



**KARAKTERISASI *POLYMER OPTICAL FIBER*  
BERSTRUKTUR *MACH-ZEHNDER*  
*INTERFEROMETER (MZI-POF)* SEBAGAI SENSOR  
SUHU**

Skripsi

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

oleh:

Helvi Rumiana

4211414026

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

**2018**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi yang berjudul “Karakterisasi *Polymer Optical Fiber* Berstruktur *Mach-Zehnder Interferometer* (MZI-POF) sebagai Sensor Suhu” ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 26 September 2018

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 "Karakterisasi *Polymer Optical Fiber* Berstruktur *Mach-Zehnder Interferometer* (MZI-POF) sebagai Sensor Suhu" 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, 26 September 2018



VI Rumiana

4211414026



## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Karakterisasi *Polymer Optical Fiber* Berstruktur *Mach-Zehnder Interferometer* (MZI-POF) sebagai Sensor Suhu

disusun oleh

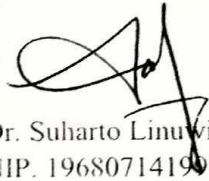
Helvi Rumiana

4211414026

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang pada tanggal 26 September 2018.

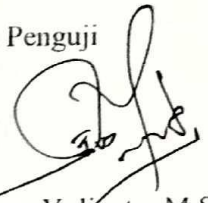


Sekretaris




Dr. Suharto Linuwih, M.Si.  
NIP. 196807141906031005

Ketua Penguji




Dr. Agus Yulianto, M.Si.  
NIP. 196607051990031002

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**

Bermimpilah, karena Tuhan akan memeluk mimpi-mimpimu

(Andrea Hirata)

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan

(QS. Al Insyirah: 6)

## **PERSEMBAHAN**

Untuk Bapakku Sarwanto, Ibuku Irawati

Adikku Adnan Dwi Prayoga

Keluarga Besarku

## PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'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 "**Karakterisasi *Polymer Optical Fiber Berstruktur Mach-Zehnder Interferometer (MZI-POF)* sebagai Sensor Suhu**" tidak terlepas dari bimbingan, masukan, saran, dan bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan yang berbahagia ini penulis ucapkan terimakasih kepada:

1. 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.
2. Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si, Akt. 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 I 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., yang telah membantu selama proses penelitian skripsi ini.
8. Adikku, Adnan Dwi Prayoga yang selalu menjadi motivasi dan semangat terbesarku.
9. Keluarga besarku yang selalu memberikan semangat dan berbagi pengalaman.
10. Teman-teman Laboratorium Fisika Instrumentasi: Azka, Kukuh, dan Junita yang telah memberi dukungan dan membantu dalam mengerjakan penelitian ini.
11. Siti Maimanah yang menjadi teman diskusi selama mengerjakan penelitian.
12. Teman sekamar Galuh Fridayanti Pitaloka yang selalu memberi semangat dan dukungan selama mengerjakan skripsi.
13. Teman-teman bermain Niken, Ida, Linda, Siti, Anik, Nura, Pungki, Nila, dan Lana yang telah memberi dukungan dan motivasi dalam mengerjakan skripsi.
14. Teman-teman rombel Fisika yang selalu memberi 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,

Helvi Rumiana

4211414026



## ABSTRAK

**Rumiana, H.** 2018. *Karakterisasi Polymer Optical Fiber Berstruktur Mach-Zehnder Interferometer (MZI-POF) sebagai Sensor Suhu*. Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng. dan Pembimbing Pendamping Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D.

**Kata Kunci:** *Polymer Optical Fiber, Mach-Zehnder Interferometer, Sensor Suhu.*

Sensor fiber optik dapat diaplikasikan untuk pengukuran berbagai parameter, salah satunya adalah suhu. Suhu penting untuk diamati perubahannya karena banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang, misalnya bidang kimia, industri, kesehatan, dan lingkungan. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah *Mach-Zehnder Interferometer* (MZI). MZI memiliki keunggulan daripada metode yang lain seperti ukuran kecil dan sederhana, sensitivitas tinggi, tahan terhadap gangguan elektromagnetik, dan biaya fabrikasi rendah. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan struktur MZI pada *polymer optical fiber* (MZI-POF). Sensor MZI-POF difabrikasi menggunakan dua buah *coupler* dan dua lengan interferometer dengan panjang yang berbeda yaitu  $L_1$  dan  $L_2$ . Pada lengan  $L_1$  bagian jaket POF dihilangkan. Penelitian ini dilakukan pada dua buah sampel sensor MZI-POF yaitu sampel A dengan panjang lengan  $L_1$  sebesar 4 cm dan sampel B dengan panjang lengan  $L_1$  5 cm. Sampel A dan sampel B mempunyai nilai sensitivitas berturut-turut 0,0807 nm/°C dan 0,0822 nm/°C. Sampel A dan B membutuhkan waktu yang singkat kurang dari 1 s untuk mencapai keadaan stabil. Nilai tersebut terjaga stabil selama 5 menit pengukuran suhu. Sampel B mempunyai akurasi data yang lebih baik daripada sampel A, karena selisih suhu paling tinggi terukur pada sensor sampel A yaitu 7,183 °C. Sedangkan selisih suhu paling kecil terukur pada sensor sampel B yaitu 0,634 °C.

## DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN.....	iii
PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
MOTTO .....	iv
PERSEMBAHAN.....	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan Masalah .....	4
1.3    Batasan Masalah.....	4
1.4    Tujuan Penelitian.....	4
1.5    Manfaat Penelitian.....	4
1.6    Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 .....	6
TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1    Fiber Optik .....	6
2.1.1    Jenis Fiber Optik .....	7
2.1.2    Penjalaran Gelombang dalam Fiber Optik.....	8
2.1.3 <i>Polymer Optical Fiber (POF)</i> .....	10
2.2    Sensor Fiber Optik.....	11
2.3 <i>Directional Coupler</i> .....	14
2.4 <i>Mach-Zehnder Interferometer (MZI)</i> .....	15
2.4.1    Struktur Sensor Optik MZI .....	17

2.4.2	Prinsip kerja sensor MZI-POF .....	18
2.5	Suhu .....	18
BAB 3	.....	20
METODE PENELITIAN	.....	20
3.1	Tempat dan Waktu .....	21
3.2	Alat dan Bahan .....	21
3.3	Teknik Fabrikasi Sensor .....	23
3.3.1	Tahap Fabrikasi <i>coupler</i> .....	23
3.3.2	Tahap fabrikasi MZI .....	25
3.4	Karakterisasi sensor.....	26
3.5	Analisis data .....	27
BAB 4	.....	28
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	28
4.1	Fabrikasi <i>Coupler</i> .....	28
4.2	Fabrikasi MZI.....	31
4.3	Karakterisasi MZI.....	33
4.3.1	Sensitivitas Sensor .....	36
4.3.2	Waktu Respon .....	43
4.3.3	Akurasi Data.....	45
BAB 5	.....	48
PENUTUP	.....	48
5.1	Kesimpulan.....	48
5.2	Saran .....	48
DAFTAR PUSTAKA	.....	50
LAMPIRAN	.....	54

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur fiber optik .....	6
Gambar 2.2 Jenis fiber optik .....	8
Gambar 2.3 Pemantulan pada fiber optik untuk $n_1$ indeks bias inti dan $n_2$ indeks bias selubung .....	10
Gambar 2.4 Diagram skematik <i>coupler</i> .....	14
Gambar 2.5 Struktur sensor MZI .....	17
Gambar 2.6 Sambungan Y pada MZI .....	18
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian .....	20
Gambar 3.2 <i>Fiber optic stripper three hole</i> .....	21
Gambar 3.3 Spektrometer <i>Ocean Optic</i> .....	22
Gambar 3.4 <i>Chamber</i> .....	22
Gambar 3.5 <i>Polymer optical fiber (POF)</i> .....	23
Gambar 3.6 Lem Loctite 7649 dan Loctite 680 .....	23
Gambar 3.7 POF yang telah dilepas sebagian jaketnya .....	24
Gambar 3.8 POF yang telah direkatkan menggunakan lem Loctite .....	24
Gambar 3.9 <i>Set-up</i> alat karakterisasi <i>coupler</i> .....	25
Gambar 3.10 MZI dengan dua buah <i>coupler</i> .....	25
Gambar 3.11 <i>Set-up</i> alat karakterisasi sensor MZI .....	26
Gambar 4.1 <i>Coupler</i> yang telah diberi lilitan benang pada bagian rekatan .....	30
Gambar 4.2 Hasil karakterisasi <i>coupler</i> .....	31
Gambar 4.3 MZI dengan bagian jaket yang sudah dilepas .....	33
Gambar 4.4 Spektrum keluaran sensor MZI-POF pada suhu 40 °C – 80° C .....	34

Gambar 4.5 Grafik pergeseran panjang gelombang sampel A .....	37
Gambar 4.6 Reversibility respon suhu sampel A.....	39
Gambar 4.7 Grafik pergeseran panjang gelombang sampel B.....	40
Gambar 4.8 Reversibility respon suhu sampel B .....	41
Gambar 4.9 Waktu respon sensor MZI-POF sampel A .....	45
Gambar 4.10 Waktu respon sensor MZI-POF sampel B .....	46
Gambar 4.11 Akurasi sensor MZI-POF sampel A.....	47
Gambar 4.12 Akurasi sensor MZI-POF sampel B .....	48

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Spesifikasi parameter fisis POF .....	29
Tabel 4.2 Nilai parameter-parameter <i>coupler</i> .....	31
Tabel 4.3 Spesifikasi sampel sensor MZI .....	33
Tabel 4.4 Nilai sensitivitas kedua sampel .....	42



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Fiber optik sebagai sensor telah menarik banyak perhatian untuk dikembangkan dan diaplikasikan. Sensor fiber optik mulai dikembangkan karena memiliki berbagai kelebihan dibandingkan sensor konvensional, diantaranya tahan terhadap interferensi elektromagnetik, ringan, memiliki ukuran kecil, redaman transmisi yang kecil, respon yang cepat, geometri yang fleksibel, dan memiliki *bandwidth* yang besar (Indra & Harmadi, 2014; Yulianti *et al.*, 2012). Sensor fiber optik merupakan perangkat dielektrik, sehingga dapat digunakan dalam tegangan tinggi, suhu tinggi, ataupun lingkungan yang korosif. Selain itu, penggunaan fiber optik juga dapat dimonitor dari jarak jauh dan dapat dihubungkan dengan sistem komunikasi data serta dimensinya yang kecil dan ringan memudahkan penginstalannya (Wulandari *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2012b).

Sensor fiber optik dapat dimanfaatkan untuk pengukuran berbagai parameter, seperti regangan, kelengkungan, perpindahan, indeks bias, suhu, dan tekanan (Yao *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2012a). Suhu merupakan salah satu parameter yang penting untuk diamati perubahannya karena banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang, misalnya bidang kimia untuk *quality control*, bidang industri untuk monitoring stabilitas material, bidang kesehatan untuk memantau suhu tubuh, dan lingkungan sekitar untuk penilaian kontaminasi. Selain itu pengukuran suhu juga penting dalam pemantauan dan pengendalian korosi di struktur bangunan besar, misalnya pesawat dan jembatan (Soltanian *et al.*, 2016).

Dalam pengembangannya, berbagai metode telah digunakan untuk mengukur dan mendeteksi perubahan suhu dengan teknologi sensor fiber optik seperti *long-period fiber gratings* (LPFG) (Urrutia *et al.*, 2016), *fiber Bragg gratings* (FBG) (Woyessa *et al.*, 2016), *Fabry-Perot* (FP) (Rong *et al.*, 2012), dan *Mach-Zehnder Interferometer* (MZI) (Zhou *et al.*, 2014). LPFG menunjukkan sensitivitas tinggi pada pengukuran suhu, tetapi memiliki *cross sensitivity* yang besar terhadap indeks bias eksternal dan tidak dapat bekerja pada suhu tinggi karena kisi-kisinya dapat terhapus. FBG sangat menarik jika digunakan sebagai sensor karena tidak memiliki *cross sensitivity* terhadap indeks bias eksternal dan mampu dioperasikan pada suhu tinggi maupun kondisi asam dan basa, tetapi membutuhkan isolator untuk mencegah pemantulan kembali. Sementara itu, metode FP kurang praktis untuk digunakan karena memerlukan perangkat tambahan dalam pendeteksian keluarannya. Dibandingkan dengan metode-metode tersebut, MZI dengan **keunggulannya** seperti ukuran kecil dan sederhana, sensitivitas tinggi, tahan terhadap gangguan elektromagnetik, dan biaya fabrikasi yang murah **sangat cocok diaplikasikan** sebagai sensor suhu fiber optik.

MZI merupakan sensor fiber optik yang memanfaatkan modulasi fasa (Ghetia *et al.*, 2013). Cahaya yang masuk pada MZI akan terbagi menjadi dua pemandu gelombang dalam jalur *sensing* dan jalur *reference*. Jalur *sensing* merupakan daerah penginderaan yang digunakan untuk variasi eksternal seperti suhu, indeks bias, dan lain-lain. Sedangkan jalur *reference* dilapisi dengan lapisan pelindung yang terisolasi. Setelah cahaya melewati kedua jalur tersebut, cahaya akan menyatu kembali.

Pada penelitian sebelumnya MZI sebagai sensor suhu telah direalisasikan dengan berbagai teknik, seperti *core-offset* dimana bagian *multi-core fiber* silika yang disambungkan di antara standar *single mode fiber* (SMF) dibuat meleset pada daerah sambungannya (Yi-hui *et al.*, 2017), pembuatan *microcavities* pada daerah sambungan antara *photonic crystal fiber* (PCF) dan SMF (Wang *et al.*, 2017), *multi-core fiber* pada fiber silika (Zhao *et al.*, 2013), dan pembuatan *taper* pada bagian inti fiber optik silika (Liu *et al.*, 2013).

Fabrikasi MZI yang dilakukan menggunakan bahan silika memiliki beberapa kelemahan seperti diameter inti yang kecil sehingga membutuhkan ketelitian dalam proses fabrikasinya, inti yang mudah patah, dan susah untuk dibentuk. Fabrikasi MZI akan lebih mudah dilakukan pada bahan yang memiliki diameter inti besar seperti *polymer optical fiber* (POF). POF memiliki sifat-sifat yang menguntungkan jika diaplikasikan sebagai sensor seperti fleksibilitas yang tinggi, biokompabilitas, tidak mudah patah, dan biaya produksi yang murah (Marques *et al.*, 2017). POF juga mudah dikembangkan sebagai sensor suhu karena mudah diubah-ubah dan diberi perlakuan. Perlakuan ini dapat berupa pemanasan, memberi bahan sambungan, tekanan, lekukan, ataupun dengan penggantian jaket pelindung.

Berdasarkan sifat dan kelebihan yang dimiliki POF, pada penelitian ini akan dilakukan fabrikasi dan karakterisasi MZI-POF dengan teknik yang mudah dan sederhana untuk mengetahui karakteristiknya jika diaplikasikan sebagai sensor suhu.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana fabrikasi sensor MZI-POF?
2. Bagaimana karakteristik sensor yang meliputi sensitivitas, respon waktu, histerisis dan akurasi data terhadap perubahan suhu?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Fiber optik yang digunakan adalah *Polymer Optical Fiber*.
2. Perubahan suhu yang digunakan adalah 40 °C – 80 °C dengan kenaikan 5 °C.
3. Suhu ruang pada *chamber* memiliki fluktuasi suhu  $\pm 2$  °C dari suhu yang ditentukan.
4. Parameter sensor yang dikarakterisasi adalah sensitivitas, waktu respon, histerisis dan akurasi data.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses fabrikasi sensor MZI-POF dan mengetahui karakteristik sensor MZI-POF yang berupa sensitivitas, waktu respons, histerisis, dan akurasi sensor terhadap perubahan suhu.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik sensor MZI-POF menggunakan fabrikasi yang mudah dengan sensitivitas tinggi, sehingga dapat digunakan untuk pengukuran suhu secara *real time*. Serta dapat digunakan sebagai acuan atau referensi untuk digunakan pada riset selanjutnya.

## 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.

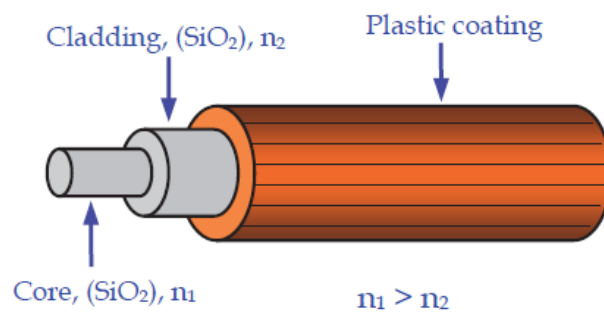
1. Bagian awal skripsi, terdiri dari halaman judul, halaman persetujuan pembimbing, halaman pernyataan, halaman pengesahan, halaman motto dan persembahan, prakata, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran.
2. Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang tersusun dengan 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 metode analisis data.
  - BAB 4. Hasil dan Pembahasan, berisi tentang hasil beserta pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan.
  - BAB 5. Penutup, berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran penelitian yang selanjutnya.
3. Bagian akhir laporan, memuat daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dalam penulisan laporan dan lampiran-lampiran.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Fiber Optik

Fiber optik merupakan pandu gelombang cahaya berupa kabel transparan yang berguna untuk mentransmisikan informasi melalui media cahaya, yang terdiri dari tiga bagian yaitu: inti (*core*), selongsong (*cladding*), dan *coating* seperti ditunjukkan Gambar 2.1.



**Gambar 2.1.** Struktur fiber optik (Castrellon-Uribe, 2012).

Inti terbuat dari bahan plastik atau kaca yang berfungsi sebagai pipa cahaya. Cahaya merambat sepanjang inti dengan bantuan proses pemantulan yang terjadi pada dinding permukaan inti dengan selubung. Selubung terbuat dari bahan plastik atau kaca dengan indeks bias lebih kecil dari inti, yang berfungsi sebagai cermin yaitu memantulkan cahaya agar dapat merambat ke ujung lainnya. *Coating* berfungsi sebagai pelindung inti dan selubung dari kondisi lingkungan yang merusak.



### 2.1.1 Jenis Fiber Optik

Berdasarkan mode-nya fiber optik dibagi menjadi dua jenis yaitu *Single-mode fiber* dan *Multi-mode fiber* (Fidanboylu & Efendioglu, 2009).

#### 1. *Single-mode Fiber*

Fiber optik *single-mode* mempunyai ukuran diameter inti yang sangat kecil yaitu sekitar 4-10  $\mu\text{m}$  dan diameter selubung sebesar 125  $\mu\text{m}$ . Fiber ini hanya dapat mentransmisikan sinyal dalam satu mode. Karena *single-mode* hanya mentransmisikan sinyal pada mode utama, maka fiber ini dapat mencegah terjadinya dispersi kromatik, serta mempunyai *bandwidth* dan kapasitas transmisi yang besar.

#### 2. *Multi-mode Fiber*

Fiber optik *multi-mode* adalah fiber optik yang dapat mentransmisikan sinyal dalam berbagai mode. Fiber ini memiliki diameter inti antara 50-70  $\mu\text{m}$  dan diameter selubung 100-200  $\mu\text{m}$ . Performansi transmisi sinyal yang dimiliki fiber *multi-mode* lebih buruk daripada *single-mode*, karena *bandwidth* dan kapasitas transmisinya kecil.

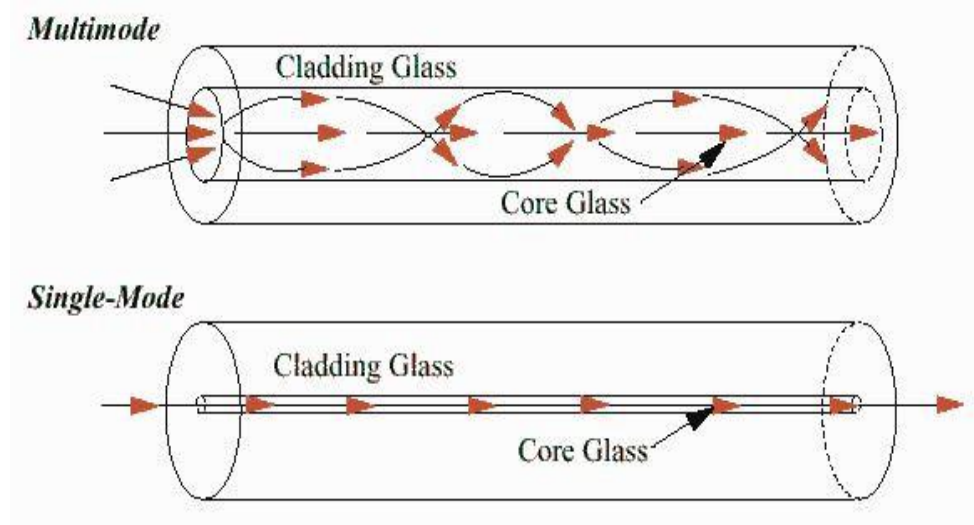
Berdasarkan profil indeks bias, fiber optik diklasifikasikan menjadi *Step-index fiber* dan *Graded-index fiber* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.

#### 1. *Step-index Fiber*

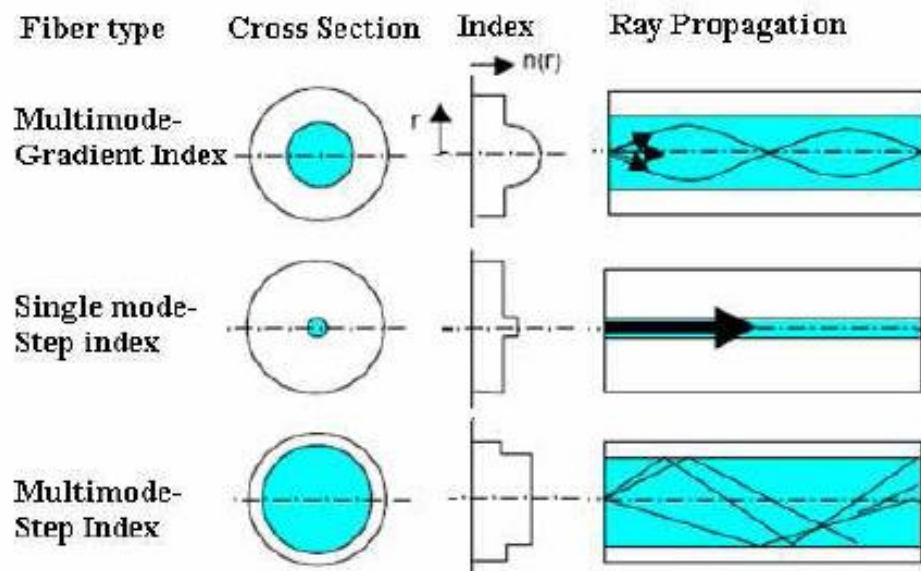
*Step-index fiber* mempunyai nilai indeks bias yang sama (*uniform*) dari bagian inti sampai inti *boundary* dan kemudian berubah (*step*) di bagian selubung.

#### 2. *Graded-index Fiber*

*Graded-index fiber* mempunyai indeks bias yang bervariasi secara radial dari bagian inti sampai selubung dan nonlinier.



(a)



(b)

**Gambar 2.2.** Jenis fiber optik (a) Berdasarkan Mode (b) Berdasarkan Indeks Bias (Fidanboylu & Efendioglu, 2009).

### 2.1.2 Penjalaran Gelombang dalam Fiber Optik

Prinsip kerja fiber optik adalah pembiasan cahaya yang dijelaskan dalam Hukum Snellius,

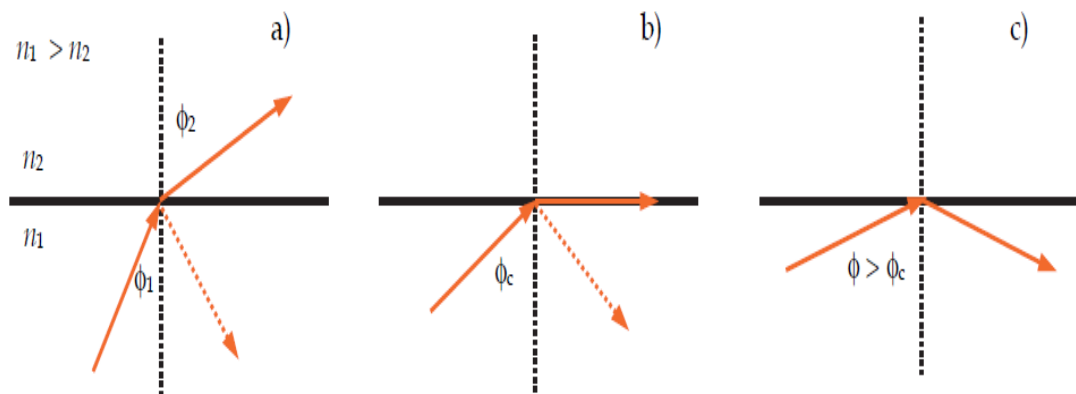
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

dimana  $n_1$  adalah indeks bias inti,  $\theta_1$  sudut datang,  $n_2$  indeks bias selubung, dan  $\theta_2$  sudut bias seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Transmisi cahaya pada fiber optik 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 indeks tinggi ( $n_1$ ) ke media dengan indeks rendah ( $n_2$ ), sinar akan dibiaskan keluar dengan sudut bias ( $\theta_2$ ) yang lebih besar daripada sudut datang ( $\theta_1$ ) seperti pada Gambar 2.3 (a). Jika sudut sinar datang diperbesar, akan terjadi suatu titik di mana sudut bias bernilai  $90^\circ$  ( $\theta_2 = 90^\circ$ ), sudut bias ini dinamakan sudut kritis ( $\theta_c$ ) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b). Nilai sudut kritis dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Jika sudut sinar datang lebih besar dari sudut kritis, maka tidak terjadi pembiasan cahaya dan semua sinar datang dipantulkan kembali terhadap bidang  $n_1$  seperti pada Gambar 2.3 (c).



**Gambar 2.3.** Pemantulan pada fiber optik untuk  $n_1$  indeks bias inti dan  $n_2$  indeks bias selubung. (a) Sudut datang lebih kecil dari sudut kritis. (b) Sudut datang sama dengan sudut kritis. (c) Sudut datang lebih besar dari sudut kritis (Castrellon-Uribe, 2012).

### 2.1.3 Polymer Optical Fiber (POF)

POF merupakan salah satu jenis fiber optik yang terbuat dari bahan polimer yang mempunyai indeks bias 1,49. POF banyak diterapkan dalam komunikasi jaringan jarak pendek terutama untuk otomotif, komunikasi private kantor dan rumah, dan untuk sistem sensor (Prajzler *et al.*, 2013).

POF terdiri dari berbagai jenis yang dikategorikan berdasarkan material penyusunnya. Material penyusun yang sering digunakan antara lain *poly(methyl methacrylate)* (PMMA), *polycarbonates* (PC), *polystyrene* (PS), dan *cyclic olefin copolymer* (COC) (Luo *et al.*, 2017; Zhang, 2013). Pada penelitian ini digunakan material PMMA dengan struktur kimia yang meliputi sifat *glass transition temperature* ( $T_g = 104\text{ }^\circ\text{C}$ ), titik lebur ( $T_m = 160\text{ }^\circ\text{C}$ ), koefisien muai-termal ( $\alpha = 0,68 \times 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), koefisien *thermo-optic* ( $\frac{dn}{dT} = -1,2 \times 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), koefisien *stress-optik* ( $\beta = (-4,5 \sim -1,5) \times 10^{-12}\text{ }^\circ\text{Pa}^{-1}$ ), dan *moisture absorption* mendekati 2,0 wt%.

## 2.2 Sensor Fiber Optik

Sensor fiber optik merupakan aplikasi lain dari teknologi fiber optik yang awalnya diterapkan dalam sistem komunikasi optik digunakan untuk mengirimkan cahaya yang membawa sinyal optik (Yulianti *et al.*, 2017). Sensor fiber optik telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti dalam bidang kesehatan untuk memantau kondisi pernapasan (Suana *et al.*, 2012), dalam bidang fisika untuk pengukuran kekentalan (Anggita & Harmadi, 2015), dan dalam bidang kimia untuk pengukuran pH (Islam *et al.*, 2014).

Sensor fiber optik diklasifikasikan menjadi 3 kategori, yaitu berdasarkan lokasi pendeteksian dan prinsip kerja, dan aplikasi (Ghetia *et al.*, 2013). Berdasarkan lokasi pendeteksian, sensor fiber optik terbagi menjadi intrinsik dan ekstrinsik.

### 1. Intrinsik

Pada sensor fiber optik intrinsik, fiber optik berperan langsung dalam proses penginderaan, dimana terdapat bagian fiber optik yang berfungsi sebagai komponen pengindera. Pada sensor tipe ini cahaya tidak pernah meninggalkan fiber optik dalam proses penginderaan, sehingga proses modulasi terjadi di dalam fiber optik. Dengan demikian ada bagian fiber optik yang berperan aktif sebagai pengindera. Karakteristik fiber optik harus dimodifikasi untuk mengurangi sifat cahaya yang diloloskan dari fiber. Sensor ini dapat menggunakan konfigurasi interferometri, *Fiber Bragg Grating* (FBG), *Long Period Fiber Grating* (LPFG), atau fiber khusus (fiber yang didoping) yang dirancang agar sensitif terhadap gangguan tertentu.

## 2. Ekstrinsik

Pada sensor fiber optik ekstrinsik, fiber optik digunakan secara sederhana untuk memandu cahaya dari dan ke lokasi *sensor head*. Dalam konfigurasi ini, satu fiber mentransmisikan energi optik ke *sensor head*, lalu cahaya ini dimodulasi dan digabungkan kembali melalui fiber kedua yang memandunya pada detektor optik. Sebagai alternatif, modulasi cahaya digabungkan kembali ke fiber yang sama dengan refleksi atau hamburan dan kemudian dipandu kembali ke sistem pendeteksian (Ghetia *et al.*, 2013).

Berdasarkan prinsip kerjanya, sensor fiber optik diklasifikasikan sebagai sensor berbasis intensitas, sensor berbasis modulasi panjang gelombang, dan sensor berbasis modulasi fase.

### 1. Sensor fiber optik berbasis intensitas

Sensor fiber optik berbasis intensitas mendeteksi variasi intensitas cahaya yang sebanding dengan lingkungan pengganggu. Konsep yang meliputi modulasi intensitas meliputi transmisi, refleksi, dan mikrobending. Untuk itu, sebuah target reflektif atau transmisiif dapat digabungkan dalam fiber. Mekanisme lain yang bisa digunakan secara independen dengan tiga konsep utama di antaranya absorpsi, hamburan, fluoresensi, dan polarisasi. Sensor fiber optik modulasi intensitas membutuhkan lebih banyak cahaya untuk berfungsi, karena itu biasanya banyak digunakan fiber optik *multimode* dengan ukuran inti yang besar.

### 2. Sensor fiber optik berbasis modulasi panjang gelombang

Sensor fiber optik berbasis modulasi panjang gelombang ini memanfaatkan perubahan panjang gelombang dalam proses pendeteksian. Jenis sensor yang diterapkan misalnya *bragg grating sensors* (Yulianti *et al.*, 2013).



### 3. Sensor fiber optik berbasis modulasi fase

Sensor jenis ini membandingkan fase cahaya dalam bagian *sensing* dan *reference* dari fiber optik. Umumnya sensor ini menggunakan sumber sinar laser yang koheren dan dua fiber *single-mode*. Cahaya yang masuk akan terbelah ke bagian *sensing* dan *reference*. Jika cahaya dalam bagian *sensing* terkena lingkungan pengganggu, maka pergeseran fasa akan terjadi. Selanjutnya pergeseran fasa akan terdeteksi oleh interferometer. Ada empat konfigurasi interferometrik yang digunakan, yaitu *Michelson*, *Fabry Perot*, *Sagnac*, dan *Mach-Zehnder* (Castrellon-Uribe, 2012).

Berdasarkan aplikasinya, sensor fiber optik terbagi menjadi sensor kimia, sensor fisika, dan sensor bio-medik.

#### a. Sensor fisika

Sensor fisika digunakan untuk pengukuran sifat-sifat fisika, seperti suhu (Wang *et al.*, 2017), tekanan (Xu *et al.*, 2014), indeks bias dan regangan (Jasim *et al.*, 2014), medan magnet (Chen *et al.*, 2018), dan kekentalan (Anggita & Harmadi, 2015).

#### b. Sensor kimia

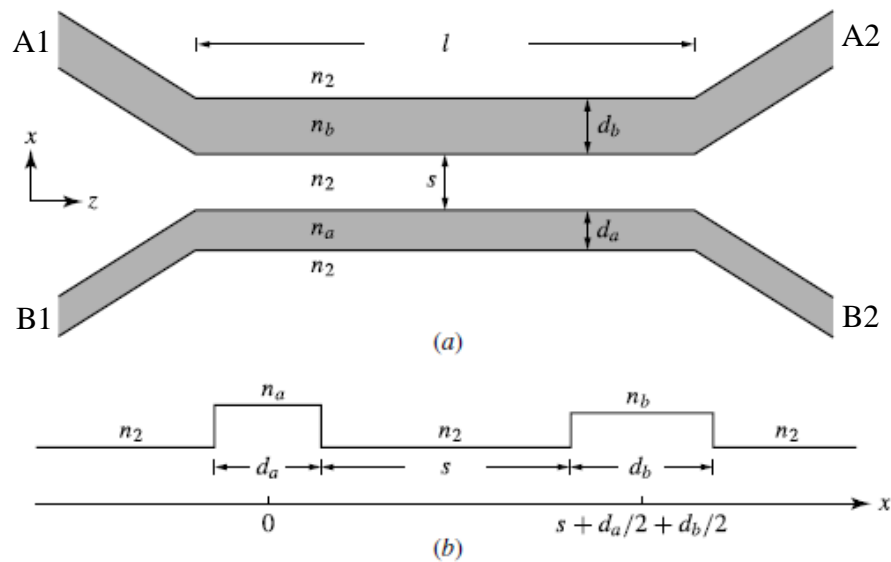
Sensor ini digunakan untuk pengukuran pH (Yulianti *et al.*, 2012), deteksi gas (Mishra *et al.*, 2015), dan pengukuran konsentrasi (Hu *et al.*, 2016).

#### c. Sensor bio-medik

Sensor ini digunakan dalam aplikasi bio-medik, seperti pengukuran kandungan glukosa dalam tubuh (Sari *et al.*, 2012), sebagai sensor napas (Suana *et al.*, 2012), dan sensor imun terhadap bakteri *Escherichia coli* (Rodrigues *et al.*, 2017).

### 2.3 Directional Coupler

*Directional coupler* merupakan piranti optik pasif yang berfungsi sebagai penggabung dua atau lebih sinyal masukan ke dalam fiber optik tunggal serta membagi sinyal menjadi dua atau lebih (Yaqin & Prajitno, 2015). *Coupler* terdiri dari dua pandu gelombang paralel seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. yangmana dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk *splitter* lisrik, optik *switch*, filter panjang gelombang, dan polarisasi *selector*.



**Gambar 2.4.** Diagram skematik (a) dua pandu gelombang *coupler* (b) profil indeks dari pandu gelombang *step-index* (Jia-ming, 2005).

Parameter-parameter pokok dalam piranti *directional coupler* optik antara lain:

1. *Coupling ratio* (CR), yaitu proporsi daya masukan pada masing-masing keluaran. Jika daya masukan diberikan pada port A1, sedangkan A2 dan B2 sebagai port keluaran maka nilai CR diperoleh dari persamaan berikut:

$$CR = \frac{P_{B2}}{P_{B2} + P_{A2}} \quad (2.3)$$

dimana  $P_{B2}$  adalah daya yang terukur pada port B2 dan  $P_{A2}$  daya yang terukur pada port A2.

2. *Insertion loss* ( $L_{ins}$ ), yaitu rugi sisipan yang terjadi karena daya dari saluran masukan *coupler* fiber optik terdistribusi di antara saluran keluaran. *Insertion loss* diukur sebagai perbandingan daya keluaran tunggal terhadap daya masukan seperti persamaan berikut:

$$L_{ins} = 10 \log \frac{P_{A2}}{P_{A1}} \text{ dB} \quad (2.4)$$

dimana  $P_{A1}$  adalah daya yang terukur pada port A1.

3. *Excess loss* ( $L_e$ ) merupakan rugi daya total pada *coupler*. Besarnya  $L_e$  dituliskan pada persamaan berikut:

$$L_e = 10 \log \left( \frac{P_{B2} + P_{A2}}{P_{A1}} \right) \quad (2.5)$$

4. *Crosstalk* ( $C_t$ ) terjadi disebabkan struktur penggabungan fiber optik sehingga ada sebagian kecil berkas cahaya yang dipantulkan kembali menuju port B1. Besarnya  $C_t$  dituliskan pada persamaan berikut:

$$C_t = 10 \log \frac{P_{B1}}{P_{A1}} \text{ dB} \quad (2.6)$$

dimana  $P_{B1}$  merupakan daya yang terukur pada port B1.

## 2.4 Mach-Zehnder Interferometer (MZI)

Sensor MZI merupakan sensor modulasi fasa yang menggunakan *two-beam interferometer*. Pada sensor ini, sumber cahaya yang masuk dipisahkan menjadi dua bagian, sebagian masuk ke jalur *reference* dan yang lainnya masuk ke jalur

*sensing* (Herdiyanto, 2007). Jalur *reference* merupakan jalur yang dilapisi dengan pelindung yang terisolasi. Sedangkan jalur *sensing* merupakan daerah penginderaan yang digunakan untuk variasi eksternal seperti suhu, indeks bias, dan lain-lain. Pada jalur ini cahaya yang melaluinya akan mengalami proses modulasi fasa.

Karena perbedaan lintasan optik antara jalur *reference* dan jalur *sensing*, respon interferensi dengan beberapa *dip* dan *peak* dihasilkan pada output yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (2.7)$$

dimana  $I_1$  adalah intensitas *sensing*,  $I_2$  adalah intensitas *reference*,  $\Delta\phi$  adalah beda fasa. Fasa  $\phi$  diperoleh dari:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int \Delta n_{eff}(L) dL \quad (2.8)$$

dimana  $\Delta n_{eff}$  adalah perubahan indeks bias efektif sepanjang lengan interferometer,  $\lambda$  adalah panjang gelombang dari input. Karena indeks bias efektif adalah konstan di sepanjang lintasan, maka persamaan (2.8) dapat disederhanakan menjadi:

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_{eff} + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \right) L_1 \quad (2.9)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_{eff} + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \right) L_2 \quad (2.10)$$

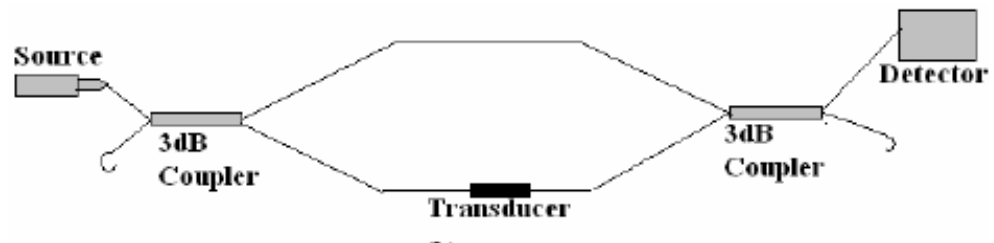
dimana  $n_{eff}$  adalah indeks bias efektif pada suhu ruang,  $\frac{\partial n}{\partial T}$  adalah koefisien termo-optik dari bahan polymer,  $\Delta T$  adalah variasi suhu di sekitar MZI, dan  $L_1$  dan  $L_2$  berturut-turut adalah panjang lengan pada jalur *sensing* dan jalur *reference*. Sehingga beda fasa  $\Delta\phi$  dapat dituliskan:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_{eff} + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \right) \Delta L \quad (2.11)$$

$\Delta L$  merupakan beda panjang antara kedua lengan sensor MZI. Berdasarkan analisis teori, dapat diringkas bahwa intensitas output bergantung pada kinerja bahan polimer, panjang gelombang yang digunakan, dan beda panjang dari kedua lengan sensor MZI (Niu *et al.*, 2018).

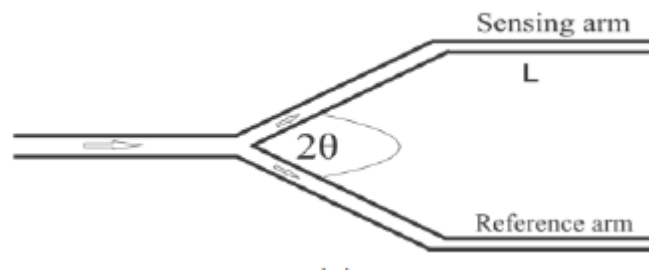
#### 2.4.1 Struktur Sensor Optik MZI

Sensor optik MZI konvensional memiliki struktur seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



**Gambar 2.5.** Struktur sensor MZI (Ghetia *et al.*, 2013).

Sensor MZI menggunakan *coupler* yang dibentuk dengan menyabangkan pandu gelombang yang tertanam (*embedded waveguide*) dalam sambungan Y, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. MZI terdiri dari dua kombinasi sambungan Y. Cahaya yang masuk ke dalam struktur MZI dibagi menjadi dua gelombang pandu oleh sambungan Y yang pertama. Dua gelombang pandu berjalan sepanjang dua lengan dari interferometer dan bergabung pada sambungan Y yang kedua. Karena kedua gelombang dibangkitkan oleh sumber yang sama, maka kedua gelombang tersebut koheren dan berinterferensi jika perbedaan diantara panjang dua lengan kurang dari panjang koherensi sumber cahaya yang digunakan.



**Gambar 2.6.** Sambungan Y pada MZI (Huda *et al.*, 2015)

#### 2.4.2 Prinsip kerja sensor MZI-POF

Pada dasarnya sensor MZI-POF merupakan perkembangan dari sensor fiber optik modulasi fase. Sensor MZI-POF menggunakan perubahan fase sebagai dasar utama kerja sensor. MZI-POF dimodifikasi dengan menghilangkan jaket pada bagian tengah MZI dengan panjang tertentu, hal ini dilakukan agar MZI sensitif terhadap perubahan yang diberikan. MZI-POF akan berinteraksi jika dikenai perubahan suhu. POF memiliki koefisien *thermo-optic* ( $dn/dT$ ) yang bernilai negatif, sehingga apabila dikenai perubahan dengan menaikkan suhu sekitar MZI, maka indeks bias inti POF akan turun. Perubahan nilai indeks bias inti akan mempengaruhi perambatan gelombang sehingga akan terjadi perubahan fase pada MZI-POF. Oleh karena itu, perubahan suhu yang diberikan pada POF dapat dideteksi melalui perubahan fasenya.

### 2.5 Suhu

Suhu merupakan parameter yang menentukan apakah suatu benda berada dalam kesetimbangan termal dengan benda-benda lainnya. Jika suatu benda padat diberi perlakuan kenaikan suhu maka benda tersebut akan mengalami pemuaian. Pemuaian adalah bertambah besarnya ukuran benda karena kenaikan suhu pada benda tersebut. Kenaikan suhu yang terjadi menyebabkan benda itu mendapat

tambahan energi berupa kalor yang menyebabkan molekul-molekul pada benda bergerak lebih cepat.

Terdapat dua parameter yang mencirikan pengaruh suhu pada fiber optik yaitu koefisien muai termal atau *Coefficient of Thermal Expansion* (CTE) dan koefisien termo-optik atau *Thermo-Optic Coefficient* (TOC) (Ariani & Prajitno, 2016). CTE mencirikan ekspansi fisik atau kontraksi volume suatu material, sedangkan TOC mencirikan perubahan indeks bias sebagai respon dari perubahan suhu. Dengan menggunakan CTE dan TOC, maka perubahan panjang fiber optik ( $\Delta L$ ), perubahan jari-jari inti ( $\Delta r$ ), dan perubahan indeks bias ( $\Delta n$ ) akibat dari perubahan suhu ( $\Delta T$ ), masing-masing dapat dinyatakan sebagai

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (2.12)$$

$$\Delta r = \alpha r \Delta T \quad (2.13)$$

$$\Delta n = \beta n \Delta T \quad (2.14)$$

dimana  $\alpha$  adalah koefisien muai termal dan  $\beta$  adalah koefisien termo-optik. Adanya variasi suhu membawa tegangan termal yang datang dari perbedaan koefisien muai termal antara fiber dan struktur luar termasuk jaket.

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan:

1. Proses fabrikasi sensor MZI-POF dilakukan menggunakan dua *coupler* terintegrasi dan dua lengan interferometer dengan panjang yang berbeda.
2. Hasil karakterisasi sensor MZI-POF menunjukkan bahwa sensor dengan lengan interferometer panjang mempunyai nilai sensitivitas dan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sensor dengan lengan interferometer pendek, akan tetapi terjadi histerisis yang besar pada sensor dengan lengan interferometer panjang. Karakteristik yang diperoleh antara lain, sensitivitas sebesar 0,0822 nm/°C dengan koefisien korelasi 97,66 %, histerisis sebesar 1,47 °C, waktu respon yang singkat kurang dari 1 s, dan akurasi dengan selisih suhu terkecil yaitu 0,634 °C.

#### 5.2 Saran

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

1. Perlu dilakukan optimasi *coupler*.
2. Perlu dilakukan pengupasan jaket pada kedua lengan MZI-POF.
3. Perlu dilakukan penambahan variasi panjang lengan  $L_1$  untuk memperoleh nilai panjang yang optimum.



4. Perlu dilakukan penambahan material *coating* yang sensitif terhadap suhu pada lengan MZI.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggita, A.W. & Harmadi 2015. Aplikasi Serat Optik sebagai Sensor Kekentalan Oli Mesran SAE 20W-50 Berbasis Perubahan Temperatur. *Jurnal Fisika Unand*, 4(3): 239–246.
- Ariani, P.F. & Prajitno, G. 2016. Analisis Pengaruh Panjang Kupasan dan Perubahan Suhu terhadap Pancaran Intensitas pada Serat Optik Plastik Multimode Tipe FD 620-10. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 5(2): 103–107.
- Castrellon-Uribe, J. 2012. Optical Fiber Sensors : An Overview. M. Yasin, ed. Mexico: Intech, hal.1–27.
- Chen, H., Shao, Z., Zhang, X., Hao, Y. & Rong, Q. 2018. Highly sensitive magnetic field sensor using tapered Mach–Zehnder interferometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 107(March): 78–82.
- Fidanboyly, K. & Efendioglu, H.S. 2009. Fiber Optic Sensors and Their Applications. *5th International Advanced Technologies Symposium*, 199–201.
- Ghetia, S., Gajjar, R. & Trivedi, P. 2013. Classification of Fiber Optical Sensors. *International Journal of Electronics Communication and Computer Technology (IJECCCT)*, 3(4): 442–445.
- Guan, X., Wang, X. & Frandsen, L.H. 2016. Optical Temperature Sensor with Enhanced Sensitivity by Employing Hybrid Waveguides in a Silicon Mach-Zehnder Interferometer. *Optics Express*, 24(15): 16349–16356.
- Herdianto 2007. Interferometer Mach-Zehnder sebagai Sensor Serat Optik. *Techne Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 6(1): 17–30.
- Hu, X., Chuan, T.S., Wang, Y. & Fang, T. 2016. Mach-Zehnder interferometer sensor based on the U-shaped probe for concentration sensing. *Optik*, 127(4): 2183–2186. Tersedia di <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.136>.
- Huda, N., Mahmudin, D., Hasanah, L. & Wijayanto, Y.N. 2015. Analisa Sudut Persimpangan dan Indeks Bias Pada Mach Zehnder Interferometer Optik. *Prosiding Seminas Nasional Fisika SNF2015*, 4: 57–60.
- Indra, A.T. & Harmadi 2014. Karakterisasi Sistem Sensor Serat Optik Berdasarkan Efek Gelombang Evanescent. *Jurnal Fisika Unand*, 3(1): 8–13.
- Islam, S., Rahman, R.A., Othaman, Z. Bin, Riaz, S. & Naseem, S. 2014. Synthesis and characterization of multilayered sol-gel based plastic-clad fiber optic pH sensor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1–5.
- Jasim, A.A., Hayashi, N., Harun, S.W., Ahmad, H., Penny, R., Mizuno, Y. & Nakamura, K. 2014. Refractive index and strain sensing using inline Mach-

Zehnder interferometer comprising perfluorinated graded-index plastic optical fiber. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 219: 94–99.

- Jia-ming, L. 2005. *Photonic Devices*. United States: Cambridge University Press.
- Li, B., Jiang, L., Wang, S., Yang, J., Wang, M. & Chen, Q. 2012a. High Sensitivity Mach-Zehnder Interferometer Sensors Based on Concatenated Ultra-Abupt Tapers on Thinned Fibers. *Optics and Laser Technology*, 44(3): 640–645.
- Li, L., Xia, L., Xie, Z. & Liu, D. 2012b. All-Fiber Mach-Zehnder Interferometers For Sensing Applications. *Optics Express*, 20(10): 11109.
- Liu, Y., Peng, W., Liang, Y., Zhang, X., Zhou, X. & Pan, L. 2013. Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometric Sensor for High-Sensitivity High Temperature Measurement. *Optics Communications*, 300: 194–198.
- Luo, Y., Yan, B., Zhang, Q., Peng, G.-D., Wen, J. & Zhang, J. 2017. Fabrication of Polymer Optical Fibre (POF) Gratings. *Sensors*, 17(3): 511.
- Mahmudin, D., Huda, N., Estu, T.T., Fathnan, A.A., Daud, P., Hardiati, S., Hasanah, L. & Wijayanto, Y.N. 2017. Design of Optical Channel Waveguide Mach-Zehnder Interferometer (MZI) for Environmental Sensor Applications. *2nd International Symposium on Frontier of Applied Physics*, Conf. Seri: 1–6.
- Marques, C.A.F., Webb, D.J. & Andre, P. 2017. Polymer Optical Fiber Sensors in Human Life Safety. *Optical Fiber Technology*, 36: 144–154.
- Mishra, S.K., Bhardwaj, S. & Gupta, B.D. 2015. Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Sensor for the Detection of Low Concentrations of Amonia Gas. *IEEE Sensors Journal*, 15(2): 1235–1239.
- Niu, D., Wang, X., Sun, S., Jiang, M., Xu, Q., Wang, F., Wu, Y. & Zhang, D. 2018. Polymer/Silica Hybrid Waveguide Temperature Sensor Based on Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 20(4): 1–6.
- Pallares-Aldeiturriaga, D., Rodriguez-Cobo, L., Quintela, A. & Lopez-Higura, J, M. 2017. In-fiber Mach-Zehnder Interferometer Inscribed with Femtosecond Laser for High Temperature Sensing. *25th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 10323: 1–4.
- Prajzler, V., Neruda, M. & Špírková, J. 2013. Planar Large Core Polymer Optical 1x2 and 1x4 Splitters Connectable to Plastic Optical Fiber. *Radioengineering*, 22(3): 751–757.
- Rodrigues, D., Lopes, R., Franco, M., Werneck, M. & Allil, R. 2017. Sensitivity Analysis of Different Shapes of a Plastic Optical Fiber-Based Immunosensor for Escherichia coli: Simulation and Experimental Results. *Sensors*, 17(12):

2944. Tersedia di <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2944>.

- Rong, Q., Sun, H., Qiao, X., Zhang, J., Hu, M. & Feng, Z. 2012. A Miniature Fiber-Optic Temperature Sensor Based on a Fabry – Perot Interferometer. *Journal Of Optics A: Pure and Applied Optics*, 14: 1–5.
- 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): 30–36.
- Sharma, K.K. 2006. *Optics Principles and Applications*. United Sta ed. London: Academic Press.
- Soltanian, M.R.K., Sharbirin, A.S., Ariannejad, M.M., Amiri, I.S., De La Rue, R.M., Brambilla, G., Rahman, B.M.A., Grattan, K.T.V. & Ahmad, H. 2016. Variable Waist-Diameter Mach-Zehnder Tapered-Fiber Interferometer as Humidity and Temperature Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 16(15): 5987–5992.
- Suana, W., Muntini, M.S. & Hatta, A.M. 2012. Pengembangan Sensor Napas Berbasis Serat Optik Plastik dengan Selubung Terkelupas untuk Aplikasi di Bidang Medis. *JURNAL FISIKA DAN APLIKASINYA*, 8(2): 1–5.
- Urrutia, A., Goicoechea, J., Ricchiuti, A.L., Barrera, D., Sales, S. & Arregui, F.J. 2016. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 227: 135–141.
- Wang, Y., Wang, S., Jiang, L., Huang, H., Zhang, L., Wang, P., Lv, L. & Cao, Z. 2017. Temperature-insensitive Refractive Index Sensor based on Mach – Zehnder Interferometer with Two Microcavities. *Chinese Optics Letters*, 15(2): 1–5.
- Woyessa, G., Fasano, A., Stefani, A., Markos, C., Nielsen, K., Rasmussen, H.K. & Bang, O. 2016. Single mode step-index polymer optical fiber for humidity insensitive high temperature fiber Bragg grating sensors. *Optics Express*, 24(2): 1253.
- Wulandari, I.P., Ryananta, Y.O.A. & Yofa, T.P. 2014. Performansi Fiber Optik Hemicircular 1000rf dalam Aplikasinya sebagai Sensor Temperatur ( Performance of Fiber Optic Hemicircular 1000RF In The Application of Temperature Sensor ). 3(2): 89–93.
- Xu, F., Shi, J., Gong, K., Li, H., Hui, R. & Yu, B. 2014. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm. *Optics Letters*, 39(10): 2838–2840.
- Yao, Q., Meng, H., Wang, W., Xue, H., Xiong, R., Huang, B., Tan, C. & Huang, X. 2014. Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on a Core-Offset Mach-Zehnder Interferometer Combined with a

Fiber Bragg Grating. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 209: 73–77.

- Yaqin, M.A. & Prajitno, G. 2015. Fabrikasi dan Karakterisasi Directional Coupler Konfigurasi 3×3 Planar Berbahan Serat Optik Plastik Step-Index Moda Jamak Tipe FD-620-10. 4(2): 38–43.
- Yi-hui, H., Guo, X., Min, M., Si-mei, S., Xiao-shan, G., Ji-bing, L. & Chao, J. 2017. Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature based on a Core-offset Mach-Zehnder Interferometer. *16th International Conference on Optical Communications and Networks*.
- Yulianti, I., Edi, S.S., Saputra, B.A., Aji, M.P., Susanto. & Kurdi, O. 2017. Detection of Cadmium Ion by Evanescent Wave Based Chitosan Coated Optical Fiber Sensor. *Journal of Physics The 3rd International Conference on Mathematics, Science and Education 2016*, (Conf. Series 824 012002).
- Yulianti, I., Supa'At, A.S.M., Idrus, S.M. & Anwar, M.R.S. 2013. Design of Fiber Bragg Grating-Based Fabry-Perot sensor for Simultaneous Measurement of Humidity and Temperature. *Optik*, 124(19): 3919–3923.
- Yulianti, I., Supa'At, A.S.M., Idrus, S.M., Kurdi, O. & Anwar, M.R.S. 2012. Sensitivity improvement of a fibre Bragg grating pH sensor with elastomeric coating. *Measurement Science and Technology*, 23(1).
- Zhang, Z. 2013. Bragg grating formation in PMMA doped with Trans-4-stilbenemethanol. 196.
- Zhao, Z., Tang, M., Fu, S., Liu, S., Wei, H., Cheng, Y., Tong, W., Shum, P.P. & Liu, D. 2013. All-Solid Multi-Core Fiber-Based Multipath Mach-Zehnder Interferometer for Temperature Sensing. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 112(4): 491–497.
- Zhou, J., Liao, C., Wang, Y., Yin, G., Zhong, X., Yang, K., Sun, B., Wang, G. & Li, Z. 2014. Simultaneous Measurement of Strain and Temperature by Employing Fiber Mach-Zehnder Interferometer. *Optics Express*, 22(2): 1680–1686.