



**PEMODELAN *BURIED WAVEGUIDE*  
*POLYMETHYLMETHACRYLATE* UNTUK  
APLIKASI SENSOR INDEKS BIAS DENGAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

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

Oleh

Jauhar Azka

4211414013

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

**2019**



**PEMODELAN *BURIED WAVEGUIDE*  
*POLYMETHYLMETHACRYLATE* UNTUK  
APLIKASI SENSOR INDEKS BIAS DENGAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

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

Oleh

Jauhar Azka

4211414013

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

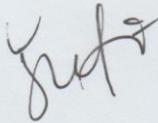
**2019**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi yang berjudul “Pemodelan *Buried Waveguide Polymethylmethacrylate* untuk Aplikasi Sensor Indeks Bias dengan Metode Elemen Hingga” ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 29 Juli 2019

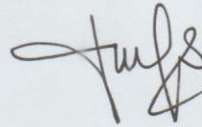
Pembimbing I



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

NIP. 197707012005012001

Pembimbing II



Drs. Ngurah Made DP, M.Si., Ph.D.

NIP. 195610291986011001

## PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi berjudul “Pemodelan *Buried Waveguide Polymethylmethacrylate* untuk Aplikasi Sensor Indeks Bias dengan Metode Elemen Hingga” benar-benar asli dan bebas plagiat. Pendapat atau temuan orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip dan dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah. 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, 29 Juli 2019



Jauhar Azka

NIM. 4211414013



## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pemodelan *Buried Waveguide Polymethylmethacrylate* untuk Aplikasi Sensor Indeks Bias dengan Metode Elemen Hingga

disusun oleh

Jauhar Azka

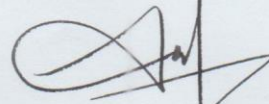
4211414013

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang pada tanggal 29 Juli 2019.

Semarang, 8 Agustus 2019

Panitia,

Sekretaris

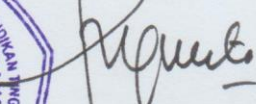


Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP 196807141996031005



Ketua



Dr. Sugianto, M.Si.

NIP 196102191993031001

Ketua Penguji

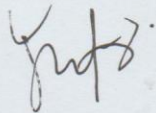


Sugiyanto, S.Pd., M.Si.

NIP 198111102003121001

Anggota Penguji/

Pembimbing I

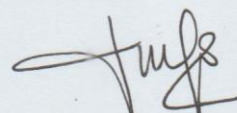


Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng.

NIP 197707012005012001

Anggota Penguji/

Pembimbing II



Drs. Ngurah Made DP, M.Si., Ph.D.

NIP 195610291986011001

## **MOTTO**

Ada kalanya, ketika berusaha, jatuh ke dalam kegelapan dan keputusasaan itu perlu. Kemudian, lampaulah kegelapan dan keputusasaan itu dengan cahaya dan harapan dari dirimu sendiri.

## **PERSEMBAHAN**

Untuk Allah & Rasul-Nya

Bapakku & Ibuku tercinta

Fisika 2014

*Photonics Laboratory*

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga beliau, sahabat, dan orang-orang yang mengikuti risalah beliau hingga akhir zaman.

Setelah melalui perjuangan dengan berbagai kendala, akhirnya penulis telah menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Pemodelan *Buried Waveguide Polyethylmethacrylate* untuk Aplikasi Sensor Indeks Bias dengan Metode Elemen Hingga” dengan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk melengkapi kurikulum dan menyelesaikan pendidikan Sarjana Strata Satu pada Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

Terselesainya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi ini.
2. 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.
3. Ibu dan Ayah atas segala doa yang selalu dipanjatkan, semangat yang selalu diberikan, kesabaran yang selalu dicurahkan, dan dukungan moril maupun materil yang tak henti-hentinya diberikan.
4. Dr. Sugianto, M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
5. Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

6. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si. selaku Kepala Program Studi Fisika Universitas Negeri Semarang.
7. Keluarga *Photonics Laboratory*: Helvi, Mae, Kukuh, dan Zunita yang telah memberi dukungan dan membantu dalam mengerjakan penelitian ini.
8. Teman-teman bermain Agus, Zaka, Sulthon, Ulil, Hendra, Zaim, Aldi, Mas Gud, dan Arifin yang telah memberi dukungan dan motivasi dalam mengerjakan skripsi.
9. Teman-teman rombel Fisika angkatan 2014 yang selalu memberi semangat dan pengalaman yang luar biasa.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang membantu menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga memohon maaf apabila dalam penyusunan skripsi ini ada beberapa kekurangan dan kesalahan karena keterbatasan yang dimiliki penulis. Sebagai akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan bagi pembaca sekalian, dan juga penulis mengharapkan saran dan kritik demi menyempurnakan kajian ini. Semoga penelitian yang telah dilakukan dapat menjadikan sumbangsih bagi kemajuan dunia riset Indonesia.

Semarang, 29 Juli 2019

Penulis



## ABSTRAK

Azka, Jauhar. 2019. *Pemodelan Buried Waveguide Polymethylmethacrylate untuk Aplikasi Sensor Indeks Bias dengan Metode Elemen Hingga*. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Ian Yulianti, M.Eng. dan Pembimbing Pendamping Drs. Ngurah Made Dharma Putra, M.Si., Ph.D.

**Kata Kunci:** *buried waveguide*, sensor indeks bias, metode elemen hingga

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai indeks bias inti yang menghasilkan konstanta propagasi yang optimum untuk desain *buried waveguide* PMMA serta memodelkan pengaruh indeks bias sekitar *waveguide* terhadap konstanta propagasi untuk mendapatkan sensitivitas *buried waveguide* terhadap indeks bias. Material selubung *waveguide* yang digunakan adalah *polymethylmethacrylate* (PMMA). Adapun ukuran penampang inti *waveguide* adalah  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . Simulasi dilakukan pada panjang gelombang 650 nm dengan Metode Elemen Hingga. Parameter *buried waveguide* yang dioptimasi pada pemodelan ini adalah indeks bias inti dengan melakukan variasi material penyusun inti *waveguide* yang mana material penyusun inti yang digunakan adalah material polimer dengan rentang nilai indeks bias 1,52 sampai 1,59. Melalui simulasi variasi nilai indeks bias inti, didapatkan nilai indeks bias yang optimum menggunakan material *benzocyclobutene* dengan nilai indeks bias 1,54 dan *polyester* dengan nilai indeks bias 1,57. Sensitivitas sensor didapatkan dari nilai gradien garis dengan variasi indeks bias lingkungan. Hasil pemodelan parameter *buried waveguide* yang optimum untuk aplikasi sensor indeks bias adalah *waveguide* dengan menggunakan material *polyester* tanpa menggunakan selubung atas yang memiliki nilai indeks bias 1,57, dengan nilai sensitivitas sebesar  $4,9 \times 10^{-10} \text{ rad/m} \cdot \text{RIU}$ , sehingga ukuran parameter tersebut disarankan untuk aplikasi *waveguide* sebagai sensor indeks bias.

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN .....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN .....	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
<b>BAB</b>	
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB</b>	
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Sensor Indeks Bias.....	6
2.1.1 Parameter Sensor Indeks Bias .....	6
2.1.2 Sensor Indeks Bias Optik .....	7
2.1.2.1 Sensor Indeks Bias Serat Optik.....	7
2.1.2.2 Sensor Indeks Bias <i>Waveguide</i> .....	8
2.2 <i>Waveguide</i> .....	8
2.2.1 Struktur Dasar <i>Waveguide</i> .....	8
2.2.2 Jenis-Jenis <i>waveguide</i> .....	9
2.2.2.1 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan bidang bias inti <i>waveguide</i> .....	9
2.2.2.2 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan profil indeks bias.....	10
2.2.2.3 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan jumlah mode yang dipandu.....	11

2.2.2.4 Jenis <i>waveguide</i> berdasarkan struktur geometrinya.....	11
2.2.3 Mode Gelombang.....	14
2.2.4 Numerical Aperture.....	15
2.2.5 V-Number .....	17
2.2.6 Penjalaran Gelombang Elektromagnetik.....	17
2.3 <i>Polymethylmethacrylate</i> (PMMA).....	21
2.4 <i>Finite Element Method</i> .....	22
BAB	
III. METODE PENELITIAN.....	24
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	24
3.2 Instrumen Penelitian .....	24
3.2.1 Perangkat Keras .....	24
3.2.2 Perangkat Lunak.....	25
3.3 Alur Penelitian .....	25
3.3.1 Studi Literatur .....	26
3.3.2 Spesifikasi Parameter .....	27
3.3.3 Desain Dimensi Buried Waveguide.....	27
3.3.4 Syarat Batas.....	29
3.3.5 Simulasi Sensor.....	30
3.4 Data dan Analisis Data .....	33
BAB	
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Validasi Program .....	34
4.2 Kajian Ukuran Jaring-Jaring Kisi .....	36
4.3 Simulasi Parameter <i>Waveguide</i> .....	38
4.3.1 Simulasi Nilai Indeks Bias Inti .....	38
4.3.2 Simulasi Ukuran Ketebalan Bagian Atas.....	42
BAB	
V. PENUTUP.....	49
5.1 Simpulan.....	49
5.2 Saran .....	49
DAFTAR PUSTAKA .....	51
LAMPIRAN.....	55

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Jenis waveguide berdasarkan bidang batas inti <i>waveguide</i> .....	10
2.2 Profil indeks bias.....	10
2.3 <i>Buried waveguide</i> .....	12
2.4 <i>Strip-loaded waveguide</i> .....	12
2.5 <i>Rib waveguide</i> .....	13
2.6 <i>Ridge waveguide</i> .....	13
2.7 <i>Diffused waveguide</i> .....	13
2.9 Segitiga vektor- <i>k</i> .....	15
2.10 Penjaran gelombang elektromagnetik.....	18
2.11 Contoh dari penggunaan elemen pada.....	22
3.1 Diagram alir penelitian.....	26
3.2 Desain dimensi <i>buried waveguide</i> .....	28
3.3 Desain dimensi <i>buried waveguide</i> untuk sensitivitas.....	29
3.4 Kondisi batas pemodelan.....	30
3.5 Algoritma simulasi nilai indeks bias inti.....	31
3.6 Algoritma simulasi sensitivitas.....	32
4.1 Desain struktur parameter <i>buried waveguide</i> .....	34
4.2 Jaringan-Jaring Kisi yang digunakan untuk validasi program pada bagian permukaan inti dan sekitarnya.....	35
4.3 Bentuk jaring-jaring kisi yang telah diterapkan dalam objek program.....	38
4.4 Grafik hubungan pengaruh indeks bias inti terhadap konstanta propagasi.....	40
4.5 Grafik pengaruh variasi indeks bias lingkungan terhadap konstanta propagasi menggunakan material inti <i>benzocyclobutene</i> .....	44
4.6 Grafik pengaruh variasi indeks bias lingkungan terhadap konstanta propagasi menggunakan material inti <i>polyester</i> .....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Spesifikasi Parameter .....	27
4.1 Data Pembandingan Validasi Program .....	36
4.2 Kajian Ukuran Jaring-Jaring Kisi.....	37
4.3 Material Polimer Penyusun Inti <i>Waveguide</i> .....	39
4.4 Nilai <i>Numerical Aperture</i> dan <i>V-Number</i> Material Polimer Penyusun Inti <i>Waveguide</i> .....	41
4.5 Nilai Sensitivitas yang Didapat dari Simulasi Variasi Selubung Atas.....	48



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1 Input parameter waveguide .....	56
2 Pembuatan desain waveguide .....	57
3 Pengaturan jaring-jaring kisi waveguide.....	57
4 Simulasi waveguide variasi indeks bias lingkungan.....	57

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Salah satu sifat yang penting dari suatu bahan pada perangkat optik adalah indeks bias (Ramandha & Wahyudi, 2017). Indeks bias merupakan sifat fisis yang sangat sensitif (Qiftia, et al., 2014). Hal ini dikarenakan indeks bias suatu material untuk panjang gelombang tertentu akan mengalami perubahan apabila komposisi material tersebut mengalami perubahan (Sari, et al., 2012). Pengukuran indeks bias sangat diperlukan dalam berbagai macam penerapan seperti analisis kimia, evaluasi pencemaran lingkungan, dan diagnosa medis (Teng, et al., 2017).

Indeks bias dapat digunakan di berbagai bidang. Dalam bidang ilmu kelautan, indeks bias dimanfaatkan untuk menentukan nilai salinitas air laut (Tengsdal, 2012). Selain itu, indeks bias dapat dimanfaatkan untuk mengetahui standar suatu larutan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Aripionnammal (2012) menunjukkan bahwa indeks bias dapat digunakan untuk menentukan standar dari suatu minyak. Pada bidang industri makanan, indeks bias dimanfaatkan untuk mengukur konsentrasi larutan sukrosa. (Hidayanto, et al., 2010).

Selain menggunakan metode listrik untuk pengukuran indeks bias, terdapat metode lain yaitu dengan menggunakan serat optik. Sensor serat optik mempunyai banyak keunggulan, di antaranya kepekaan yang tinggi, ukuran yang kecil, dan dapat mendeteksi pergeseran panjang gelombang yang amat kecil (Liu, et al., 2013). Sensor serat optik diaplikasikan sebagai pemantau indeks bias, suhu, tekanan, dan regangan (Jiang, et al., 2011). Selain itu, sensor serat optik juga dapat diaplikasikan sebagai sensor gas (Schmitt, et al., 2015). Sensor serat optik dapat ditanamkan pada material atau bangunan. Hal ini dikarenakan ukurannya yang sangat kecil dan ringan. Sensor serat optik dapat diklasifikasikan

berdasarkan parameter yang telah termodulasi (Her & Yang, 2012). Selain menggunakan sensor serat optik, terdapat metode lain yaitu menggunakan *waveguide*. Berdasarkan sifat dan fungsinya, sensor optik berbasis *waveguide* hampir sama dengan sensor serat optik, akan tetapi secara struktur berbeda. Sensor optik berbasis *waveguide* memiliki ukuran yang dapat disesuaikan dengan perangkat. Sehingga, sensor optik berbasis *waveguide* dapat disusun di dalam sebuah sirkuit. Sebagai akibatnya, sensor optik berbasis *waveguide* tidak mengalami *bending* dan lebih stabil (Yulianti, et al., 2018).

Dewasa ini, penelitian mengenai *waveguide* sebagai sensor indeks bias telah dikembangkan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Bruck dan Hainberger, (2008) *waveguide* digunakan sebagai sensor indeks bias dengan menggunakan prinsip Mach-Zehnder-Interferometer (MZI). Wang et al., (2018) menggunakan *Long-Period Waveguide Grating* sebagai sensor indeks bias. Adapun prinsip untuk mendapatkan nilai sensitivitas didasarkan pada analisis spektrum absorpsi keluaran dan resonansi pergeseran panjang gelombang terhadap konsentrasi cairan. Rezem et al., (2016) melakukan penelitian sensor indeks bias berbasis *waveguide* polimer, yang difabrikasi menggunakan metode *UV-Curing*. Oleh karena itu, sensor indeks bias berbasis *waveguide* berpeluang untuk diteliti.

Material penyusun *waveguide* jenisnya beragam. Akan tetapi, material yang sering digunakan adalah silika dan polimer. Polimer jenisnya sangat beragam, salah satunya adalah *Polymethylmethacrylate* (PMMA) atau akrilik. Dari beragam jenis polimer, PMMA sering digunakan sebagai bahan *waveguide*. Hal ini dikarenakan, PMMA memiliki transparansi yang tinggi, biaya yang rendah, dan mudah untuk difabrikasi (Prajzler, et al., 2010).

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.

Parameter yang penting dalam sensor indeks bias adalah sensitivitas. Sensitivitas dipengaruhi oleh struktur *waveguide*, terutama ketebalan selubung atas *waveguide* karena ketebalan selubung atas *waveguide* kontak langsung dengan lingkungan. Penelitian untuk mengetahui sensitivitas sensor dapat dilakukan secara fabrikasi maupun secara simulasi. Simulasi parameter *waveguide* dalam aplikasi sensor indeks bias dilakukan menggunakan metode numerik.

Metode simulasi secara numerik dapat dilakukan dengan berbagai metode, di antaranya adalah metode beda hingga dan metode elemen hingga. Metode elemen hingga dipilih pada penelitian ini. Hal ini dikarenakan, diskretisasi domain pada metode elemen hingga lebih fleksibel terhadap objek yang diukur, sehingga dalam perhitungan tersebut memiliki ketelitian yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan simulasi sensor indeks bias berbasis *waveguide* PMMA struktur *buried waveguide* dengan metode elemen hingga.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana konstanta propagasi dalam *buried waveguide* PMMA dengan variasi indeks bias inti?
2. Bagaimana pengaruh indeks bias lingkungan terhadap konstanta propagasi *buried waveguide* PMMA?

## 1.3 Batasan Masalah

Pembatasan masalah dimaksudkan untuk membatasi ruang lingkup penelitian. Pembatasan masalah yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Selubung yang digunakan adalah PMMA.
2. Struktur *waveguide* yang digunakan yaitu *buried waveguide*.
3. Parameter-parameter fisis *waveguide* yang dikaji meliputi indeks bias inti dan indeks bias sekitar.

4. Parameter sensor yang disimulasikan adalah sensitivitas berupa perubahan konstanta propagasi ( $\beta$ ) terhadap indeks bias.
5. Simulasi dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendapatkan nilai indeks bias inti yang menghasilkan konstanta propagasi yang optimum untuk desain *buried waveguide* PMMA.
2. Memodelkan pengaruh indeks bias sekitar *waveguide* terhadap konstanta propagasi ( $\beta$ ) untuk mendapatkan sensitivitas *buried waveguide* terhadap indeks bias.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan nilai indeks bias inti dan ketebalan selubung yang optimum untuk desain *buried waveguide* PMMA menggunakan metode elemen hingga, sehingga dapat digunakan sebagai sensor indeks bias. Selain itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan atau referensi untuk digunakan pada riset selanjutnya, khususnya untuk riset fabrikasi.

#### **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, daftar tabel, dan daftar lampiran.



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 inialisasi parameter untuk pemodelan.
  - 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, dan lampiran-lampiran.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sensor Indeks Bias**

Definisi sensor secara umum yaitu suatu perangkat yang digunakan untuk mendeteksi dan merespon perubahan keadaan lingkungan sekitar (Fraden, 2010). Keadaan yang dimaksud berupa fenomena alam, diantaranya yaitu fenomena kimia, biologi, dan fisika. Fenomena tersebut kemudian digunakan sebagai parameter besaran untuk pendeteksian oleh sensor. Besaran kimia yang menjadi parameter pendeteksian oleh sensor diantaranya yaitu pH, konsentrasi larutan, gas, dan uap kimia. Adapun fenomena biologi, besaran-besaran biologi yang dapat dideteksi oleh sensor diantaranya yaitu jenis dan populasi mikroorganisme, serta komponen-komponen biokimia. Sedangkan, untuk fenomena fisika, beberapa besaran fisika yang menjadi pendeteksian sensor meliputi indeks bias, suhu, tekanan, tegangan, perpindahan, percepatan, dan arus listrik (Yulianti, et al., 2018).

Indeks bias merupakan salah satu besaran fisika yang memiliki pengaruh besar dalam berbagai bidang, salah satunya di bidang industri. Bidang industri, indeks bias digunakan sebagai pendeteksian gas dan kontrol kualitas dari produk industri (Naora, et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan suatu sensor indeks bias yang efisien dan fleksibel. Sensor indeks bias yang baik dapat digunakan di berbagai kondisi lingkungan, tetapi bahan sensor tidak mudah rusak karena pengaruh dari kondisi lingkungan tersebut. Hal inilah yang menjadi alasan dasar untuk dilakukan berbagai penelitian dalam pengembangan sensor indeks bias.

##### ***2.1.1 Parameter Sensor Indeks Bias***

Kemampuan sebuah sensor dalam mendeteksi indeks bias dapat diamati berdasarkan beberapa parameter, di antaranya:

1. Sensitivitas, yaitu kemampuan respon sensor terhadap indeks bias yang dideteksi. Sensor yang baik akan mampu mendeteksi perubahan indeks bias.
2. Waktu respon (*time respond*), yaitu waktu yang dibutuhkan sensor untuk memberikan respon terhadap indeks bias yang dideteksi. Semakin cepat waktu respon, maka semakin baik sensor tersebut untuk digunakan.
3. Stabilitas, yaitu kemampuan sensor dalam menjaga konsistensi sensitivitas terhadap indeks bias dan waktu penggunaan sensor tersebut.
4. Histeresis, yaitu deviasi dari keluaran sensor pada titik tertentu dari sinyal masukan ketika mendekati dari arah kebalikan.
5. Keberulangan, yaitu parameter yang disebabkan oleh ketidakmampuan sensor untuk menunjukkan nilai yang sama dibawah kondisi yang mungkin identik.
6. Resolusi, yaitu peningkatan yang paling kecil dari stimulus, yang dapat dirasakan.

### **2.1.2 Sensor Indeks Bias Optik**

Sensor indeks bias optik merupakan sensor indeks bias yang menggunakan teknologi optik dalam mekanisme pengindraan dan pendeteksiannya. Sensor ini terdiri dari sensor indeks bias serat optik dan sensor indeks bias *waveguide*, sebagaimana dijelaskan di bawah ini.

#### **2.1.2.1 Sensor Indeks Bias Serat Optik**

Serat optik umumnya digunakan di bidang telekomunikasi untuk mentransmisikan data. Namun, dalam hal tersebut, serat optik memiliki kelemahan karena adanya lengkungan (*bending*) dan pengurangan daya (*loss*) akibat penyerapan hamburan oleh material serat. Di sisi lain, kelemahan tersebut dapat dimanfaatkan karena dapat mendeteksi keadaan di sekitarnya, salah satunya indeks bias. Akan tetapi sebagai sensor, serat optik memiliki kelemahan di antaranya hanya dapat digunakan untuk memandu cahaya pada frekuensi tinggi dan tidak dapat memandu gelombang mikro yang memiliki frekuensi lebih rendah dari frekuensi

cahaya tampak. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan pengembangan sensor indeks bias menggunakan bahan lain, salah satunya sensor indeks bias *waveguide*.

#### 2.1.2.2 Sensor Indeks Bias *Waveguide*

Berdasarkan sifat dan fungsinya, *waveguide* hampir sama dengan serat optik, tetapi secara struktur keduanya berbeda. *Waveguide* memiliki ukuran yang dapat disesuaikan dengan perangkat. Sehingga, *waveguide* dapat disusun di dalam sebuah sirkuit. Sebagai akibatnya, *waveguide* tidak mengalami *bending* dan lebih stabil (Yulianti, et al., 2018).

*Waveguide* dapat digunakan sebagai sensor indeks bias karena intensitas keluaran *waveguide* dipengaruhi oleh faktor eksternal, diantaranya indeks bias lingkungan. Oleh karena itu, dengan mengamati perubahan intensitas keluaran *waveguide*, maka perubahan faktor eksternal seperti indeks bias dapat ditentukan. Nilai intensitas keluaran direpresentasikan oleh konstanta propagasi *waveguide* secara simulasi (Fluitman & Popma, 1986).

## 2.2 *Waveguide*

*Waveguide* merupakan komponen dasar optik untuk memandu dan mentransmisikan gelombang elektromagnetik dalam bentuk cahaya dari suatu tempat ke tempat. *Waveguide* digunakan sebagai struktur utama dalam pembentukan laser semikonduktor dan dapat membentuk perangkat fotonik aktif maupun pasif seperti *waveguide coupler*, saklar optik, dan modulator (Liu, 2005).

### 2.2.1 Struktur Dasar *Waveguide*

Struktur dasar *waveguide* terdiri dari medium optik yang memiliki indeks bias tinggi dan menjalar secara longitudinal yang disebut sebagai inti (*core*), sedangkan media yang mengapit inti secara transversal dengan indeks bias yang lebih rendah disebut selubung (Okamoto, 2006). Menurut hukum Snellius, cahaya yang datang di antara dua media yang berbeda indeks biasnya akan mengalami

pembiasan dan pemantulan. Perbedaan indeks bias tersebut yang memicu terjadinya pemantulan internal secara total, sehingga perambatan cahaya di dalam inti semakin efektif. Perambatan gelombang optik pada *waveguide* ditentukan oleh profil transversal, karena konstanta dielektrik *waveguide*  $\epsilon(x, y)$  tidak dipengaruhi arah perambatannya.

Bahan *waveguide* untuk model yang paling sederhana memiliki sifat-sifat: *lossless* (tidak menyerap energi gelombang cahaya), isotropis (laju penjalaran gelombang cahaya sama ke segala arah), homogen (indeks biasnya sama di setiap titik), linear (indeks biasnya bersifat linear terhadap intensitas cahaya). Indeks bias dan ketebalan menentukan karakteristik *waveguide*, dimana semakin besar ketebalan dan selisih harga indeks biasnya, maka semakin banyak mode gelombang yang dapat dipandu.

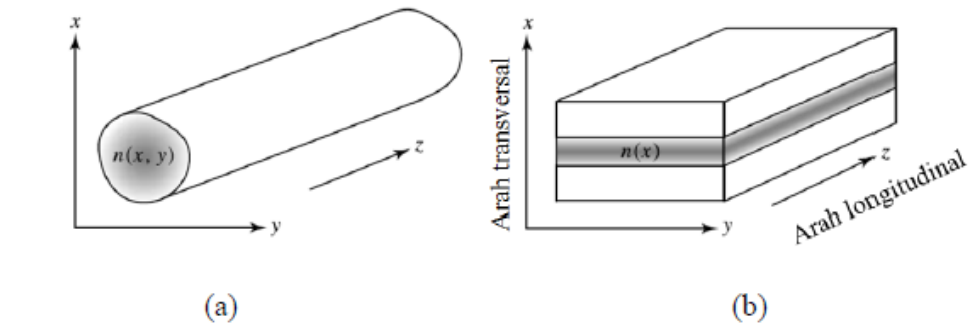
## 2.2.2 Jenis-Jenis *waveguide*

### 2.2.2.1 Jenis *waveguide* berdasarkan bidang bias inti *waveguide*

Terdapat dua jenis *waveguide* berdasarkan bidang batas inti *waveguide* yaitu *waveguide planar* dan *waveguide nonplanar*. *Waveguide nonplanar* memiliki selubung batas transversal dua dimensi, di mana bentuk inti *waveguide* dan batas antara selubung dengan inti tidak beraturan. Adapun bentuk dari *waveguide nonplanar* ditunjukkan pada Gambar 2.1(a). Contoh *waveguide nonplanar* diantaranya *channel waveguide* dan serat optik.

*Waveguide planar* memiliki inti yang menyisip di antara lapisan selubung dan substrat pada satu arah, misal arah  $x$  dengan profil indeks  $n(x)$ , dimana batas selubung yang melingkupi inti dapat diamati secara jelas pada arah transversal. Inti *waveguide planar* juga disebut film, sedangkan selubung atas disebut selubung dan selubung bawah disebut substrat, seperti ditunjukkan pada Gambar 2,1(b). Perbedaan yang membedakan antara *waveguide planar* dan *waveguide nonplanar*, dari segi strukturnya yaitu *waveguide planar* memiliki inti berupa plat dan batas antara selubung dengan inti yang beraturan, sedangkan *waveguide nonplanar* memiliki bentuk inti dan batas selubung dengan inti tidak beraturan..

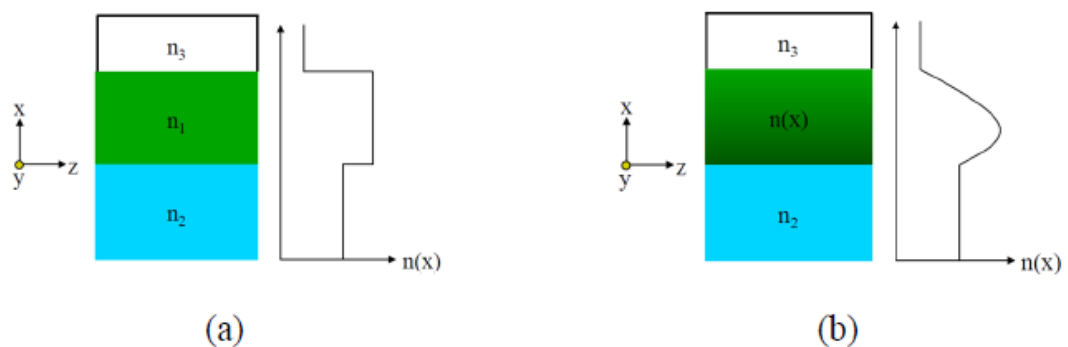




**Gambar 2.1** Jenis waveguide berdasarkan bidang batas inti *waveguide* (a) *waveguide* nonplanar (b) *waveguide* planar (Liu, 2005).

#### 2.2.2.2 Jenis *waveguide* berdasarkan profil indeks bias

Perambatan cahaya pada permukaan *waveguide* membentuk profil indeks bias yang berbeda. Jenis *waveguide* berdasarkan profil indeks bias berupa *step index* dan *graded index*. Profil indeks bias yang berupa *step index* mempunyai karakteristik di mana perbedaan indeks bias antara lapisan inti  $n_1$  dan indeks bias selubung  $n_2$  dapat diamati secara jelas, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.2 (a). Sementara itu, profil indeks bias yang berupa *graded index* merupakan profil indeks bias dengan perubahan indeks bias pada lapisan inti  $n_1$  secara berangsur sepanjang arah longitudinal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 (b) (Moller, 2007).



**Gambar 2.2** Profil indeks bias (a) *step index* dan (b) *graded index*

### 2.2.2.3 Jenis *waveguide* berdasarkan jumlah mode yang dipandu

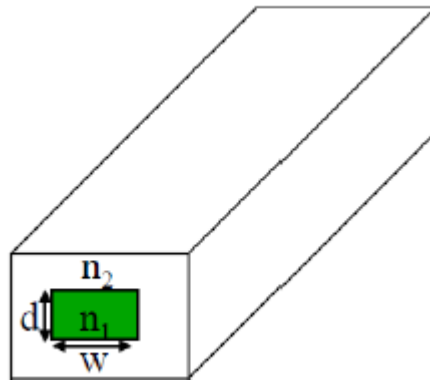
Berdasarkan jumlah mode yang dipandu, jenis *waveguide* dibedakan menjadi *singlemode* dan *multimode*. *Waveguide singlemode* merupakan *waveguide* dengan jumlah mode yang dipandu tunggal. Berdasarkan struktur dan fungsinya, jenis *waveguide singlemode* lebih menguntungkan dibandingkan jenis *multimode*. 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.

### 2.2.2.4 Jenis *waveguide* berdasarkan struktur geometrinya

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

#### 1. *Buried waveguide*

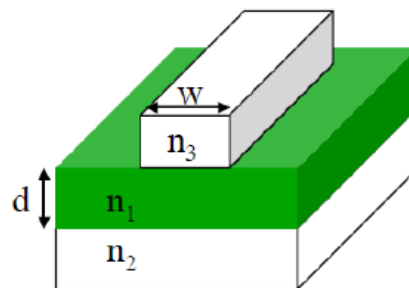
Struktur geometri ini dibentuk dengan lapisan inti berindeks bias tinggi yang menyisip di dalam selubung dengan indeks bias yang lebih rendah. Struktur geometri *buried waveguide* dapat diamati pada Gambar 2.3. Salah satu keunggulan *buried waveguide* dibandingkan jenis *waveguide* yang lain adalah rugi daya yang rendah, bahkan kurang dari 1 db/cm, sehingga *buried waveguide* digunakan sebagai pandu gelombang optik yang cukup efektif (Liu, 2005). Keistimewaan tersebut meningkatkan potensi *buried waveguide* untuk dikembangkan dalam berbagai hal di bidang optik, salah satunya yaitu penggunaan *buried waveguide* sebagai sensor indeks bias.



**Gambar 2.3** *Buried waveguide* (Liu, 2005)

## 2. *Strip-loaded waveguide*

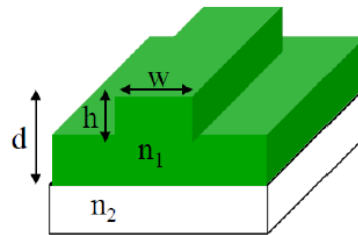
Struktur *strip-loaded waveguide* disusun dengan inti terletak di antara substrat dan selubung. Namun, selubung hanya berupa potongan dengan lebar yang lebih kecil dibandingkan lebar inti dan lebar substrat. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.4, dengan  $n_3 < n_2 < n_1$  (Liu, 2005).



**Gambar 2.4** *Strip-loaded waveguide* (Liu, 2005)

## 3. *Rib waveguide*

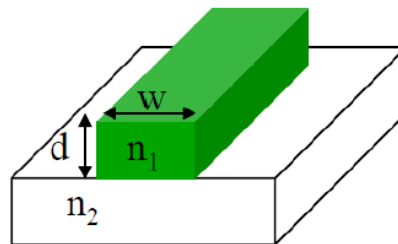
*Rib waveguide* memiliki struktur geometri yang sama dengan *strip waveguide*. Ilustrasi *Rib waveguide* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Ciri khas *rib waveguide* yaitu pada lapisan inti dan lapisan planar di bawahnya memiliki indeks bias yang sama (Liu, 2005).



**Gambar 2.5** *Rib waveguide* (Liu, 2005)

#### 4. *Ridge waveguide*

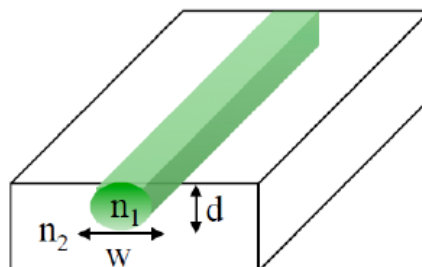
*Ridge waveguide* memiliki struktur geometri seperti *strip waveguide* dan *rib waveguide*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Tetapi memiliki perbedaan di mana lebar inti *ridge waveguide* lebih kecil daripada lebar substrat (Liu, 2005).



**Gambar 2.6** *Ridge waveguide* (Liu, 2005)

#### 5. *Diffused waveguide*

*Diffused waveguide* dibentuk dengan inti dibentuk di dalam selubung melalui proses difusi, dimana batas inti di dalam selubung tidak terdefinisi secara jelas, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.7. Salah satu contoh *diffused waveguide* yaitu *waveguide* LiNbO<sub>3</sub> dengan inti dibentuk oleh difusi Ti (Liu, 2005).



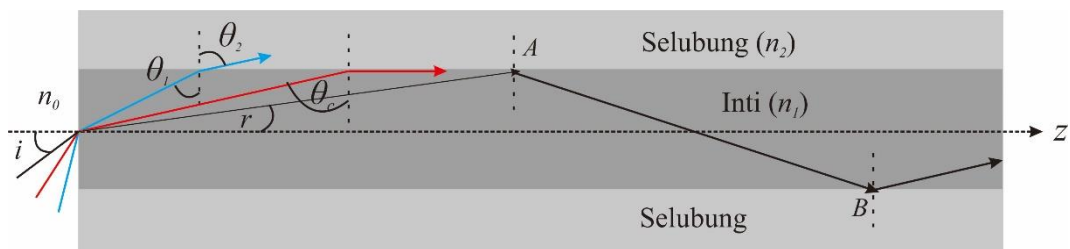
**Gambar 2.7** *Diffused waveguide* (Liu, 2005)

### 2.2.3 Mode Gelombang

Prinsip kerja *waveguide* adalah pembiasan cahaya yang dijelaskan pada hukum Snellius,

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

dimana  $n_1$  adalah indeks bias inti,  $\theta_1$  sudut datang,  $n_2$  indeks bias selubung, dan  $\theta_2$  sudut bias. Secara skematis perambatan cahaya dalam *waveguide* ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Perambatan cahaya dalam *waveguide* (Ghatak, 2010)

Cahaya yang datang dari medium rapat ( $n_1$ ) ke medium yang kurang rapat ( $n_2$ ) akan dibiaskan menjauhi garis normal. Pada bidang batas antarmuka inti-selubung, jika sudut datang  $i$  diperbesar secara gradual maka pada sudut  $\theta_1$  tertentu, sudut bias akan bernilai  $90^\circ$  dan cahaya akan dirambatkan pada batas. Pada saat  $\theta_1$  mencapai kondisi ini dinamakan sudut kritis ( $\theta_c$ ).

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

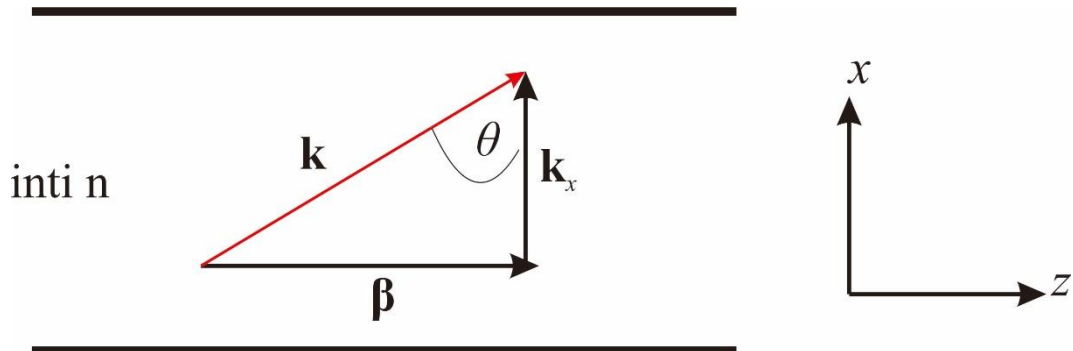
$$\sin \theta_c = \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

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

Ketika cahaya merambat dengan sudut datang kurang dari sudut kritis, maka cahaya akan dibiaskan keluar dari inti, akan tetapi jika 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*.



Mode gelombang optik yang diperoleh dari pemantulan internal sempurna dapat digunakan untuk menentukan nilai konstanta propagasi *waveguide*, di mana konstanta propagasi tersebut tergantung besarnya sudut  $\theta$  yang dibentuk dalam sinar optik. Kerangka konstanta propagasi *waveguide* terhadap garis normal gelombang didefinisikan sebagai vektor- $\mathbf{k}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Segitiga vektor- $\mathbf{k}$

$$\text{komponen transersal } \mathbf{k}_x = (n\omega/c) \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\text{komponen transersal } \beta = (n\omega/c) \sin \theta \quad (2.6)$$

Adapun  $\omega$  adalah frekuensi gelombang,  $c$  merupakan cepat rambat cahaya pada inti *waveguide*. Berdasarkan Gambar 2.9 dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$k^2 = \beta^2 + k_x^2 = \left(\frac{n\omega}{c}\right)^2 \quad (2.7)$$

$$\text{Sehingga, } k = n\omega/c \quad (2.8)$$

Oleh karena itu, pemahaman mengenai perambatan gelombang elektromagnetik di dalam *waveguide* merupakan hal yang penting. Hasil analisis *waveguide* tersebut berguna untuk aplikasi pemodelan dan simulasi sebelum dilakukan proses fabrikasi.

#### 2.2.4 Numerical Aperture

Gambar 2.8 menunjukkan cahaya yang masuk dari medium luar (udara) menuju inti dengan sudut datang  $i$  mengalami pembiasan sedemikian rupa sehingga menjadikan sudut datang pada bidang batas kedua lebih besar dari sudut kritis. Hal tersebut menyebabkan cahaya terperangkap di dalam inti *waveguide*. Cahaya yang

dibiaskan membentuk sudut  $r$  terhadap sumbu  $z$ . Dengan asumsi indeks bias medium luar adalah  $n_0$ , maka pada bidang batas pertama berlaku:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_1}{n_0} \quad (2.9)$$

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

$$\sin \theta_c = \cos r = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.10)$$

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

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

$$\sin i = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}} \quad (2.13)$$

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

$$\sin i_m = \begin{cases} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} & \text{jika } n_1^2 < n_2^2 + 1 \\ 1 & \text{jika } n_1^2 > n_2^2 + 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

Nilai  $\sin i_m$  disebut sebagai tingkat numeris atau *numerical aperture* (NA). *Numerical aperture* adalah parameter yang mempresentasikan sudut penerimaan maksimum dimana berkas cahaya masih bisa diterima dan merambat di dalam inti *waveguide*. Persamaan (2.14) berlaku  $n_1^2$  kurang dari  $n_2^2 + 1$ , sehingga NA dari *waveguide* didefinisikan oleh persamaan (2.15) (Ghatak, 2010):

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.15)$$

NA untuk *multimode waveguide* berdiameter inti besar, bernilai antara 0,3-0,5.

### 2.2.5 V-Number

*V-Number* merupakan sebuah parameter tanpa dimensi yang mana sering digunakan pada pembahasan *step-index waveguide*. *V-Number* dapat diinterpretasikan sebagai sebuah frekuensi optik ternormalisasi, didefinisikan sebagai:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.16)$$

di mana  $\lambda$  merupakan panjang gelombang,  $a$  adalah panjang sisi inti *waveguide*, dan  $NA$  merupakan *numerical aperture*.

### 2.2.6 Penjalaran Gelombang Elektromagnetik

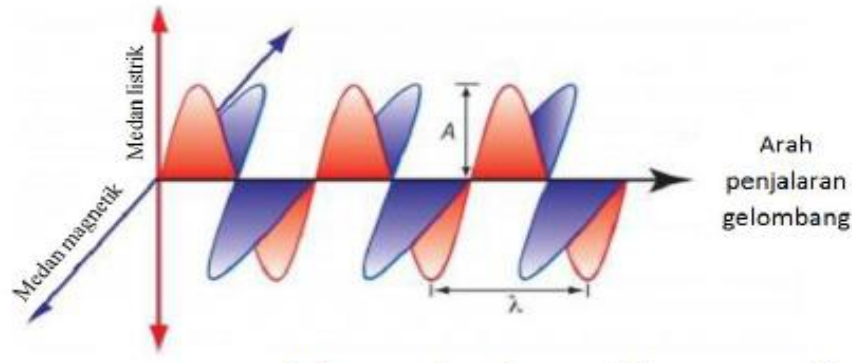
Penjalaran gelombang elektromagnetik pada *waveguide planar* membentuk mode *waveguide*. Mode *waveguide* membentuk pola medan secara transversal berupa profil amplitudo dan polarisasi, tetapi keduanya bernilai konstan sepanjang arah longitudinal (koordinat  $z$ ). Penjalaran medan listrik dan medan magnetik suatu mode di dalam *waveguide* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{E}_v(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0(x, y)e^{i(\beta_v z - \omega t)} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{H}_v(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0(x, y)e^{i(\beta_v z - \omega t)} \quad (2.18)$$

dimana  $v$  adalah indeks mode penjalaran,  $\omega$  adalah frekuensi,  $\mathbf{r}$  adalah vektor jarak terhadap waktu  $t$ ,  $\mathbf{E}_0(x, y)$  dan  $\mathbf{H}_0(x, y)$  merupakan profil mode medan dan  $\beta_v$  adalah konstanta mode penjalaran. *Waveguide* dari pengurangan optik dua dimensi transversal, memiliki 2 derajat kebebasan pada bidang  $xy$  transversal, dan indeks mode  $v$  terdiri dari 2 parameter untuk mengkarakterisasi variasi dari medan mode pada dua dimensi transversal. Sebagai contoh,  $v$  merepresentasikan dua bilangan mode,  $v = mn$  dengan integral  $m$  dan  $n$ , untuk mode terpandu diskrit (Liu, 2005).

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 2.10.



**Gambar 2.10** Penjaran gelombang elektromagnetik

Persamaan Maxwell dirumuskan dalam besaran medan listrik  $\mathbf{E}$  dan magnet  $\mathbf{H}$  yang berkaitan dengan kerapatan fluks listrik  $\mu$  dan kerapatan fluks magnetik  $\varepsilon$ . Persamaan Maxwell diturunkan dari hukum Faraday dalam bentuk medan vektor, dirumuskan sebagai berikut:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.19)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.20)$$

Persamaan Maxwell menggabungkan beberapa hukum seperti hukum Faraday, hukum Ampere dan konsep mengenai *displacement current*. Operasi curl yang dilakukan pada persamaan (2.19) dan (2.20) menghasilkan persamaan gelombang medan listrik dan gelombang medan magnet sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

di mana  $\nabla^2$  adalah operator laplacian.

Hubungan persamaan (2.17) dan (2.18) terhadap persamaan (2.21) dan (2.22) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - i\beta E_y = i\omega\mu_0 H_x \quad (2.23)$$

$$i\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 H_y \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - i\beta H_y = -i\omega\varepsilon E_x \quad (2.26)$$

$$i\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = i\omega\varepsilon E_y \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = i\omega\varepsilon E_z \quad (2.28)$$

dari persamaan tersebut, komponen transversal medan listrik dan medan magnetik dapat diekspresikan dalam bentuk komponen longitudinal sebagai berikut:

$$(k^2 - \beta^2)E_x = i\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + i\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.29)$$

$$(k^2 - \beta^2)E_y = i\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - i\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.30)$$

$$(k^2 - \beta^2)H_x = i\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} - i\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.31)$$

$$(k^2 - \beta^2)H_y = i\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - i\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.32)$$

di mana  $k^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon(x, y)$  adalah fungsi  $x$  dan  $y$  untuk menghitung struktur spasial *waveguide* secara transversal yang tidak homogen.

Persamaan (2.29) hingga (2.32) berlaku untuk *waveguide* homogen secara longitudinal pada profil indeks di setiap geometri transversalnya dan setiap indeks profil transversalnya di mana  $\varepsilon(x, y)$  bukan fungsi dari  $z$ . Oleh karena itu, persamaan di atas berlaku untuk *step index* dan *graded index waveguide*.

Persamaan medan didapatkan dengan membuat hubungan antar komponen medan. Secara umum, hanya mendapatkan  $E_z$  dan  $H_z$ . Kemudian semua komponen dapat dicari menggunakan persamaan (2.29) hingga (2.32). Pendekatan umum untuk mendapatkan  $E_z$  dan  $H_z$  adalah untuk menyelesaikan persamaan gelombang bersamaan dengan syarat batas.

Persamaan gelombang didapatkan dengan menambahkan dua persamaan Maxwell selain persamaan (2.19) dan (2.20). *Waveguide* isotropik dengan tergantung spasial  $\varepsilon(x, y)$ , dapat ditulis

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.33)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.34)$$

di mana  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ , untuk daerah yang tidak ada muatan. Perhatikan bahwa persamaan (2.33) dapat diartikan

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (2.35)$$

yang mana secara umum tidak hilang karena  $\varepsilon(x, y)$  tergantung spasial. Menggunakan persamaan Maxwell pada persamaan (2.19), (2.20), (2.33), dan (2.34) dengan vektor identitas  $\nabla \times \nabla \times = \nabla \nabla \cdot - \nabla^2$ , didapatkan

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = -\nabla \left( \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} \right) \quad (2.36)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = -\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \times \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.37)$$

dapat dilihat bahwa 3 komponen  $E_x$ ,  $E_y$ , dan  $E_z$  untuk medan listrik secara umum digabung bersamaan karena  $\nabla \varepsilon \neq 0$  pada *waveguide*. Alasan yang sama,  $H_x$ ,  $H_y$ , dan  $H_z$  juga digabung. Fakta ini mengindikasikan bahwa karakteristik vektorial dari medan mode pada *waveguide* sangat tergantung pada geometri dan profil indeks dari sebuah *waveguide*.

Jika sisi kanan dari persamaan (2.36) dan (2.37) hilang, maka komponen medan terpisah. Kondisi ini terjadi hanya pada kasus tertentu. Sebagai contoh, pada kasus mode TE

$$\nabla \varepsilon \perp \mathbf{E} \quad \text{sehingga} \quad \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.38)$$

sebagai konsekuensi, setiap komponen pada medan listrik dari mode TE memenuhi persamaan diferensial skalar homogen. Komponen medan magnet dari mode TE masih bergabung karena sisi kanan pada persamaan (2.37) tidak hilang.

Profil indeks pada *step-index waveguide* konstan. Persamaan gelombang dapat ditulis secara terpisah untuk setiap wilayah dari konstanta  $\varepsilon$  karena  $\nabla \varepsilon = 0$

dalam setiap wilayah. Mengambil  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{H}$  dari bentuk persamaan (2.17) dan (2.18), dan menggunakan persamaan (2.36) dan (2.37) dengan  $\nabla \varepsilon = 0$  untuk setiap wilayah dari konstanta  $\varepsilon$ , maka didapatkan

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + (k_i^2 - \beta^2)E_z = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + (k_i^2 - \beta^2)H_z = 0 \quad (2.40)$$

di mana  $k_i^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_i = n_i^2 \omega^2 / c^2$  dan  $k_i$  bersifat konstan pada wilayah  $i$  dengan konstanta indeks bias  $n_i$  (Liu, 2005). Adapun persamaan (2.39) digunakan untuk simulasi *waveguide* yang diselesaikan dengan menggunakan metode numerik.

### 2.3 Polymethylmethacrylate (PMMA)

*Poly (methyl methacrylate)* PMMA juga dikenal sebagai akrilik merupakan *thermoplastic* transparan. PMMA pada umumnya berbentuk lembaran yang ringan dan kuat. PMMA memiliki massa jenis dengan rentang 1,17-1,20  $g/cm^3$ . Ketahanan benturan dari PMMA lebih besar daripada kaca dan *polystyrene*. PMMA dapat mentransmisikan sampai 95% dari cahaya tampak dengan ketebalan 3mm. Karena memiliki indeks bias 1,4905 pada panjang gelombang 589,3nm, PMMA dapat memantulkan cahaya dari permukaan. Oleh karena stabilitas lingkungan dari akrilik lebih baik dibandingkan dengan *polystyrene* dan *polyethylene*, PMMA sering digunakan di industri plastik (Pawar, 2016).

PMMA dapat dimanfaatkan sebagai material *waveguide*. Hal ini dikarenakan, material polimer yang mana salah satunya yaitu PMMA memiliki banyak kelebihan. Beberapa di antaranya yaitu transparansi yang tinggi dari cahaya tampak sampai gelombang infra merah, indeks bias yang terkontrol dengan baik, *loss* optik yang rendah, fabrikasi mudah, dan biaya murah (Prajzler, et al., 2014). Sehingga, dalam pemodelan ini menggunakan material PMMA sebagai *waveguide*.

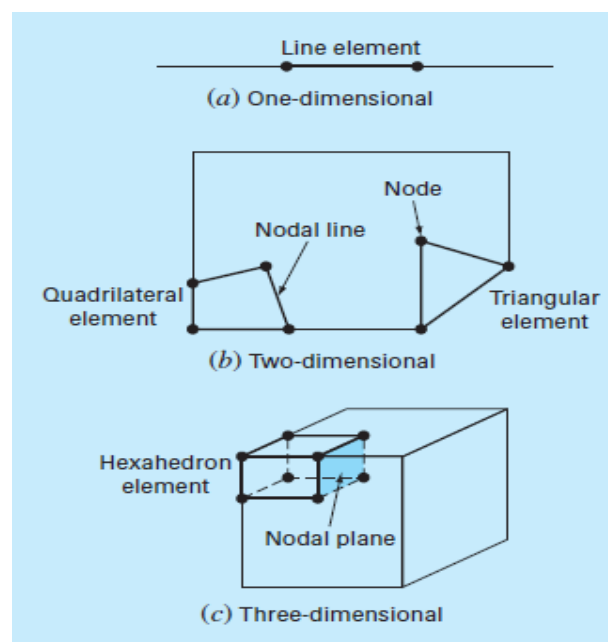
## 2.4 Finite Element Method

*Finite element method* (FEM) atau metode elemen hingga merupakan metode numerik yang mana dalam penggunaannya melibatkan fisika, geometri, dan *boundary* yang kompleks. Sebuah domain pada metode elemen hingga dilihat sebagai sekumpulan dari subdomain, dan setiap subdomain terdapat persamaan yang didapat dari setiap variasi pendekatan metode yang biasa. Alasan umum dibalik mencari solusi pendekatan pada sekumpulan subdomain bahwa sangat mudah untuk merepresentasikan fungsi yang kompleks sebagai sekumpulan polinomial yang sederhana (Reddy, 2006).

Terdapat langkah-langkah yang harus dilakukan untuk menerapkan metode elemen hingga. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

### 1. Diskretisasi

Pada langkah ini, solusi domain dibagi menjadi elemen berhingga. Contoh dari penggunaan elemen pada satu, dua, dan tiga diperlihatkan pada Gambar 2.11. Titik dari pertemuan garis yang membentuk sisi elemen sebagai node dan sisi pada elemen tersebut disebut sebagai garis *nodal* (Chapra & Canale, 2015).



**Gambar 2.11** Contoh dari penggunaan elemen pada (a) satu dimensi, (b) dua dimensi, dan (c) tiga dimensi (Chapra & Canale, 2015)



## 2. Penentuan Bentuk Fungsi Interpolasi

Pada tahap ini, bentuk dari fungsi interpolasi ditentukan. Fungsi interpolasi yang umum digunakan pada COMSOL Multiphysics adalah fungsi interpolasi polinomial. Tingkat dari polinomial ditentukan oleh jumlah node pada setiap elemen dan syarat kontinuitas pada batas elemen.

## 3. Persamaan Elemen

Langkah selanjutnya yaitu mengembangkan persamaan untuk menemukan solusi pendekatan untuk setiap elemen. Langkah ini, memerlukan 2 tahap penyelesaian. Pertama, kita harus memilih persamaan yang sesuai dengan koefisien tak diketahui yang mana akan digunakan untuk mendapatkan pendekatan solusi. Kedua, kita mengevaluasi koefisien yang dipakai, sehingga fungsi tersebut mendapatkan solusi pada kondisi optimal (Chapra & Canale, 2015).

## 4. Penggabungan

Setelah persamaan elemen individu didapatkan, persamaan-persamaan tersebut harus disambungkan atau digabung untuk memperpadukan karakter dari setiap sistem. Proses penggabungan dipengaruhi oleh konsep kontinuitas. Sehingga, solusi untuk elemen yang berdekatan sesuai dan nilai yang belum diketahui pada *node* yang ditempati nilainya sama (Chapra & Canale, 2015).

## 5. Syarat Batas

Sebelum menyelesaikan dan menemukan solusi, terlebih dahulu menentukan syarat batas penyelesaian sistem (Chapra & Canale, 2015).

## 6. Penyelesaian

Setelah menentukan kondisi batas penyelesaian sistem, langkah selanjutnya adalah penyelesaian. Elemen-elemen tersebut dapat dikonfigurasi, sehingga persamaan yang didapat dapat terikat (Chapra & Canale, 2015).

## 7. Proses Akhir

Setelah mendapatkan penyelesaian, hasil dari penyelesaian tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk tabel atau grafik (Chapra & Canale, 2015).

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Simpulan**

Pemodelan parameter *buried waveguide* sebagai sensor indeks bias telah dilakukan secara simulasi dengan menggunakan metode elemen hingga. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dalam penelitian, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan parameter *buried waveguide* sebagai sensor indeks bias dapat dilakukan terlebih dahulu dengan melakukan simulasi variasi nilai indeks bias inti. Adapun material penyusun inti *waveguide* menggunakan material polimer dengan rentang nilai indeks bias 1,52 sampai 1,59. Melalui simulasi variasi nilai indeks bias inti, didapatkan nilai indeks bias yang optimum menggunakan material *benzocyclobutene* dengan nilai indeks bias 1,54 dan *polyester* dengan nilai indeks bias 1,57.
2. Simulasi parameter *buried waveguide* yang optimum untuk aplikasi sensor indeks bias diperoleh pada material inti *polyester* yang memiliki nilai indeks bias 1,57 tanpa selubung atas, dengan nilai sensitivitas sebesar  $4,9 \times 10^{-10} \text{rad/m} \cdot \text{RIU}$ , sehingga ukuran parameter tersebut lebih disarankan untuk *waveguide* yang akan diaplikasikan dan difabrikasikan sebagai sensor indeks bias.

#### **5.2 Saran**

1. Pengembangan penelitian mengenai pemodelan dan simulasi untuk sensor indeks bias menggunakan metode elemen hingga dapat dilakukan dengan

menggunakan struktur geometri *waveguide* yang lain, diantaranya seperti *ridge waveguide*, *rib waveguide*, dan *diffused waveguide*.

2. Ketelitian pengukuran nilai konstanta propagasi pada *waveguide* dapat ditingkatkan dengan melakukan kajian nilai jaring-jaring kisi.
3. Perlu dilakukan pemodelan propagasi cahaya dalam *waveguide*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boiragi, I. et al., 2009. SU-8 Polymer based waveguide biochemical sensor for medical diagnostic application. *International Conference on Optics and Photonics*, pp. 1-5.
- Bruck, R. & Hainberger, R., 2008. Polymer waveguide based biosensor. *Photonics, Devices, and Systems*, 7(4), pp. 1-5.
- Chapra, S. C. & Canale, R. P., 2015. *Numerical Methods for Engineers*. 7th penyunt. New York: McGraw-Hill Education.
- Fluitman, J. & Popma, T., 1986. Optical Waveguide Sensor. *Sensors and Actuators*, Volume 10, pp. 25-46.
- Fraden, J., 2010. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. 4th penyunt. New York: Springer.
- Ghatak, A., 2010. *OPTICS*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Her, S.-C. & Yang, C.-M., 2012. Dynamic Strain Measured by Mach-Zehnder Interferometric Optical Fiber Sensors. *Sensors*, Volume 12, pp. 3314-3326.
- Hidayanto, E., Rofiq, A. & Sugito, H., 2010. Aplikasi Portable Brix Meter untuk Pengukuran Indeks Bias. *Berkala Fisika*, 13(4), pp. 113 - 118.
- Jiang, L. et al., 2011. Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity. *Optics Letters*, 36(19), pp. 3753-3755.
- Khatri, A., Punjabi, N., Dhawangale, A. & Mukherji, S., 2016. Inexpensive polyester sheet based waveguides for detection of cardiac biomarker, myeloperoxidase. *Procedia Engineering*, Issue 168, pp. 125-128.
- Kim, J.-W., Kim, K.-J., Yi, J.-A. & Oh, M.-C., 2010. Polymer waveguide label-free biosensors with enhanced sensitivity by incorporating low-refractive-index

- polymers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 16(4), pp. 973-980.
- Liu, G. R. & Trung, N. T., 2010. *Smoothed Finite Element*. Boca Raton: CRC Press.
- Liu, J.-M., 2005. *Photonic Devices*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Liu, Q., Kee, J. S. & Park, M. K., 2013. A refractive index sensor design based on grating-assisted coupling between a strip waveguide and a slot waveguide. *Optics Express*, 21(5), pp. 1-13.
- Mishra, S. K., Zou, B. & Chiang, K. S., 2016. Surface-plasmon-resonance refractive-index sensor with Cu-coated polymer waveguide. *IEEE Photonics Technology Letters*, pp. 1-4.
- Moller, K. D., 2007. *Optics*. New York: Springer.
- Naora, M., Taue, S. & Fukano, H., 2018. Ultrasensitive fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference with fiber-loop configuration. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(8), pp. 1-4.
- Okamoto, K., 2006. *Fundamental of Optical Waveguides*. Oxford: Elsevier.
- Pawar, E., 2016. A Review Article on Acrylic PMMA. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(2), pp. 1-4.
- Peters, K., 2011. Polymer optical fiber sensors-a review. *Smart Materials and Structures*, 20(013002), p. 17.
- Prajzler, V. et al., 2010. Design, Fabrication and Measurement Polymethylmethacrylate Optical Waveguides Prepared by Modification of Surface Profile by Applying Electric Field. *Electroscope*, Volume 3, pp. 1-5.
- Prajzler, V., Nekvindová, P., Hypš, P. & Lyutakov, O., 2014. Flexible Polymer Planar Optical Waveguides. *Radioengineering*, 23(3), pp. 776-782.

- Qiftia, Z., Samian & Supadi, 2014. Sensor Indeks Bias Larutan Menggunakan Fiber Coupler. *Desain Sensor Pengukur Indeks Bias Larutan*, 2(2), pp. 74 - 80.
- Ramandha, R. & Wahyudi, 2017. Desain Sensor Pengukur Indeks Bias Larutan Berbasis Fiber Optik. *Seminar Nasional Pendidikan MIPA dan Teknologi IKIP PGRI Pontianak*, pp. 377-386.
- Reddy, J., 2006. *An Introduction to The Finite Element Method*. 3rd penyunt. New York: McGraw-Hill.
- Rezem, M. et al., 2016. Fabrication and sensing applications of multilayer polymer optical waveguides. *Procedia Technology*, Volume 26, pp. 517-523.
- S., A., 2012. A Novel Method of Using Refractive Index as a Tool for Finding the Adultration of Oils. *Research Journal of Recent Sciences*, 1(7), pp. 77-79.
- Sari, N. W., Marzuki, A. & Riyatun, 2012. Sensor Fiber Optik Dari Bahan Fiber Optik Polimer Untuk Pengukuran Refractive Index Larutan Gula. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 2(1), pp. 30-36.
- Schmitt, K., Rist, J., Peter, C. & Wöllenstein, J., 2015. Optical fiber waveguide sensor for the colorimetric detection of ammonia. *SPIE*, 8066(80661), pp. 1-6.
- Teng, C. et al., 2017. Refractive index sensor based on a multi-notched plastic optical fiber. *Applied Optics*, 56(7), pp. 1833-1838.
- Tengesdal, Ø. A., 2012. *Measurement of seawater refractive index and salinity by means of optical refraction*, s.l.: s.n.

- Wang, L., Ren, K., Bao, S. & Kaixin, C., 2018. Highly Sensitive Refractive Index Sensor Based on Polymer Long-Period Waveguide Grating With Liquid Cladding. *Photonic Sensors*, pp. 1-6.
- Wang, M., Hiltunen, J. & Myllylä, R., 2013. Refractive index sensing in aqueous environment using three different polymeric waveguide interferometers. *3rd International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision*, pp. 166-171.
- Yulianti, I., D. P., N. M., Lestiyanti, Y. & Kurdi, O., 2018. Optimization of Ridge Waveguide Structure for Temperature Sensor Application Using Finite Difference Method. *MATEC Web of Conferences*, 159(02020), pp. 1-6.