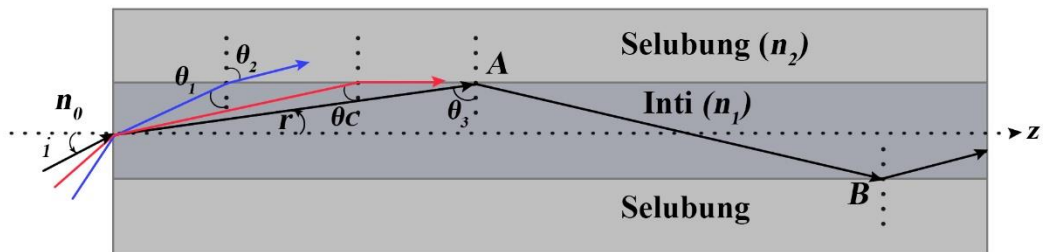
Gambar 2.3. Jenis *waveguide* berdasarkan struktur geometrinya (a) *strip loaded waveguide*, (b) *rib waveguide*, (c) *buried waveguide*, (d) *ridge waveguide*, dan (e) *diffused waveguide* (Hameed & Obayya, 2018).

2.1.3. Penjalaran Gelombang Pada *Waveguide*

Pemantulan dan perambatan cahaya di dalam inti *waveguide* didasarkan pada hukum Snellius,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

dimana n_1 adalah indeks bias inti, θ_1 sudut datang, n_2 indeks bias selubung, dan θ_2 sudut bias seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Perambatan cahaya dalam *waveguide* (Ghatak, 2010).

Transmisi cahaya pada *waveguide* didasarkan pada pemantulan internal sempurna, yang berkaitan dengan berkas cahaya pada batas antara dua media dengan indeks bias yang berbeda. Sebagian sinar yang mengenai bidang batas akan mengalami pemantulan dan sebagian yang lain mengalami pembiasan. Ketika sudut sinar datang kecil merambat dari media dengan nilai indeks bias tinggi (n_1) ke media dengan nilai indeks bias rendah (n_2), maka sinar akan dibiaskan keluar inti dengan sudut bias (θ_2) yang lebih besar dari pada sudut datang (θ_1). Jika sudut datang i diperbesar secara gradual maka pada sudut θ_1 tertentu, sudut bias akan bernilai 90° dan cahaya akan dirambatkan pada bidang batas. Pada saat θ_1 mencapai kondisi ini dinamakan sudut kritis (θ_c). Nilai sudut kritis dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (2.2)$$

$$\sin \theta_c = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

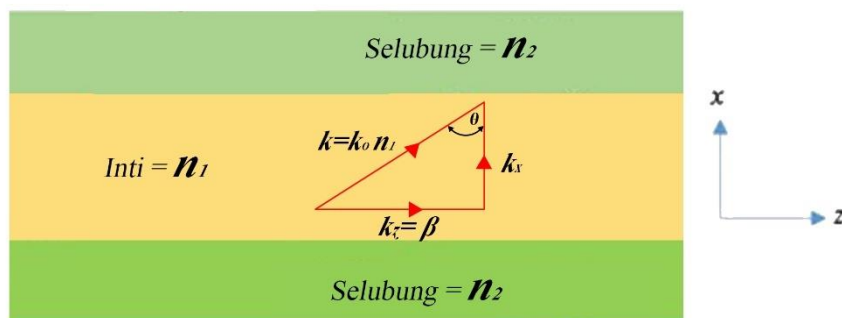
$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

Ketika cahaya merambat menuju bidang batas antarmuka inti-selubung dengan sudut datang yang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya tersebut akan dipantulkan kembali (oleh bidang batas inti-selubung) ke dalam inti. Efek semacam ini disebut sebagai pemantulan internal sempurna (*total internal reflection/TIR*). Kondisi inilah yang dipertahankan dalam transmisi cahaya dalam *waveguide*.

Parameter penting yang harus dipertimbangkan dalam analisis perambatan cahaya adalah konstanta propagasi yang digunakan untuk mengkarakterisasi mode gelombang *waveguide*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, komponen orthogonal dari konstanta propagasi k_x dalam arah x dan $k_z = \beta$ dalam arah z saling berkalian dalam segitiga vektor- k (Hameed & Obayya, 2018). Konstanta propagasi bidang gelombang dalam arah gelombang normal didefinisikan sebagai berikut :

$$k = k_o n_1 = \frac{2\pi}{\lambda_o} n_1 \quad (2.5)$$

dimana λ_o adalah panjang gelombang cahaya dalam ruang vakum. Konstanta propagasi sepanjang arah x dan z terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Segitiga vektor- k .

$$\text{Komponen transversal } k_x = k_o n_1 \cos \theta \quad (2.6)$$

$$\text{Komponen transversal } \beta = k_o n_1 \sin \theta \quad (2.7)$$

2.1.4 Numerical Aperture

Numerical aperture adalah parameter yang mempresentasikan sudut penerimaan maksimum dimana berkas cahaya masih dapat diterima dan terpandu pada inti *waveguide*. NA dapat ditentukan dari perbedaan nilai antara inti dan selubung. Pada Gambar 2.4 cahaya yang masuk dari medium luar (udara) menuju inti dengan sudut datang i mengalami pembiasan dengan sudut bias r sedemikian rupa sehingga menjadikan sudut datang pada bidang batas kedua (θ_3) lebih besar dari sudut kritis (θ_c). Hal tersebut menyebabkan cahaya terperangkap di dalam inti serat. Dengan asumsi indeks bias medium luar adalah n_0 , dan $\sin \theta_3 = \cos r$, maka pada bidang batas pertama berlaku:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_1}{n_0} \quad (2.8)$$

Cahaya yang mengalami pemantulan internal total pada bidang batas kedua berlaku kondisi,

$$\sin \theta_3 > \sin \theta_c \quad (2.9)$$

$$\sin \theta_3 > \frac{n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

dengan menggunakan persamaan $\cos^2 r + \sin^2 r = 1$, maka,

$$\sin r < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (2.11)$$

$$\sin i < \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{\frac{(n_1^2 - n_2^2)}{n_0^2}} \quad (2.12)$$

dengan asumsi indeks bias udara $n_0 = 1$, maka nilai maksimum $\sin i$ adalah

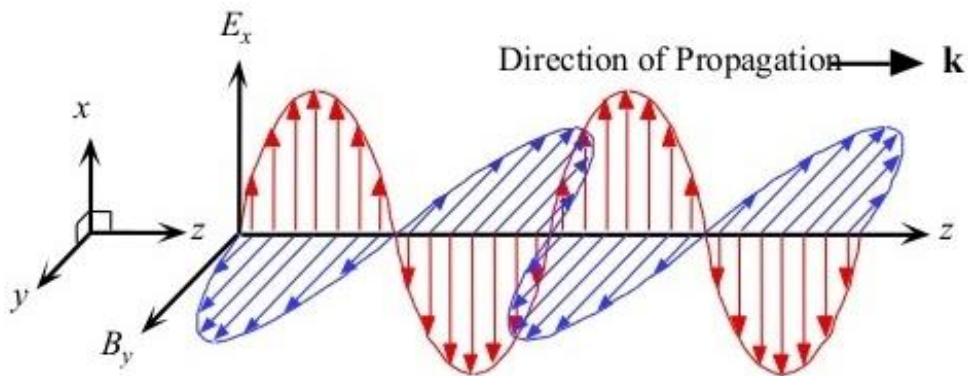
$$\sin i_m = \begin{cases} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} & \text{jika } n_1^2 < n_2^2 + 1 \\ 1 & \text{jika } n_1^2 > n_2^2 + 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

Nilai $\sin i_m$ disebut sebagai tingkat numeris atau *numerical aperture* (NA). Cahaya tidak dapat melewati *waveguide* jika sudut datang lebih besar dari i_m . Dalam praktiknya pada persamaan (2.13) berlaku n_1^2 kurang dari $n_2^2 + 1$, sehingga NA dari *waveguide* didefinisikan oleh persamaan (2.14) (Ghatak, 2010) :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.14)$$

2.1.5 Penjalaran Gelombang Elektromagnetik

Penjalaran gelombang elektromagnetik dalam *waveguide* sepanjang arah longitudinal dapat dijelaskan melalui persamaan gelombang yang diturunkan dari persamaan Maxwell. Gelombang elektromagnetik didefinisikan sebagai perpaduan gelombang listrik dan gelombang magnet yang merambat saling tegak lurus, sehingga dapat dinyatakan bahwa gelombang elektromagnetik termasuk gelombang transversal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Penjalaran gelombang elektromagnetik (S.O. Kasap, 2001).

Persamaan Maxwell dirumuskan dalam besaran medan listrik \mathbf{e} dan magnet \mathbf{h} dirumuskan sebagai berikut :

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \tilde{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \varepsilon \frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (2.16)$$

dimana ε dan μ merupakan permivitas dan permeabilitas suatu medium. Jika permivitas dan permeabilitas digantikan dengan $\varepsilon = \varepsilon_0 n^2$ dan $\mu = \mu_0$ maka dapat didapatkan sebagai berikut :

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -\mu_0 \frac{\partial \tilde{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (2.18)$$

dimana ε_0 adalah kerapatan fluks magnetik di udara atau vakum sebesar $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, μ_0 adalah kerapatan fluks listrik di udara atau vakum sebesar $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$, sedangkan n adalah nilai indeks bias bahan (Lifante Pedrola, 2016).

Gelombang elektromagnetik memiliki sudut frekuensi ω dan merambat ke arah z dengan konstanta propagasi β . Medan listrik dan medan magnet dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tilde{\mathbf{E}} = \mathbf{E}(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad (2.19)$$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}(x, y) e^{j(\omega t - \beta z)}. \quad (2.20)$$

dengan memasukan persamaan (2.19) dan (2.20) ke dalam persamaan (2.17) dan (2.18) dapat menghasilkan seperangkat persamaan medan elektromagnetik sebagai berikut :

$$\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} + j\beta \mathbf{E}_y = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}_x \quad (2.21)$$

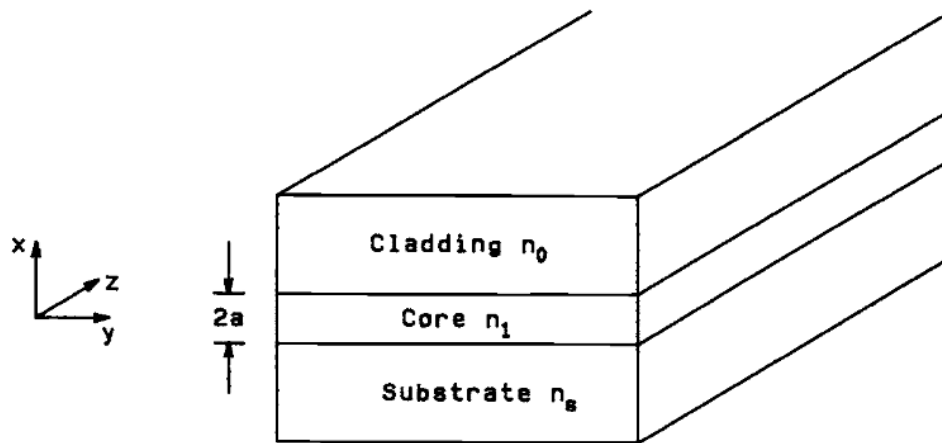
$$-j\beta \mathbf{E}_x - \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}_y \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial y} = -j\omega \mu_0 \mathbf{H}_z \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} + j\beta \mathbf{H}_y = -j\omega \epsilon_0 n^2 \mathbf{E}_x \quad (2.24)$$

$$-j\beta \mathbf{H}_x - \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} = j\omega \epsilon_0 n^2 \mathbf{E}_y \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial y} = j\omega \epsilon_0 n^2 \mathbf{E}_z \quad (2.26)$$



Gambar 2.7. *Waveguide planar* (Okamoto, 2006).

Pada *waveguide planar* yang seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7, medan elektromagnetik \mathbf{E} dan \mathbf{H} tidak memiliki ketergantungan sumbu y . Oleh karena itu $\partial \mathbf{E} / \partial y = 0$ dan $\partial \mathbf{H} / \partial y = 0$. Dengan menggunakan persamaan (2.21) hingga (2.26), maka persamaan mode gelombang elektromagnetik telah terbentuk, yaitu mode *transverse electric* (TE) dan *transverse magnetic* (TM). Persamaan mode TE dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.27)$$

dimana $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon = n^2 \omega^2 / c^2$ dan k bersifat konstan dengan konstanta indeks bias n .

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y, \quad (2.28)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{dE_y}{dx}, \quad (2.29)$$

dan

$$E_x = E_z = H_y = 0, \quad (2.30)$$

komponen tangensial E_y dan H_z harus kontinu di dua batas yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.30) bahwa komponen medan listrik sepanjang sumbu z adalah nol ($E_z = 0$). Karena medan listrik terletak pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu z , maka distribusi medan listrik disebut dengan mode *transverse electric* (TE). Persamaan mode TM dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{n^2} \frac{dH_y}{dx} \right) + \left(k^2 - \frac{\beta^2}{n^2} \right) H_y = 0 \quad (2.31)$$

dimana

$$E_x = \frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_y, \quad (2.32)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega\epsilon_0 n^2} \frac{dH_y}{dx}, \quad (2.33)$$

$$E_y = H_x = H_z = 0 \quad (2.34)$$

Seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.34) bahwa komponen medan magnet sepanjang sumbu z adalah nol ($H_z = 0$). Karena medan listrik terletak pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu z , maka distribusi medan listrik disebut dengan mode *transverse magnetic* (TM).

Medan elektromagnetik di dalam *waveguide plannar* terpandu secara terbatas di dalam inti dan meluruh secara eksponensial di dalam selubung, distribusi medan listrik dan medan magnet di dalam *waveguide plananar* dituliskan sebagai berikut :

$$E_y = \begin{cases} A \cos(\kappa a - \phi) e^{-\sigma(x-a)} & (x > a) \\ A \cos(\kappa x - \phi) & (-a \leq x \leq a) \\ A \cos(\kappa a + \phi) e^{\xi(x+a)} & (x < -a), \end{cases} \quad (2.35)$$

dan

$$H_y = \begin{cases} A \cos(\kappa a - \phi) e^{-\sigma(x-a)} & (x > a) \\ A \cos(\kappa x - \phi) & (-a \leq x \leq a) \\ A \cos(\kappa a + \phi) e^{\xi(x+a)} & (x < -a), \end{cases} \quad (2.36)$$

dimana κ , σ , dan ξ adalah bilangan gelombang sepanjang sumbu x di dalam inti dan daerah selubung, persamaanya adalah sebagai berikut :

$$\begin{cases} \kappa = \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2} \\ \sigma = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_0^2} \\ \xi = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_s^2}. \end{cases} \quad (2.37)$$

dimana n_0 adalah nilai indeks bias selubung, n_1 adalah nilai indeks bias inti, dan n_s substrat seperti pada Gambar 2.7. Distribusi medan listrik pada persamaan (2.35) ditentukan kecuali untuk konstanta arbitrer A . Konstanta A di tentukan saat menentukan daya optik P yang dibawa oleh *waveguide*. Daya optik P dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = \int_0^1 dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{u}_z dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} (E_x H_y^* - E_y H_x^*) dx. \quad (2.38)$$

Untuk mode TE dapat memasukan persamaan (2.27) hingga (2.30) kedalam persamaan (2.38) maka didapatkan persamaan daya sebagai berikut:

$$P = \frac{\beta}{2\omega \mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} |E_y|^2 dx. \quad (2.39)$$

Untuk mendapatkan fraksi daya di dalam inti, substrat dan daerah selubung, persamaan distribusi daya medan listrik pada persamaan (2.39) dimasukkan kedalam persamaan (2.35), maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P_{inti} = \frac{\beta a A^2}{2\omega \mu_0} \left\{ 1 + \frac{\sin^2(u + \phi)}{2\xi a} + \frac{\sin^2(u - \phi)}{2\sigma a} \right\} \quad (-a \leq x \leq a) \quad (2.40)$$

$$P_{substrat} = \frac{\beta a A^2 \cos^2(u + \phi)}{2\omega \mu_0} \frac{1}{2\xi a} \quad (x \leq -a) \quad (2.41)$$

$$P_{selubung} = \frac{\beta a A^2 \cos^2(u - \phi)}{2\omega\mu_0} \frac{1}{2\sigma a} \quad (x > a) \quad (2.42)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.40) hingga (2.42) maka persamaan total daya P pada *waveguide* dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P &= P_{inti} + P_{substrat} + P_{selubung} \\ &= \frac{\beta a A^2}{2\omega\mu_0} \left\{ 1 + \frac{1}{2\xi a} + \frac{1}{2\sigma a} \right\} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Maka konstanta A dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$A = \sqrt{\frac{2\omega\mu_0 P}{\beta a \left(1 + \frac{1}{2\xi a} + \frac{1}{2\sigma a} \right)}} \quad (2.44)$$

2.2 Thermo-Optic Coefficient (TOC).

Thermo-Optic Coefficient (TOC) didefinisikan sebagai variasi nilai indeks bias terhadap suhu pada tekanan yang tetap. TOC dilambangkan dengan dn/dT , unit satuan dari nilai TOC adalah $1/^\circ\text{C}$ atau $/\text{K}$. Umumnya nilai dari TOC sangat kecil yaitu antara 10^{-3} hingga $10^{-6}/^\circ\text{C}$. Analisis TOC sangat penting untuk karakterisasi perangkat optik yang bergantung pada suhu, sistem komunikasi serat optik, teknologi semikonduktor dan teknologi *femtosecond technology* (Edward D. Palik, 1985).

Nilai karakteristik TOC untuk material dielektrik optik seperti silica dan *polymer* sangat penting dipertimbangkan untuk aplikasikan pada perangkat *waveguide*. Silica memiliki nilai positif dn/dT sekitar $10^{-5}/^\circ\text{C}$, dan *polymer* memiliki nilai negatif dn/dT sekitar $-10^{-4}/^\circ\text{C}$ (N. Nikogosyan, 2003). Efek dari TOC yang ditunjukkan oleh suatu bahan ditentukan oleh pengaruh gabungan dari ketergantungan suhu terhadap dua faktor yaitu massa jenis dan polarisasi

elektronik. Massa jenis biasanya menurun dengan meningkatnya suhu, hal tersebut menyebabkan penurunan nilai suatu jenis unsur yang terpolarisasi per satuan volume dan mengakibatkan penurunan indeks bias. Nilai polarisasi dari masing-masing jenis unsur dalam materi meningkat dengan meningkatnya suhu dan oleh karena itu, indeks bias meningkat. Secara umum, nilai dari dn/dT untuk material anorganik seperti silica ditentukan oleh antara dua faktor tersebut. Namun pada material polymer, dn/dT pada dasarnya ditentukan oleh waktu perubahan massa jenis karena perubahan massa jenis yang dialami oleh polimer dengan perubahan suhu jauh lebih besar daripada perubahan polarisasi yang sesuai. Maka dari itu sebagian besar polimer optik memiliki nilai negatif (Kang *et al.*, 2003).

2.3 *Polymethyl methacrylate (PMMA).*

Polymethyl methacrylate (PMMA) disebut juga sebagai gelas atau akrilik. PMMA pertama kali dikembangkan pada tahun 1928 dan digunakan secara komersial pada tahun 1933 oleh Rohm dan Hass. PMMA merupakan plastik transparan atau serat *thermoplastic* yang terbuat dari polimerisasi *methyl methacrylate* menggunakan emulsi dan larutan tanpa polimerisasi radikal bebas (Carragher, 2003). PMMA memiliki massa jenis $1,19 \text{ g/cm}^3$ (Zhang *et al.*, 2017) dan memiliki nilai indeks bias 1,484 (Hofmann *et al.*, 2016).

PMMA memiliki beberapa kelebihan yaitu transparansi yang tinggi dari cahaya tampak hingga gelombang infra merah, nilai indeks bias yang terkontrol dengan baik, loss optik yang rendah serta fabrikasi yang murah (Prajzler *et al.*, 2014). Hingga saat ini PMMA banyak digunakan di berbagai penelitian, salah satunya adalah penggunaan PMMA sebagai splitter pada jaringan optik (Prajzler *et al.*, 2013).

2.4 *Unsaturated Polyester Resin*

Polimer *poly ethylene terephthalate* (PET) atau Polyester memiliki jenis yang beragam, salah satunya adalah *Unsaturated Polyester Resin* (UPR) atau Resin Polyester. UPR merupakan bahan yang sering digunakan masyarakat dan memiliki

harga yang murah. UPR sering digunakan sebagai kerajinan resin akrilik, *body repair* pada mobil, membuat *body* kapal, dan membuat tangki air (Bharat Dholakiya, 2012). UPR memiliki berbagai jenis merek, seperti UPR Yukalac C108 b yang diproduksi oleh PT. Justus Sakti raya. Yukalac C 108 b memiliki massa jenis 1.2 g/cm^2 . Katalis yang digunakan adalah *Metil Ethyl Ketone* (MEK). Selain itu, UPR Eternal 2441PI yang diproduksi oleh Eternal Synthetic resin (changhu) co.ltd, memiliki massa jenis $1.1 - 1.2 \text{ g/cm}^2$. Katalis dari UPR Eternal 2441PI adalah Mepoxe yang ditambahkan dengan cobalt n24/21.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan:

1. Sampel *waveguide* A dengan material inti UPR Yukalac C 108 B memiliki nilai rugi daya yang lebih rendah dari sampel *waveguide* B yaitu 7.89 dB di panjang gelombang 660 nm, sementara itu sampel *waveguide* B dengan material inti UPR Eternal 2441IP memiliki nilai rugi daya 13.85 dB di panjang gelombang 660 nm.
2. Perubahan rugi daya keluaran sampel *waveguide* A dan B terhadap perubahan suhu adalah $5,8 \times 10^{-3}$ dB/°C dan $5,5 \times 10^{-3}$ dB/°C dengan koefisien korelasi berturut-turut 98,60% dan 92,77%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian di atas, untuk penelitian lebih lanjut beberapa saran yang dapat diberikan adalah :

1. Perlu dilakukan identifikasi *wavelength dependent loss* (WDL).
2. Perlu dilakukan identifikasi *polarization dependent loss* (PDL).
3. Perlu adanya *chamber* yang lebih optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-azzawi, Abdul. 2016. *Optical Fibers and Integrated Photonic Devices*. edited by T. & F. Group. New York: CRC Press.
- Ali, Maryam, Akbar Ganji, and Reza Asadi. 2018. "SC." *Sensors & Actuators: A. Physical*.
- Bharat Dholakiya. 2012. "Unsaturated Polyester Resin for Speciality Applications." *Polyester* 7:168.
- Carraher, Charles E. 2003. *Polymer Chemistry, Sixth Edition*. 6th ed. edited by M. Dekker. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Dong, Ningning, Yicun Yao, Yuechen Jia, Feng Chen, Sudheer Kumar, Andrew Anthony, and Qingming Lu. 2012. "Buried Channel Waveguides in KTiOPO₄ Nonlinear Crystal Fabricated by Focused He + Beam Writing." *Optical Materials* 35(2):184–86.
- Du, Wei and Feng Zhao. 2014. "Surface Plasmon Resonance Based Silicon Carbide Optical Waveguide Sensor." *Materials Letters* 115:92–95.
- Edward D. Palik. 1985. *Handbook of Optical Constants of Solids*. volume 5. edited by Edward D. Palik. Academic Press.
- Ferreira, Miguel F. S., Gabriela Statkiewicz-Barabach, Dominik Kowal, Pawel Mergo, Waclaw Urbanczyk, and Orlando Frazão. 2017. "Fabry-Perot Cavity Based on Polymer FBG as Refractive Index Sensor." *Optics Communications* 394(November 2016):37–40.
- Ghatak, Ajoy. 2010. *OPTICS*. 1st ed. New York: McGraw-Hill.

- Gozali, M. Hulaifi and Paryanto Dwi Setyawan. 2016. "Tensile Properties and Translaminar Fracture Toughness of Glass Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin Composites Aged in Distilled and Salt Water." *AIP Conference Proceedings*. 1717(1):040015.
- Hameed, Mohamed Farhat O. and Salah Obayya. 2018. *Computational Photonic Sensors*. edited by M. F. O. Hameed and S. Obayya. Springer.
- Hegedus, Gergely, Tamás Sarkadi, and Tibor Czigány. 2017. "Analysis of the Light Transmission Ability of Reinforcing Glass Fibers Used in Polymer Composites." *Materials* 10(6).
- Hofmann, Meike, Yanfen Xiao, Stanislav Sherman, Uwe Gleissner, Thomas Schmidt, and Hans Zappe. 2016. "Asymmetric Mach–Zehnder Interferometers without an Interaction Window in Polymer Foils for Refractive Index Sensing." *Applied Optics* 55(5):1124.
- Hooda, Babita and Vipul Rastogi. 2017. "Low Cost Highly Sensitive Miniaturized Refractive Index Sensor Based on Planar Waveguide." *Optik* 143:158–66.
- Huang, Binke, Juan Chen, and Wanshun Jiang. 2009. "Effects of Surface Roughness on TE Modes in Rectangular Waveguide." *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 30(7):717–26.
- Huang, Tianye, Yiheng Wu, Yuan Xie, and Zhuo Cheng. 2018. "Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications A Slot-Waveguide-Based Polarization Beam Splitter Assisted by Epsilon-near- Zero Material." *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* (October):0–1.
- Jiang, L., J. Yang, S. Wang, B. Li, and M. Wang. 2011. "Fiber Mach–Zehnder Interferometer Based on Microcavities for High-Temperature Sensing with High Sensitivity." *Optics Letters* 36(19):3753.

- Jing, Ning, Chuanxin Teng, Jie Zheng, Guanjun Wang, Minjuan Zhang, and Zhibin Wang. 2016. "Optical Fiber Technology Temperature Dependence of Light Power Propagation in Bending Plastic Optical Fiber." *Optical Fiber Technology* 31:20–22.
- Kalantar-zadeh, Kourosh. 2013. *Sensors: An Introductory Course*. Springer.
- Kang, Eun-seok, Jang-ung Park, and Byeong-soo Bae. 2003. "Effect of Organic Modifiers on the Thermo-Optic Characteristics of Inorganic – Organic Hybrid Material Films." *Journal of Materials Research* 18(08):1889–94.
- Kumar, Dinesh, R. Anandan, and J. Ekanthamoorthy. 2015. "Advances in Dental-PMMA Based Artificial Teeth through Rapid Prototyping Technology." *Biomedical Research* 26(4):6–8.
- Li, Shiqi, Weiwei Chen, Pengjun Wang, Qiang Fu, Jie Zhang, Bohao Zhang, Tingge Dai, Yuehai Wang, and Jianyi Yang. 2018. "Bandwidth-Tunable Optical Passband Filter Based on Graphene – Silicon Waveguide." *Optics Communications* 426(May):206–11.
- Lifante Pedrola, Ginés. 2016. "The Beam-Propagation Method." Pp. 22–70 in. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Liu, Qing, Jack Sheng Kee, and Mi Kyoung Park. 2013. "A Refractive Index Sensor Design Based on Grating-Assisted Coupling between a Strip Waveguide and a Slot Waveguide." *Optics Express* 21(5):5897.
- Luo, Xin, Xihua Zou, Xiaofeng Li, Zhi Zhou, Wei Pan, Lianshan Yan, and Kunhua Wen. 2013. "High-Uniformity Multichannel Plasmonic Filter Using Linearly Lengthened Insulators in Metal–insulator–metal Waveguide." *Optics Letters* 38(9):1585.
- N. Nikogosyan, David. 2003. "Properties of Optical and Laser-Related Materials: A Handbook." *Properties of Optical and Laser-Related Materials: A Handbook*, by David N. Nikogosyan, Pp. 614. ISBN 0-471-97384-X. Wiley-VCH, May 2003. 1.

- Okamoto, Katsunari. 2006. *Fundamentals of Optical Waveguides (Optics and Photonics Series)*. California: Elsevier Inc.
- Pang, Fufei, Wenchao Xiang, Hairun Guo, Na Chen, Xianglong Zeng, Zhenyi Chen, and Tingyun Wang. 2008. "Special Optical Fiber for Temperature Sensing Based on Cladding-Mode Resonance." *OPTICS EXPRESS* 16(149):12967–72.
- Patra, Trilochan. 2013. "Numerical Aperture of A Plastic Optical Fiber." *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)* 2(1):258–63.
- Pi, Mingquan, Chuantao Zheng, Ran Bi, Huan Zhao, Lei Liang, Yu Zhang, Yiding Wang, and Frank K. Tittel. 2019. "Sensors and Actuators B : Chemical Design of a Mid-Infrared Suspended Chalcogenide / Silica-on-Silicon Slot-Waveguide Spectroscopic Gas Sensor with Enhanced Light-Gas Interaction Efficiency." *Sensors & Actuators: B. Chemical* 297(April):126732.
- Prajzler, Václav, Pavla Nekvindová, Petr Hypš, Oleksiy Lyutakov, and Viťežslav Jerřábek. 2014. "Flexible Polymer Planar Optical Waveguides." *Radioengineering* 23(3):776–82.
- Prajzler, Václav, Miloř Neruda, and Jarmila řpírková. 2013. "Planar Large Core Polymer Optical 1x2 and 1x4 Splitters Connectable to Plastic Optical Fiber." *Radioengineering* 22(3):751–57.
- Ren, Yingying, Limu Zhang, Hongguang Xing, Carolina Romero, Javier R. Vázquez de Aldana, and Feng Chen. 2018. "Cladding Waveguide Splitters Fabricated by Femtosecond Laser Inscription in Ti:Sapphire Crystal." *Optics and Laser Technology* 103:82–88.
- Rogers, Alan. 2008. *Essentials of Photonics Second Edition*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, LLC.
- S.O. Kasap. 2001. *Optoelectronics and Photonics Principles and Practices* Prentice Hall. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

- Saha, Nabarun, Arun Kumar, and Arup Mukherjee. 2017. "Enhancement of Refractive Index Sensitivity of Bragg-Gratings Based Optical Waveguide Sensors Using a Metal under-Cladding." *Optics Communications* 396(March):83–87.
- Suana, Wayan, Melania Suweni Muntini, and Agus Muhamad Hatta. 2015. "Pengembangan Sensor Napas Berbasis Serat Optik Plastik Dengan Cladding Terkelupas Untuk Aplikasi Di Bidang Medis." *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya* 8(2):120207.
- Sutrisno, Dewi Anggrahani. 2015. "Resin Based Stepwedge As A Substitute For Soft Tissue On Digital Radiographyc." *ICMSE 2015*. 2(1):69.
- Taya, Sofyan A. and Khitam Y. Elwasife. 2012. "Guided Modes in a Metal-Clad Waveguide Comprising a Left-Handed Material as a Guiding Layer." *Ijrras* 13(1):294–305.
- Teotia, Pradeep Kumar and R. S. Kaler. 2017. "Multilayer with Periodic Grating Based High Performance SPR Waveguide Sensor." *Optics Communications* 395:154–58.
- Wahidah, Miftahul Jannah. 2018. "Studi Awal Fabrikasi Pandu Gelombang Symetric Dengan Tin Oxida." *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia* 07(01):19–23.
- Yadav, Gulab Chand, Gaurav Sharma, Sushil Kumar, Deepak, Rajesh Kumar, Surendra Prasad, and Vivek Singh. 2017. "Fabrication of a Metal Clad Planar Polymer Waveguide Based Sensor for Detection of Low-Refractive-Index-Contrast of Liquid." *Optik* 138:289–94.
- Younus, Marwan Hafeedh, Odai Falah Ameen, Norizah Redzuan, Norhayati Ahmad, and Raja Kamarulzaman Raja Ibrahim. 2017. "Fabrication and Characterization of Multimode Optical Fiber Sensor for Chemical Temperature Monitoring Using Optical Time Domain Reflectometer." *Karbala International Journal of Modern Science* 2–8.

- Yulianti, Ian, Ngurah Made D. P, Yuni Lestiyanti, and Ojo Kurdi. 2018. "Optimization of Ridge Waveguide Structure for Temperature Sensor Application Using Finite Difference Method." 02020.
- Zhang, Hongming, Guangcheng Zhang, Jiantong Li, Xun Fan, Zhanxin Jing, Jianwei Li, and Xuetao Shi. 2017. "Lightweight, Multifunctional Microcellular PMMA/Fe₃O₄@MWCNTs Nanocomposite Foams with Efficient Electromagnetic Interference Shielding." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 100:128–38.
- Zhong, Nianbing, Mingfu Zhao, Qiang Liao, Xun Zhu, and Yishan Li. 2016. "Effect of Heat Treatments on the Performance of Polymer Optical Fiber Sensor." 24(12):12893–98.