



DISERTASI - SF186601

**STUDI PANDU GELOMBANG STRUKTUR MACH-ZEHNDER BERBASIS MATERIAL  $\text{SnO}_2$  UNTUK APLIKASI GERBANG LOGIKA OPTIK**

**MUHIMMATUL KHOIRO**  
01111660010013

Dosen Pembimbing  
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.  
Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.

Departemen Fisika  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020



**DISERTASI - SF186601**

**STUDI PANDU GELOMBANG STRUKTUR MACH-ZEHNDER BERBASIS MATERIAL  $\text{SnO}_2$  UNTUK APLIKASI GERBANG LOGIKA OPTIK**

**MUHIMMATUL KHOIRO**  
**01111660010013**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.**  
**Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.**

**Departemen Fisika**  
**Fakultas Sains dan Analitika Data**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**2020**



**DISSERTATION - SF186601**

**STUDY OF MACH-ZEHNDER STRUCTURING  
WAVEGUIDE BASED SnO<sub>2</sub> MATERIAL FOR  
OPTICAL LOGIC GATES APPLICATION**

**MUHIMMATUL KHOIRO  
01111660010013**

**Supervisors:**

**Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.**

**Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.**

**Physics Department  
Faculty of Scientics  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020**

## LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Doktor (Dr)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh:

**MUHIMMATUL KHOIRO**

**NRP. 01111660010013**

Tanggal Ujian : 24 Februari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:

**Pembimbing:**

1. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng

NIP : 19690904 199203.1.003

(.....)

2. Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.

NIP: 19641229 199002.2.001

(.....)

**Penguji:**

1. Dr. Mashuri, M.Si

NIP: 19691216 199402.1.001

(.....)

2. Agus Muhammad Hatta, M.Si, Ph.D

NIP: 19780902 200312.1.002

(.....)

3. Prof. Dr. Moh Yasin, M.Si

NIP: 19670312 199102.1.001

(.....)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **PERNYATAAN KEASLIAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Disertasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar Doktor di Perguruan Tinggi manapun. Sepanjang pengetahuan Penulis juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah dituliskan atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam Disertasi ini dan disebutkan dalam Daftar Pustaka.

Surabaya, 2 Maret 2020

Pembuat Pernyataan

Muhimmatul Khoiro  
01111660010013

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# STUDI PANDU GELOMBANG STRUKTUR MACH-ZEHNDER BERBASIS MATERIAL SnO<sub>2</sub> UNTUK APLIKASI GERBANG LOGIKA OPTIK

Nama Mahasiswa : Muhimmatul Khoiro  
NRP : 01111660010013  
Pembimbing : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.  
Co-supervisor : Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.

## ABSTRAK

Indonesia merupakan negara penghasil timah terbesar kedua di dunia dengan menghasilkan 26,77% dari total produksi timah dunia pada tahun 2018. Timah tersebut dapat diolah menjadi timah oksida untuk meningkatkan nilai ekonomis dan kegunaannya. Timah murni 99% dalam disertasi ini dibentuk menjadi lapisan tipis SnO<sub>2</sub>. Lapisan timah setebal sekitar 250 μm dideposisi menggunakan *vacuum evaporation* di atas kaca *quartz*. Kawat timah dan kaca *quartz* dipilih karena memiliki harga yang relatif murah sedangkan metode *vacuum evaporation* dipilih karena metode ini merupakan metode paling sederhana untuk mendapatkan lapisan tipis yang memiliki permukaan homogen dan rata. Lapisan dipanaskan pada dua tahap kalsinasi berurutan selama 3 jam pada 200°C dan 3 jam pada 400°C menggunakan *furnace* untuk mengurangi kekasaran permukaan. Kemudian, lapisan disintering pada lima temperatur selama 3 jam, masing-masing: 600, 700, 800, 900, dan 1000°C. Lapisan bertransformasi menjadi SnO pada dua tahap kalsinasi pertama. Struktur kristal lapisan di atas substrat kaca sepenuhnya bertransformasi menjadi SnO<sub>2</sub> pada suhu 600°C. Peningkatan suhu sintering hingga 1000°C dapat menurunkan ukuran kisi kristal pada lapisan. Teknik oksidasi termal ini juga dapat menimbulkan pori-pori pada permukaan lapisan. Akan tetapi jumlah pori-pori dan volume kisi menurun seiring dengan meningkatnya suhu sintering. Sifat optik lapisan tipis dikarakterisasi menggunakan *prism coupling apparatus* yang menunjukkan bahwa lapisan memiliki indeks bias tinggi yakni sekitar 2.0759 – 2.2735. Uniknya, lapisan SnO<sub>2</sub> yang memiliki indeks bias paling tinggi didapatkan pada suhu 1000°C. Lapisan tersebut mengandung energi Urbach setelah diobservasi dengan spektrometri cahaya tampak. Oleh karena itu, lapisan tipis SnO<sub>2</sub> ini berpotensi tinggi untuk aplikasi perangkat optik, terutama untuk pandu gelombang dan solar sel.

SnO<sub>2</sub> juga memiliki potensi tinggi sebagai material nonlinear optik dilihat dari nilai susceptibilitas orde ketiganya. Nonlinearitas dari SnO<sub>2</sub> ini lebih tinggi daripada LiNbO<sub>3</sub> sebagai bahan nonlinear yang telah banyak digunakan sebagai pandu gelombang. Pembelajaran mengenai material nonlinear SnO<sub>2</sub> dilakukan menggunakan pemodelan penalaran gelombang pada pandu gelombang nonlinear yang mengandung SnO<sub>2</sub> menggunakan *Finite Difference Beam Propagation*



*Method* (FD-BPM). Pandu gelombang didesain dalam dua struktur, yakni struktur *directional coupler* ganda dan struktur berbasis Mach-zehnder. Aplikasi pandu gelombang optik sebagai gerbang logika optik didapatkan akibat perbedaan respon daya keluaran pada setiap daya masukkan. Pandu gelombang nonlinear berstruktur *directional coupler* ganda dapat diaplikasikan untuk berbagai gerbang logika optik operasi AND, OR, dan XNOR dengan memberikan daya masukkan sebesar  $1.2 \text{ W/m}^2$ ,  $1.6 \text{ W/m}^2$  dan  $5.2 \text{ W/m}^2$ . Pemodelan pada pandu gelombang Mach-zehnder dilakukan menggunakan dua jenis  $\text{SnO}_2$ . Pemodelan pertama dilakukan dengan  $\text{SnO}_2$  dari literatur yang menghasilkan fungsi gerbang logika optik OR, XNOR, dan NAND menggunakan masing-masing daya optik masukan yakni  $18.1 \text{ W/m}^2$ ,  $15 \text{ W/m}^2$  and  $18.7 \text{ W/m}^2$ . Pemodelan kedua dilakukan dengan hasil fabrikasi lapisan tipis hingga didapatkan gerbang logika fungsi XNOR dengan membutuhkan daya optik dari sinyal kontrol sebesar  $4 \text{ W/m}^2$ . Desain pandu gelombang ini dapat dijadikan pilihan desain untuk perangkat gerbang logika optik multifungsi dengan kebutuhan energi rendah

Kata kunci: Lapisan tipis  $\text{SnO}_2$ , *vacuum evaporation deposition*, *directional coupler*, Mach-zehnder, nonlinier optik, gerbang logika optik,

# STUDY OF MACH ZEHNDER STRUCTURING CONSISTING WAVEGUIDE BASED SnO<sub>2</sub> MATERIAL FOR OPTICAL LOGIC GATES APPLICATION

Student Name : Muhimmatul Khoiro  
Student Identity Number : 01111660010013  
Supervisor : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.  
Co-supervisor : Dr. Melania Suweni Muntini, M.T.

## ABSTRACT

Indonesia is the second largest tin producing country while produces tin by 26,77% of total world tin production in 2018. Tin can be processed into tin oxide to increase their economic value and used value. 99% pure tin metal in this dissertation had been formed by SnO<sub>2</sub> thin films. A 250 nm thick pure tin film was deposited on quartz substrates by vacuum evaporation. Tin metal and quartz glass were chosen because their price is relatively cheap, while vacuum evaporation method was chosen because it is simplest method to produce the homogeneous and uniform films. The films were heated in a two-step annealing sequence for 3 h at 200 and 3 h at 400°C with an electric furnace to decrease their surface roughness. Subsequently, the films were annealed at five temperatures for 3 h each: 600, 700, 800, 900 and 1000°C. The first two steps of annealing process transformed the films into Tin(II) oxide. The crystal structure of the film on the quartz substrate was completely transformed into SnO<sub>2</sub> at 600°C. With the increase of annealing temperature to 1000°C, the size of the lattices appeared to decrease on the thin film. In addition, the annealing process led to the formation of pores on the surface, but the number of pores and the lattices volume decreased with increased annealing temperature. The optical properties of the thin film were characterized by the use of visible spectrophotometry which showed a high refractive index at around 2.0759 – 2.2735. Interestingly, the SnO<sub>2</sub> thin film with the highest refractive index was obtained at 1000 °C, exhibited the lowest Urbach energy. Therefore, the SnO<sub>2</sub> thin film has a high potential for optical applications, especially in dielectric waveguides and solar cells.

SnO<sub>2</sub> also has high potential as optical nonlinear material by their third order susceptibility. Nonlinearity of SnO<sub>2</sub> is higher than LiNbO<sub>3</sub> as nonlinear material which had been widely used as waveguide. Study of nonlinear material SnO<sub>2</sub> had been carried out by wave propagation in nonlinear waveguide consisting SnO<sub>2</sub> modeling using means of Finite Difference Beam Propagation Method (FD-BPM). Waveguide was designed in two structure, such as Directional Coupler parallel and Mach-zehnder structuring. Optical waveguide application as optical logic gates were obtained because differ response of output power on each input power. Nonlinear waveguide structured directional coupler parallel can be applied

for varied optical logic gates in AND, OR, and XNOR operation using input power of  $1.2 \text{ W/m}^2$ ,  $1.6 \text{ W/m}^2$  and  $5.2 \text{ W/m}^2$  respectively. Simulation of nonlinear waveguide structured Mach-zehnder had attended in two kind of SnO<sub>2</sub>. Firstly, SnO<sub>2</sub> from literature which carried out function of optical logic gates operation OR, XNOR, and NAND using input power of  $18.1 \text{ W/m}^2$ ,  $15 \text{ W/m}^2$  and  $18.7 \text{ W/m}^2$  respectively. Lastly, by using SnO<sub>2</sub> from thin film characterization was obtain XNOR optical logic gate function by optical power of control reach  $4 \text{ W/m}^2$ . The proposed design of waveguides can be used as design options in multifunctional optical logic gates device with lower energy consumption.

Keywords: SnO<sub>2</sub> thin films, *vacuum evaporation deposition*, *directional coupler*, Mach-zehnder, nonlinear optics, optical logic gate.

Disertasi ini kupersembahkan kepada:

*Adikku: Qoriatul Tri Setya Ananda dan Magastina Reva Labiba*

*Kedua orangtuaku: Agus Sugiarto dan Nur Hanifah*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala berkah dan izin-Nya penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul: **“Studi Pandu Gelombang Struktur Mach-zehnder berbasis Material SnO<sub>2</sub> untuk Aplikasi Gerbang Logika Optik”** untuk memenuhi persyaratan pendidikan doktoral (S-3) di Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Aktuaria, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa terselesainya penyusunan disertasi ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis tidak lupa untuk mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M. Eng selaku promotor yang senantiasa memberikan banyak bantuan, bimbingan, wawasan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini dengan baik.
2. Ibu Dr. Melania Suweni Muntini, M.T., selaku co-promotor yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan banyak masukan dalam penyajian presentasi maupun penulisan laporan.
3. Prof. Dr. Moh Yasin, M.Si., Agus Muhammad Hatta, M.Si. Ph.D., dan Dr. Mashuri, M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritik, masukan, dan arahnya sehingga memperluas wawasan penulis.
4. Prof. Takeshi Hashishin selaku pembimbing saat penelitian di *Kumamoto University* yang memberikan banyak saran dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan publikasi
5. Orang tua tercinta, Bapak Agus Sugiarto dan Ibu Nur Hanifah yang selalu memberikan doa dan restunya kepada penulisan dalam menyelesaikan studi.
6. Dr. Gatut, Yudoyono, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana kepada penulis selama kuliah sampai terselesainya disertasi ini.
7. Seluruh Staf Pengajar dan Laboran di Jurusan Fisika FMIPA ITS, atas pendidikan, ilmu pengetahuan, bantuan dan motivasi yang telah diberikan.
8. Keluarga besar Bani Talha, yang selalu memberikan dukungan dan motivasi
9. Keluarga besar kos Gebang Wetan baik yang masih menetap maupun sudah alumni atas motivasi, dukungan, bantuan dan semangatnya
10. Teman seperjuangan sesama beasiswa PMDSU: Mbak Umi, Mbak Aini, Fitri, Dhesak, Nastiti yang saling memotivasi dan memberi semangat
11. Teman seperjuangan di laboratorium optik: Bu Nurma, Siddiq, Pak Putu, Pak Asnawi, Bu Tetti, Bu Yani, Mbak Erna, Mas Rohim, Pak Bustomi, Mas Jelang yang selalu memberikan motivasi dan semangat serta menemani penulis bekerja di laboratorium

12. Sahabat-sahabatku tercinta lainnya: Lastri, Titis, Putri, Tyas, Lelli, Melia, Ailin, Aida, Diah, April, Dwi, Sherry, Neni, Yuni, Umi, Nudia yang selalu memberikan semangat dan motivasi dimanapun berada.
13. Keluarga besar Perkumpulan Pelajar Indonesia Jepang Kumamoto (PPIJK) yang selalu memberikan dukungan saat penulis menjalankan kehidupan di Jepang
14. Teman-teman kolega di *Hashishin's Laboratory* yang telah membantu dan menemani penulis selama melakukan penelitian di *Kumamoto University*
15. Dr. Noguchi dan Kajiwara-san yang memberi ijin dan membantu penulis dalam penggunaan *Prism Coupler Apparatus* di *Chemical Engineering Kumamoto University*
16. Kemenristek Dikti yang telah memberikan beasiswa PMDSU kepada penulis selama studi S2-S3.

Penulis menyadari sepenuhnya atas keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, oleh karena itu penulis berharap akan menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan disertasi ini. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta memberikan inspirasi bagi pembaca untuk perkembangan yang lebih lanjut.

Surabaya, 9 Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxv</b>
<b>DAFTAR ISTILAH .....</b>	<b>xxvii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xxxv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan Penelitian .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Keterbaruan.....	6
1.5 Kontribusi Penelitian .....	10
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Pandu Gelombang Optik.....	13
2.2 Kristal Optik .....	14
2.3 Material Pandu Gelombang .....	16
2.4 Material Nonlinear Optik.....	16
2.5 Efek Nonlinear Optik.....	17
2.6 Tin (IV) Oksida.....	19
2.7 Desain Pandu Gelombang Mach-zehnder.....	20
2.8 Relasi Dispersi Pandu Gelombang .....	21
2.8.1 Metode Bagi Dua .....	24
2.9 Analisa Fungsi Gelombang Masukkan .....	26
2.9.1 Fungsi Gelombang Masukkan Linear .....	26
2.9.2 Fungsi Gelombang Masukkan Nonlinear .....	32



2.10	<i>Finite Difference Beam Propagation Method (FD-BPM)</i> .....	35
2.10.1	<i>Transparency Boundary Condition (TBC)</i> .....	37
2.10.2	Pemrograman dan Metode Tridiagonal .....	39
2.11	<i>Karakterisasi Pandu Gelombang</i> .....	42
2.12	Teori Moda Terkopel .....	44
2.13	Teori Moda Cabang Y .....	46
2.14	Metode Matrik Karakteristik Pandu Gelombang Lapis Jamak ..	47
2.15	Gerbang Logika dan Aplikasinya.....	53
<b>BAB 3</b>	<b>METODE FABRIKASI LAPISAN TIPIS .....</b>	<b>55</b>
3.1	Fabrikasi Lapisan Tipis .....	55
3.1.1	Preparasi Substrat .....	55
3.1.2	<i>Vacuum Evaporation Deposition</i> .....	56
3.1.3	Teknik Oksidasi Termal.....	57
3.2	Karakterisasi Material .....	59
3.2.1	Karakterisasi dengan <i>X-ray Diffractometer (XRD)</i> .....	59
3.2.2	Karakterisasi dengan <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	60
3.2.3	Karakterisasi dengan Mikroskop Optik .....	61
3.2.4	Karakterisasi dengan <i>Prism Coupler Apparatus</i> .....	62
3.2.5	Karakterisasi dengan Spektrofotometri.....	64
3.3	Pemodelan Pandu Gelombang .....	65
<b>BAB 4</b>	<b>KARAKTERISASI LAPISAN TIPIS TIN OXIDE .....</b>	<b>67</b>
4.1	Pendahuluan .....	67
4.2	Struktur Lapisan Tipis SnO <sub>2</sub> .....	67
4.3	Sifat Optik Lapisan Tipis SnO <sub>2</sub> .....	73
<b>BAB 5</b>	<b>PANDU GELOMBANG NONLINEAR.....</b>	<b>79</b>
5.1	Pendahuluan .....	79
5.2	Analisa Parameter Pandu Gelombang.....	79
5.2.1	Parameter Pandu Gelombang Berbahan SnO <sub>2</sub> .....	80
5.2.2	Parameter Pandu Gelombang Berbahan SnO <sub>2</sub> Hasil Fabrikasi .....	81

5.3 Analisa Penjalaran Gelombang dalam Pandu Gelombang.....	83
5.3.1 Pandu Gelombang Nonlinear struktur <i>Directional Coupler</i> Ganda Berbahan SnO <sub>2</sub> Literatur .....	83
5.3.2 Pandu Gelombang Nonlinear Struktur <i>Mach-Zehnder</i> Ganda Berbahan SnO <sub>2</sub> Literatur.....	92
5.3.3 Pandu Gelombang Nonlinear Struktur <i>Mach-Zehnder</i> Berbahan SnO <sub>2</sub> Hasil Fabrikasi.....	102
<b>BAB 6 KESIMPULAN .....</b>	<b>109</b>
6.1 Kesimpulan .....	109
6.2 Saran .....	110
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>111</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>121</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>131</b>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Bagan penelitian mengenai pandu gelombang optik nonlinear ...	6
Gambar 1.2 Bagan penelitian mengenai pandu gelombang optik nonlinear (lanjutan) .....	7
Gambar 2.1 Struktur Pandu Gelombang (a) Slab Dielektrik (b) Kanal .....	13
Gambar 2.2 Penghamburan cahaya dalam keramik polikristal karena ketidaksempurnaan struktur mikro .....	15
Gambar 2.3 (a) Serbuk SnO <sub>2</sub> (b). Stuktur Kristal SnO <sub>2</sub> .....	19
Gambar 2.4 Pandu Gelombang Mach Zehnder .....	21
Gambar 2.5 Arah medan listrik dan medan magnet cahaya sesuai dengan hukum Fresnel .....	21
Gambar 2.6 Pemantulan internal muka fase dari sinar yang terpandu pada pandu gelombang .....	23
Gambar 2.7 Langkah iterasi metode bagi dua.....	25
Gambar 2.8 Profil indeks bias pandu gelombang .....	29
Gambar 2.9 Ketebalan efektif pada pandu gelombang .....	31
Gambar 2.10 Penyamplingan pandu gelombang dengan FDBPM .....	37
Gambar 2.11 Posisi batas integrasi pada perhitungan daya keluaran .....	43
Gambar 2.12 Pandu Gelombang Lapis Jamak Lateral DC .....	48
Gambar 3.1 Diagram alir fabrikasi lapisan tipis SnO <sub>2</sub> .....	55
Gambar 3.2 Set alat <i>Vacuum evaporation</i> VPC-260 yang berada di Universitas Kumamoto, Jepang.....	57
Gambar 3.3 Skema alat pada <i>Vacuum evaporation</i> deposition .....	57
Gambar 3.4 Tahapan kalsinasi teknik oksida termal lapisan tipis SnO <sub>2</sub> .....	58
Gambar 3.5 Perangkat SEM di Universitas Kumamoto .....	61
Gambar 3.6 Perangkat Mikroskop Optik di Universitas Kumamoto .....	62
Gambar 3.7 Perangkat Prism Coupler Apparatus di Universitas Kumamoto ..	63
Gambar 3.8 Perangkat prisma kopling (a) saat pengukuran dan (b) prinsip kerjanya .....	63
Gambar 3.9 Spektrophotometri cahaya tampak tipe N2S .....	64
Gambar 3.10 Bagan peletakan sampel lapisan tipis pada spektrophotometri ..	65

Gambar 4.1 Pola difraksi XRD lapisan tipis pada suhu sintering 200-1000°C dan pola data ICDD dari Sn (grafik batang biru), SnO (grafik batang merah), dan SnO <sub>2</sub> (grafik batang hitam) .....	68
Gambar 4.2 Hubungan suhu dan ukuran kristal pada lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada suhu sintering 600-1000°C .....	69
Gambar 4.3 Parameter kisi (a) sumbu-a dan (b) sumbu-c dibandingkan dengan volume kisi pada setiap suhu sintering.....	71
Gambar 4.4 Morfologi permukaan lapisan tipis dari observasi SEM (gambar kecil) dan OM (gambar besar) pada suhu sintering (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C, (d) 900°C and (e) 1000°C .....	72
Gambar 4.5 Fraksi pori di permukaan lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu sintering .....	73
Gambar 4.6 Perbandingan ukuran kristal dan ukuran partikel pada lapisan tipis SnO <sub>2</sub> setelah proses sintering.....	73
Gambar 4.7 Indeks bias lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu sintering .....	74
Gambar 4.8 Spektrum transmitansi optik lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu sintering.....	76
Gambar 4.9 Spektrum absorbansi lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu Sintering.....	76
Gambar 4.10 Regangan kisi mutlak dibandingkan dengan puncak spektrum energi Urbach dari lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu sintering .....	77
Gambar 5.1 Relasi dispersi pada desain pandu gelombang berbahan SnO <sub>2</sub> literatur.....	81
Gambar 5.2. Relasi dispersi pada desain pandu gelombang berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi .....	82
Gambar 5.3 Struktur pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur.....	83
Gambar 5.4 Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur .....	85
Gambar 5.5 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika AND	

ketika daya masukkan $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dimatikan .....	86
Gambar 5.6 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukkan $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan .....	86
Gambar 5.7. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukkan $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan .....	87
Gambar 5.8. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukkan $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dinyalakan .....	87
Gambar 5.9. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dimatikan.....	88
Gambar 5.10. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan .....	88
Gambar 5.11. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan .....	89
Gambar 5.12. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan $\text{SnO}_2$ literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dinyalakan .....	89

Gambar 5.13. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dimatikan .....	90
Gambar 5.14. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan.....	91
Gambar 5.15. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan.....	91
Gambar 5.16. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dinyalakan.....	91
Gambar 5.17. Struktur pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur.....	93
Gambar 5.18. Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur saat kedua port kontrol dimatikan .....	94
Gambar 5.19. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$ dan kedua port kontrol dimatikan .....	95
Gambar 5.20. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan.....	95
Gambar 5.21. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol	

(port 3) dinyalakan .....	96
Gambar 5.22. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 18.1 W/m <sup>2</sup> dan kedua port kontrol dihidupkan ...	96
Gambar 5.23. Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur saat salah satu port kontrol dinyalakan .....	97
Gambar 5.24. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 15 W/m <sup>2</sup> dan kedua port kontrol dimatikan.....	98
Gambar 5.25. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 15 W/m <sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan .....	98
Gambar 5.26. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 15 W/m <sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan .....	99
Gambar 5.27. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 15 W/m <sup>2</sup> dan kedua port dinyalakan .....	99
Gambar 5.28. Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur saat kedua port kontrol dinyalakan .....	100
Gambar 5.29. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukkan P <sub>2</sub> = 18.7 W/m <sup>2</sup> dan kedua port kontrol dimatikan.....	101



Gambar 5.30. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukkan $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan.....	101
Gambar 5.31. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukkan $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan.....	101
Gambar 5.32. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukkan $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$ dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan.....	102
Gambar 5.33 Struktur pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi.....	103
Gambar 5.34. Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur Mach-zehnder berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi saat salah satu port kontrol diberikan .....	104
Gambar 5.35 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika kedua port kontrol dimatikan.....	105
Gambar 5.36 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan .....	106
Gambar 5.37 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan .....	106
Gambar 5.38 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika kedua port kontrol dihidupkan.....	106

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Beberapa penelitian mengenai fabrikasi lapisan tipis SnO <sub>2</sub> .....	8
Tabel 2.1 Nilai koefisien bahan nonlinear dan respon panjang gelombang ...	17
Tabel 2.2 Karakteristik SnO <sub>2</sub> .....	19
Tabel 2.3 Tabel kebenaran gerbang logika .....	53
Tabel 4.1 Data hasil perhitungan parameter kisi lapisan tipis SnO <sub>2</sub> pada setiap suhu sintering.....	70
Tabel 5.1 Parameter Material Pandu Gelombang berbahan SnO <sub>2</sub> literatur .....	81
Tabel 5.2 Parameter Material Pandu Gelombang berbahan SnO <sub>2</sub> hasil fabrikasi.....	82
Tabel 5.3. Parameter pandu gelombang nonlinear berstruktur <i>directional</i> <i>coupler</i> ganda.....	84
Tabel 5.4. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear DC ganda dengan operasi gerbang logika AND ketika daya masukkan $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$ .....	87
Tabel 5.5. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear DC ganda dengan operasi gerbang logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 1,6 \text{ W/m}^2$ .....	89
Tabel 5.6. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear DC ganda dengan operasi gerbang logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$ .....	92
Tabel 5.7. Parameter pandu gelombang nonlinear berstruktur <i>directional</i> <i>coupler</i> ganda .....	93
Tabel 5.8. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear MZ dengan operasi gerbang logika OR ketika daya masukkan $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$ .....	96
Tabel 5.9. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear MZ dengan operasi gerbang logika XNOR ketika daya masukkan $P_2 = 15 \text{ W/m}^2$ .....	99
Tabel 5.10. Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang nonlinear DC ganda dengan operasi gerbang logika	

NAND ketika daya masukkan $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$ .....	102
Tabel 5.11 Parameter pandu gelombang nonlinear berbasis Mach-zehnder berbahan $\text{SnO}_2$ hasil fabrikasi .....	103
Tabel 5.12 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu struktur MZ berbahan $\text{SnO}_2$ hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR.....	107
Tabel 5.13. Komparasi hasil penelitian dengan referensi.....	107

## DAFTAR ISTILAH

Absorbansi	: Suatu polarisasi cahaya yang terserap oleh bahan atau komponen kimia tertentu pada panjang gelombang tertentu
Amorf	: Bentuk padatan yang bukan kristalin dan tidak memiliki keteraturan kisinya
Amplifier	: Komponen yang dipakai untuk menguatkan daya
Amplitudo	: Pengukuran skalar yang nonnegatif dari besar osilasi suatu gelombang
Anisotropik	: Keadaan yang memperlihatkan sifat berbeda, seperti kecepatan transmisi cahaya dalam arah yang berbeda
Anoda	: Elektroda berkutub negatif pada sel elektroimia
Arus Listrik	: Banyaknya muatan listrik yang mengalir dari suatu titik yang berpotensi tinggi ke titik yang berpotensi rendah dalam waktu satu detik
Bandgap	: Lebar celah energi diantara pita valensi dan pita konduksi pada semikonduktor
Bandwith	: Luas atau lebar cakupan frekuensi yang digunakan oleh sinyal dalam medium transmisi
Coupling	: Ketergantungan antar modul satu dengan modul lainnya
Daya Optik	: Besaran daya yang dapat merepresentasikan sifat koheren/fokus dari sinar optik
Deformasi material	: Perubahan bentuk, dimensi dan posisi dari suatu material, khususnya pada kristal akibat beban/gaya
Densitas	: Suatu besaran kerapatan massa benda yang dinyatakan dalam berat benda per satuan volume benda tersebut
Deposisi	: Metode pelapisan pada substrat
Dielektrik	: Sejenis bahan Isolator listrik yang dapat dikutubkan oleh medan listrik
Difraksi	: Kecenderungan gelombang yang dipancarkan dari sumber melewati celah yang terbatas untuk menyebar ketika merambat
Difusi	: Peristiwa mengalirnya/berpindahannya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah
Dioda	: Komponen aktif dua kutub yang memperbolehkan arus listrik mengalir ke satu arah dan menghambat arus dari arah sebaliknya
<i>Directional Coupler</i>	: Struktur pandu gelombang yang meng-couple sebagian dari pandu gelombang satu ke pandu gelombang lainnya

Diskontinuitas	: Ketidaksinambungan
Dispersi	: Peristiwa penguraian cahaya polikromatik (putih) menjadi cahaya-cahaya monokromatik pada prisma lewat pembiasan atau pembelokan
Doping	: Proses yang bertujuan menambah ketidakmurnian kepada semikonduktor sangat murni dalam rangka mengubah sifat listriknya
Persamaan Eigen	: Seperangkat skalar khusus yang terkait dengan sistem persamaan linear dan juga dikenal sebagai nilai karakteristik
Efek Kerr	: Perubahan dalam indeks bias material sebagai respon terhadap medan listrik yang diterapkan
Eksitasi	: Perpindahan elektron dari kondisi energi terendah / keadaan dasar ke salah satu energi yang lebih tinggi / keadaan tereksitasi
Eksplisit	: Tegas, gamblang, tidak tersembunyi
Extinction Ratio	: Perbandingan dua tingkat daya optik keluaran dari pandu gelombang
Elektroda	: Konduktor yang dilalui arus listrik dari satu media ke yang lain
Elektron	: Partikel subatom yang bermuatan negatif
Evaporation	: Proses perubahan molekul di dalam keadaan cair dengan spontan menjadi gas
Fabrikasi	: Suatu proses produksi logam yang meliputi antara lain rekayasa, pemotongan, pembentukan, penyambungan, perakitan atau pengerjaan akhir
Fasa	: Sejumlah zat yang homogen baik secara kimia maupun fisika
Fase	: Tingkatan masa berupa perubahan, perkembangan, dan sebagainya
<i>Fiber Optic</i>	: Saluran transmisi atau sejenis kabel yang terbuat dari kaca atau plastik yang sangat halus dan lebih kecil dari sehelai rambut, dan dapat digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain
<i>Film</i>	: Lapisan tipis
Foton	: Partikel elementer dalam fenomena elektromagnetik
Furnace	: Sebuah perangkat yang digunakan untuk pemanasan
Gelombang Elektromagnetik	: Kombinasi medan listrik dan medan magnet yang berosilasi dan merambat melewati ruang dan membawa energi dari satu tempat ke tempat yang lain
Homogen	: Memiliki sifat, tingkah laku dan karakteristik yang sama

Ikatan Ion	: Suatu ikatan yang terjadi pada atom yang mempunyai muatan yang besarnya sama namun memiliki muatan yang berlawanan tanda
Ikatan Kovalen	: Stabilitas tarikan dan tolakan yang terbentuk di antara atom-atom ketika mempergunakan bersama electron
Indeks Bias	: Perbandingan antara kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara dengan cepat rambat cahaya pada suatu medium
<i>Integrated Optic</i> / Optika terintegrasi	: Rangkaian yang terdiri dari beberapa komponen optik untuk mengolah sinyal optik
Interferensi	: Interaksi antar gelombang di dalam suatu daerah
Isotropik	: Zat yang memiliki sifat fisik yang sama di segala arah dari suatu zat
Kaca Kuarsa	: Besaran yang memiliki nilai sama jika terukur dari berbagai arah
Kalsinasi	: Proses pemanasan, penghilangan kandungan air, karbon dioksida atau gas lain yang mempunyai ikatan kimia dengan materi pada temperatur tinggi di bawah titik leleh dari zat penyusun materi
Karakterisasi	: Perwatakan yang bersifat khas
Kisi	: Sebuah susunan dari sejumlah besar celah sejajar yang lebar
Klading	: Pelapis atau penutup suatu struktur atau material
Kohesif	: Melekat satu dengan yang lain; padu; berlekatan
Komposit	: Jenis bahan yang terdiri dari dua atau lebih bahan dimana sifat masing-masing bahan berbeda satu sama lainnya baik itu sifat kimia maupun fisiknya dan tetap terpisah dalam hasil akhir bahan tersebut
Konduktivitas	: Ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik
Kopling	: Alat yang digunakan untuk menghubungkan dua poros pada kedua ujungnya dengan tujuan untuk mentransmisikan daya mekanis
Kover	: Membuat laporan secara terperinci tentang suatu kejadian atau peristiwa
Kristal	: Suatu padatan yang atom, molekul, atau ion penyusunnya terkemas secara teratur dan polanya berulang melebar secara tiga dimensi
Kristalografi	: Ilmu yang mempelajari tentang sifat-sifat geometri dari kristal terutama perkembangan, pertumbuhan, kenampakan bentuk luar, struktur dalam (internal) dan sifat-sifat fisis lainnya
Lapisan Dipol	: Lapisan yang memiliki kutub positif ( $\delta+$ ) di satu sisi, dan kutub negatif ( $\delta-$ ) di sisi yang lain

Latensi	: Jeda waktu yang dibutuhkan dalam pengantaran data dari pengirim ke penerima
<i>Lattice Strain</i>	: Pengukuran dari penyebaran parameter kisi yang menunjukkan kecacatan pada kristal
Longitudinal	: Metode penelitian yang didasarkan pada masa tertentu yang relatif lama untuk mengetahui karakter tertentu
Massa Molar	: Massa satu mol suatu zat
Modulasi	: Proses perubahan suatu gelombang periodik sehingga menjadikan suatu sinyal mampu membawa suatu informasi
Molekul	: Sekumpulan atau sekelompok atom yang saling berikatan satu sama lainnya dengan sangat kuat atau kovalen, bermuatan netral dan dalam susunan tertentu serta cukup stabil
Morfologi	: Ilmu yang mempelajari tentang bentuk organisme yang mencakup bagian-bagiannya
Muatan	: Muatan dasar yang dimiliki suatu benda, yang membuatnya mengalami gaya pada benda lain yang berdekatan dan juga memiliki muatan listrik
Multiplexing	: Teknik menggabungkan beberapa sinyal untuk dikirimkan secara bersamaan pada suatu kanal transmisi
Nano	: Awalan dalam sistem metrik yang berarti sepermilyar
<i>Nanosphere</i>	: Suatu partikel matriks dimana seluruh massa padat dan molekul dapat teradsorpsi pada permukaan bola atau dienkapsulasi dalam partikel
Nonlinear	: Sistem yang tidak linier yakni sistem yang tidak memenuhi prinsip superposisi
Nonlinearitas	: Suatu karakteristik yang dimiliki oleh sensor dan dinyatakan dengan suatu grafik yang lurus
Non-stoikiometri	: Reaksi yang apabila reaktannya tidak habis dalam reaksi tersebut, melainkan masih bersisa
Oksidasi	: Interaksi antara molekul oksigen dan semua zat yang berbeda
Optoelektronika	: Cabang ilmu yang mengkaji peralatan elektronik yang berhubungan dengan cahaya dan dianggap juga sebagai sub-bidang dari fotonika
Organosol	: Suatu bahan padatan yang didominasi oleh material organik
Osilasi	: Variasi periodik terhadap waktu dari suatu hasil pengukuran
Pandu Gelombang Slab	: Sebuah medium yang digunakan untuk memandu gelombang, seperti gelombang elektromagnetik atau gelombang suara

Parametrik	: Parameter dari distribusi data populasi yang digunakan untuk menguji hipotesis mendekati normal atau mendekati distribusi normal setelah teorema limit sentral
Pelet	: Partikel kecil yang berbentuk silinder
Permeabilitas	: Kemampuan yang dimiliki oleh suatu zat / membran untuk meloloskan sejumlah partikel yang menembus atau melaluinya
Permitivitas	: Besaran yang menggambarkan bagaimana medan listrik mempengaruhi dan dipengaruhi oleh suatu medium dielektrik untuk terpolarisasi sebagai respons dari medan tersebut
Pertubasi/perturbed	: Gangguan kecil pada sistem fisik
Pita Valensi	: Pita energi yang mungkin diisi oleh elektron dari zat padat hingga komplit
Polarisasi	: Properti yang berlaku untuk gelombang transversal yang menentukan orientasi geometri dari osilasi
Polaritas	: Pemisahan muatan listrik yang mengarah pada molekul atau gugus kimia yang memiliki momen listrik dipol atau multipol
Polimer	: Rantai berulang dari atom yang panjang, terbentuk dari pengikat yang berupa molekul identik yang disebut monomer
Propagasi	: Perambatan gelombang pada media perambatan
Radiasi	: Pancaran energi melalui suatu materi atau ruang dalam bentuk panas, partikel atau gelombang elektromagnetik / cahaya dari sumber radiasi
<i>RF sputtering</i>	: Teknik yang digunakan untuk membuat lapisan tipis, seperti yang ditemukan di komputer dan industri semikonduktor
Rugi-rugi daya	: Berkurangnya pasokan daya
Self trapping	: Salah satu sifat dari gelombang soliton yang didapatkan dari penjalaran gelombang dalam bahan nonlinear
<i>Self-Focusing</i>	: Proses optik non-linear yang disebabkan oleh perubahan indeks bias bahan yang terpapar radiasi elektromagnetik yang kuat
<i>Self-Routing</i>	: Konektor yang dapat mengatur sakelar sendiri untuk mewujudkan pemetaan satu per satu dari inputnya ke outputnya
Semikonduktor	: Sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara insulator dan konduktor
<i>Sensing</i> /rangsangan	: Sifat sensor untuk mendeteksi rangsangan akibat perubahan keadaan baik secara fisika maupun kimia
Sinar	: Sesuatu yang membuat terang secara langsung



Sintering	: Pemanasan material / bahan dengan cara memanaskannya tidak sampai melampaui titik lelehnya
<i>Sol gel</i>	: Proses pembentukan senyawa anorganik melalui reaksi kimia dalam larutan pada suhu rendah, dimana dalam Proses tersebut terjadi perubahan fasa dari suspensi koloid (sol) membentuk fasa cair kontinyu (gel)
Solar Sel	: Suatu komponen yang dapat digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip yang disebut efek photovoltaic
Soliton	: Gelombang soliter berupa sebuah paket gelombang atau pulsa yang mempertahankan bentuknya sementara ia menjalar pada kecepatan konstan
Spasial	: Berkenaan dengan ruang atau tempat
Spektrum	: Sebuah keadaan atau harga yang tidak terbatas hanya pada suatu set harga saja tetapi dapat berubah secara tak terbatas di dalam sebuah kontinum
<i>Spray Pyrolysis</i>	: Salah satu teknik penting untuk mensintesis bahan nano dan melapisi substrat dengan lapisan film tipis
Stasioner	: Tetap; tidak berubah; ajek tentang jumlah, nilai, ukuran, posisi, dan sebagainya
Substrat	: Suatu molekul yang menjadi sasaran aksi enzim
Suseptibilitas	: Tingkat kemagnetan suatu benda untuk termagnetisasi, yang pada umumnya erat kaitannya dengan kandungan mineral dan oksida besi
<i>Switching</i>	: Sistem elektronik yang dapat dipakai untuk menghubungkan jalur komunikasi atau penyambung arus
Tensor	: Besaran yang merupakan perluasan dari vektor, seperti halnya vektor merupakan perluasan dari besaran skalar
Timah Oksida	: Senyawa anorganik dengan rumus $\text{SnO}_2$ yang merupakan bahan baku paling penting dalam industri timah
Timah/Tin	: Sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Sn
Transformasi	: Perubahan rupa dari bentuk, sifat, fungsi, dan sebagainya
Transistor	: Alat semikonduktor yang dipakai sebagai penguat, sebagai sirkuit pemutus dan penyambung arus (switching), stabilisasi tegangan, dan modulasi sinyal
Translasi Ion	: Pergeseran ion

- Transmitansi : Prosentasi cahaya yang diteruskan melalui suatu material
- Transversal : Gelombang yang arah rambatannya tegak lurus dengan arah getarannya
- Vacuum* : Hampa udara

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$A$	Absorbansi	a.u.
$B$	Medan Magnet	Tesla
$\vec{D}$	Vektor pergeseran listrik	C/m <sup>2</sup>
$D$	Ukuran kristal	m
$d_{eff}$	Ketebalan efektif pandu gelombang	m
$D_{obs}$	Jarak antar atom hasil observasi menggunakan pengamatan XRD	m
$E$	Medan Listrik	N/C
$\vec{H}$	Vektor Instensitas Magnet	At/m
$k$	Bilangan gelombang untuk lapisan film	m <sup>-1</sup>
$\kappa$	Koefisien Kopling	-
$k_0$	Bilangan gelombang ruang hampa	m <sup>-1</sup>
$Lc$	Panjang Kopling	m
$N$	Nilai indeks bias efektif	-
$P$	Polarisasi	C/m <sup>2</sup>
$R_{ex}$	Extintion Ratio	dB
$T$	Transmitansi	%
$\alpha$	Koefisien nonlinear untuk material nonlinear bertipe Kerr	m <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>
$\beta$	Tetapan Propagansi Sinar	m <sup>-1</sup>
$\beta_{x-ray}$	Full Width at Half Maximum (FWHM)	radian
$\varepsilon$	Permitivitas Ruang Hampa	F/m
$\varepsilon_k$	Regangan kisi	-
$\eta$	Efisiensi dari daya optik keluaran pandu gelombang	%
$\lambda$	Panjang Gelombang	m
$\mu$	Permeabilitas	H/m
$\rho$	Densitas Material	Kg/m <sup>3</sup>
$\chi$	Susepbilitas medium	esu
$\gamma_k$	Lapisan Substrat dan Kover	m <sup>-1</sup>
$\gamma_s$	Bilangan gelombang	m <sup>-1</sup>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Timah merupakan salah satu sumber daya tambang terbesar di Indonesia. Indonesia telah menjadi negara penghasil timah terbesar kedua di dunia dengan menghasilkan sekitar 83.000ton atau sekitar 26,77% dari total produksi timah di dunia pada tahun 2018. Akan tetapi, sebagian besar hasil tersebut diekspor sebagai bahan mentah berupa timah batangan (Salim, 2015). Sisanya sekitar 52% hanya diolah sebagai kawat timah untuk bahan solder (Kemenperin, 2009). Padahal jika mengacu pada data investing, harga timah batangan juga mengalami penurunan sekitar 0,26% dari bulan September 2019 lalu. (CNBC Indonesia, 2019). Salah satu solusi dalam mengatasi masalah tersebut adalah dengan mengolah timah untuk meningkatkan nilai ekonomis dan nilai kegunaannya.

Salah satu olahan timah yang cukup berpotensi adalah oksida timah ( $\text{SnO}_2$ ).  $\text{SnO}_2$  dikenal memiliki aplikasi yang cukup beragam seperti bahan sensor gas (Hashishin, 2009), bahan anoda baterai litium (Zhao, 2015) bahan laser (Siddiq, 2018) dan banyak lainnya. Aplikasi ini, tidak lepas dari keunggulan dari sifat material  $\text{SnO}_2$  yakni memiliki indeks bias tinggi (2,006-2,486), transparansi tinggi (43,8-75% pada daerah cahaya tampak), konduktivitas tinggi ( $\sim 10^3 \Omega \text{ cm}^{-1}$ ), dan *bandgap* lebar ( $\geq 3,6\text{eV}$ ). (Abdelkrim, 2016; Rahal, 2015; Sakhare, 2013; Uysal, 2015).

$\text{SnO}_2$  juga berpotensi untuk digunakan dalam aplikasi optoelektronika khususnya sebagai material nonlinear optik. Permukaan lapisan tipis  $\text{SnO}_2$  dapat membentuk lapisan dipol dan meningkatkan efek polaritas dan meningkatkan efek nonlinearitas. Sebagai bahan nonlinear optik,  $\text{SnO}_2$  memiliki nilai suseptibilitas nonlinear orde ketiga ( $\chi^{(3)}$ ) sebesar  $1,8 \times 10^{-10}$  esu dengan respon panjang gelombang  $1,06 \mu\text{m}$  (Wu, 1997). Hasil ini lebih besar daripada kenonlinearan material lain yang sudah banyak digunakan, seperti  $\text{LiNbO}_3$ , semikonduktor MQW (*Multi Quantum Well*), *Liquid Crystal* MBBA (p-methoxy-benzylidene p-n-butylaniline), *Nematik Liquid Crystal* PCH-5 (Pentylcyclohexil benzonitrile)

(Cotter, 1992). Sebagai bahan semikonduktor, SnO<sub>2</sub> berpotensi memiliki waktu lebih cepat daripada material nonlinear optik orde ketiga lainnya hingga pikodetik. Waktu latensi ini merupakan waktu saat sinyal berada di dalam perangkat optik hingga sinyal keluaran didapatkan (Miyata, 1992).

Material nonlinear optik sudah banyak digunakan aplikasi perangkat optoelektronik seperti pemrosesan sinyal optik, komputer optik, sakelar ultra cepat, laser pulsa ultra pendek, sensor, pembangkit laser dan banyak yang lainnya (Abdeldayem, 2008). Material ini sangat berpotensi diaplikasikan untuk *switching* optik yang ultra cepat. Proses *switching* tersebut memiliki kecepatan terabit per detik apabila menggunakan kecepatan rekombinasi dan interaksi dari foton dengan menggunakan bahan nonlinear (Al-hemyari, 1992).

Pada material nonlinear optik orde ketiga, perubahan indeks bias akibat pemberian medan optik berintensitas tinggi dapat menyebabkan efek *self-focusing* atau *self-routing* pada medan optik tersebut (Berakdar, 2010). Sifat ini sangat bermanfaat dalam aplikasi pandu gelombang optik. Pandu gelombang optik merupakan bagian penting dalam perangkat optika terpadu dengan berbagai peranan seperti pembagi daya optik (Daniyati, 2015), pengkombinasi daya optik (Bernard, 2019), saklar optik (Pramono, 1999), sebagai gerbang logika optik (Ghadi, 2011) dan lain-lain bergantung pada strukturnya. Struktur pandu gelombang tersebut antara lain struktur X-silang, cabang Y asimetri (Pramono, 2000), *Directional coupler* (Kalonakis, 2005), *microring* (Jalil, 2011), dan Mach-zehnder (Wu, 2010). Struktur *directional coupler* merupakan struktur pandu gelombang paling sederhana dan sangat cocok sebagai langkah awal pembelajaran mengenai pandu gelombang nonlinear. Struktur ini juga digunakan untuk menginvestigasi pandu gelombang nonlinear berbasis SnO<sub>2</sub> dalam disertasi ini

Pengembangan struktur pandu gelombang tersebut dilakukan dengan menganalisa penjalaran gelombang didalamnya menggunakan metode pemodelan dalam proses penyelesaian persamaan gelombang dengan bantuan komputasi. Salah satu alternatif yang digunakan dalam menyelesaikan persamaan gelombang tersebut adalah melalui pendekatan *finite difference*. Pendekatan yang dilakukan untuk menganalisa penjalaran gelombang ini disebut dengan *Finite Difference Beam Propagation Method* (FD-BPM) yang dikenalkan pertama kali oleh Chung

dan Dagli (Chung, 1990). Telah dilaporkan bahwa waktu komputasi setiap langkah propagasi gelombang pada FD-BPM dari pada FFT-BPM (Yokota, 1995). Selain itu, FFT-BPM membutuhkan lebih banyak langkah propagasi dan grid transversal dari pada FD-BPM untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam analisa pandu gelombang *step-index* (Thylen, 1983). Hal ini mengindikasikan bahwa FD-BPM merupakan metode analisa yang lebih stabil dan efisien. Seiring dengan perkembangan teknologi, beberapa metode pemodelan lain bermunculan diantaranya *Finite Difference Time Domain* (FDTD) dengan menggunakan perangkat lunak *CST Suite Studio* dan *Finite Element* (FE) dengan menggunakan perangkat lunak *COMSOL*. Akan tetapi, metode FDTD membutuhkan waktu komputasi lebih lama (Rycroft, 1996) sedangkan FE membutuhkan memori komputasi lebih besar (Benson, 2004) jika dibandingkan FD-BPM.

Disertasi ini juga menggunakan struktur pandu gelombang *Mach Zehnder*. Penggunaan struktur Mach-Zehnder memiliki potensi untuk mengurangi penyebaran optik pada pandu gelombang dan kehilangan radiasi seperti yang dialami dengan penggunaan struktur pandu gelombang S dan Y. Kelebihan perangkat dengan struktur ini adalah juga memiliki bandwidth yang baik, ukuran lebih kecil, toleransi terhadap fabrikasi yang tinggi serta keseimbangan daya yang baik (Hanim, 2014). Struktur ini memiliki performansi lebih baik dalam hal sensitivitas terhadap panjang gelombang dan temperatur daripada struktur *Microring Resonator* (Ding, 2015). Struktur pandu gelombang *Mach Zehnder* didasarkan ini didasarkan oleh prinsip *Mach-Zehnder Interferometri* (MZI). Pada MZI tidak terjadi modulasi intensitas dan fasa karena jalur keluaran dan masukan yang terpisah. Selain itu, gelombang interferensi memiliki jalur yang paralel, sehingga tidak saling mengganggu satu sama lain. (Shamir, 1999). *Nonlinear Mach Zehnder Interferometri* (NMZI) telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi perangkat optik diantaranya *multiplexing* dan modulasi (Hanim, 2014), *Switching* (Medhekar, 2009), *amplifier* (Srivastava, 2012) dan paling banyak dilakukan adalah untuk aplikasi gerbang logika (Ding, 2015; Gupta, 2016; Kumar, 2016).

Struktur pandu gelombang pada disertasi ini digunakan untuk aplikasi gerbang logika optik. Gerbang logika elektrik memiliki kekurangan ketika digunakan dalam sistem optik karena dibutuhkan konversi optik – elektrik dan



elektrik – optik sehingga kecepatan pemrosesan dan kapasitasnya menjadi berkurang (Li, 2005). Gerbang logika berbasis optik dapat menjadi solusi efektif, yakni dengan mengontrol jalur perambatan cahaya pada pandu gelombang optik melalui pemberian cahaya di jalur lain maka gerbang logika dengan fungsi tertentu dapat direalisasikan. Gerbang logika optik dalam disertasi ini dapat dimunculkan dalam struktur *Directional coupler* dan Mach-zehnder.

SnO<sub>2</sub> dalam bentuk lapisan tipis lebih mudah digunakan baik dalam karakterisasi sifat material maupun dalam penggunaan material sebagai aplikasi perangkat optik. Oleh karena itu, penelitian mengenai lapisan tipis SnO<sub>2</sub> telah dilakukan pada disertasi ini. Lapisan tipis SnO<sub>2</sub> difabrikasi dari kawat timah murni dan dideposisi menggunakan metode *vacuum evaporation* di atas kaca kuarsa. Kawat timah dan kaca kuarsa dipilih karena masing-masing memiliki harga yang relatif murah dan tahan terhadap suhu tinggi. Sedangkan, metode *vacuum evaporation* dipilih karena metode ini merupakan metode paling sederhana untuk mendapatkan lapisan tipis yang memiliki permukaan homogen dan rata. Akan tetapi proses mengubah timah menjadi SnO<sub>2</sub> dengan menggunakan suhu tinggi menyebabkan ketidakberaturan dan pori-pori pada permukaan lapisan. Hal ini karena partikel timah akan membentuk *nanosphere* pada suhu tinggi, ketidakberaturan lapisan terjadi karena pemisahan pada *nanosphere* tersebut (Laghrib, 2010). Apabila diaplikasikan untuk pandu gelombang, ketidakberaturan dan pori-pori ini sangat berpengaruh terhadap penjalaran gelombang dan dapat menyebabkan loss penjalaran yang cukup besar akibat penghamburan gelombang cahaya didalamnya. Oleh karena itu, pada disertasi juga diperkenalkan teknik oksidasi termal dengan tiga tahap temperatur untuk mengurangi ketidakberaturan permukaan lapisan tipis SnO<sub>2</sub> tersebut.

Studi awal pandu gelombang dilakukan menganalisa parameter pandu gelombang untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Dalam penelitian ini, analisa dilakukan dengan metode pemodelan FD-BPM untuk mengobservasi propagansi gelombang pada struktur pandu gelombang. Pemodelan pandu gelombang berbasis SnO<sub>2</sub> dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis material yakni parameter material SnO<sub>2</sub> yang diambil dari penelitian sebelumnya (Wu, 1997) dan parameter material SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi yang telah dilakukan.

## 1.2 Permasalahan Penelitian

Permasalahan yang mendasari penelitian ini adalah sebagai berikut:

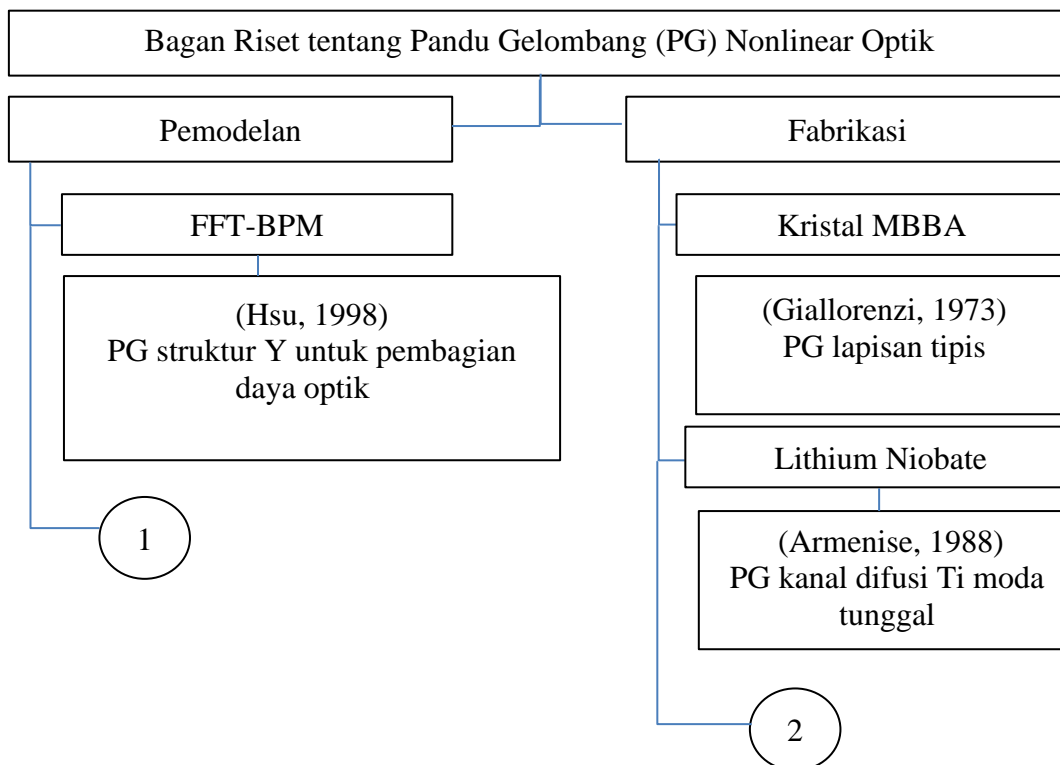
1. Lapisan tipis harus memiliki permukaan dengan kualitas yang tinggi dan halus agar dapat dimanfaatkan dalam perangkat optik dengan performansi baik. Sedangkan, telah banyak pada penelitian-penelitian sebelumnya (Aziz, 2013; Chetri, 2013; Gordillo, 1994; Lotfi, 2016; Rahal, 2015; Sakhare, 2013; Uysal, 2015) yang menyatakan bahwa lapisan tipis SnO<sub>2</sub> memiliki potensi untuk diaplikasikan dalam aplikasi optoelektronika. Akan tetapi, pembahasan mengenai karakteristik optik terutama mengenai indeks bias lapisan masih kurang dimunculkan dalam penelitian-penelitian tersebut. Oleh karena itu, disertasi ini akan membahas mengenai bagaimana cara menfabrikasi dan mengkarakterisasi sifat lapisan tipis SnO<sub>2</sub> terutama pada sifat optiknya.
2. Langkah awal dalam pembelajaran mengenai material nonlinear dapat dilakukan dengan menggunakan struktur *directional coupler* dimana struktur ini merupakan struktur pandu gelombang paling sederhana (Sun, 2010). Pembelajaran mengenai pandu *directional coupler* berbahan nonlinear juga telah banyak dilakukan untuk aplikasi gerbang logika optik (Ghadi, 2011; Kalonakis, 2005; Fraga, 2006). Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menggunakan parameter SnO<sub>2</sub> sebagai bahan nonlinearnya. Oleh karena itu, disertasi membahas mengenai analisa pandu gelombang berbasis *directional coupler* berbahan material nonlinear SnO<sub>2</sub> untuk aplikasi gerbang logika optik
3. Penggunaan material nonlinear optik dalam pandu gelombang Mach-zehnder dari penelitian-penelitian sebelumnya (Pramono, 2000; Wu, 2008; Yabu, 2002). Akan tetapi belum ada yang memasukkan parameter SnO<sub>2</sub> sebagai material pandu gelombang berbasis nonlinear optik. Pandu gelombang pada penelitian dalam disertasi ini tersebut juga hanya menempatkan material nonlinear di beberapa bagian pandu gelombang, selain itu aplikasi gerbang logika dimunculkan dengan mengganti struktur material. Oleh karena itu, pada penelitian ini perlu dibahas mengenai analisa pandu gelombang yang seluruh bagian pandunya berbahan nonlinear optik SnO<sub>2</sub> untuk berbagai operasi gerbang logika optik

### 1.3 Tujuan Penelitian

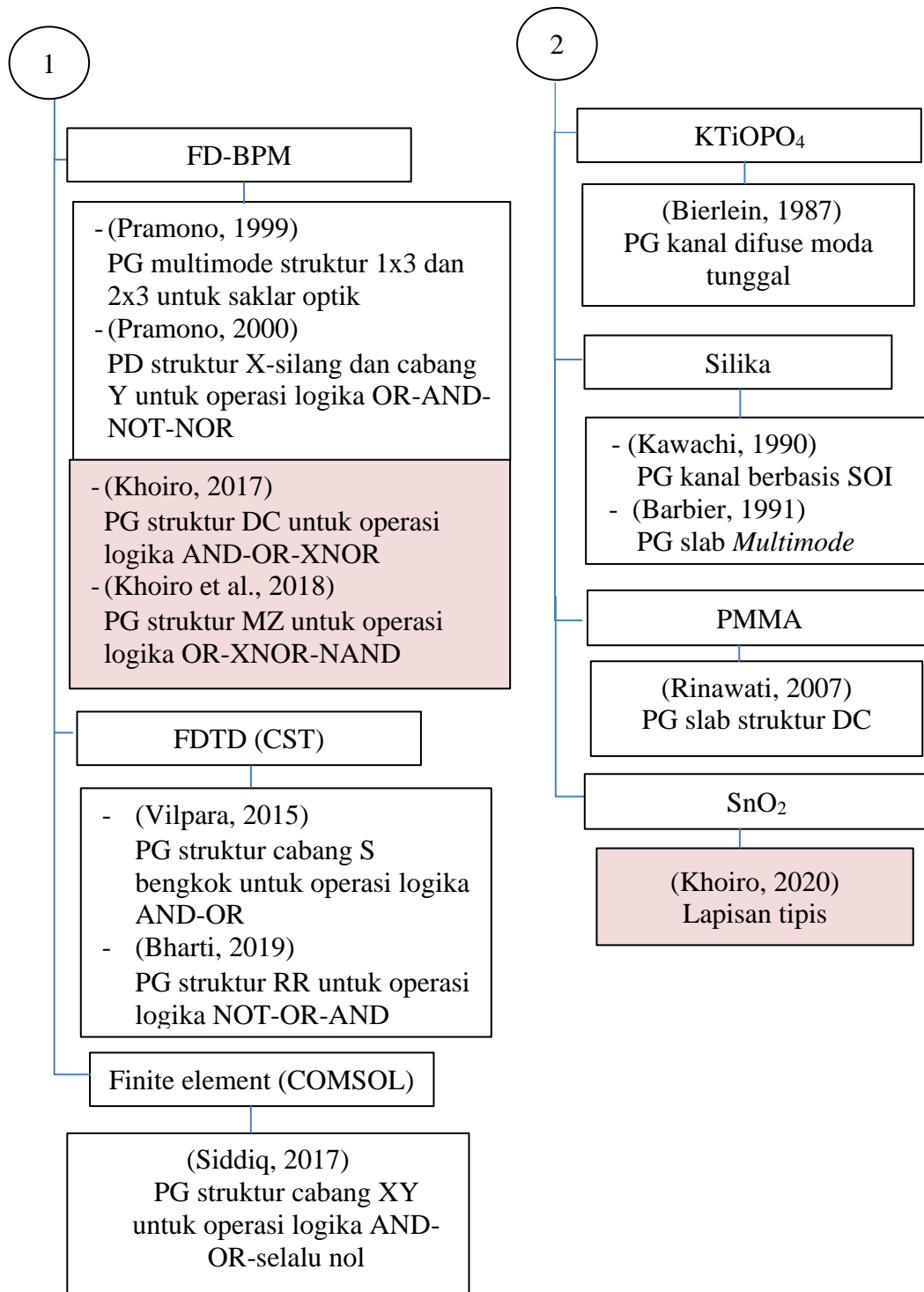
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Menfabrikasi lapisan tipis  $\text{SnO}_2$  dari timah murni dengan *vacuum evaporation deposition* dan menganalisa sifat-sifat optiknya agar dapat digunakan untuk aplikasi optoelektronika
2. Menganalisa pemodelan desain pandu gelombang berbasis struktur *directional coupler* ganda mengandung material nonlinear  $\text{SnO}_2$  untuk aplikasi gerbang logika optik
3. Menganalisa pemodelan pandu gelombang berbasis struktur Mach Zehnder mengandung material nonlinear  $\text{SnO}_2$  baik dari literatur maupun hasil fabrikasi yang telah dilakukan untuk aplikasi gerbang logika optik

### 1.4 Keterbaruan



Gambar 1.1 Bagan penelitian mengenai pandu gelombang optik nonlinear



Gambar 1.2 Bagan penelitian mengenai pandu gelombang optik nonlinear (lanjutan)

Tabel 1.1 Beberapa penelitian mengenai fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub>

<b>Teknik Fabrikasi</b>	<b>Substrat</b>	<b>Sumber</b>
RF <i>sputtering</i>	kaca <i>borosilicate</i>	(Czapla, 1989)
RF <i>sputtering</i>	kaca <i>soda lime</i>	(Baco, 2012)
<i>Spray Pyrolysis</i>	kaca <i>corning</i>	(Abdeldayem, 2008)
Metode Sol gel	kaca mikroskop	(Rahal, 2015)
Metode Sol gel	kaca <i>corning</i>	(Uysal, 2015)
Metode <i>Citrate</i> gel	kaca <i>kuarsa</i>	(Mehraj, 2015)
<i>Vacuum Evaporation</i>	Kaca <i>kuarsa</i>	(Khoiro, 2020)

Penelitian mengenai pandu gelombang mengandung material nonlinear telah banyak dilakukan sejak abad ke-19. Gambar 1.1 dan 1.2 menunjukkan bagan penelitian mengenai pandu gelombang nonlinear. Pandu gelombang nonlinear terus dikembangkan pada segi material yang digunakan dan struktur pandu gelombang yang terbentuk. Pengembangan dilakukan dengan metode fabrikasi dan pemodelan. Penelitian ini memberikan keterbaruan pada keduanya yakni dengan fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dan pemodelan pandu gelombang yang mengandung SnO<sub>2</sub>.

Karakteristik lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dapat bergantung pada metode pelapisannya, temperatur, durasi sintering, dan jenis substrat yang digunakan. Beberapa penelitian mengenai lapisan tipis SnO<sub>2</sub> terangkum dalam Tabel 1.1. Penelitian ini menggunakan kawat tin murni (bahan solder) karena harganya yang relatif murah dan kaca *kuarsa* karena memiliki daya tahan pada suhu tinggi. Sedangkan metode pelapisan menggunakan *vacuum evaporation* karena metode ini merupakan metode deposisi yang paling sederhana untuk membentuk lapisan yang homogen. Ketika menggunakan substrat kaca *kuarsa*, partikel *tin* tidak benar-benar membasahi kaca dan membentuk gumpalan-gumpalan berukuran nano pada suhu tinggi. Sedangkan, SnO<sub>2</sub> hanya dapat terbentuk dengan menggunakan proses oksidasi pada suhu tinggi. Kekasaran permukaan lapisan meningkat saat SnO bertransformasi menjadi SnO<sub>2</sub> karena adanya proses pemisahan pada molekul-molekulnya (Laghrib, 2010). Oleh karena itu, salah satu keterbaruan dari disertasi ini adalah **memperkenalkan teknik fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada kaca**

**kuarsa dengan menggunakan *vacuum evaporation* dan teknik tiga tahap kalsinasi untuk mengurangi kekasaran pada permukaan lapisan**

Penelitian sebelumnya (Yu, 1996) menyatakan bahwa material SnO<sub>2</sub> memiliki sifat nonlinear optik dilihat dari nilai suspebilitas orde ketiganya. Nonlinearitas dari SnO<sub>2</sub> ini lebih tinggi daripada LiNbO<sub>3</sub> sebagai bahan nonlinear yang telah banyak digunakan. SnO<sub>2</sub> nano belakangan juga telah diaplikasikan sebagai material sensing dan *nanofibers* seperti yang dilakukan oleh (Butt, 2012) dan (Sharifpour-Boushehri, 2015). Karakteristik SnO<sub>2</sub> sebagai salah satu semikonduktor tipe n, menjadikan material ini sangat berpotensi dalam aplikasi nonlinear optik. Hal ini berhubungan dengan penelitian (Miyata, 1992) yang menemukan bahwa material berbasis semikonduktor memiliki kecepatan pemindahan daya (*switching*) lebih cepat dari material nonlinear optik lainnya. Material semikonduktor dapat menimbulkan proses *switching* hingga orde piko-detik. Oleh karena itu, salah satu keterbaruan dari disertasi ini terletak pada **penggunaan material SnO<sub>2</sub> sebagai bahan pandu gelombang, terutama dengan memanfaatkan sifat nonlinear SnO<sub>2</sub> yang telah diketahui.**

Penggunaan material nonlinear optik bertipe *Kerr* dalam pandu gelombang *Mach-zehnder* untuk aplikasi gerbang logika optik telah banyak dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya (Pramono, 2000; Wu, 2008; Yabu, 2002). Pada penelitian-penelitian tersebut, struktur dan parameter pandu gelombang serta peletakan material nonlinear di dalam strukturnya diubah agar pandu gelombang dapat dimanfaatkan pada gerbang logika optik yang berbeda. Perubahan struktur dan parameter pandu gelombang dapat memberikan efek tertentu pada penjalaran gelombang didalamnya. Oleh karena itu, keterbaruan disertasi ini juga terletak pada **modifikasi struktur pandu gelombang berbasis struktur Mach-zehnder yang seluruh bagian pandunya mengandung bahan nonlinear (SnO<sub>2</sub>) untuk dapat diaplikasikan dalam beberapa operasi gerbang logika optik tanpa mengubah struktur dan parameternya.**

## 1.6 Kontribusi Penelitian

Hasil penelitian pada disertasi ini memberikan kontribusi pada materi pengajaran di ilmu fisika baik di perguruan tinggi maupun institusi. Dalam segi pengajaran disertasi ini dapat memberikan kontribusi dalam menambah materi dan pengetahuan tentang teori dasar sifat optik bahan nonlinear serta pemodelan pandu gelombang optik dengan menggunakan FDBPM. Pada bidang riset, hasil penelitian telah menghasilkan metode baru yang juga telah dituliskan dalam beberapa artikel ilmiah. Salah satunya adalah mengenai analisa sifat optik SnO<sub>2</sub> dan penjalaran gelombang pada pandu gelombang berbasis bahan tersebut untuk acuan penelitian selanjutnya. Artikel tersebut telah dipublikasikan baik dalam jurnal maupun prosiding internasional yaitu

1. Penelitian mengenai analisa pandu gelombang yang mengandung material nonlinear SnO<sub>2</sub> dengan struktur berbasis *directional coupler* (DC) telah dimuat dalam artikel berjudul “*All-Optical Logic Gates in Directional Coupler Waveguide Consisting of Nonlinear Material*”. Artikel ini telah dipresentasikan dalam *International Seminar of Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)* dan diterbitkan dalam jurnal *conference IEEE* pada tahun 2017. Penelitian ini menunjukkan analisa penjalaran gelombang pada pandu gelombang berstruktur DC ganda yang dimodelkan dengan FDBPM sehingga dapat digunakan dalam operasi AND, XNOR dan OR dengan bervariasi daya optik masukan (Khoiro, 2017).
2. Penelitian mengenai analisa pandu gelombang yang mengandung material nonlinear SnO<sub>2</sub> juga dilakukan dengan struktur Mach-zehnder (MZ). Penelitian ini juga telah termuat dalam artikel berjudul “*OR, XNOR, and NAND Optical Logic Gates in Mach-Zehnder Waveguiding Structure Consisting of Nonlinear Material*” dan diterbitkan dalam jurnal internasional *International Journal of Microwave and Optical Technology* pada tahun 2018. Penelitian ini menunjukkan analisa penjalaran gelombang pada pandu gelombang berstruktur MZ yang dimodelkan dengan FDBPM sehingga dapat digunakan dalam operasi OR, XNOR dan NAND dengan bervariasi daya optik masukan (Khoiro, 2018).

3. Penelitian mengenai analisa sifat lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang dideposisi menggunakan *vacuum evaporation deposition* telah dimuat dalam artikel berjudul “*Morphological and Optical Properties of Tin Oxide Nanomaterial Thin Film Deposited Using Vacuum Evaporation*” yang telah dinyatakan diterima di jurnal internasional *Journal of the Ceramic Society of Japan* pada tanggal 26 Desember 2019 lalu dan akan diterbitkan pada bulan Maret 2020. Penelitian ini menunjukkan teknik fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada kaca *kuarsa* dengan menggunakan proses tiga tahap kalsinasi untuk mengurangi kekasaran permukaan lapisan (Khoiro, 2020).



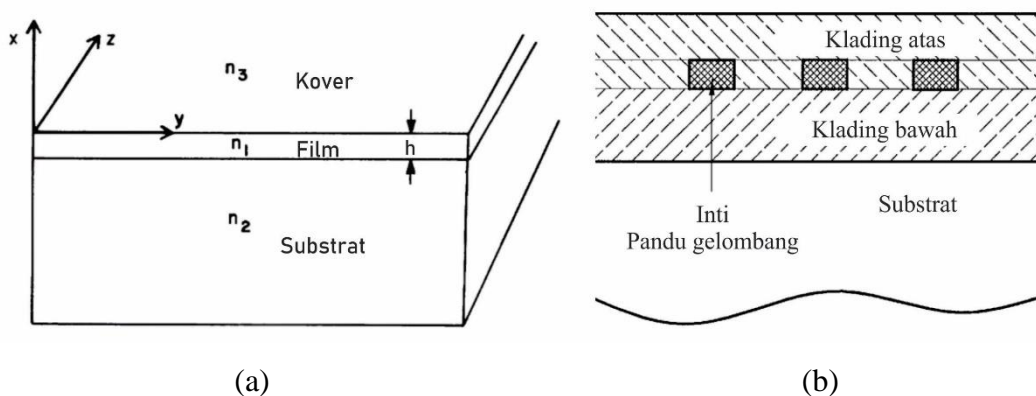
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pandu Gelombang Optik

Pandu gelombang adalah sebuah medium yang digunakan untuk memandu gelombang, seperti gelombang elektromagnetik atau gelombang suara. Berdasarkan struktur geometrisnya pandu gelombang optik dibedakan atas pandu gelombang dua dimensi (2-D) atau pandu gelombang slab dielektrik bila pembatasan gelombang optik terpandu hanya terjadi dalam arah sumbu x saja dan pandu gelombang tiga dimensi (3-D) atau disebut dengan pandu gelombang kanal bila pembatasan gelombang optik terpandu terjadi dalam arah sumbu x dan y.



Gambar 2.1 Struktur Pandu Gelombang (a) Slab Dielektrik (b) Kanal (Marcuse, 1974)

Pandu gelombang slab merupakan struktur pandu gelombang paling sederhana. Pandu gelombang ini tersusun atas tiga lapisan yaitu kover, film dan substrat yang memiliki ketiganya memiliki indeks bias masing-masing  $n_k$ ,  $n_f$ , dan  $n_s$ . Penjalaran cahaya pada pandu gelombang slab berada di sepanjang lapisan film dengan memenuhi syarat pemantulan dalam total (*total internal reflection*) dimana  $n_f > n_s > n_k$  dan ukuran film lebih besar dari ukuran kritis. Bila cahaya disalurkan ke arah sumbu z, maka medan cahaya akan seragam di sepanjang arah sumbu y. Oleh karena itu, bidang datang cahaya terletak di sepanjang bidang x-z (Rubiyanto, 2003).

Cahaya yang terpandu di dalam pandu gelombang slab memiliki kemungkinan lebih besar akan mengalami difraksi di sepanjang arah perambatannya. Oleh karena itu, pandu gelombang kanal lebih banyak digunakan dalam aplikasinya untuk mengurangi efek difraksi tersebut. Pandu gelombang kanal memiliki bermacam-macam jenis seperti pandu gelombang kanal strip, tanam (*buried*), difusi dan lain-lain. Jenis yang paling umum digunakan adalah pandu gelombang kanal tanam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1(b) karena moda gelombang pada pandu gelombang ini lebih simetri (stabil). Pandu gelombang ini terdiri dari inti pandu gelombang dimana cahaya terpandu yang tertanam dalam klading yang indeks biasnya lebih kecil. Struktur pandu gelombang ini dideposisi di atas substrat yang indeks biasnya jauh lebih kecil (Paschotta, 2008). Penampang transversal dari pandu gelombang ini serupa dengan pandu gelombang slab simetri. Oleh karena itu, umumnya dimensi pandu gelombang kanal direduksi ke dalam dimensi pandu gelombang slab dengan metode indeks bias efektif untuk mempermudah proses investigasi penjalaran gelombang di dalamnya (Rinawati, 2007).

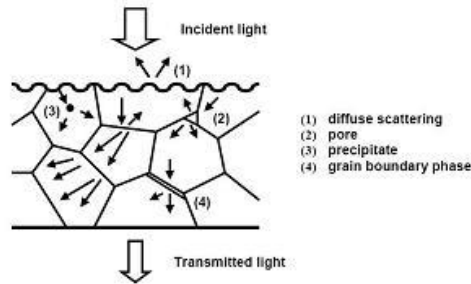
## 2.2 Kristal optik

Kristal optik merupakan ilmu mengenai perilaku optik di dalam suatu bahan, terutama untuk jenis material kristal. Jika cahaya yang dalam hal ini adalah foton, mengenai/berinteraksi dengan partikel-partikel di dalam material, cahaya akan mengalami tiga keadaan yaitu :

- a) Jika energi foton rendah, cahaya akan menjalar melalui material
- b) Foton akan terpantul karena menumbuk material
- c) Jika energi foton tinggi yakni melebihi energi *gap* material ditandai dan dalam ini terjadi pada panjang gelombang pendek, maka cahaya akan terabsorpsi oleh elektron dalam material. Akibatnya, elektron dapat tereksitasi dari pita konduksi menjadi elektron bebas yang dapat menimbulkan arus seperti dalam aplikasi sel surya.

Interaksi cahaya dalam suatu material ditunjukkan dengan nilai indeks biasnya. Indeks bias material umumnya bernilai kompleks. Indeks bias terutama bagian

riilnya menunjukkan perbandingan kecepatan cahaya di dalam material dan di ruang hampa. Nilai imajiner ini berkaitan transparansi dan absorbansi material sedangkan nilai riil dipengaruhi oleh penghamburan cahaya dalam material. Penghamburan cahaya pada material polikristal berhubungan dengan indeks bias yang tak kontinu akibat struktur kristal tak homogen, pori-pori, dan *birefringence* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. (Fu, 2015)



Gambar 2.2 Penghamburan cahaya dalam keramik polikristal karena ketidaksempurnaan struktur mikro

Berdasarkan indeks biasnya, material dapat dibedakan menjadi dua jenis yakni bahan isotropik dan anisotropik. Bahan isotropik memiliki nilai indeks bias tunggal dan tetap. Bahan isotropik biasanya terdapat pada kaca, gas, udara, *liquid*, dan padatan amorf. Sedangkan indeks bias anisotropik memiliki lebih dari satu nilai indeks bias (*birefringence*) sesuai dengan jenis kristalnya. Bahan anisotropik dengan dua nilai indeks bias (*uniaxial*) terjadi pada struktur kristal tetragonal dan hexagonal sedangkan yang memiliki tiga indeks bias (*biaxial*) terjadi pada struktur kristal triklinik, monoklinik, dan *orthorombik*. (Yariv, 2006).

Indeks bias ( $n$ ) dalam kristal dapat dihitung menggunakan perumusan Gladstone yang ditunjukkan dalam persamaan :

$$\frac{n-1}{\rho} = C \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan  $\rho$  dan  $C$  berturut-turut merupakan densitas material dan konstanta Gladstone. Konstanta ini terkait dengan jarak atom penyusun dan sudut pada struktur kristal (Teertstra, 2008).

### 2.3 Material Pandu Gelombang

Karakteristik material yang cocok untuk diaplikasikan sebagai pandu gelombang diantaranya adalah

- a) Indeks bias tinggi agar cahaya dapat terkurung (mengalami pemantulan total) dan berpropagansi di dalam pandu gelombang
- b) Absorbansi rendah pada panjang gelombang sesuai dengan sistem komunikasi optik (pada umumnya 850 nm, 1300 nm dan 1550 nm)
- c) Nonlinearitas tinggi untuk dapat memodulasi dan *switching* pulsa optik ultracepat
- d) Transmisi tinggi pada panjang gelombang sekitar inframerah (Zhang, 2016)

Pandu gelombang yang baik harusnya memiliki rugi-rugi propagasi lebih rendah. Keadaan tersebut dapat dicapai pada material dengan karakteristik antara lain memiliki stabilitas tinggi terhadap lingkungan, dinding pemandu rata dan stabil terhadap suhu tinggi seperti pada pandu gelombang *epoxy* (Hagerhorst-Trewhella, 1990).

### 2.4 Material Nonlinear Optik

Beberapa material dapat merubah cahaya yang melewatinya, bergantung pada orientasi (arah), temperatur, panjang gelombang cahaya, dan lainnya. Jenis material nonlinear optik memiliki struktur kristal yang berbeda. Pada umumnya, material ini akan bersifat anisotropik saat berhubungan dengan radiasi elektromagnetik. Berdasarkan gaya kohesif yang mengikat muatan dan polarisasi bersamaan, material nonlinear optik diklasifikasikan dalam jenis kristal ion dan kristal kovalen. Jenis material nonlinear optik kristal ion umumnya berupa padatan yang mengandung *oxygen-polyhedra*. Material yang berbasis kristal ion antara lain kristal molekuler, semikonduktor, material organik, padatan amorf/cacat, sebagian dari kaca, polimer, komposit, dan padatan buatan tak homogen. Efek nonlinear optik dari material pada umumnya berkaitan dengan gerak elektron di pita valensi yang melibatkan gerakan atau getaran translasi ion. Besar dan kecepatan gerakan

tersebut menjadi karakteristik penting sebagai syarat dari material nonlinear optik (Arivuoli, 2001).

Material-material nonlinear yang telah diuji antara lain semikonduktor MQW (*Multi Quantum Well*), *Liquid Crystal* MBBA (p-methoxy-benzylidene p-n-butylaniline), *Nematik Liquid Crystal* PCH-5 (Pentylcyclohexil benzonitrile) (Cotter, 1992) dan Organosol SnO<sub>2</sub> (Yu, 1996). Parameter-parameter yang berhubungan dengan bahan di atas dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Nilai koefisien bahan nonlinear dan respon panjang gelombang (Pramono, 2000)

Nama Bahan	Koefisien nonlinear, $\alpha$ (m <sup>2</sup> /V <sup>2</sup> )	Respon panjang gelombang (μm)
<i>Glass</i> SF59	$7 \times 10^{-19}$	1,30
<i>Liquid Crystal</i> MBBA	$6,377 \times 10^{-12}$	0,51 – 1,55
Semikonduktor MQW	$10^{-19}$	1,48 – 1,55
<i>Nematik Liquid Crystal</i> PCH-5	$9,9 \times 10^{-11}$	0,51 – 1,55
<i>CdS<sub>1-x</sub>Sex nano crystal</i>	$3 \times 10^{-11}$	0,51 – 1,53
Organosol SnO <sub>2</sub>	$1,7 \times 10^{-11}$	1.06

## 2.5 Efek Nonlinear Optik

Nonlinear Optik adalah cabang dari ilmu optik yang menjelaskan mengenai sifat-sifat cahaya pada medium nonlinear, yakni adanya respon nonlinear terhadap medan listrik dari cahaya. Sifat nonlinear ini biasanya teramati pada intensitas cahaya yang sangat tinggi (nilai dari medan listrik tersebut setara dengan medan listrik yang terjadi akibat ikatan antar atom, biasanya 10<sup>8</sup> V/m). Pada daya tinggi, sifat material dapat berubah lebih cepat. Beberapa efek nonlinear yang terjadi antara lain *self-focusing*, soliton, dan *high-harmonics generation*.

Pandu gelombang slab yang di bagian pandunya mengandung materi nonlinear akan memberikan sifat *self-focusing* dan *self-trapping* pada gelombang yang menjalar di dalamnya ke arah yang sejajar dengan batas-batas bagian pandu tersebut. Dalam kasus ini, kombinasi profil indeks bias efektif linear dalam arah sejajar dan indeks bias efektif nonlinear yang diinduksi dalam arah tegak lurus

menghasilkan sebuah indeks bias efektif dengan potongan melintang dua dimensi. Di samping itu kasus ini menghasilkan solusi yang dikenal sebagai soliton spasial (Chiang, 1993).

Gelombang elektromagnetik yang merambat di dalam medium nonlinier akan mengalami polarisasi yang diekspresikan dalam bentuk ekspansi deret Taylor:

$$P_{nl}(t) = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E(t) + \chi^{(2)} E^2(t) + \chi^{(3)} E^3(t) + \dots) \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana koefisien  $\chi^{(n)}$  merupakan suseptibilitas medium orde ke-n dan juga menyatakan nonlinearitas orde ke-n. Secara umum,  $\chi^{(n)}$  merupakan tensor pangkat  $n + 1$  yang menunjukkan sifat polarisasi bergantung pada interaksi parametrik dan kesimetrian bahan nonlinier. Suku pertama pada persamaan tersebut merupakan polarisasi linier, Sedangkan, suku kedua, ketiga, dan seterusnya merupakan polarisasi tak linier. (Handoko, 2006).

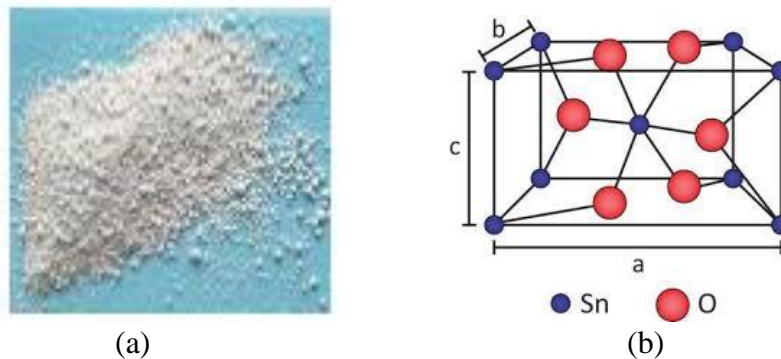
Efek nonlinear optik yang paling banyak digunakan dalam perangkat pandu gelombang optik adalah efek Kerr. Efek Kerr merupakan gejala dimana suatu material (kristal maupun cairan) yang semula isotropik menjadi anisotropik jika material tersebut berada dalam pengaruh medan listrik yang kuat (Soedjo, 1992). Efek Kerr terbagi menjadi dua yaitu efek Kerr elektro-optik (*DC Kerr effect*) dan efek Kerr optik (*AC Kerr effect*). Efek Kerr elektro-optik adalah efek perubahan indeks bias material akibat respon terhadap medan listrik eksternal. Medan ini biasanya berasal dari elektroda yang dihubungkan dengan sumber listrik dan disisipkan pada bagian pandu gelombang. Sedangkan, efek Kerr optik (*AC Kerr effect*) adalah kasus di mana medan listrik terjadi akibat pengaruh cahaya itu sendiri sehingga menyebabkan variasi dalam indeks bias yang sebanding dengan radiasi lokal cahaya. Perubahan indeks bias ini,  $n_{nl}$  dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$n_{nl}^2 = n_l^2 + \alpha |E|^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana  $\alpha$  adalah koefisien nonlinearitas yang berasal dari suseptibilitas medium orde ketiga  $\chi^{(3)}$  dan  $E$  adalah medan listrik (Helmi, 2013).

## 2.6 Tin (IV) Oksida

Senyawa  $\text{SnO}_2$  merupakan senyawa ionik, yang non-stoikiometri karena adanya cacat titik berupa kelebihan atom logam Sn (Stannic).  $\text{SnO}_2$  banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi karena stabil terhadap perlakuan panas dan biaya pendeposisiannya yang relatif murah. Pada umumnya,  $\text{SnO}_2$  berbentuk serbuk berwarna putih seperti pada Gambar 2.3 (a). Material oksida  $\text{SnO}_2$  disebut juga keramik.  $\text{SnO}_2$  merupakan paduan dua unsur yaitu logam dan non logam yang berikatan ionik dan atau ikatan kovalen. Oleh karena itu,  $\text{SnO}_2$  yang tak terdoping merupakan semikonduktor tipe-n dengan celah pita lebar. Tabel 2.2 menunjukkan karakteristik  $\text{SnO}_2$  secara umum. (Anonim, 2013).



Gambar 2.3 (a) Serbuk  $\text{SnO}_2$  (b). Stuktur Kristal  $\text{SnO}_2$

Tabel 2.2 Karakteristik  $\text{SnO}_2$  (Anonim, 2013; Patnaik, 2003)

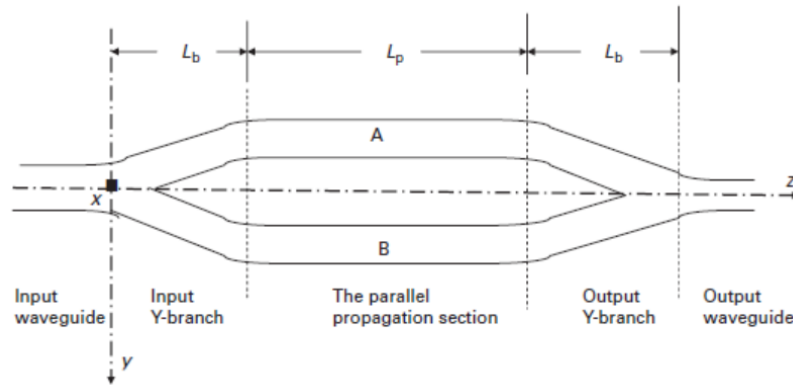
<b>Properties</b>	
Nama IUPAC	Tin (IV) Oxide
Formula molekul	$\text{SnO}_2$
Massa Molar	150,71 g/mol
Tampilan	Serbuk berwarna putih atau keabu-abuan
Densitas	6,90-7,00 g/cm <sup>3</sup>
Titik leleh	1630 °C
Titik didih	1800 – 1900 °C
Indeks Bias	2,006-2,486



Kristal SnO<sub>2</sub> memiliki struktur tetragonal rutil. Kisi kristal mengandung enam atom yang terdiri dari dua atom timah/*tin* dan 4 atom oksigen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b). Setiap atom *tin* berada di bagian tengah antara enam atom oksigen yang terletak dekat sudut dari reguler *octahedron* dan setiap atom oksigen dikelilingi tiga atom *tin* yang mendekati sudut dari sebuah segitiga *equilateral*. Oleh karena itu, satu unit kristal SnO<sub>2</sub> memiliki koordinasi 6:3. (Baur, 1956) menemukan parameter kisi SnO<sub>2</sub> adalah  $a = b = 4,737\text{\AA}$  dan  $c = 3,185\text{\AA}$ . Perbandingan  $c/a$  adalah 0,673. Radius ion dari O<sup>2-</sup> dan Sn<sup>4+</sup> masing-masing adalah 1,4Å dan 0,71Å (Jarzebski, 1976).

## 2.7 Desain Pandu Gelombang Mach-zehnder

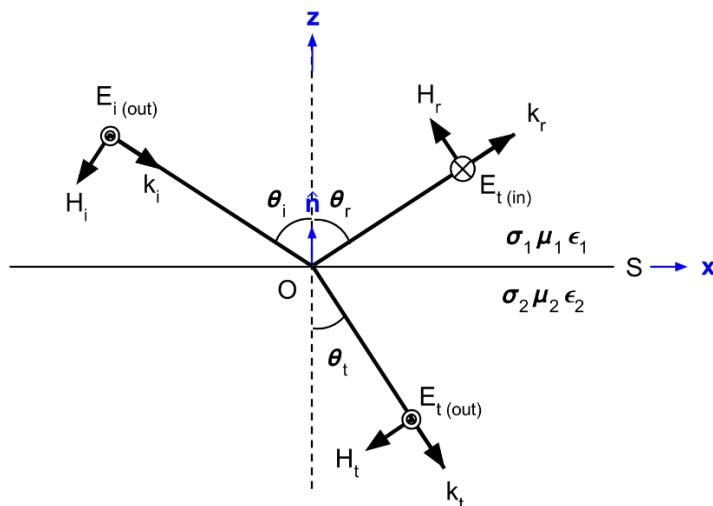
Pandu gelombang Mach Zehnder merupakan pandu gelombang dengan modulasi fasa yang menggunakan prinsip *Mach Zehnder Interferometri* (MZI). Struktur pandu gelombang Mach-zehnder ditunjukkan pada Gambar 2.4. Interferometer Mach Zehnder didasarkan pada dua berkas gelombang yang berinterferensi disebabkan pembagian amplitudo dari gelombang yang masuk menjadi dua gelombang berjalan pada panjang lintasan yang berbeda. Proses modulasi fasa tersebut, terjadi karena kedua gelombang tersebut akan memiliki perbedaan fasa yang bergantung pada sudut percabangan, konstanta propagansi dan panjang pandu gelombang (Herdiyanto, 2007). Struktur pandu gelombang Mach Zehnder merupakan struktur pandu gelombang paling sederhana untuk menginvestigasi perilaku *switching* akibat pergeseran fase pada gelombang (Miyata, 1992). Dalam pandu gelombang pada proposal ini, modulasi dilanjutkan dengan pengaruh gelombang yang menjalar di dua pandu gelombang lurus di samping kanan dan kiri pandu gelombang Mach Zehnder.



Gambar 2.4 Pandu Gelombang *Mach Zehnder* (Chang, 2010)

## 2.8 Relasi Dispersi Pandu Gelombang

Relasi dispersi adalah persamaan yang memberikan kriteria bagi terpandunya cahaya dalam pandu gelombang slab (Rubiyanto, 2003). Persamaan ini didapatkan dari total pergeseran fase yang dialami sinar yang menjalar pada pandu gelombang. Pergeseran fase gelombang yang terpandu pada pandu gelombang satunya disebabkan oleh pemantulan pada bidang batas antara material substrat dan kover. Oleh karena itu, analisisnya diawali pada hukum Fresnel mengenai sistem pemantulan dan pembiasan (Jones, 1987).



Gambar 2.5 Arah medan listrik dan medan magnet cahaya sesuai dengan hukum Fresnel (Zhdanov, 2018)

Gambar 2.5 memberikan hubungan komponen medan listrik,  $E$  dan medan magnet,  $H$  yang ditunjukkan dalam persamaan

$$E_i + E_r = E_t \dots\dots\dots(2.4)$$

$$H_i \cos \theta_i + H_r \cos \theta_r = H_t \cos \theta_t \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana elemen  $i, r$  dan  $t$  berturut-turut menunjukkan gelombang masuk, pantul dan transmisi (bias). Penggunaan salah satu persamaan pada persamaan Maxwell dapat mengubah persamaan (2.5) menjadi

$$n_1 \cos \theta_i (E_i - E_r) = n_2 \cos \theta_t E_t \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana  $n_1$  dan  $n_2$  adalah indeks bias lapisan pertama dan kedua. Jika persamaan (2.4) dimasukkan ke dalam persamaan di atas, didapatkan koefisien pantul yang didefinisikan dalam persamaan berikut:

$$|R| = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \dots\dots\dots(2.7)$$

Berdasarkan hukum snellius didapatkan definisi

$$\cos \theta_t = -j \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i - 1} \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan tanda negatif menunjukkan adanya peluruhan sinar pada bidang batas.

Dengan demikian, persamaan (2.6) menjadi

$$|R| = \frac{n_1 \cos \theta_i + j \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}}{n_1 \cos \theta_i - j \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}} \dots\dots\dots(2.9)$$

bagian riil dan imajiner dari persamaan tersebut didefinisikan sebagai:

$$\begin{cases} \cos \phi = n_1 \cos \theta_i \\ \sin \phi = \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2} \end{cases} \dots\dots\dots(2.10)$$

Koefisien pantul yang bernilai kompleks sebagaimana pada persamaan (2.9) dapat didefinisikan sebagai

$$|R| = \exp(j2\phi) \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana  $-2\phi$  merupakan pergeseran fase akibat pantulan pada bidang batas yang didefinisikan dalam persamaan

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}{n_1^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Pada pandu gelombang slab didefinisikan bahwa  $n_1$  adalah indeks bias film/pemandu dan  $n_2$  adalah indeks bias substrat atau kover.

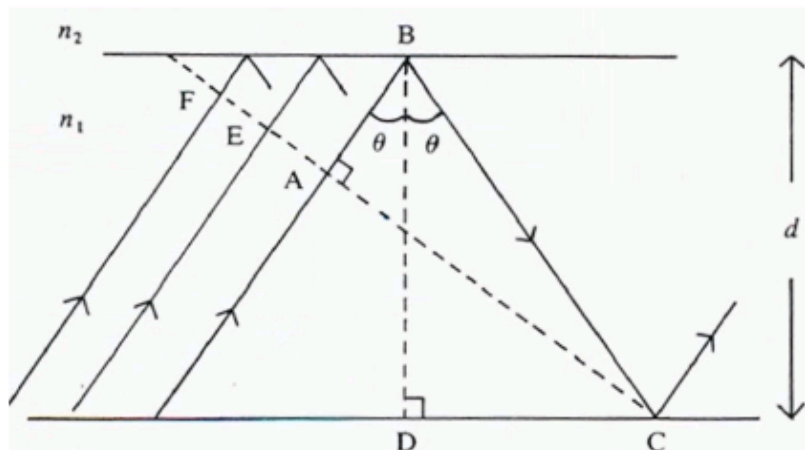
Pergeseran fase sinar pada pandu gelombang juga disebabkan oleh perjalanan sinar yang mempunyai muka fase yang sama di dalam pandu gelombang yang dijelaskan melalui konsep sinar optik. Gambar 2.6 menunjukkan skema pemantulan internal yang menyebabkan pergeseran fase saat proses perjalanan sinar. Segitiga ABC pada Gambar tersebut menunjukkan persamaan

$$AB = BC \cos 2\theta \dots\dots\dots (2.13)$$

maka jumlah pergeseran fase di daerah film/pemandu didapatkan

$$AB + BC = 2h \cos \theta \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana  $h$  adalah lebar film/medium pandu.



Gambar 2.6 Pemantulan internal muka fase dari sinar yang terpandu pada pandu gelombang (<http://cleanenergywiki.org/>)

Dengan demikian, seluruh pergeseran fase akibat perjalanan sinar dalam medium pandu disertai dengan akibat pemantulan sinar pada bidang batas dengan medium substrat dan kover dapat dituliskan sebagai

$$2n_1k_0h \cos \theta - 2\phi_s - 2\phi_k = 2m\pi \dots\dots\dots (2.15)$$

Faktor kelipatan  $2\pi$  diberikan agar sinar-sinar yang tiba pada posisi yang sama menjadi sefase (tidak saling melemahkan). Persamaan di atas dapat dituliskan sebagai persamaan relasi dispersi untuk pandu gelombang slab step indeks sebagai berikut

$$n_f k_0 h \cos \theta - \tan^{-1} \sqrt{\frac{n_f^2 \sin^2 \theta_i - n_s^2}{n_f^2 - n_f^2 \sin^2 \theta_i}} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{n_f^2 \sin^2 \theta_i - n_k^2}{n_f^2 - n_f^2 \sin^2 \theta_i}} = m\pi \quad (2.16)$$

dengan elemen  $f$ ,  $s$ , dan  $k$  menunjukkan daerah film, substrat dan kover pandu gelombang slab step indeks Sedangkan,  $m$  menunjukkan jenis moda yang terpandu.

Indeks bias efektif dapat didefinisikan sebagai hasil bagi tetapan propagansi efektif sinar yang mewakili moda gelombang optik terpandu terhadap bilangan gelombang dalam ruang hampa yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

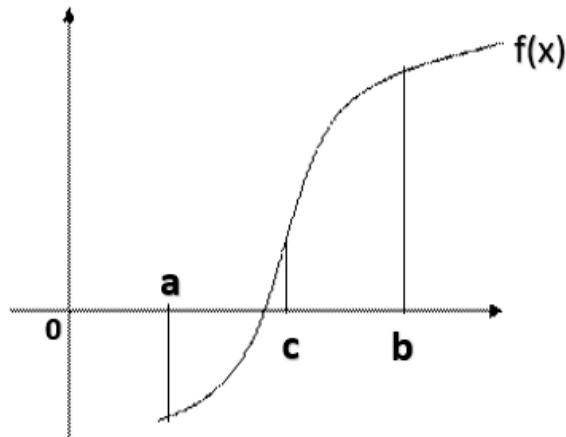
$$N = \frac{\beta}{k_0} = n_f \sin \theta_i \quad (2.17)$$

dimana  $\beta$  didefinisikan sebagai tetapan propagansi sinar di sepanjang arah pemanduan gelombang (sumbu-z). Sehingga persamaan (2.16) dapat dituliskan kembali menjadi

$$k_0 h \sqrt{n_f^2 - N^2} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - N^2}} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{N^2 - n_k^2}{n_f^2 - N^2}} = m\pi \quad (2.18)$$

### 2.8.1 Metode Bagi Dua

Nilai indeks bias efektif dapat dicari dengan mencari akar-akar persamaan relasi dispersi yang ditunjukkan pada persamaan (2.18). Penentuan akar-akar persamaan tersebut dilakukan dengan metode numerik komputasi. Metode numerik yang lazim diimplementasikan untuk menyelesaikannya antara lain *metode Bisection*, *Newton-Raphson*, *False-Position*, dan *Secant*. Dalam penelitian ini, indeks bias efektif dicari menggunakan metode *Bisection* atau Bagi Dua yang akan dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.7 Langkah iterasi metode bagi dua

Pertama-tama, persamaan (2.17) dituliskan kembali dalam bentuk fungsi

$$f(x) = k_0 h \sqrt{n_f^2 - N^2} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - N^2}} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{N^2 - n_k^2}{n_f^2 - N^2}} - m\pi \dots (2.19)$$

Nilai indeks bias efektif,  $N$  berada di antara indeks bias film dan substrat atau kover, maka batas-batas akar persamaan awal  $a$  dan  $b$  diambil dari nilai indeks bias tersebut. Batas-batas awal akar persamaan untuk pandu gelombang slab simetri dapat diambil dari nilai

$$\begin{aligned} a &= n_s = n_k \\ b &= n_f \end{aligned} \dots (2.20)$$

Perhitungan akar persamaan  $c$  pada metode numerik Bagi Dua dilakukan dengan persamaan

$$c = \frac{a+b}{2} \dots (2.21)$$

Penentuan nilai ini dilakukan dengan persyaratan-persyaratan berikut:

- Jika  $f(a).f(c) < 0$  maka  $b = c$
- Jika  $f(a).f(c) > 0$  maka  $a = c$
- Jika  $f(a).f(c) = 0$  maka  $c$  merupakan akar persamaan

Iterasi perhitungan akan berhenti jika selisih batas-batas akar akhi kurang dari toleransi,  $\epsilon$ .

$$|a_n - b_n| \leq \epsilon \dots (2.22)$$

atau

$$n = \frac{\log\left(\frac{b-a}{\varepsilon}\right)}{\log 2} \dots\dots\dots(2.23)$$

dengan  $n$  menunjukkan batas minimum iterasi yang diperlukan untuk metode bagi dua.

## 2.9 Analisa Fungsi Gelombang Masukkan

Sinyal masukkan pandu gelombang diasumsikan sebagai gelombang elektromagnetik yang umumnya didapatkan dari laser. Suatu gelombang elektromagnetik terdiri atas vektor medan listrik ( $\vec{E}$ ) dan medan magnet ( $\vec{B}$ ). Berdasar pada hubungannya dengan bahan atau materi, gelombang elektromagnetik juga dikaitkan dengan dua vektor lainnya, yaitu pergeseran listrik ( $\vec{D}$ ) dan intensitas magnet ( $\vec{H}$ ). Keempat vektor tersebut dihubungkan dengan persamaan Maxwell, yaitu persamaan yang mengatur fenomena elektromagnetik. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa bahan yang digunakan adalah bahan dielektrik sempurna, non-magnetik, homogen dan isotropik. Oleh karena itu, rapat muatan dan rapat arus bernilai nol. Dengan demikian, persamaan Maxwell dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots(2.27)$$

### 2.9.1 Fungsi Gelombang Masukkan Linear

Fungsi gelombang masukkan linear merupakan fungsi gelombang sinar masukkan yang langsung berasal dari laser yang dikopling dengan serat optik atau lensa cembung sebelum dimasukkan kepada pandu gelombang. Perumusan

gelombang tersebut dapat dicari dengan menggunakan definisi pergeseran listrik untuk bahan linear sebagai berikut:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \dots\dots\dots (2.28)$$

dengan  $\epsilon_0$  dan  $\mu_0$  masing-masing merupakan permitivitas dan permeabilitas di ruang hampa.

Penggunaan operasi rotasi (*curl*) pada persamaan (2.26) dan mensubstitusikan persamaan (2.27) dan (2.28) kedalamnya didapatkan persamaan berikut:

$$\nabla \times \nabla \times E = -\epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.29)$$

Persamaan di atas dan persamaan (2.23) disubstitusikan ke dalam identitas vektor

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \dots\dots\dots (2.30)$$

didapatkan persamaan berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.31)$$

Kecepatan fase dapat didefinisikan yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$v^2 = \frac{1}{\mu\epsilon} = \frac{c^2}{n^2} \dots\dots\dots (2.32)$$

dimana  $c$  dan  $n$  berturut-turut adalah kecepatan cahaya di ruang hampa dan indeks bias medium sehingga persamaan (2.31) dapat diubah menjadi

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.33)$$

Gelombang masukkan pada penelitian ini dibatasi hanya pada moda TE. Sehingga medan listrik yang tegak lurus dengan bidang datang bernilai nol ( $E_x = E_z = 0$ ). Pandu gelombang diasumsikan homogen ke arah sumbu maka  $\partial/\partial y=0$  (Nishihara et al., 1989). Dengan demikian, persamaan (2.33) menghasilkan

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.34)$$

Medan listrik masukkan yang akan menjalar pada sumbu-z dapat diasumsikan dalam fungsi gelombang bergantung waktu sebagai berikut:

$$E_y = u(x) \exp j(\omega t - \beta z) \dots\dots\dots (2.35)$$



dimana  $\omega$  dan  $\beta$  berturut-turut adalah frekuensi dan tetapan propagansi. Turunan kedua fungsi tersebut terhadap koordinat- $z$  menghasilkan

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -\beta^2 E_y \dots\dots\dots(2.36)$$

Sedangkan, turunan kedua terhadap waktu ( $t$ ) menghasilkan

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = -\omega^2 E_y \dots\dots\dots(2.37)$$

maka persamaan (4.11) dapat ditulis menjadi

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} = (\beta^2 - k_0^2 n^2(x))u(x) \dots\dots\dots(2.38)$$

dengan  $k_0$  adalah bilangan gelombang di ruang hampa.

Osilasi medan listrik yang terpandu sengaja dibuat dalam bentuk gelombang berdiri (gelombang stasioner) agar daya optik dari gelombang tidak ada yang hilang ke daerah substrat dan kover selama proses propagansi di dalam pandu gelombang. Ragam gelombang berdiri yang terbentuk tiap lapisan bersesuaian dengan pola medan listrik dan moda gelombang yang merambatkan paket-paket daya optik tersebut. Oleh karena itu, persamaan Helmholtz pada persamaan (2.33) disederhanakan dalam bentuk gelombang berdiri sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_{jx} u = 0 \dots\dots\dots(2.39)$$

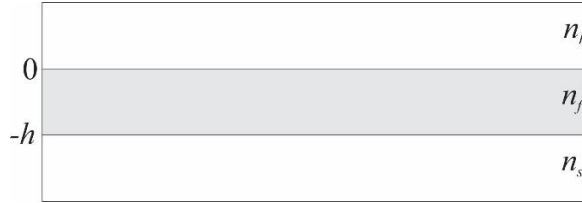
dengan  $j$  bersesuaian dengan lapisan pandu gelombang (substrat, film dan kover) dan  $k_{jx}$  didefinisikan sebagai  $\sqrt{k_0^2 n_j^2 - \beta^2}$ . Nilai  $k_{jx}$  akan bernilai riil untuk medan yang menjalar di daerah film karena indeks bias film lebih besar dari pada indeks bias efektif ( $n_f > \beta/k_0$ ) sehingga bilangan gelombang pada lapisan film dapat dituliskan sebagai berikut :

$$k_f = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2} \dots\dots\dots(2.40)$$

Pada indeks bias substrat dan kover yang lebih kecil dari pada indeks bias efektif ( $n_s, n_k < \beta/k_0$ ). didapatkan bilangan gelombang pada lapisan substrat dan kover berturut-turut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\gamma_s = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\gamma_k = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_k^2} \dots\dots\dots (2.42)$$



Gambar 2.8 Profil indeks bias pandu gelombang

Dengan demikian, persamaan Helmholtz untuk masing-masing lapisan sesuai dengan Gambar 2.8 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma_s u = 0 \quad x \leq -h \dots\dots (2.43)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_f u = 0 \quad -h \geq x \geq 0 \dots\dots (2.44)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma_k u = 0 \quad x \geq 0 \dots\dots (2.45)$$

Penyelesaian persamaan-persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u_s(x) = A \exp(\gamma_s(x+h)) \quad x \leq -h \dots\dots (2.46)$$

$$u_f(x) = B(\cos(k_f x) + C \sin(k_f x)) \quad -h \geq x \geq 0 \dots\dots (2.47)$$

$$u_k(x) = D \exp(-\gamma_k x) \quad x \geq 0 \dots\dots (2.48)$$

Amplitudo A, B, C, dan D dapat ditentukan menggunakan syarat batas dan kontinuitas. Pada saat  $x = -h$  berlaku syarat batas bahwa medan di daerah substrat sama dengan medan di daerah film ( $u_s = u_f$ ) sehingga didapatkan

$$A = B(\cos(k_f h) + C \sin(k_f h)) \dots\dots\dots (2.49)$$

Syarat kontinuitas dan substitusi persamaan (2.48) didapatkan

$$B = DC \left( \frac{k_f \cos(k_f h) + \gamma_s \sin(k_f h)}{\gamma_s \cos(k_f h) - k_f \sin(k_f h)} \right) \dots\dots\dots (2.50)$$

Sedangkan, pada saat  $x = 0$  berlaku bahwa medan di daerah film dan kover adalah sama ( $u_f = u_k$ ) dan turunan medannya juga sama sehingga didapatkan

$$B = D \dots\dots\dots(2.51)$$

dan

$$C = -\frac{\gamma_k}{k_f} \dots\dots\dots(2.52)$$

Substitusi persamaan (2.52) ke persamaan (2.50) menghasilkan

$$\tan(k_f h) = \frac{\gamma_s + \gamma_k}{k_f \left(1 - \frac{\gamma_s \gamma_k}{k_f^2}\right)} \dots\dots\dots(2.53)$$

Substitusi persamaan (2.49), (2.52) dan (2.53) menjadikan fungsi gelombang pada persamaan (2.46) hingga (2.48) dapat dituliskan kembali dengan koefisien amplitude yang sama menjadi

$$u_s(x) = B \left( \cos(k_f h) + \frac{\gamma_k}{k_f} \sin(k_f h) \right) \exp(\gamma_s (x+h)) \quad x \leq -h \dots\dots(2.54)$$

$$u_f(x) = B \left( \cos(k_f x) + C \sin(k_f x) \right) \quad -h \geq x \geq 0 \dots\dots(2.55)$$

$$u_k(x) = B \exp(-\gamma_k x) \quad x \geq 0 \dots\dots(2.56)$$

Daya optik dipertimbangkan mengandung medan listrik yang dipandu dalam struktur pandu gelombang. Daya optik dari medan listrik masukkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{in} = \frac{\beta}{k_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} |E(x)|^2 dx \dots\dots\dots(2.57)$$

Pada penelitian ini, daya masukkan dirumuskan sebagai

$$P_{in} = \frac{\beta}{k_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left( \int_{-\infty}^{-h} |u_s|^2 dx + \int_{-h}^0 |u_f|^2 dx + \int_0^{\infty} |u_k|^2 dx \right) \dots\dots\dots(2.58)$$

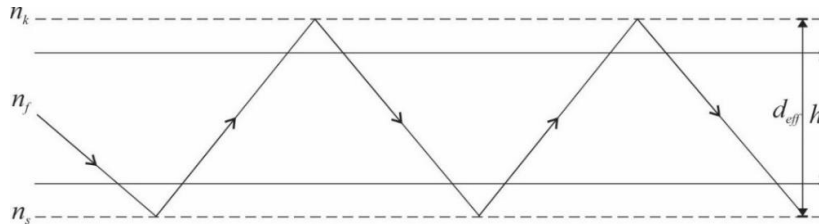
Koefisien B pada persamaan (2.54), (2.55) dan (2.56) dapat dicari dengan menyelesaikan persamaan di atas dan substitusi definisi pada persamaan (2.53) (Yariv, 1973) sebagai berikut:

$$B = 2k_f \left[ \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} P_{in}}{\beta/k_0 d_{eff} (k_f^2 + \gamma_k^2)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2.59)$$

dimana  $d_{eff}$  merupakan ketebalan efektif pandu gelombang yang didefinisikan sebagai

$$d_{eff} = h + \frac{1}{\gamma_k} + \frac{1}{\gamma_s} \dots\dots\dots (2.60)$$

Ketebalan ini dapat dijelaskan dari analisa pergeseran Goos-Haenchen yang menyatakan bahwa pemantulan total internal pada batas dielektrik menyebabkan pergeseran lateral. Secara fisis, pergeseran ini dapat dijelaskan pada Gambar berikut:



Gambar 2.9 Ketebalan efektif pada pandu gelombang

Pada kasus pandu gelombang simetri dimana bahan kover dan substratnya sama, bilangan gelombang untuk bilangan substrat dan kovernya juga sama ( $\gamma_s = \gamma_k = \gamma$ ). Dengan demikian, fungsi eigen pada persamaan (2.53) menjadi

$$\tan(k_f h) = \frac{\gamma/k_f}{\left(1 - \frac{\gamma^2}{k_f^2}\right)} \dots\dots\dots (2.61)$$

Penggunaan identitas trigonometri memberikan persamaan

$$\tan(2k_f h/2) = \frac{2 \tan(k_f h/2)}{1 - \tan^2(k_f h/2)} \dots\dots\dots (2.62)$$

Jika dibandingkan dengan persamaan (2.61) diperoleh solusi

$$\tan(k_f h/2) = \frac{\gamma}{k_f} \dots\dots\dots (2.63)$$

dan

$$\tan(k_f h/2) = -\frac{k_f}{\gamma} \dots\dots\dots (2.64)$$

Persamaan (2.64) dan (2.65) di atas berturut-turut adalah persamaan eigen untuk moda genap dan ganjil pada pandu gelombang slab simetri. Hasil kedua moda ini didapatkan dengan menggeser koordinat asal ke tengah inti. Pandu gelombang slab simetri biasanya menggunakan simbol  $h$  untuk setengah lebar dari inti. Hal ini dapat

menjelaskan mengapa pada persamaan di atas menggunakan fungsi  $h/2$  daripada  $h$  (Marcuse, 1974). Persamaan di atas merupakan persamaan eigen yang tidak memiliki solusi eksplisit. Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai eigen ( $k_f$ ), yakni dengan metode numerik atau grafik (Jones, 1987).

### 2.9.2 Fungsi Gelombang Masukan Nonlinear

Fungsi gelombang masukan nonlinear dapat diperoleh dari hasil perambatan gelombang linear ke medium nonlinear sebelum dijadikan sinyal masukan pada pandu gelombang. Medium nonlinear tersebut dapat berupa fiber optik yang bagian intinya terbuat dari bahan nonlinear sebagai bahan kopling laser ke dalam pandu gelombang. Medium nonlinear tersebut diasumsikan bertipe Kerr sehingga hasilnya berupa gelombang soliton. Gelombang soliton merupakan gelombang elektromagnetik yang terlokalisasi dalam bidang transversal dan dapat merambat tanpa perubahan fasa dan kecepatan.

Adanya polarisasi gelombang elektromagnetik akibat perambatannya pada medium nonlinear, pergeseran listrik pada persamaan (2.28) akan mengalami penambahan akibat polarisasi tersebut yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$D = \epsilon E + P_{nl} \dots\dots\dots(2.65)$$

Oleh karena itu, persamaan (2.33) untuk bahan nonlinear didapatkan menjadi

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}}{\partial t^2} \dots\dots\dots(2.66)$$

dengan polarisasi nonlinear telah ditunjukkan pada persamaan (2.2). Polarisasi nonlinear pada bahan nonlinear bertipe Kerr, diambil dalam orde ketiga sebagai berikut:

$$P_{nl} = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \dots\dots\dots(2.67)$$

Medan listrik moda TE sebagaimana pada persamaan (2.67) juga dapat diekspresikan dalam

$$E_y = \frac{1}{2} \{ \psi(x, z) \exp(j\omega t) + c.c \} \dots\dots\dots(2.68)$$

dimana  $c.c$  adalah bilangan kompleks konjugasinya. Substitusi persamaan (2.68) kedalam persamaan (2.66) menghasilkan

$$P_{nl} = \frac{1}{8} \varepsilon_0 \chi^{(3)} \left\{ \psi^3 \exp(j3\omega t) + 3|\psi|^2 \psi \exp(j\omega t) + c.c \right\} \dots\dots\dots (2.69)$$

Bagian orde ketiga dari persamaan di atas untuk frekuensi tinggi, dapat diabaikan. Sehingga, persamaan dapat dipersingkat menjadi

$$P_{nl} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3}{4} \varepsilon_0 \chi^{(3)} |\psi|^2 \psi(x, z) \exp(j\omega t) + c.c \right\} \dots\dots\dots (2.70)$$

Substitusi persamaan medan listrik (2.68) dan polarisasi nonlinear (2.69) dapat mengubah persamaan (2.66) menjadi

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -k_0^2 n^2 \psi - k_0^2 \alpha(x, z) |\psi|^2 \psi \dots\dots\dots (2.71)$$

dimana  $\alpha(x, z)$  adalah koefisien nonlinearitas untuk material nonlinear bertipe Kerr yang dapat didefinisikan sebagai

$$\alpha(x, z) = \frac{3}{4} \chi^{(3)} \dots\dots\dots (2.72)$$

Permeabilitas nonlinear pada persamaan (2.72) juga dapat didefinisikan sebagai

$$\alpha(x, z) = c \varepsilon_0 n(x, z)^2 \bar{n}(x, z) \dots\dots\dots (2.73)$$

dimana  $\bar{n}$  adalah distribusi index nonlinear.

Medan listrik yang menjalar pada struktur homogen ke arah sumbu-z dapat diekspresikan dalam bentuk fungsi gelombang sebagai berikut

$$\psi = u(x) \exp(-j\beta z) \dots\dots\dots (2.74)$$

Persamaan (2.71) dapat diubah dengan mensubstitusikan persamaan (2.74) sehingga menjadi persamaan differensial nonlinear tak bergantung waktu sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2(x) - \beta^2) u + k_0^2 \alpha(x, z) |u|^2 u = 0 \dots\dots\dots (2.75)$$

Jika diasumsikan fungsi gelombang merupakan fungsi riil, maka persamaan differensial tersebut untuk gelombang pada bagian film dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_0^2 \left[ n_f^2 - N^2 + \alpha(x, z) |u|^2 \right] u = 0 \dots\dots\dots(2.76)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan medan listrik pada medium nonlinear yang mematuhi persamaan Helmholtz nonlinear (Faridawati, 2009). Penyelesaian persamaan (2.76) didapatkan dengan substitusi persamaan tersebut dikalikan dengan  $du/dx$  sehingga menghasilkan

$$\frac{d^2 u}{dx^2} \frac{du}{dx} + k_0^2 \left[ n_f^2 - N^2 + \alpha(x, z) |u|^2 \right] u \frac{du}{dx} = 0 \dots\dots\dots(2.77)$$

Persamaan (2.77) dapat dituliskan kembali dalam bentuk

$$\frac{k_0^2}{2} \frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{k_0^2} \left( \frac{du}{dx} \right)^2 + \left[ n_f^2 - N^2 + \frac{1}{2} \alpha(x, z) u^2 \right] u^2 \right\} = 0 \dots\dots\dots(2.78)$$

Persamaan di atas mengindikasikan bahwa

$$\frac{1}{k_0^2} \left( \frac{du}{dx} \right)^2 + \left[ n_f^2 - N^2 + \frac{1}{2} \alpha(x, z) u^2 \right] u^2 = C_{nl} \dots\dots\dots(2.79)$$

Pada kondisi awal dimana  $u = u_0$  dan  $du/dx = 0$ , nilai konstanta  $C_{nl}$  dapat didefinisikan sebagai

$$C_{nl} = \left( n_f^2 - N^2 + \frac{1}{2} \alpha(x, z) u_0^2 \right) u_0^2 \dots\dots\dots(2.80)$$

$u_0$  adalah medan listrik pada perbatasan di  $x = -h$  dan di  $x = 0$ . Penyelesaian dari persamaan (2.79) dapat memiliki solusi sebagai sebagai fungsi Jacobian eliptik (Faridawati, 2009).

$$u_{nl}(x) = pcn \left[ k_0 q (x - x_0) \mid m \right] \dots\dots\dots(2.81)$$

dengan  $x_0$  adalah konstanta integral yang menunjukkan lokasi medan maksimum Sedangkan, konstanta yang lain dapat didefinikan sebagai

$$\begin{cases} p = q \sqrt{2m/\alpha} \\ q^2 = (n_f^2 - N^2)(1/1 - 2m) \\ m = (|\Gamma| - (n_f^2 - N^2))/2|\Gamma| \\ \Gamma^2 = (n_f^2 - N^2)^2 + 2\alpha C_{nl} \end{cases} \dots\dots\dots(2.82)$$

**2.10 Finite Difference Beam Propagation Method (FD-BPM)**

Saat gelombang elektromagnetik mulai menjalar sepanjang struktur pandu gelombang, fungsi gelombang elektromagnetik tersebut akan mengalami perubahan pada arah propagasinya dimana dalam penelitian ini propagasi cahaya mengarah pada sumbu-z sehingga persamaan (2.74) ditulis kembali dalam bentuk

$$\psi = u(x, z) \exp(-j\beta z) \dots\dots\dots (2.83)$$

Oleh karena itu persamaan differensial pada persamaan (2.76) selama perjalanan dalam pandu gelombang nonlinear dapat ditulis sebagai

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 2j\beta \frac{\partial u}{\partial z} + (k_0^2 n^2(x) - \beta^2)u + k_0^2 \alpha(x, z)|u|^2 u = 0 \dots\dots\dots (2.84)$$

atau dapat ditulis kembali dengan pengertian indeks bias efektif sebagai berikut

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 2jk_0 N \frac{\partial u}{\partial z} + k_0^2 (n^2 - N^2)u + k_0^2 \alpha(x, z)|u|^2 u = 0 \dots\dots\dots (2.85)$$

Distribusi medan gelombang cahaya diasumsikan tidak berubah pada langkah yang sangat kecil ke arah perjalanan longitudinal (sumbu-z)

$$\left| \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right| \ll 2jk_0 N \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \dots\dots\dots (2.86)$$

atau dapat dianggap bahwa  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \approx 0$  maka persamaan (2.85) dapat diubah menjadi

$$2jk_0 N \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - N^2)u + k_0^2 \alpha(x, z)|u|^2 u \dots\dots\dots (2.87)$$

Penyelesaian persamaan differensial di atas didapatkan dengan bantuan perhitungan komputasi. Proses pemasukan persamaan (2.87) ke dalam bahasa pemrograman lebih mudah dilakukan dengan mendiskritisasi persamaan tersebut menggunakan pendekatan *Finite Difference* (FD). Diskritisasi dilakukan pada koordinat x dan z dengan pendekatan

$$\begin{aligned} x &= s\Delta x \\ z &= r\Delta z \end{aligned} \dots\dots\dots (2.88)$$

dan



$$\begin{cases} u(x, z) \rightarrow u_s^r = u(x_s, z_r) \\ n(x, z) \rightarrow n_s^r = n(x_s, z_r) \dots\dots\dots(2.89) \\ \alpha(x, z) \rightarrow \alpha_s^r = \alpha(x_s, z_r) \end{cases}$$

dengan  $s$  dan  $r$  adalah bilangan *integer* dan diambil langkah  $N + 1$  untuk  $s$  dari nol hingga  $N$ . Diskritisasi elemen sumbu- $x$  pada suku pertama sisi kanan persamaan (2.87) didapatkan

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{s+1} - 2u_s + u_{s-1}}{\Delta x^2} \dots\dots\dots(2.90)$$

Sedangkan, suku kedua didapatkan

$$k_0^2 (n^2 - N^2) u = k_0^2 (n_s^2 - N^2) u_s \dots\dots\dots(2.91)$$

dan untuk suku ketiga didapatkan

$$k_0^2 \alpha(x, z) |u|^2 u = k_0^2 \alpha_s |u_s|^2 u_s \dots\dots\dots(2.92)$$

Diskritisasi elemen sumbu- $z$  pada sisi kiri persamaan (2.87) didapatkan

$$2jk_0N \frac{\partial u}{\partial z} = 2jk_0N \frac{u_s^{r+1} - u_s^r}{\Delta z} \dots\dots\dots(2.93)$$

Pada persamaan diatas terlihat bahwa *difference center* pada sisi kiri persamaan terletak pada  $r+1/2$  yakni pertengahan antara  $r$  dan  $r+1$ . Dengan demikian, sisi kanan juga harus didiskritisasi pada sumbu- $z$  dengan *difference center*  $r+1/2$  sehingga didapatkan persamaan

$$2jk_0N \frac{u_s^{r+1} - u_s^r}{\Delta z} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{u_{s+1}^r - 2u_s^r + u_{s-1}^r}{\Delta x^2} + k_0^2 \left( (n_s^2)^{r+1/2} - N^2 \right) u_s^r \\ & + k_0^2 \alpha_s^{r+1/2} |u_s^r|^2 u_s^r \end{aligned} \right\} \\ + \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{u_{s+1}^{r+1} - 2u_s^{r+1} + u_{s-1}^{r+1}}{\Delta x^2} + k_0^2 \left( (n_s^2)^{r+1/2} - N^2 \right) u_s^{r+1} \\ & + k_0^2 \alpha_s^{r+1/2} |u_s^{r+1}|^2 u_s^{r+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.94)$$

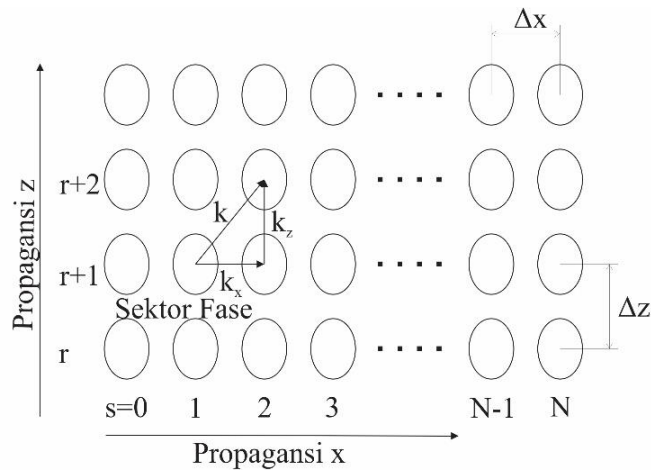
Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

$$\begin{aligned} & -\rho A u_{s-1}^{r+1} + \left\{ 2(1 + \rho A) - \Delta z B_s^{r+1/2} \right\} u_s^{r+1} - \rho A u_{s+1}^{r+1} \\ & = \left\{ 2(1 - \rho A) + \Delta z B_s^{r+1/2} \right\} u_s^r + \rho A (u_{s+1}^r + u_{s-1}^r) \dots\dots\dots(2.95) \\ & \quad + \Delta z C_s^{r+1/2} \left( |u_s^r|^2 u_s^r + |u_s^{r+1}|^2 u_s^{r+1} \right) \end{aligned}$$

dengan definisi

$$\begin{cases} \rho = \frac{\Delta z}{\Delta x^2} \\ A = \frac{-j}{2k_0 N} \\ B_s^{r+1/2} = \frac{-jk_0}{2N} \left\{ n_s^{2r+1/2} - N^2 \right\} \\ C_s^{r+1/2} = \frac{-jk_0 \alpha_s^{r+1/2}}{2N} \end{cases} \dots\dots\dots (2.96)$$

$\Delta x$  dan  $\Delta z$  berturut-turut adalah beda panjang langkah transversal dan longitudinal. Sedangkan,  $s$  dan  $r$  menunjukkan titik sampling transversal dan longitudinal. Persamaan (2.95) bersesuaian dengan skema *Crank-Nicholson*. Langkah perhitungan FD-BPM tersebut dapat dijelaskan melalui Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Penyamplingan pandu gelombang dengan FDBPM (Pramono, 1999)

### 2.10.1 Transparency Boundary Condition (TBC)

Pada struktur sebenarnya, gelombang radiasi terpantul di daerah perbatasan dan kembali ke daerah inti dimana mereka akan berinteraksi dengan medan penjalaran. Interaksi ini dapat mengganggu medan akurasi perhitungan. Dalam pembahasan kali ini akan dibahas *Transparency Boundary Condition* (TBC) yang dikembangkan oleh Handley sebagai cara untuk secara efisien menekan pemantulan pada perbatasan dan mudah diimplementasikan dalam program komputer. Hipotesa tersebut menunjukkan analisa hanya dilakukan pada titik  $s = 1$  hingga  $s = N-1$ . Titik-

titik pada  $s = 0$  dan  $s = N$  diasumsikan berada diluar daerah analisa. Oleh karena itu, TBC dilakukan dengan memberikan hubungan pendekatan fungsi pada titik  $s = 0$  dan  $s = N$  ke dalam titik-titik pada  $s = 1$  dan  $s = N-1$  (Acioli et al., 1990).

Metode ini diasumsikan bahwa medan di dekat perbatasan dapat diekspresikan dalam fungsi eksponensial dengan argument kompleks. Pada penelitian ini, gelombang diasumsikan menjalar ke arah sumbu-z dengan bilangan gelombang  $k_x$  (dimana daerah perbatasan berada di sepanjang sumbu-x) sehingga fungsi medan gelombang pada daerah perbatasan dapat dituliskan

$$\begin{cases} u = A_L \exp(jk_{xl}x) \dots \dots \dots (\text{Batas kiri}) \\ u = A_R \exp(-jk_{xr}x) \dots \dots \dots (\text{Batas kanan}) \end{cases} \dots \dots \dots (2.97)$$

dimana  $A_L$  dan  $A_R$  merupakan bilangan kompleks sedangkan  $k_{xl}$  dan  $k_{xr}$  adalah bilangan tak diketahui pada titik sampling. Sebagaimana telah ditunjukkan pada Gambar 4.3, analisa skema dilakukan dari titik  $s = 0$  hingga  $s = N$ . Maka diasumsikan bahwa perbatasan kiri terletak pada  $s = 0$  dan 1 sedangkan perbatasan kanan terletak pada  $s = N-1$  dan  $N$ . Dengan demikian, fungsi medan gelombang di daerah perbatasan kiri ditulis sebagai

$$\begin{cases} u_0 = A_L \exp(jk_{xl}x_0) \\ u_1 = A_L \exp(jk_{xl}x_1) \end{cases} \dots \dots \dots (2.98)$$

dan untuk perbatasan kanan

$$\begin{cases} u_{N-1} = A_R \exp(-jk_{xr}x_{N-1}) \\ u_N = A_R \exp(-jk_{xr}x_N) \end{cases} \dots \dots \dots (2.99)$$

Persamaan (2.98) dan (2.99) memberikan hubungan

$$\begin{cases} \frac{u_0}{u_1} = \exp(jk_{xl}(x_0 - x_1)) = \exp(jk_{xl}(-\Delta x)) \\ \frac{u_N}{u_{N-1}} = \exp(-jk_{xr}(x_N - x_{N-1})) = \exp(-jk_{xr}\Delta x) \end{cases} \dots \dots \dots (2.100)$$

Kondisi medan gelombang di perbatasan menjadi

$$\begin{cases} u_0 = u_1 \exp(-jk_{xl}\Delta x) \\ u_N = u_{N-1} \exp(-jk_{xr}\Delta x) \end{cases} \dots \dots \dots (2.101)$$

Tanda negatif pada fungsi di atas memastikan bahwa tidak ada aliran radiasi di daerah perbatasan. Hubungan di atas memberikan definisi bilangan  $k_{xl}$  dan  $k_{xr}$  dalam persamaan

$$\begin{cases} k_{xl} = \frac{j}{\Delta x} \ln\left(\frac{u_0}{u_1}\right) \\ k_{xr} = \frac{j}{\Delta x} \ln\left(\frac{u_N}{u_{N-1}}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (2.102)$$

Nilai riil dari  $k_x$  menunjukkan tingkat perubahan fase di dekat perbatasan sedangkan, nilai imajinerinya menunjukkan tingkat keterlambatan atau peningkatan besar medan. Selama nilai riil  $k_x$  adalah positif, maka perubahan keseluruhan energi dari perbatasan ini akan selalu negatif. Salah satunya menunjukkan radiasi energi akan hanya mengalir keluar dari perhitungan. Untuk itu nilai  $k_x$  harus dibatasi menjadi positif agar memastikan pemanduan di luar radiasi. Sebaliknya akan menyebabkan algoritma tidak stabil karena kecenderungan timbulnya radiasi palsu yang masuk kembali ke daerah perhitungan. Meskipun kondisi di atas dapat membatasi arah radiasi, jumlah arus radiasi yang keluar tetap bergantung pada nilai  $k_x$  yang digunakan. Ekspektasi ini konsisten dengan observasi bahwa koefisien pantul diperkirakan mendekati nilai maksimum ketika nilai  $k_x$  mendekati nilai nol atau  $\pi/\Delta x$ .

### 2.10.2 Pemrograman dan Metode Tridiagonal

Perhitungan komputasi menggunakan FD-BPM dilakukan dengan menyelesaikan permasalahan dengan mendapatkan penyelesaian fungsi  $u^{r+1}$  yang tak diketahui menggunakan fungsi yang diketahui dari  $u^r$  yang berasal dari fungsi masukan. Koefisien  $r$  dan  $r+1$  disini mewakili arah penjalaran  $z$  dan  $z + \Delta z$ . Persamaan (2.94) perlu disederhanakan menjadi

$$A_s u_{s-1}^{r+1} + B_s u_s^{r+1} + C_s u_{s+1}^{r+1} = D_s^r \dots\dots\dots (2.103)$$

dengan mengasumsikan koefisien  $A_s$ ,  $B_s$ , dan  $C_s$  yang diketahui dan nilai  $D_s$  sebagai berikut

$$\begin{aligned}
A_s &= -\rho A \\
B_s &= 2(1 + \rho A) - \Delta z B_s^{r+1/2} \\
C_s &= -\rho A \quad \dots\dots\dots(2.104) \\
D_s &= \left\{ 2(1 - \rho A) + \Delta z B_s^{r+1/2} \right\} u_s^r + \rho A (u_{s+1}^r + u_{s-1}^r) \\
&\quad + \Delta z C_s^{r+1/2} \left( |u_s^r|^2 u_s^r + |u_s^{r+1}|^2 u_s^{r+1} \right)
\end{aligned}$$

**Batas Kiri**

Modifikasi subjek pada persamaan (2.94) menjadi matrik tridiagonal dilakukan dengan mengaplikasikan kondisi *Dirichelt* pada daerah perbatasan (Pramono, 2000). Persamaan medan gelombang untuk daerah perbatasan ditulis berdasarkan ketentuan *TBC* dimana medan gelombang  $u_0$  didapatkan dari persamaan (2.95) pada perbatasan kiri dapat dituliskan menjadi

$$u_0 = u_1 \exp(-jk_{xl} \Delta x) = u_1 \eta_L \quad \dots\dots\dots(2.105)$$

sehingga persamaan (4.71) untuk kondisi di batas kiri menjadi

$$B_1' u_1^{r+1} + C_1 u_2^{r+1} = D_1^r \quad \dots\dots\dots(2.106)$$

dengan

$$\begin{aligned}
B_1' &= 2(1 + \rho A) - \Delta z B_1^{r+1/2} - \rho A \eta_L \\
C_1 &= -\rho A \\
D_1 &= \left\{ 2(1 - \rho A) + \Delta z B_1^{r+1/2} + \rho A \eta_L \right\} u_1^r + \rho A u_2^r \quad \dots\dots\dots(2.107) \\
&\quad + \Delta z C_1^{r+1/2} \left( |u_1^r|^2 u_1^r + |u_1^{r+1}|^2 u_1^{r+1} \right)
\end{aligned}$$

**Batas Kanan**

Pada daerah perbatasan kanan, medan gelombang  $u_N$  didapatkan dari persamaan (2.95) dapat dituliskan menjadi

$$u_N = u_{N-1} \exp(-jk_{xr} \Delta x) = u_{N-1} \eta_R \quad \dots\dots\dots(2.108)$$

sehingga persamaan (4.71) untuk kondisi di batas kanan menjadi

$$A_{N-1} u_{N-2}^{r+1} + B_{N-1}' u_{N-1}^{r+1} = D_{N-1}^r \quad \dots\dots\dots(2.109)$$

dengan

$$\begin{aligned}
A_{N-2} &= -\rho A \\
B'_{N-1} &= 2(1 + \rho A) - \Delta z B_{N-1}^{r+1/2} - \rho A \eta_R \\
D^r_{N-1} &= \left\{ 2(1 - \rho A) + \Delta z B_{N-1}^{r+1/2} + \rho A \eta_R \right\} u^r_{N-1} + \rho A u^r_{N-2} \dots\dots\dots (2.110) \\
&\quad + \Delta z C_{N-1}^{r+1/2} \left( |u^r_{N-1}|^2 u^r_{N-1} + |u^{r+1}_{N-1}|^2 u^{r+1}_{N-1} \right)
\end{aligned}$$

Jika dirangkum, persamaan pada penjalaran gelombang dapat ditulis dalam bentuk matriks tridiagonal dimana semua koefisien matriks bernilai nol kecuali pada elemen diagonalnya seperti yang tertulis sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix}
B'_1 & C_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
A_2 & B_2 & C_2 & \dots & \dots & 0 & 0 \\
0 & A_3 & B_3 & C_3 & \dots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & C_{N-2} \\
0 & 0 & 0 & \dots & \dots & A_{N-1} & B'_{N-1}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
u_1^{r+1} \\
u_2^{r+1} \\
u_3^{r+1} \\
\vdots \\
u_{N-2}^{r+1} \\
u_{N-1}^{r+1}
\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
D_1^r \\
D_2^r \\
D_3^r \\
\vdots \\
D_{N-2}^r \\
D_{N-1}^r
\end{pmatrix}
\dots\dots (2.111)$$

Matriks tridiagonal di atas dapat diselesaikan dengan metode Thomas (Kawano, 2004). Analisa dilakukan hanya pada sumbu- $x$  atau elemen  $s$  agar dapat mempermudah proses analisa sehingga elemen  $r$  dihilangkan untuk sementara. Tahap pertama dilakukan dengan mengubah persamaan baris pertama menjadi

$$u_1 + \gamma_1 u_2 = \rho_1 \dots\dots\dots (2.112)$$

dimana

$$\begin{cases}
\gamma_1 = \frac{C_1}{B'_1} \\
\rho_1 = \frac{D_1}{B'_1}
\end{cases}
\dots\dots\dots (2.113)$$

Baris kedua didapatkan dengan mengeliminasi persamaan tersebut dengan persamaan pada baris sebelumnya sehingga didapatkan

$$u_2 + \gamma_2 u_3 = \rho_2 \dots\dots\dots (2.114)$$

dimana

$$\begin{cases} \gamma_2 = \frac{C_2}{B_2 - A_2\gamma_1} \\ \rho_2 = \frac{D_2 - A_2\rho_1}{B_2 - A_2\gamma_1} \end{cases} \dots\dots\dots(2.115)$$

Cara penyelesaian tersebut terus berlanjut hingga semua baris berubah menjadi persamaan

$$u_s + \gamma_s u_{s+1} = \rho_s \dots\dots\dots(2.116)$$

dimana

$$\begin{cases} \gamma_s = \frac{C_s}{B_s - A_s\gamma_{s-1}} \\ \rho_s = \frac{D_s - A_s\rho_{s-1}}{B_s - A_s\gamma_{s-1}} \end{cases} \dots\dots\dots(2.117)$$

Sedangkan, baris terakhir didapatkan persamaan

$$A_{N-1}u_{N-2} + B_{N-1}'u_{N-1} = D_{N-1} \dots\dots\dots(2.118)$$

Eliminasi dengan persamaan pada baris sebelumnya menghasilkan

$$u_{N-1} = \rho_{N-1} \dots\dots\dots(2.119)$$

Penyelesaian matriks diagonal ini akan mendapatkan nilai eigen  $u_s$  yang ditunjukkan dalam matriks penyelesaian sebagai berikut:

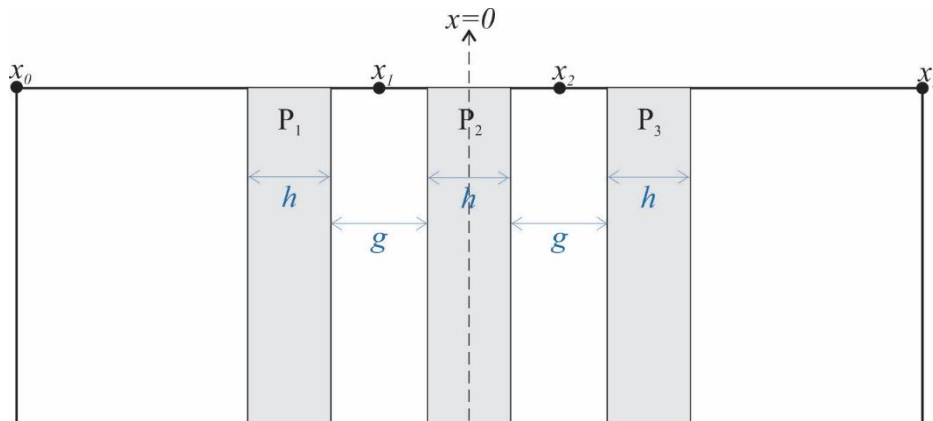
$$\begin{pmatrix} 1 & \gamma_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \gamma_2 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 1 & \gamma_{N-2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_{N-2} \\ u_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \vdots \\ \rho_{N-2} \\ \rho_{N-1} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.120)$$

### 2.11 Karakterisasi Pandu Gelombang

Karakterisasi struktur pandu gelombang didapatkan dari nilai daya optik keluaran pada masing-masing port keluaran yang dapat dihitung dengan persamaan yang sama dengan perhitungan daya masukan pada persamaan (2.57) sebagai berikut:

$$P_i = \frac{\beta}{k_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} |E(x)|^2 dx, \quad i=1,2,3,\dots \quad (2.121)$$

dimana  $E(x)$  merupakan distribusi medan yang dihasilkan oleh analisa FD-BPM. Sebagai contoh, pada struktur pandu gelombang yang memiliki tiga port keluaran seperti pada Gambar 2.11, maka fungsi integral didapatkan dari daerah yang didefinisikan pada persamaan (2.120).



Gambar 2.11 Posisi batas integrasi pada perhitungan daya keluaran

$$\begin{aligned} x_0 &= -x_{\max} \\ x_1 &= -(h+g)/2 \\ x_2 &= (h+g)/2 \\ x_3 &= x_{\max} \end{aligned} \quad (2.122)$$

dimana  $x_{\max}$  adalah setengah dari lebar substrat. Sedangkan,  $d$  dan  $g$  berturut-turut adalah lebar port keluaran dan jarak antar port keluaran. Perhitungan daya optik keluaran pandu gelombang tersebut didapatkan dengan persamaan

$$P_m = \frac{\beta}{k_0} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left( \int_{x_0}^{x_1} |u_1|^2 dx + \int_{x_1}^{x_2} |u_2|^2 dx + \int_{x_2}^{x_3} |u_3|^2 dx \right) \quad (2.123)$$

dimana  $u_1$ ,  $u_2$ , dan  $u_3$  menunjukkan fungsi medan yang menjalar melalui port keluaran 1, 2 dan 3.

Efisiensi dari daya optik keluaran pada pandu gelombang didefinisikan sebagai

$$\eta = \frac{P_i}{P_{in}}, \quad i=1,2,3 \quad (2.124)$$



Sebaliknya, normalisasi daya optik memberikan perhitungan rugi radiasi yang mengekspresikan prosentase daya yang teradiasi keluar dari pandu gelombang. Rugi radiasi tersebut ditunjukkan melalui persamaan

$$P_l = \left( 1 - \sum_{i=1}^3 \frac{P_i}{P_{in}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.125)$$

Efisiensi pemanduan daya optik pada pandu gelombang juga dapat direpresentasikan dengan *Extinction Ratio* ( $R_{ex}$ ).  $R_{ex}$  merupakan perbandingan dua tingkat daya optik keluaran dari pandu gelombang. Pada penelitian ini,  $R_{ex}$  dideskripsikan dalam fungsi desibel dalam persamaan

$$R_{ex} = 10 \log_{10} \left( \max \left\{ \frac{P_j}{P_i}, \frac{P_k}{P_i} \right\} \right) \dots\dots\dots(2.126)$$

Deskripsi menggunakan desibel dipilih karena logaritma pada fungsi desibel dapat menghindari operasi perkalian dan pembagian dari angka kecil dan besar dan diubah menjadi operasi penambahan dan pengurangan dan membuat perbandingan lebih mudah pada nilai terbesar dan terkecil dari nilai daya optik keluaran. Elemen  $i$ ,  $j$ , dan  $k$  pada persamaan mewakili port keluaran 1, 2, 3 pada pandu gelombang. Fungsi  $\max\{A,B\}$  dideskripsikan pada pengambilan nilai terbesar dari A dan B. Sedangkan,  $P_i$  menunjukkan nilai terbesar dari ketiga daya optik keluaran. Oleh karena itu,  $R_{ex}$  akan selalu bernilai negatif atau nol. Hasil nol menunjukkan bahwa daya keluaran dari ketiga port adalah sama.

## 2.12 Teori Moda Terkopel

Dua pandu gelombang sejajar seperti pada *directional coupler* (DC) akan mengalami gangguan yang biasa disebut dengan pertubasi, (pandu gelombang *perturbed*). Di dalam pandu gelombang ini, moda-moda normal *unperturbed* satu sama lain tidak lagi merambat saling bebas, melainkan saling terkopel bersama. Sedangkan, ketika kedua pandu gelombang terpisah cukup jauh, moda normal pandu gelombang I,  $\psi_a$  dan moda normal pandu gelombang II,  $\psi_b$  merambat saling bebas dengan konstanta propagansi berturut-turut  $\beta_a$  dan  $\beta_b$ , dengan perbedaan tertentu semisal  $\beta_a < \beta_b$ . Kedua medan moda normal tersebut ditunjukkan dengan persamaan:

$$\psi_a(x, y, z, t) = A(z)e^{-j\beta_a z} f_a(x, y)e^{i\omega t} \dots\dots\dots(2.127)$$

$$\psi_a(x, y, z, t) = A(z)e^{-j\beta_a z} f_a(x, y)e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.128)$$

dengan  $f_a(x, y)$  dan  $f_b(x, y)$  adalah fungsi-fungsi distribusi medan ternormalisasi ketika daya menjalar melalui penampang transversal tiap pandu gelombang,  $A(z)$  dan  $B(z)$  adalah amplitudo masing-masing medan yang nilainya bervariasi di sepanjang arah rambatnya (sumbu  $z$ ).

Berkurangnya jarak pisah, kedua moda tersebut akan tergantikan dengan dua moda normal baru yaitu medan moda simetri (*even-mode*)  $\psi_e$  dan moda antisimetri (*odd-mode*) yang masing-masing merambat dengan tetapan propagansi  $\beta_e$  dan  $\beta_o$  dengan  $\beta_e > \beta_b$  dan  $\beta_o < \beta_a$ . Sedangkan, nilai amplitudo dari kedua moda normal,  $A(z)$  dan  $B(z)$  akan bervariasi dengan mematuhi persamaan moda terkopel.

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -j\kappa_{ab} B(z)e^{-j(\beta_b - \beta_a)z} \dots\dots\dots (2.129)$$

$$\frac{\partial B(z)}{\partial z} = -j\kappa_{ba} A(z)e^{-j(\beta_b - \beta_a)z} \dots\dots\dots (2.130)$$

dengan  $\kappa_{ab}$  dan  $\kappa_{ba}$  adalah koefisien kopling kedua moda yang ditetapkan untuk mengukur seberapa besar ketumpang-tindihan (*overlapping*) secara spasial antar moda normal pada salah satu daerah pandu gelombang yang disebabkan oleh adanya peningkatan tetapan dielektrik  $\Delta\epsilon$ . Jika sinar dieksitasi melalui pandu gelombang I, maka overlap terjadi di pandu gelombang II dan nilai koefisien koplingnya diberikan sebagai:

$$\kappa = \kappa_{ab} = c \iint_{II} f_a^*(x, y) \Delta\epsilon f_b(x, y) dx dy \dots\dots\dots (2.131)$$

dengan batas integral adalah luas penampang pandu gelombang II, besaran  $c$  adalah tetapan yang berkaitan dengan normalisasi  $\psi_a$  dan  $\psi_b$ . Jika sinar dieksitasi melalui pandu gelombang II maka  $\kappa = \kappa_{ba}$ , dan batas integralnya adalah luas penampang pandu gelombang I. Jika pandu gelombang penyusun terbuat dari bahan-bahan yang tidak memiliki rugi-rugi, maka berlaku  $\kappa_{ab} = \kappa_{ba}$ .

Pemanfaatan ekspresi amplitudo moda-moda normal  $A(z)$  dan  $B(z)$  untuk menjelaskan perpindahan daya optik dilakukan bila daya optik tersebut dinyatakan dalam besaran intensitas cahaya. Dimana nilainya sebanding dengan kuadrat absolut dari amplitudo. Perpindahan daya dapat terjadi jika jarak kedua pandu

gelombang maksimum berada pada jarak satu panjang kopling yang ditunjukkan dengan persamaan:

$$z_{\max} = L_c = \frac{\pi}{2\kappa} \dots\dots\dots(2.132)$$

Panjang kopling dipengaruhi oleh parameter-parameter pandu gelombang itu sendiri, seperti lebar, kedalaman, dan indeks bias pandu gelombang. Perpindahan daya juga bergantung dari koefisien kopling dan derajat kesinkronan fasanya (beda fasa) (Rubiyanto, 2003).

Pendekatan moda normal menjadi menjadi metode pendekatan yang lebih akurat untuk menjelaskan proses pemindahan (*switching*) daya optik dalam DC linear. Dalam pendekatan ini, proses pemindahan daya optik terjadi akibat interferensi dua moda medan optik terendah yang disebut moda simetri dan moda simetri yang terpandu di sepanjang sumbu transversalnya. Ekspresi medan dari kedua moda ini merupakan diperlukan dalam tetapan propagansi efektif yang berlaku untuk seluruh struktur DC, bukan dari masing-masing pandu gelombangnya seperti yang direkomendasikan pada teori moda terkopel. Adapun panjang kopling dapat ditentukan dengan menggunakan kedua moda ini dalam persamaan

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_s - \beta_a} \dots\dots\dots(2.133)$$

dengan  $\beta_s$  dan  $\beta_a$  masing-masing adalah nilai tetapan propagansi efektif moda simetri dan asimetri (Kogelnik, 1988).

**2.13 Teori Moda Cabang Y**

Pada penelitian ini, pembagi daya dan *combiner* gelombang dalam pandu gelombang *Mach-Zehnder* dilakukan dengan memanfaatkan pandu gelombang bercabang simetri (*symmetric Y-branches*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pada umumnya pandu gelombang Y-cabang simetri akan membagi daya gelombang sama besar. Rugi-rugi daya pada percabangan bergantung pada sudut percabangan. Semakin besar sudut percabangan maka semakin besar pula rugi dayanya karena penyebaran daya menuju *cladding* (Raghuwanshi et al., 2012). Setelah percabangan hanya moda simetri saja yang ditransmisikan, Sedangkan,

moda anti-simetri teradiasi pada substrat/*cladding*. Fungsi gelombang masing-masing diberikan sebagai

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i\phi} \bar{e}_A \dots\dots\dots (2.134)$$

$$\psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i\phi} \bar{e}_B \dots\dots\dots (2.135)$$

dimana  $\bar{e}_A$  dan  $\bar{e}_B$  adalah moda pandu gelombang A dan B tak terkopel. Ketika kedua pandu gelombang identik, gelombang masukkan pada cabang keluaran pada  $z = L_p + L_b$  adalah

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i2\phi} e^{-j\beta_A L_p} (\bar{e}_A + \bar{e}_B) \dots\dots\dots (2.136)$$

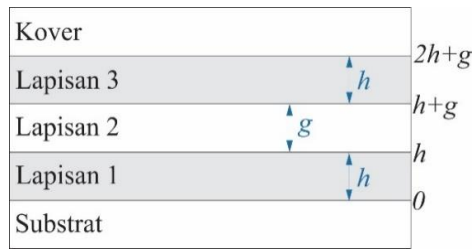
Jika kedua gelombang memiliki sedikit perbedaan indeks bias efektif atau konstanta propagansi,  $\beta_a$  dan  $\beta_b$ , maka gelombang masukkan pada cabang keluaran menjadi

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} A e^{i2\phi} e^{-j\beta_A L_p} (\bar{e}_A + \bar{e}_B e^{-j(\beta_A - \beta_B)L_p}) \dots\dots\dots (2.137)$$

Ketika  $(\beta_B - \beta_A)L_p = \pm\pi$  atau  $(2n \pm 1)\pi$ , amplitudo keluaran menjadi nol atau dengan kata lain terjadi interferensi desktruktif / saling meniadakan antar kedua gelombang (Chang, 2010).

## 2.14 Metode Matrik Karakteristik Pandu Gelombang Lapis Jamak

Metode matrik karakteristik pandu gelombang lapis jamak telah banyak digunakan dalam perancangan berbagai perangkat fotonik (Rohedi, 2005). Perumusan nilai eigen DC dapat dilakukan dengan proses reduksi dari dua dimensi ke dimensi satu dengan metode indeks bias efektif. Penerapan metode ini dilakukan dengan meninjau DC hanya pada bagian lateralnya dalam bentuk struktur pandu gelombang lapis jamak berisi 5 lapisan tipis. Lapisan tersebut terdiri dari dua lapis sebagai pemandu, selapis sebagai pemisah antara kedua pemandu dan dua lapis sebagai substrat dan kover seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pandu Gelombang Lapis Jamak Lateral DC (Rinawati, 2007)

Lapisan 1 hingga 3 dianggap sebagai daerah *stack* seperti lapisan film pada pandu gelombang slab. Oleh karena itu secara prinsip, penurunan persamaan nilai eigennya mengikuti kaidah pada pandu gelombang slab.

Metode matrik karakteristik lapis jamak didasarkan pada kontinuitas komponen-komponen medan cahaya terpandu pada setiap perbatasan antar lapisan. Syarat kontinuitas komponen-komponen medan tangensial setiap modus cahaya yang menjalar setiap lapisan kemudian dituliskan dalam kesatuan vektor kolom matrik.

Pada medan TE, penerapan syarat kontinuitas dilakukan pada medan-medan yang sejajar dengan bidang batas. Dalam hal ini, medan tersebut adalah medan listrik  $E_y$  dan medan magnet  $H_z$  yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u &= E_y \\ v &= -j\omega\mu H_z \end{aligned} \dots\dots\dots(2.138)$$

Persamaan Helmholtz pada bagian *stack* sama dengan persamaan Helmholtz lapisan film pada pandu gelombang slab yang dituliskan sebagai

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k^2 u = 0 \dots\dots\dots(2.139)$$

dimana

$$k = \sqrt{k_0^2 n^2 - \beta^2} \dots\dots\dots(2.140)$$

Persamaan (2.138) memiliki penyelesaian yang dapat dinyatakan fungsi eksponensial berikut:

$$\begin{aligned} u &= A \exp(-jkx) + B \exp(jkx) \\ v &= -jk (A \exp(-jkx) - B \exp(jkx)) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.141)$$

dengan  $k_0$  dan  $\beta$  berturut-turut adalah konstanta propagansi pada ruang hampa dan tetapan propagansi moda sejajar arah pemanduan sinar. Sedangkan,  $n$  adalah indeks bias film. Persamaan (2.141) kemudian dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-jkx) & \exp(jkx) \\ -jk \exp(-jkx) & jk \exp(jkx) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.142)$$

Pada bidang batas  $x=0$ , fungsi moda dapat didefinisikan sebagai  $u(x=0) = u_0$  dan  $v(x=0) = v_0$  sehingga persamaan (2.142) dapat dituliskan kembali menjadi

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kx) & \sin(kx)/k \\ -k \sin(kx) & \cos(kx) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.143)$$

Pada bidang batas  $x = x_1$  sebagai tanda batas lapisan 1, fungsi moda dapat didefinisikan sebagai  $u(x = x_1) = u_1$  dan  $v(x = x_1) = v_1$  sehingga persamaan (2.142) dapat dituliskan menjadi

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_1 x_1) & \sin(k_1 x_1)/k_1 \\ -k_1 \sin(k_1 x_1) & \cos(k_1 x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.144)$$

Dengan demikian, persamaan matrik untuk lapisan ke- $n$  didapatkan dengan mengasumsikan  $u(x = x_n) = u_n$  dan  $v(x = x_n) = v_n$  sehingga dapat dituliskan sebagai

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_n (x_n - x_{n-1})) & \sin(k_n (x_n - x_{n-1}))/k_n \\ -k_n \sin(k_n (x_n - x_{n-1})) & \cos(k_n (x_n - x_{n-1})) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{n-1} \\ v_{n-1} \end{bmatrix} \dots\dots (2.145)$$

Tebal tiap lapisan didapatkan dari selisih titik observasi yang dinyatakan dalam  $h_i = x_i - x_{i-1}$  sehingga tetapan propagansi tiap lapisan didefinisikan sebagai

$$k_i = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - \beta^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \dots\dots\dots (2.146)$$

Dengan demikian, bentuk persamaan matrik karakteristik secara umum dapat dituliskan sebagai

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} u_{i-1} \\ v_{i-1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.147)$$

dengan  $M_i$  menyatakan matrik karakteristik untuk setiap lapisan film pandu gelombang, yaitu

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_i h_i) & \sin(k_i h_i)/k_i \\ -k_i \sin(k_i h_i) & \cos(k_i h_i) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.148)$$

Demikian seterusnya sehingga diperoleh bentuk matrik karakteristik untuk pandu gelombang dengan  $n$  lapisan adalah

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = M_n M_{n-1} \dots M_2 M_1 \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.149)$$

Persamaan Helmholtz perambatan moda TE pada lapisan kover dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} - \gamma_k^2 u_k = 0 \dots\dots\dots(2.150)$$

dimana

$$\gamma_k = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_k^2} \dots\dots\dots(2.151)$$

dengan  $n_k$  adalah indeks bias lapisan kover. Persamaan (2.150) memiliki penyelesaian yang dapat dinyatakan fungsi eksponensial berikut:

$$\begin{aligned} u_k &= A_k \exp(-\gamma_k (x - x_n)) + B_k \exp(\gamma_k (x - x_n)) \\ v_k &= -\gamma_k (A_k \exp(-\gamma_k (x - x_n)) - B_k \exp(\gamma_k (x - x_n))) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.152)$$

Sehingga bentuk matriknya menjadi

$$\begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-\gamma_k (x - x_n)) & \exp(\gamma_k (x - x_n)) \\ -\gamma_k \exp(-\gamma_k (x - x_n)) & \gamma_k \exp(\gamma_k (x - x_n)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} \dots\dots(2.153)$$

Syarat kontinuitas terjadi pada batas *stack*-kover yang tidak lain pada  $x = x_n$  sehingga diperoleh Matrik karakteristik

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_k & \gamma_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.154)$$

atau dapat dituliskan kembali sebagai

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_k & \gamma_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.155)$$

Sedangkan, pada lapisan substrat, persamaan Helmholtznya adalah

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma_s^2 u = 0 \dots\dots\dots(2.156)$$

dimana

$$\gamma_s = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \dots\dots\dots (2.157)$$

Persamaan (2.155) memiliki penyelesaian yang dapat dinyatakan fungsi eksponensial berikut:

$$\begin{aligned} u_s &= A_s \exp(-\gamma_s x) + B_s \exp(\gamma_s x) \dots\dots\dots (2.158) \\ v_s &= -\gamma_s (A_s \exp(-\gamma_s x) - B_s \exp(\gamma_s x)) \end{aligned}$$

Sehingga bentuk Matriknya menjadi

$$\begin{bmatrix} u_s \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-\gamma_s x) & \exp(\gamma_s x) \\ -\gamma_s \exp(-\gamma_s x) & \gamma_s \exp(\gamma_s x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.159)$$

Syarat kontinuitas terjadi pada batas *stack*-substrat yang tidak lain pada  $x=0$  sehingga diperoleh Matrik karakteristik

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_s & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.160)$$

Jika persamaan (2.155) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.149) maka didapatkan

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_k & \gamma_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.161)$$

kemudian persamaan (2.159) ke persamaan di atas sehingga menjadi

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_k & \gamma_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\gamma_s & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.162)$$

Matrik di atas mengungkapkan bahwa amplitude medan listrik dan medan magnet pada kover dapat dinyatakan dalam amplitude medan listrik dan medan magnet pada substrat. Pada pandu gelombang slab simetri dimana indeks bias substrat dan kover adalah sama dan  $\gamma_s = \gamma_k$  maka persamaan (2.162) dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ B_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.163)$$

Bila amplitudo medan listrik yang merambat ke dalam substrat dan kover dinyatakan dalam  $A_s$  dan  $A_k$  maka medan tangensial pada bidang batas  $x=0$  yang berbatasan dengan substrat dapat dinyatakan dalam bentuk

$$\begin{aligned} u_s &= A_s = u_0 \dots\dots\dots (2.164) \\ v_s &= \gamma_s A_s = v_0 \end{aligned}$$



dan pada bidang batas  $x = x_n$  yang berbatasan dengan kover dapat dinyatakan dalam bentuk

$$\begin{aligned} u_k &= A_k = u_n \\ v_k &= -\gamma_k A_k = v_n \end{aligned} \dots\dots\dots(2.165)$$

Hasil pada persamaan (2.164) dan (2.165) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.163) maka didapatkan persamaan

$$\begin{bmatrix} A_k \\ -\gamma_k A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s \\ \gamma_s A_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.166)$$

Jika persamaan (2.1) dijabarkan dalam bentuk persamaan linear didapatkan

$$\begin{aligned} A_k &= m_{11}A_s + m_{12}\gamma_s A_s \\ -\gamma_k A_k &= m_{21}A_s + m_{22}\gamma_s A_s \end{aligned} \dots\dots\dots(2.167)$$

Hasil eliminasi kedua persamaan di atas dapat menghasilkan persamaan relasi dispersi sebagai berikut (Rinawati, 2007):

$$\gamma_k m_{11} + \gamma_k \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22} = 0 \dots\dots\dots(2.168)$$

Matrik karakteristik daerah *stack* untuk *directional coupler* simetri didapatkan dengan perkalian matrik-matrik berikut: lapisan pandu gelombang pertama dengan lebar  $h$  ( $M_1$ ), dua buah matrik lapisan pemisah (*gap*) dengan lebar  $S$  ( $M_s$ ) dan matrik lapisan pandu gelombang kedua dengan lebar  $h$  ( $M_2$ ) seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$m = M_1 M_s M_s M_2 \dots\dots\dots(2.169)$$

dimana masing-masing matrik didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} M_1 = M_2 &= \begin{bmatrix} \cos(k_f h) & \sin(k_f h)/k_f \\ -k_f \sin(k_f h) & \cos(k_f h) \end{bmatrix} \\ M_s &= \begin{bmatrix} \cos(k_s S/2) & 1/k_s \sin(k_s S/2) \\ -k_s \sin(k_s S/2) & \cos(k_s S/2) \end{bmatrix} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.170)$$

Setelah memasukkan elemen  $m$  hasil perkalian matrik tersebut ke dalam persamaan (2.169) dihasilkan dua buah persamaan nilai eigen, yang masing-masing berlaku untuk moda genap dan moda ganjil. Persamaan nilai eigen untuk moda genap berbentuk

$$k_s \tan\left(\frac{k_s S}{2}\right) = -k \tan(k_f h - \phi) \dots\dots\dots (2.171)$$

Sedangkan, untuk moda ganjil berbentuk

$$k_s \tan\left(\frac{k_s S}{2}\right) = k \tan(k_f h - \phi) \dots\dots\dots (2.172)$$

Pada kedua persamaan tersebut, nilai eigen tersebut didefinisikan  $\phi = \arctan\left(\frac{k_s}{k_f}\right)$

(Rohedi, 2005).

### 2.15 Gerbang Logika dan Aplikasinya

Gerbang logika adalah piranti dua keadaan, yaitu mempunyai keluaran dua keadaan: keluaran dengan nol volt yang menyatakan logika 0 (atau rendah) dan keluaran dengan tegangan tetap yang menyatakan logika 1 (atau tinggi). Gerbang logika dapat mempunyai beberapa masukan yang masing-masing mempunyai salah satu dari dua keadaan logika, yaitu 0 atau 1 (<http://elektronika-dasar.web.id>)

Gerbang logika adalah elemen komputasi yang mengimplementasikan fungsi Boolean dimana operasi logikanya dilakukan pada lebih dari satu masukan biner dan menghasilkan keluaran biner tunggal. Gerbang logika pada perangkat elektronik umumnya diimplementasikan menggunakan dioda dan transistor yang berperan sebagai *switching* elektronik. Rangkaian gerbang logika ini telah menjadi landasan industri *chip* semikonduktor saat ini (Rajan, 2018). Perangkat Tabel 2.3 menunjukkan Tabel kebenaran dari beberapa contoh gerbang logika.

Tabel 2.3 Tabel kebenaran gerbang logika

Masukkan		Keluaran					
A	B	AND	NAND	OR	NOR	XOR	XNOR
0	0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	0	1

Sebagaimana gerbang logika pada rangkaian elektronik, gerbang logika pada *integrated optic* dapat dimunculkan dengan menggunakan transistor optik.

Transistor optik ini merupakan perangkat optik dapat membelokkan atau meningkatkan sinyal optik. Perangkat ini umumnya memanfaatkan material nonlinear optik dalam sistem kerjanya. Efek nonlinear dalam transistor optik berperan untuk menstimulasi proses pergeseran cahaya. Adapun kriteria-kriteria transistor optik antara lain:

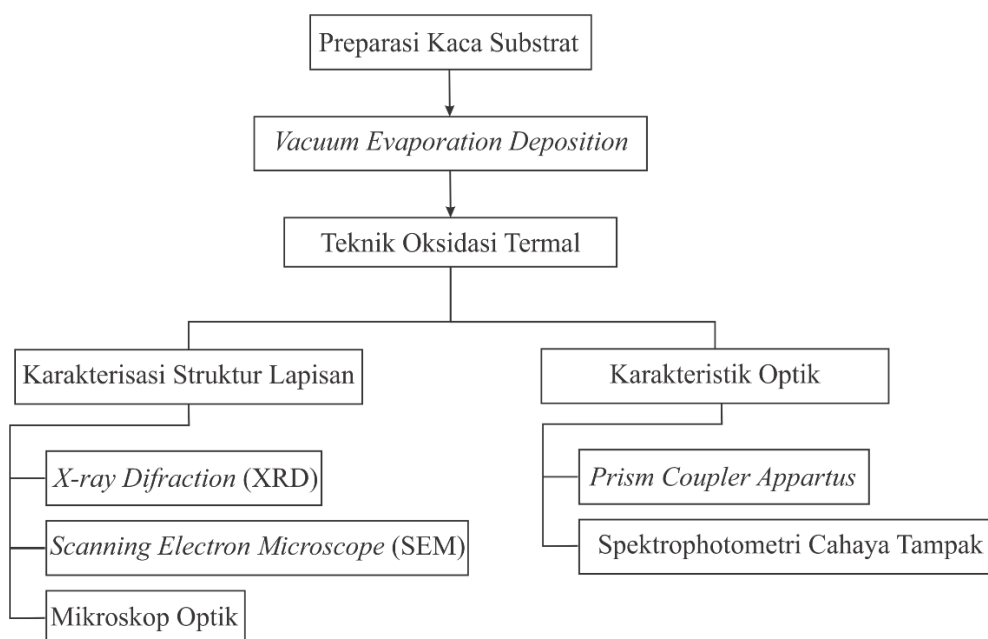
1. *Cascadability*, sinyal keluaran dari satu perlakuan harus berbentuk sebenarnya untuk diteruskan sebagai masukan pada perlakuan selanjutnya.
2. *Fan out*, keluaran pada satu tahap perlakuan harus mampu mendorong input masukkan tahap selanjutnya (minimal dua tahap)
3. Dapat memulihkan tingkat logika
4. Sinyal masukan dan keluaran terisolasi
5. Tidak adanya perubahan nilai kritis
6. Tingkat-logika tak bergantung dengan rugi-rugi (Miller, 2010)

## BAB 3

### METODE

#### 3.1 Fabrikasi Lapisan Tipis

Pada penelitian ini dilakukan analisa sifat-sifat material SnO<sub>2</sub> yang nantinya akan dijadikan sebagai bahan pemandu dari pandu gelombang. Material SnO<sub>2</sub> difabrikasi dalam bentuk lapisan tipis agar lebih mudah dianalisa sifat-sifat optiknya sebagai pandu gelombang nantinya. Lapisan tin oxide terbentuk dari kawat timah murni 99,9% berdiameter 0,5 mm. Timah tersebut dilapiskan pada kaca substrat dengan metode *Vacuum Evaporation*. Sedangkan, SnO<sub>2</sub> terbentuk dengan proses oksidasi termal secara bertahap. Proses fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dilakukan dengan variasi suhu sintering pada proses oksidasi, yakni 600°C, 700°C, 800°C, 900°C, dan 1000°C. Tahapan fabrikasi lapisan SnO<sub>2</sub> terangkum dan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub>

##### 3.1.1 Preparasi substrat

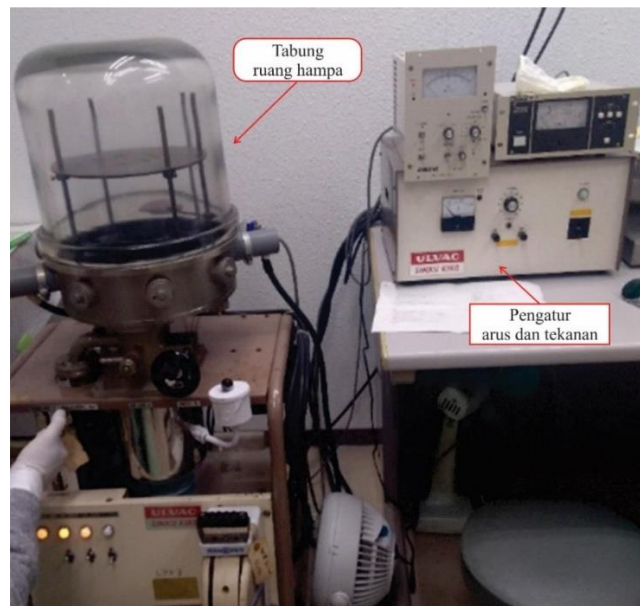
Substrat yang digunakan dalam penelitian ini berbahan kaca kuarsa dengan luas penampang berukuran 5 x 5 mm dan ketebalan sebesar 1 mm. Kaca substrat

perlu dibersihkan untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan beberapa goresan karena gesekan permukaan kaca dengan benda lain, debu dan residu lainnya. Teknik pembersihan juga dilakukan untuk mendapatkan kondisi optik permukaan substrat yang halus sehingga didapatkan kondisi lapisan tipis yang optimal. Kaca substrat dimasukkan ke dalam gelas beker yang berisi ethanol hingga semua permukaan terendam. Gelas beker berisi ethanol dan kaca substrat kemudian dibersihkan dengan menggunakan *Ultrasonication* pada frekuensi 28kHz, 45kHz, dan 100 kHz selama 20 menit secara berurutan. Permukaan kaca substrat dialiri dengan udara bertekanan tinggi untuk menghilangkan butiran ethanol yang masih melekat di permukaan kaca substrat. Selanjutnya, kaca substrat dipanaskan di atas *Hotplate* pada suhu 90°C selama 10 menit untuk memastikan kaca substrat benar-benar kering.

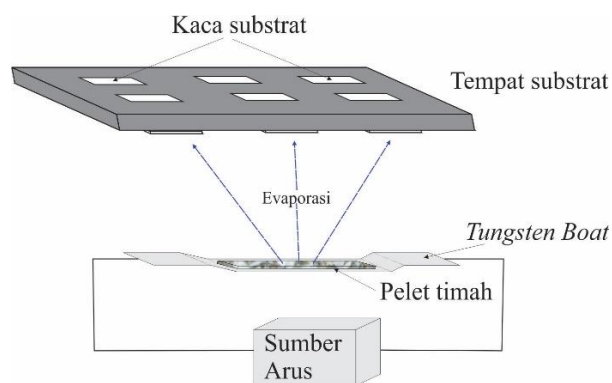
### **3.1.2 Vacuum Evaporation Deposition**

Lapisan timah dilapisi di atas kaca substrat dengan menggunakan teknik *Vacuum evaporation deposition* seperti yang telah dilakukan dalam penelitian (Wang, 2019). Proses deposisi dilakukan dengan menggunakan alat *Vacuum evaporation* tipe VPC-260 produksi dari *ULVAC Technologies, Inc* di Universitas Kumamoto, Jepang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Metode ini dipilih untuk mendapatkan lapisan dengan densitas dan kemurnian yang tinggi sehingga dapat meningkatkan sifat optik dari lapisan.

Gambar 3.3 menunjukkan secara sederhana skema alat dari sistem *Vacuum evaporation*. Kawat timah yang akan di evaporasi dipotong menjadi pelet agar deposisi dapat dilakukan lebih merata. Pelet timah tersebut ditempatkan di atas *tungsten boat* yang letaknya berjarak sekitar 35 cm di bawah tempat kaca substrat. Selama proses evaporasi, tekanan di dalam tabung ruang hampa dijaga pada  $1,5 \times 10^{-5}$  Torr. Pelet timah dievaporasi dengan mengalir arus pada *tungsten boat* dengan nilai arus yang ditingkatkan secara bertahap hingga 90 A selama 1,5 menit sehingga didapatkan lapisan timah di atas kaca substrat setebal 250 nm.



Gambar 3.2 Set alat *Vacuum evaporation* VPC-260 yang berada di Universitas Kumamoto, Jepang



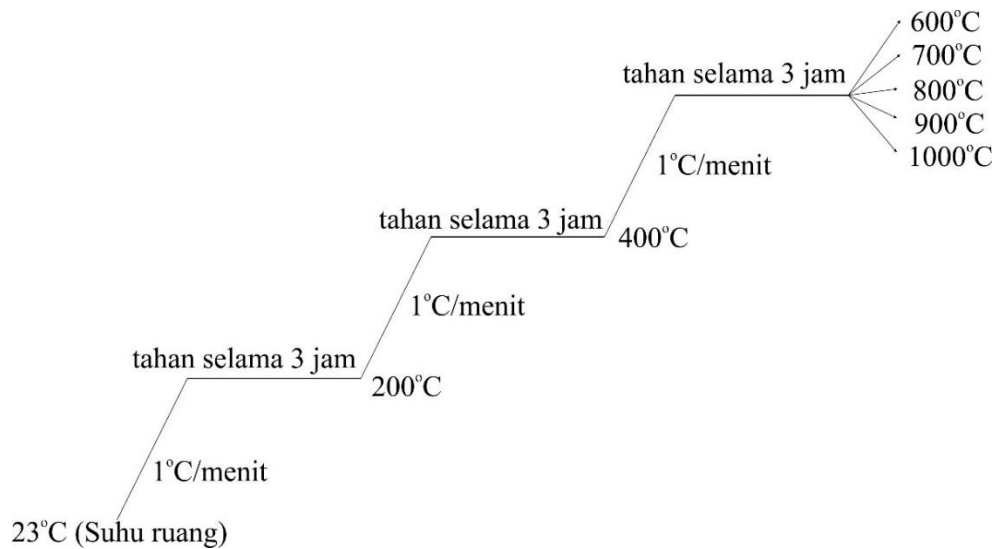
Gambar 3.3 Skema alat pada *Vacuum evaporation deposition*

### 3.1.3 Teknik oksidasi termal

Lapisan tipis timah dapat sepenuhnya berubah menjadi lapisan  $\text{SnO}_2$  dengan teknik oksidasi termal pada suhu pemanasan  $600^\circ\text{C}$  selama 2 jam (Diéguez, 2000). Akan tetapi, agar mendapatkan lapisan yang lebih merata dan lebih halus diperlukan teknik kalsinasi bertahap yang telah dikenalkan pada penelitian (Paper2). Suhu tahapan kalsinasi yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.

Teknik oksidasi termal pada penelitian ini dilakukan dengan proses kalsinasi menggunakan *Furnace electric* di *Material Structure Control Science*

Laboratory, Universitas Kumamoto, Jepang. Kenaikan suhu dilakukan bertahap dengan laju  $1^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  untuk menghindari deformasi permukaan lapisan pada saat suhu berubah. Sedangkan, proses oksidasi termal dilakukan dalam tiga tahapan . Tahap pertama kalsinasi dilakukan dengan menaikkan suhu menjadi  $200^{\circ}\text{C}$  dan menahannya pada suhu tersebut selama 3 jam. Pada tahap ini, permukaan lapisan tipis sedikit meleleh dan meratakan lelehan ke seluruh permukaan substrat. Selanjutnya, lapisan timah dioksidasi menjadi Tin(II) oksida dengan kalsinasi pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  selama 3 jam seperti yang didapatkan dalam penelitian (Orlandi, 2008). Pada tahap akhir, oksidasi lapisan dilakukan terpisah dengan variasi suhu sintering yaitu  $600, 700, 800, 900$  dan  $1000^{\circ}\text{C}$  sebagai variabel bebas pada penelitian ini. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu sintering terhadap sifat morfologi dari lapisan yang terbentuk. Masing-masing lapisan pada tahap ini dipanaskan selama 3 jam. Lapisan tipis akan sepenuhnya bertransformasi menjadi Tin(IV) oksida pada semua suhu tersebut. Selain untuk proses oksidasi atau pembentukan  $\text{SnO}_2$ , teknik sintering tiga tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan pori-pori pada lapisan yang memiliki potensi menjadi salah satu faktor rugi-rugi untuk aplikasi pandu gelombang akibat penghamburan cahaya saat menjalar di dalamnya.



Gambar 3.4 Tahapan teknik oksida termal lapisan tipis  $\text{SnO}_2$

## 3.2 Karakterisasi Material

Karakterisasi dilakukan untuk menganalisa struktur dan sifat optik dari lapisan yang terbentuk. Struktur lapisan dianalisa menggunakan beberapa pengukuran yakni meliputi (a) *X-Ray Diffraction* (XRD), (b) *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan (c) Mikroskop optik. Sedangkan, sifat optik dianalisa dengan menggunakan *Prism Coupler Apparatus* dan Spektrofotometri cahaya tampak. Seluruh karakterisasi yang dilakukan baik struktur maupun sifat optik dilakukan pada temperatur kamar. Gambar 3.5 menunjukkan lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada substrat kaca yang akan dikarakterisasi.

### 3.2.1 Karakterisasi dengan *X-ray Diffractometer* (XRD)

Karakterisasi dan analisa fase kristal pada lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada penelitian ini dilakukan melalui pengukuran menggunakan instrumen *X-ray diffractometer* (XRD) tipe XRD-Ultima IV produksi RIGAKU yang berada di Departemen *Materials Science and Engineering, Graduate School of Science and Technology*, Universitas Kumamoto, Jepang. Tujuan pengukuran ini adalah untuk mendapatkan pola data yang terukur dari difraksi sinar-X setelah melewati celah sempit antar kristal di dalam suatu material. Pengukuran dilakukan pada rentang sudut antara 20-80° dan *step size* 0.02° dengan menggunakan radiasi Cu K $\alpha$  dengan panjang gelombang 1.540598 Å.

Pola difraksi terukur dapat dianalisa dalam beberapa informasi seperti fase-fase penyusun material, ukuran kristal material (dilihat dari lebar puncak yang didapatkan), parameter kisi bahkan cacat kristal yang terkandung oleh material tersebut. Analisa struktur kristal dilakukan dengan dua tahapan, (a) secara kualitatif, dan (b) secara kuantitatif. Tahapan pertama dilakukan dengan cara identifikasi puncak difraksi terukur yang diikuti dengan pencocokan antara data-data puncak difraksinya dengan basis data fasa yang dikompilasi. Basis data berisi informasi terkait nama fasa, sifat fisis dan kristalografi, serta posisi puncak dan intensitas relatif untuk panjang gelombang radiasi tertentu. Dalam penelitian ini, basis data yang digunakan berupa data ICDD (*The International Centre for Diffraction Data*) yang didapatkan dari laboratorium tempat dimana dilakukan pengukuran. Tahapan



identifikasi puncak dilakukan secara manual dengan membandingkan grafik data difraksi dengan data ICDD yang juga telah dibentuk dalam bentuk grafik.

Analisis secara kuantitatif dilakukan untuk mendapatkan data-data lain dari data difraksi yang diperoleh. Pada penelitian ini, Analisa kuantitatif dilakukan dengan perhitungan secara manual. Adapun data-data yang diperoleh dari analisa ini adalah ukuran kristal, parameter kisi, dan regangan kisi. Ukuran kristal ( $D$ ) didapatkan dengan perhitungan menggunakan pendekatan Scherrer (Scherrer, 1920), yang ditunjukkan dengan persamaan berikut :

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, dan  $\theta$  adalah sudut difraksi *Bragg* dimana posisi puncak berada,  $K$  adalah konstanta yang besarnya tergantung pada faktor kristal (umumnya menggunakan 0,94), dan besaran  $\beta_{x-ray}$  adalah *Full Width at Half Maximum* (FWHM) atau Integral lebar dari puncak. Parameter kisi didapatkan dengan perhitungan menggunakan perangkat lunak “*CellCalc Ver 2.20*” yang dibuat oleh Miura Hiroyuki dari *Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Universitas Hokkaido*. Sedangkan, regangan kisi ( $\epsilon_k$ ) didapatkan dengan perhitungan menggunakan persamaan Williamson-Hall (Rahal, 2015) yang ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\beta_{x-ray} \cos \theta}{\lambda} = \frac{0.9}{D} + \epsilon_k \frac{\sin \theta}{\lambda} \dots\dots\dots(3.2)$$

Besaran-besaran dari persamaan di atas memiliki arti yang sama dengan besaran-besaran pada persamaan (3.1).

### 3.2.2 Karakterisasi dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Morfologi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pada penelitian ini, observasi dilakukan menggunakan perangkat SEM tipe FESEM-JEM-7600F produksi JEOL di *Instrumental Analysis Center for Engineering Research, Universitas Kumamoto, Jepang*. Gambar 3.6 menunjukkan alat SEM yang berada di Universitas Kumamoto. Sampel yang akan diobservasi terlebih dahulu diletakkan pada *specimen holder* (tempat sampel)

produksi JEOL yang terbuat dari aluminium, Sampel direkatkan menggunakan perekat yang terbuat dari bahan konduktor di atas *specimen holder* lalu dimasukkan ke dalam mesin SEM. Dalam penelitian ini, sinar elektron ditembakkan dengan tegangan 5 kV. Gambar SEM didapatkan dengan perbesaran 50000x, resolusi sebesar 100 nm dan *depth of field* 6.6 mm. Gambar yang diperoleh kemudian dianalisa menggunakan ImageJ untuk mendapat ukuran rata-rata partikel SnO<sub>2</sub> yang menyebar pada lapisan tipis yang terbentuk.



Gambar 3.5 Perangkat SEM di Universitas Kumamoto

### 3.2.3 Karakterisasi dengan Mikroskop Optik

Struktur permukaan juga diobservasi dengan menggunakan mikroskop optik (OM) dengan perbesaran lebih kecil. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik tipe OM-KH8700 produksi HIROX di Laboratorium Kubota, Universitas Kumamoto, Jepang yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Mikroskop optik dihubungkan dengan komputer untuk pengaturan resolusi Gambar yang didapatkan. Pada penelitian ini, pengamatan dilakukan dengan resolusi perbesaran 500  $\mu\text{m}$ . Gambar yang diperoleh mikroskop optik kemudian dianalisa secara kuantitatif menggunakan ImageJ.



Gambar 3.6 Perangkat Mikroskop Optik di Universitas Kumamoto

### 3.2.4 Karakterisasi dengan *Prism Coupler Apparatus*

Salah satu analisa sifat optik lapisan tipis  $\text{SnO}_2$  dapat dilakukan dengan pengukuran indeks bias. Pengukuran indeks bias dalam penelitian dilakukan menggunakan *Prism Coupler Apparatus* (PCA) seperti pada penelitian (Takafuji, 2019). Alat yang digunakan merupakan PCA tipe SPA-4000 produksi Sairon Technology. Inc yang terdapat di *Department of Applied Chemistry and Biochemistry*, Universitas Kumamoto, Jepang. Gambar 3.8 menunjukkan perangkat PCA yang ada di Universitas Kumamoto. Peralatan tersebut terdiri laser, prisma, fotodioda dan tempat sampel. Semua perlengkapan tersebut ditempatkan pada tempat tertutup agar cahaya ruang tidak mempengaruhi pengukuran. Pada penelitian ini, laser yang digunakan adalah Laser He-Ne dengan panjang gelombang 638.5 nm dan lensa prisma jenis *rutile* yang bisa digunakan untuk mengukur indeks bias dalam rentang 1.8 – 2.45. Sedangkan, indeks bias kaca substrat yang digunakan didapatkan dari referensi yakni sebesar 1.4585. PCA menggunakan prinsip kerja kopling prisma seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9 (b). Cahaya dari laser yang diarahkan ke bagian bawah prisma sehingga membentuk sudut tertentu sehingga mengalami pemantulan sempurna dan hasil pemantulan terdeteksi oleh detektor. Laser digerakkan berputar namun tetap mengarah pada prisma. Cahaya kemudian akan membelok ke arah sampel yang terletak di bawah prisma dengan sudut tertentu ( $\theta_m$ ) sehingga cahaya di dalam sampel akan menjalar zigzag. Keadaan ini disebut dengan moda. Pada keadaan ini,

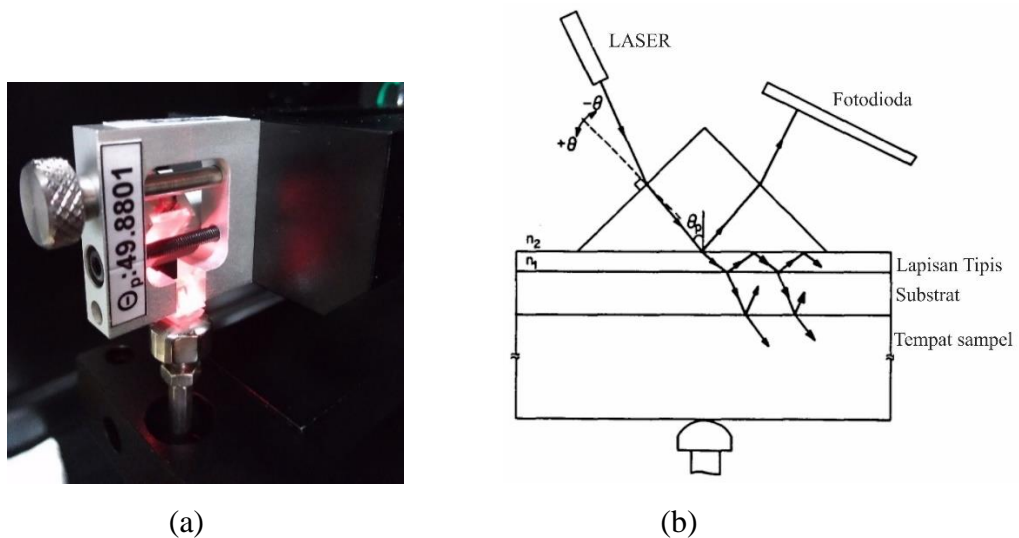
detektor akan mendeteksi intensitas cahaya paling rendah. Keadaan ini dapat terjadi berulang-ulang sesuai dengan jenis sampel saat laser diputar. Secara manualnya, indeks bias ( $n_{eff, film}$ ) dapat dihitung dari nilai sudut moda menggunakan persamaan berikut :

$$n_{eff, film} = n_p \sin \left( \arcsin \left( \frac{\sin \theta_m}{n_p} \right) + \beta \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana  $n_p$  dan  $\beta$  berturut-turut adalah indeks bias prisma dan sudut pembias prisma.



Gambar 3.7 Perangkat *Prism Coupler Apparatus* di Universitas Kumamoto



Gambar 3.8 Perangkat prisma kopling (a) saat pengukuran dan (b) prinsip kerjanya

### 3.2.5 Karakterisasi dengan Spektrofotometer

Sifat optik lapisan tipis yang lain seperti transmitansi, absorptansi dan energi *Urbach* dapat diukur menggunakan Spektrofotometer. Spektrofotometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Visible Spectrophotometry* (Spektrofotometer cahaya tampak) tipe N2S yang berada di Laboratorium Optik, Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya seperti yang ditunjukkan Gambar 3.10. Peralatan spektrofotometer ini terdiri dari sumber cahaya tampak (lampu tungsten), tempat sampel, lensa prisma dan detektor. Spektrofotometer menggunakan prinsip kerja dari sifat cahaya terdispersi saat melalui lensa prisma. Gambar 3.11 menunjukkan began peletakkan sampel lapisan tipis pada spektrofotometer. Pengukuran spektrum transmitansi dan absorptansi dilakukan pada rentang panjang gelombang 350 – 800 nm.

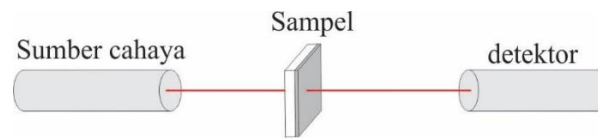
Parameter lain yang dapat diamati dengan spektrofotometer ini adalah energi *Urbach* pada rentang panjang gelombang 350 – 1100 nm. Pada nilai terendah dari koefisien absorptansi ( $\alpha$ ), ujung penurunan eksponensial dari absorptansi menandakan adanya energi *Urbach* yang mengindikasikan lebar pita tepi dari keadaan terlokalisasi pada energi *gap* yang ditunjukkan pada persamaan:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana  $\alpha_0$  dan  $E_u$  berturut-turut adalah konstanta dan lebar pita tepi mengindikasikan lebar pita tepi dari keadaan terlokalisasi pada energi *gap*. (Rahal, 2015).



Gambar 3.9 Spektrofotometri cahaya tampak tipe N2S



Gambar 3.10 Bagan peletakan sampel lapisan tipis pada spektrophotometri

### 3.3 Pemodelan pandu gelombang

Pemodelan pandu gelombang pada penelitian ini dilakukan untuk mengamati karakteristik penjarangan gelombang di dalam pandu gelombang yang mengandung material  $\text{SnO}_2$  yang telah dikarakterisasi sebelumnya. Adapun parameter yang digunakan dalam pemodelan adalah indeks bias dari material yang telah diukur menggunakan PSA. Pemilihan parameter diambil dari material  $\text{SnO}_2$  yang memiliki sifat-sifat sebagai penyusun pandu gelombang seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 2.3. Pemodelan dibangun menggunakan metode FDBPM yang dibuat dengan bahasa pemrograman Fortran. Sinyal masukan berupa fungsi gelombang linear, dan penyelesaian persamaan dengan menggunakan FDBPM didukung dengan TBC dan metode tridiagonal. Seluruh alur yang dipakai sebagai dasar pemodelan telah diturunkan pada Bab 2, sub bab 2.10 sampai 2.11, selanjutnya dilakukan analisa terhadap karakterisasi daya keluaran dari pemodelan untuk dapat diaplikasikan dalam fungsi gerbang logika optik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **BAB 4**

### **KARAKTERISASI LAPISAN TIPIS TIN OXIDE**

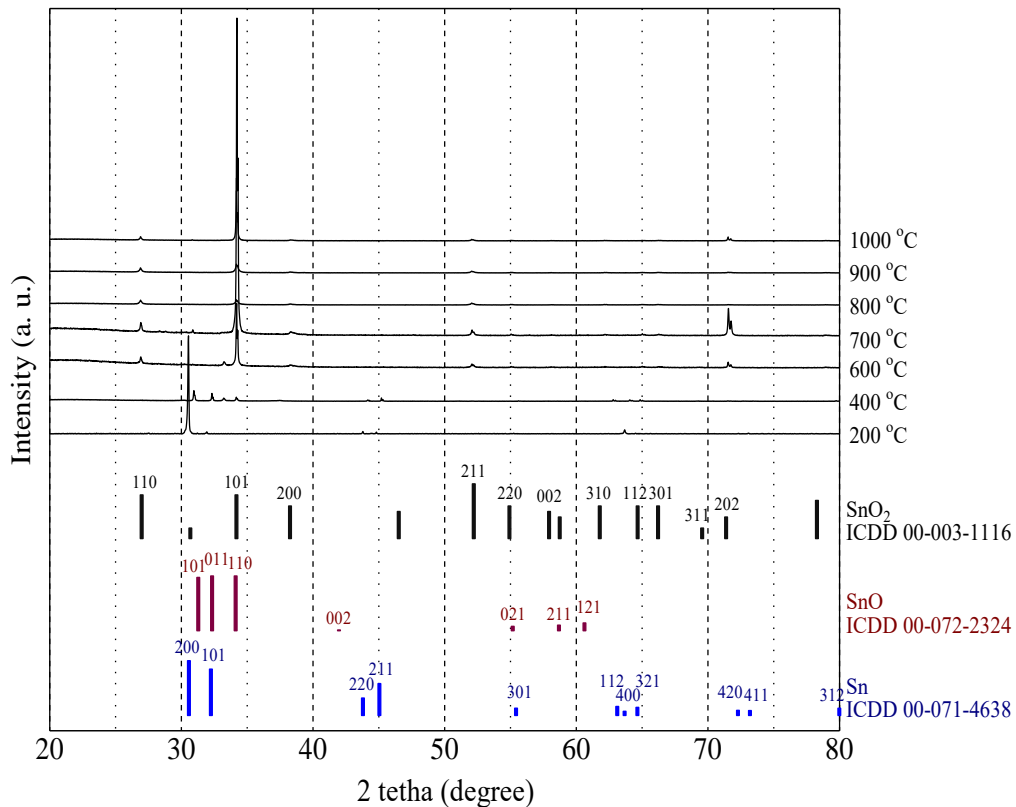
#### **4.1 Pendahuluan**

Pada bab 4 ini, akan dipaparkan hasil fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang telah didapatkan dalam penelitian. Karakterisasi dilakukan untuk menganalisa struktur, sifat morfologi dan sifat optik dari lapisan tipis. Analisa struktur didapatkan dari hasil pengukuran menggunakan XRD, SEM, dan mikroskop optik. Sedangkan, sifat optik didapatkan dari hasil pengukuran menggunakan *Prism Coupler Apparatus* dan Spektrofotometri cahaya tampak. Analisa dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat lapisan tipis SnO<sub>2</sub> bergantung pada variasi temperatur pada proses oksidasi termal yakni pada suhu 600°C, 700°C, 800°C, 900°C, dan 1000°C. Analisa morfologi lapisan dilakukan menggunakan data perhitungan ukuran kristal, ukuran parameter kisi, lattice strain, ukuran partikel, dan kehalusan permukaan lapisan yang ditunjukkan dari perhitungan presentasi pori-pori pada permukaan. Sedangkan, sifat optik lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dianalisa dari pengukuran indeks bias, spektrumtransmitansi, dan absorbansi. Analisa karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui potensi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada aplikasi perangkat optik, khususnya pada pandu gelombang dielektrik dan solar sel.

#### **4.2 Struktur Lapisan Tipis SnO<sub>2</sub>**

Pengukuran XRD menghasilkan pola difraksi yang berbeda pada setiap tahap kalsinasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pola-pola difraksi tersebut cocok dengan data difraksi ICDD pada fase Sn, SnO, dan SnO<sub>2</sub>. Timah murni belum mengalami oksidasi pada suhu sintering pada suhu 200°C. Hal ini dibuktikan dengan cocoknya pola difraksi pada suhu tersebut dengan file data ICDD 00-071-4638 untuk fase Sn. Pada fase Sn yang memiliki struktur tetragonal ini, terdeteksi puncak difraksi pada posisi  $2\theta$  30,54° yang sesuai dengan puncak (200) dari data ICDD. Puncak difraksi Sn dengan intensitas lemah juga teramati sesuai dengan puncak difraksi bidang (400) pada  $2\theta$  63,69°.



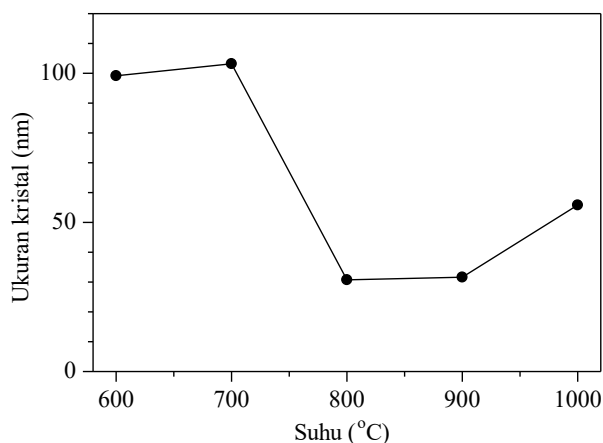
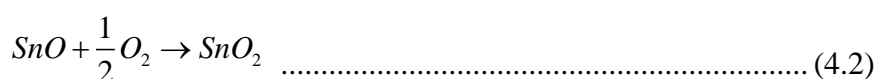
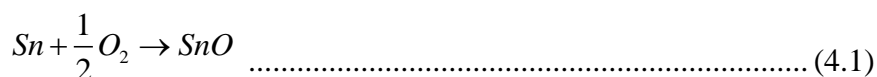


Gambar 4.1 Pola difraksi XRD lapisan tipis pada suhu kalsinasi 200-1000°C dan pola data ICDD dari Sn (grafik batang biru), SnO (grafik batang merah), dan SnO<sub>2</sub> (grafik batang hitam)

Proses oksidasi termal dimulai pada 400°C. Hal ini dapat dilihat pada pola XRD yang sesuai dengan data ICDD 00-072-2324 untuk fase SnO. Puncak difraksi tin (II) oksida terdeteksi pada posisi  $2\theta$  32,34° dan pada posisi 34,18° sesuai dengan posisi puncak difraksi bidang (011) dan puncak difraksi bidang (110) dari data ICDD. Selama proses tersebut, fase SnO dengan struktur ortorombik terbentuk sesuai dengan reaksi oksidasi yang ditunjukkan pada persamaan (1).

Struktur kristal lapisan yang dideposisi pada substrat kuarsa sepenuhnya bertransformasi menjadi SnO<sub>2</sub> pada saat sintering mulai suhu 600°C melalui proses oksidasi yang ditunjukkan melalui persamaan reaksi (2). Pola XRD lapisan hasil oksidasi ini memiliki empat puncak yang sesuai dengan pola pada data ICDD 00-003-1116 dengan fase SnO<sub>2</sub> berstruktur tetragonal. Puncak-puncak tersebut dikenal pada bidang 110, 101, 211, dan 202. Adapun posisi puncak-puncak tersebut juga sesuai dengan puncak-puncak yang dimiliki oleh fase SnO<sub>2</sub> pada data ICDD.

Informasi mengenai puncak-puncak tersebut ditunjukkan pada lampiran. Posisi puncak-puncak tersebut memiliki selisih dari puncak dari data referensi ICDD. Misalnya, puncak difraksi dari sampel pada suhu sintering 600°C pada bidang 110 bergeser ke 26,98°. Selisih tersebut semakin kecil dengan bertambahnya suhu sintering. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, fase kristal SnO<sub>2</sub> yang terbentuk menjadi lebih sempurna.



Gambar 4.2 Hubungan suhu dan ukuran kristal pada lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada suhu sintering 600-1000°C

Ukuran kristal (D) pada lapisan SnO<sub>2</sub> dihitung dengan menggunakan pendekatan Scherrer yang diberikan pada persamaan 3.1. Ukuran kristal terkecil terjadi pada suhu 800°C Sedangkan, ukuran terbesar terjadi pada 700°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang mengandung kristal ukuran lebih kecil didapati memiliki puncak difraksi lebih banyak. Peningkatan ukuran kristal antara 800 hingga 1000°C dapat berkontribusi untuk tekanan relaksasi (Kabir, 2017).

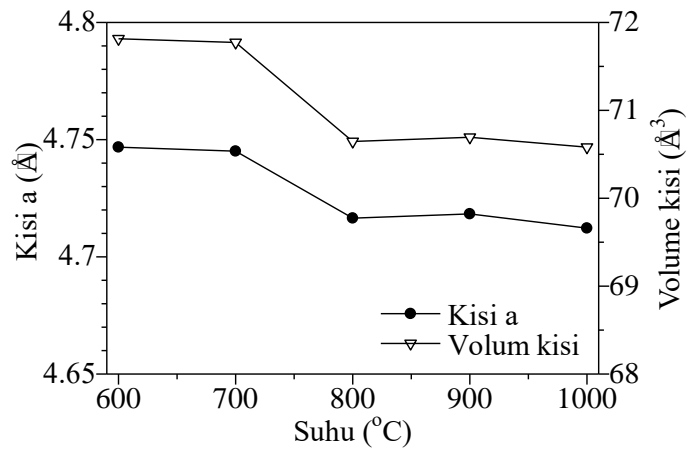
Tabel 4.1 Data hasil perhitungan parameter kisi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering

Suhu sintering (°C)	Parameter kisi a (Å)	Parameter kisi c (Å)
600	4.74679	3.18722
700	4.74508	3.18765
800	4.71651	3.17575
900	4.71832	3.17547
1000	4.71223	3.17861

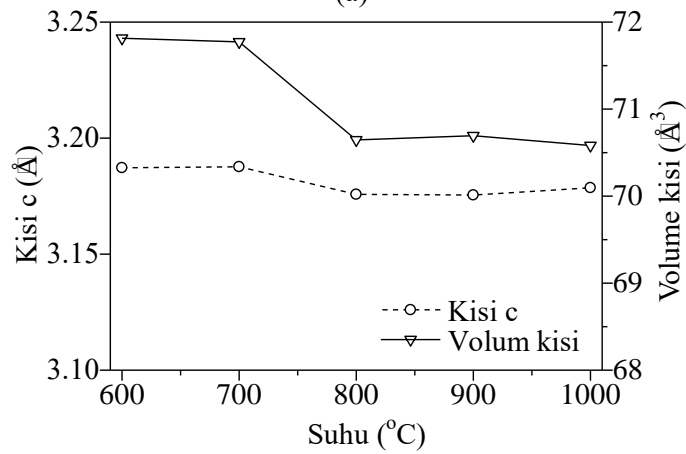
Parameter kisi kristal yang terbentuk pada lapisan tipis dapat dihitung dari jarak antar atom hasil observasi menggunakan pengamatan XRD ( $D_{obs}$ ).  $D_{obs}$  ini didapatkan dari persamaan Hukum Bragg yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\lambda = 2D_{obs} \sin \theta \dots\dots\dots(4.3)$$

dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X pada alat XRD dan  $\theta$  adalah sudut difraksi bragg yang didapatkan pada pola difraksi hasil pengukuran sebagai posisi puncak. Gambar 4.3 menunjukkan ketergantungan suhu volume kisi dengan parameter kisi. Volume kisi lebih mirip dengan perubahan parameter kisi sumbu-c. Akan tetapi, konstanta kisi sumbu-a sedikit meningkat pada suhu 900°C. Namun, peningkatan ini dapat diabaikan karena tidak menimbulkan perubahan pada volume kisi. Parameter kisi hasil perhitungan yang ditunjukkan pada table 4.1 ini sudah mendekati parameter kisi kristal fase SnO<sub>2</sub> secara umum, yakni parameter kisi-a sebesar 4,72Å dan parameter kisi-c sebesar 3,17Å.



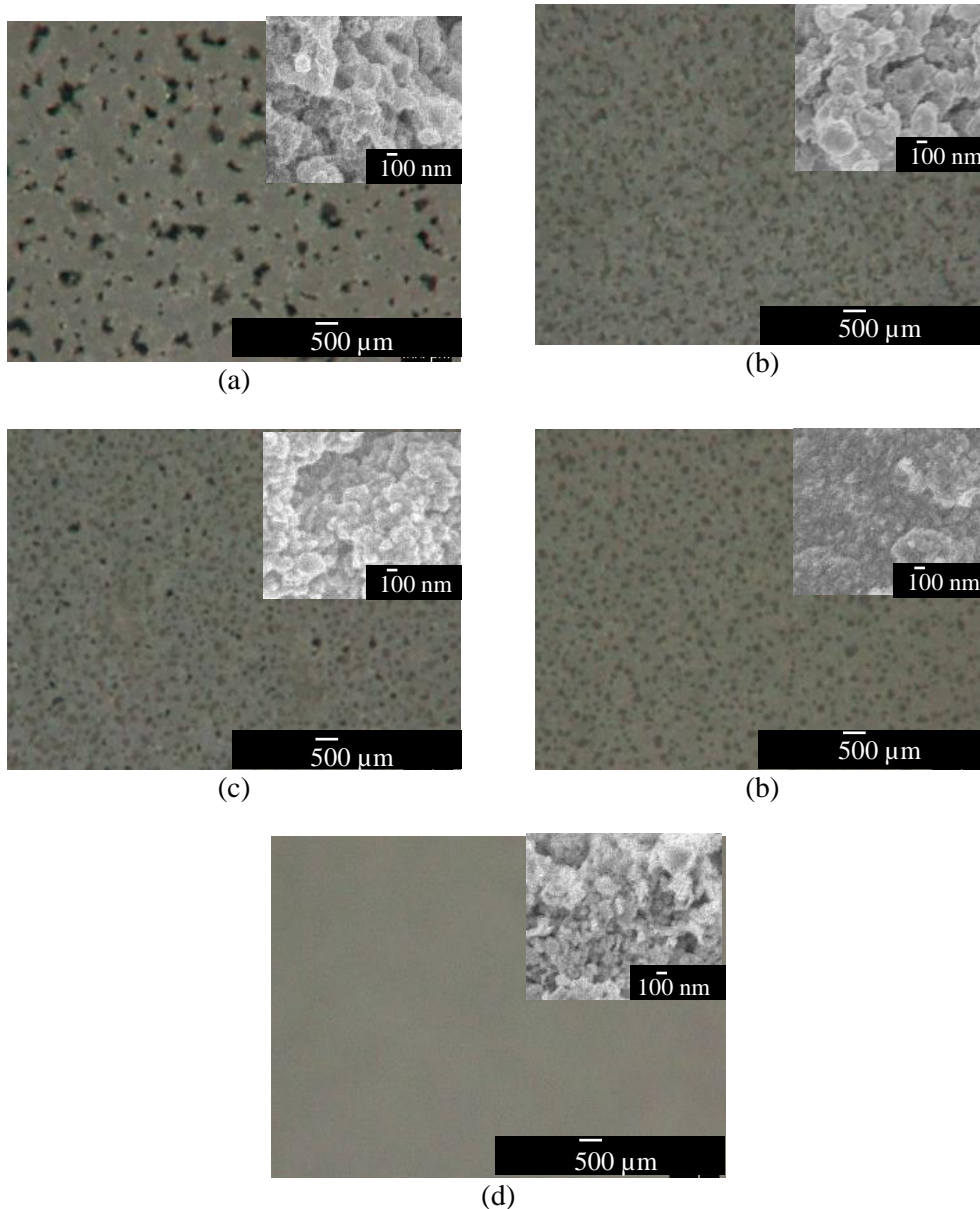
(a)



(b)

Gambar 4.3 Parameter kisi (a) sumbu-a dan (b) sumbu-c dibandingkan dengan volume kisi pada setiap suhu sintering

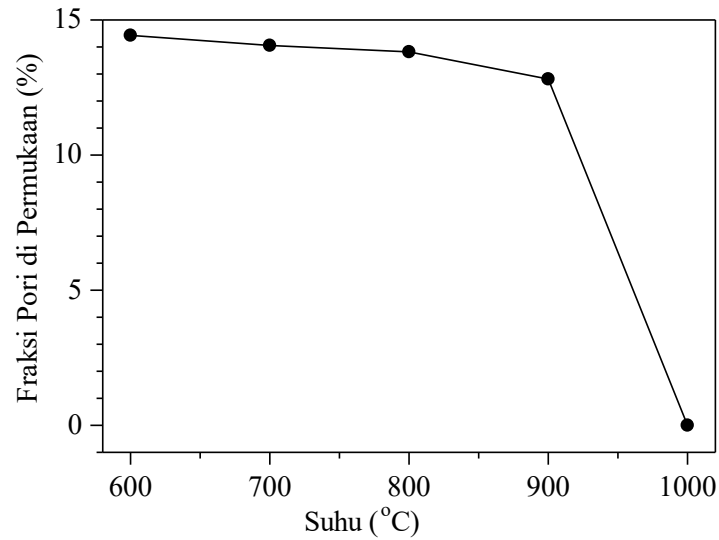
Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan Gambar hasil observasi SEM (Gambar kecil) dengan Gambar hasil observasi OM (Gambar besar). Banyaknya partikel yang tertumpuk pada permukaan lapisan tipis SnO<sub>2</sub> tampak menurun dengan peningkatan suhu sintering pada proses oksidasi hingga 1000°C. Hal tersebut dapat dilihat dari pengamatan pada Gambar SEM. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu sintering mengakibatkan terpisahnya partikel-partikel penyusun SnO<sub>2</sub>.



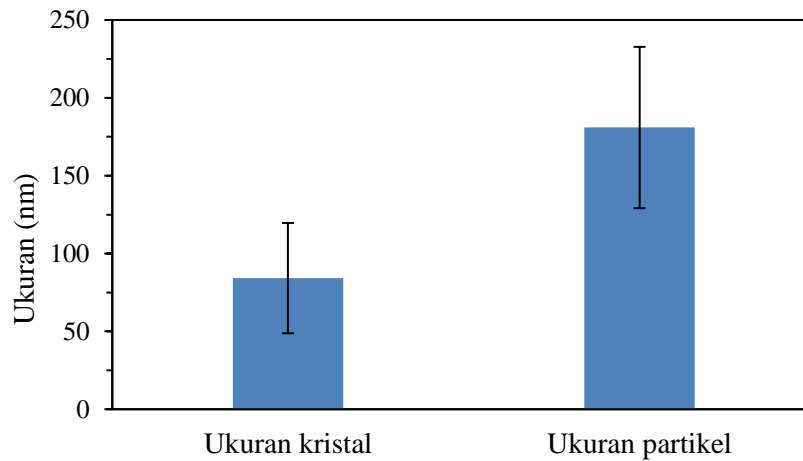
Gambar 4.4 Morfologi permukaan lapisan tipis dari observasi SEM (gambar kecil) dan OM (gambar besar) pada suhu sintering (a) 600°C, (b) 700°C, (c) 800°C, (d) 900°C and (e) 1000°C

Selama proses tersebut, fraksi pori pada permukaan lapisan menurun secara bertahap dengan meningkatnya suhu melalui difusi permukaan yang telah banyak dikenal dan mekanisme difusi batas butir selama proses sintering seperti yang ditunjukkan pada grafik di Gambar 4.5. Pori pori menghilang akibat efek difusi terjadi pada suhu 1000°C. Perilaku permukaan pori selama proses sintering telah

disimulasikan oleh (Du, 2018). Simulasi tersebut menunjukkan bahwa penyusutan pori dapat disebabkan oleh difusi selama sintering.



Gambar 4.5 Fraksi pori di permukaan lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering

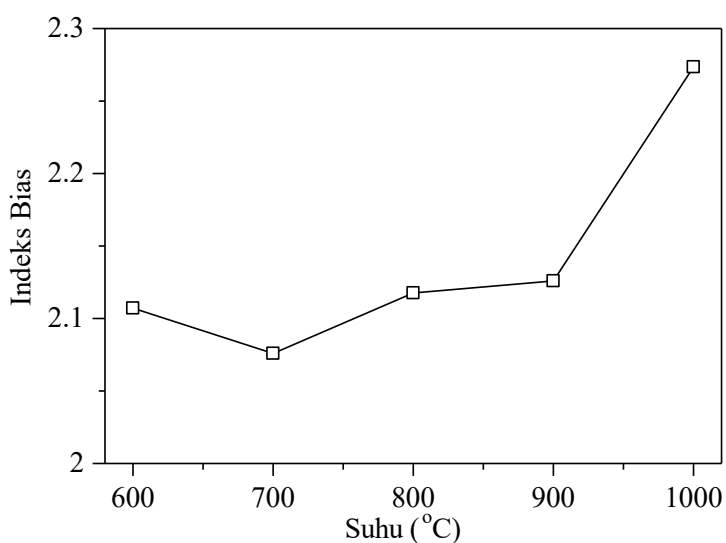


Gambar 4.6 Perbandingan ukuran kristal dan ukuran partikel pada lapisan tipis SnO<sub>2</sub> setelah proses sintering

### 4.3 Sifat Optik Lapisan Tipis SnO<sub>2</sub>

Sifat optik lapisan tipis tin(IV) oksida dapat dilihat dari indeks bias yang diukur menggunakan PCA. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai indeks bias meningkat secara bertahap dengan meningkatnya suhu sintering.

Ketidakteraturan ketebalan lapisan mempengaruhi spektrum hasil pengukuran pada lapisan. Hal ini berhubungan dengan timbulnya pori-pori yang dihasilkan selama proses sintering. Sinar laser akan mengalami pembauran saat mengenai pori-pori tersebut selama proses pengamatan pada PCA. Permukaan lapisan tipis yang kontinu dan tak mengandung pori-pori dapat meningkatkan densitas permukaan dan memperoleh indeks bias yang lebih tinggi. Hal ini tampak terjadi pada lapisan tipis hasil proses sintering menggunakan suhu 1000°C. Pada suhu sintering 700°C, sampel lapisan tipis memiliki indeks bias terendah. Hal ini disebabkan karena pada suhu tersebut dihasilkan ukuran kristal terbesar sehingga dapat meningkatkan pemantulan pada lapisan (Uysal, 2015). Peningkatan indeks bias juga dipengaruhi dengan densitas lapisan tipis, jarak antar atom penyusun dan sudut struktur kristal. Hal ini dapat dijelaskan dalam perumusan Gladstone pada persamaan (2.172) (Teertstra, 2018).



Gambar 4.7 Indeks bias lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering

Gambar 4.7 menunjukkan grafik spektrum transmitansi optik dari lapisan tipis SnO<sub>2</sub> setiap pengukuran dari lima suhu sintering dalam rentang panjang gelombang cahaya tampak 350-800 nm. Diskontinuitas spektrum transmitansi pada panjang gelombang 360, 450, dan 580-600 nm diperkirakan disebabkan oleh perubahan dispersi pada prisma. Secara keseluruhan, transmitansi optik lapisan tipis

SnO<sub>2</sub> meningkat seiring dengan meningkatnya panjang gelombang cahaya. Ini sesuai dengan penelitian sebelumnya tentang lapisan tipis SnO<sub>2</sub> (Huda, 2018). Transmittansi lapisan SnO<sub>2</sub> tertinggi pada penelitian ini yakni sekitar 27% dan 29% terjadi pada panjang gelombang lebih tinggi / di daerah mendekati inframerah (IR) masing-masing pada suhu sintering 600°C dan 800°C. Transmittansi yang lebih tinggi ini berkaitan dengan ukuran partikel lebih kecil. Hal ini dapat dikarenakan kemungkinan terjadinya pemantulan lebih tinggi dan transmisi berkurang yang terjadi jika partikel lebih besar. Sedangkan pada panjang gelombang pendek, nilai transmittansi ini berkaitan dengan absorbansi material karena pada energi foton lebih tinggi akan terserap oleh elektron di dalam partikel untuk bereksitasi ke tingkat energi lebih tinggi (Zhang, 2016).

Lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada sintering 1000°C memiliki persentase transmittansi terendah yaitu sekitar 4,5% pada daerah dekat IR. Hal ini terjadi karena pada suhu tersebut permukaan lapisan sudah merata dan memiliki kepadatan tinggi sehingga cahaya yang ditransmisikan berkurang atau lebih banyak terpantulkan. Selain itu, nilai transmittansi yang lebih rendah menunjukkan bahwa lebih sedikit cahaya yang mengarah ke substrat. Hal ini dikarenakan perbedaan indeks bias lapisan dan substrat. Karakteristik inilah sangat dibutuhkan agar lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dapat digunakan sebagai bahan pemandu pada pandu gelombang optik pada aplikasi optoelektronika.

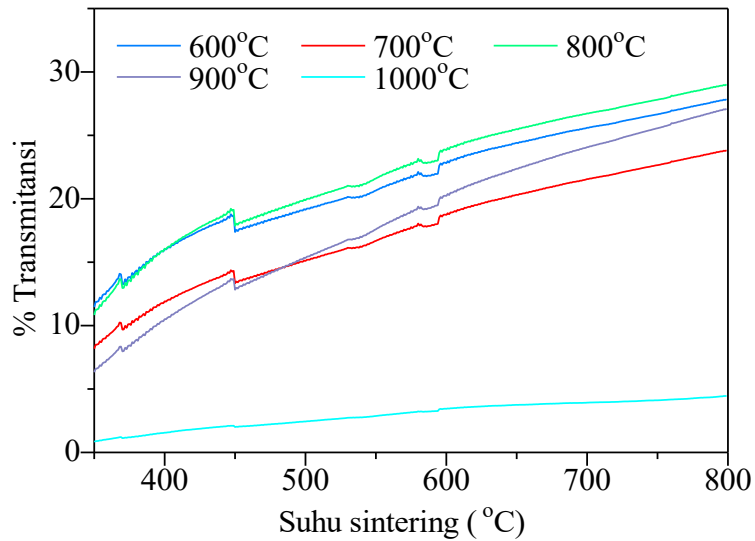
Absorbansi lapisan tipis dapat dihitung dari persentase transmittansinya (%T) menggunakan persamaan berikut:

$$A = 2 - \log_{10} \%T \dots\dots\dots(4)$$

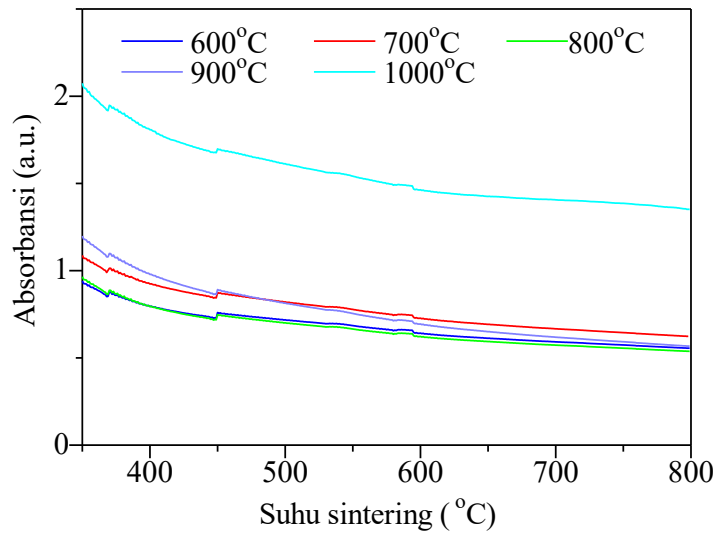
di mana A merupakan absorbansi. Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa puncak absorbansi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek. Hal ini sebanding dengan penelitian sebelumnya oleh (Huda, 2018). Puncak spektrum absorbansi dari lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari penelitian tersebut berada dalam rentang panjang gelombang ultraviolet (UV) 250-300 nm. Sayangnya, absorbansi dalam penelitian ini hanya dapat teramati dalam rentang cahaya tampak. Bertentangan dengan persentase transmittansi, sampel pada suhu sintering 1000°C memiliki puncak absorbansi tertinggi pada sekitar 2 dalam kisaran UV seperti pada



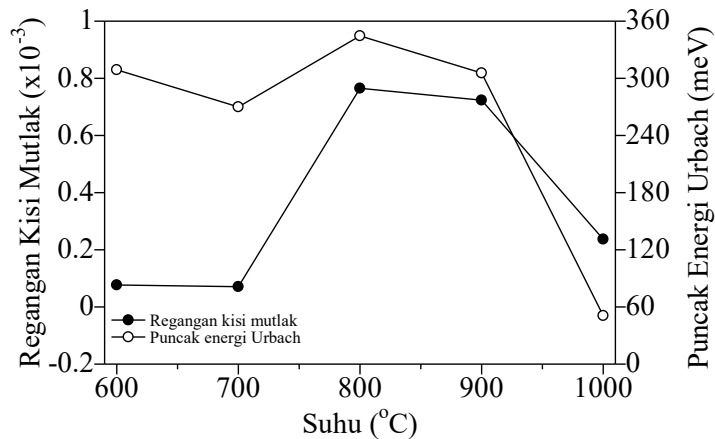
Gambar 4.9. Nilai absorbansi ini lebih tinggi daripada yang dibutuhkan pada sel surya komersial pada penelitian sebelumnya (Li, 2012). Sifat ini menunjukkan bahwa lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dari penelitian ini memenuhi persyaratan sebagai bahan sel surya.



Gambar 4.8 Spektrum transmitansi optik lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering



Gambar 4.9 Spektrum absorbansi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering



Gambar 4.10 Regangan kisi mutlak dibandingkan dengan puncak spektrum energi Urbach dari lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada setiap suhu sintering

Investigasi tambahan dilakukan pada energi Urbach yang didapatkan pada pengukuran menggunakan spektrofotometer cahaya tampak. Energi Urbach dari lapisan tipis SnO<sub>2</sub> diukur pada rentang panjang gelombang 350-1100 nm. Energi Urbach timbul karena adanya kecacatan dalam kristal yang terbentuk pada lapisan tipis. Kecacatan tersebut dapat disebabkan oleh banyak hal antara lain cacat struktural, kepadatan dislokasi, cacat akibat kekosongan dan intersisi posisi kristal pada lapisan. Nilai efektif dari regangan kisi dihitung dengan menggunakan persamaan Williamson-Hall yang ditunjukkan pada persamaan 3.2 dengan parameter dari pengukuran XRD (Rahal, 2015). Persamaan tersebut menunjukkan nilai efektif regangan kisi berbanding terbalik dengan ukuran kristal. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa perubahan nilai puncak dari spektrum energi Urbach, di mana puncak tertinggi dalam spektrum energi telah diperoleh dalam rentang panjang gelombang 750 – 905 nm, sesuai dengan nilai mutlak dari regangan kisi pada setiap suhu sintering. Hasil pengamatan ini sesuai dengan (Kumar, 2017). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa energi Urbach pada dasarnya dikontrol oleh medan regangan akibat kecacatan pada struktural material. Pada material semikonduktor dan kristal ionik, energi Urbach diperoleh sebagai hasil pelapisan Wannier-Mott (Studeniyak, 2014). Nilai ini berhubungan dengan transmitansi dan absorbansi dalam panjang gelombang yang sama. Ketika energi Urbach berkurang transmitansi akan berkurang Sedangkan, absorbansi meningkat. Kecenderungan ini terkait dengan efek kristal pada transmitansi material (Uysal, 2015). Perilaku tersebut

dapat ditunjukkan oleh lapisan tipis dengan suhu sintering 700°C. Sedangkan, pada suhu sintering 600, 800, dan 900°C yang memiliki nilai puncak energi Urbach yang hampir sama menghasilkan transmitansi dan absorbansi yang sama pada panjang gelombang 750 nm. Energi Urbach dan transmitansi optik tertinggi didapatkan pada lapisan tipis dengan suhu sintering 800°C dengan puncak energi Urbach sekitar 334,3 meV. Sedangkan, puncak energi Urbach terendah didapatkan pada lapisan tipis dengan suhu sintering 1000°C yakni sekitar 50 meV. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang dioksidasi pada suhu sintering 1000 °C memiliki kecacatan minimal.

## **BAB 5**

### **PANDU GELOMBANG NONLINEAR**

#### **5.1 Pendahuluan**

Pada bab ini, akan dipaparkan mengenai hasil pemodelan penjalaran cahaya dalam pandu gelombang yang mengandung SnO<sub>2</sub>. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan dua jenis SnO<sub>2</sub>. Pemodelan pertama dilakukan dengan menggunakan SnO<sub>2</sub> organosol yang memiliki indeks bias sebesar 2.011. Parameter material ini didapatkan dari penelitian sebelumnya (Wu, 1997). Pemodelan kedua dilakukan menggunakan lapisan tipis SnO<sub>2</sub> yang telah dikarakterisasi pada Bab 4. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, sampel hasil oksidasi menggunakan 1000°C memiliki kriteria material yang cocok untuk diaplikasikan sebagai pandu gelombang yakni indeks bias paling tinggi, permukaan paling rata yang ditandai dengan ketiadaan pori-pori dan absorbansi rendah di daerah panjang gelombang dalam sistem komunikasi optik. Oleh karena itu, parameter pada sampel inilah yang digunakan untuk parameter pemodelan pandu gelombang. Parameter tersebut tidak lain adalah indeks bias sampel yang didapatkan sebesar 2.2735. Material SnO<sub>2</sub> tersebut selanjutnya dijadikan sebagai inti/bagian pandu dari pandu gelombang sedangkan bagian klading juga dapat terbuat dari material yang memiliki indeks bias lebih rendah. Indeks bias lebih rendah dapat dilakukan dengan menggunakan material SnO<sub>2</sub> yang didoping sesuai dengan penelitian (Cross, 1974) yang menyatakan bahwa pendopingan pada semikonduktor tipe-n dapat menurunkan nilai indeks bias material. Pada penelitian ini, digunakan kontras indeks bias sebesar 0,005. Menurut penelitian (Wu, 1997), konstanta nonlinearitas SnO<sub>2</sub> didapatkan sebesar  $1.70 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ .

#### **5.2 Analisa Parameter Pandu Gelombang**

Analisa penjalaran gelombang pada awal bab dilakukan untuk menentukan besar parameter yang cocok dalam desain pandu gelombang. Parameter ini didapatkan dengan perhitungan konstanta propagansi ( $\beta$ ) dari indeks bias efektif ( $N$ ). Konstanta propagansi diturunkan dari parameter indeks bias pandu gelombang

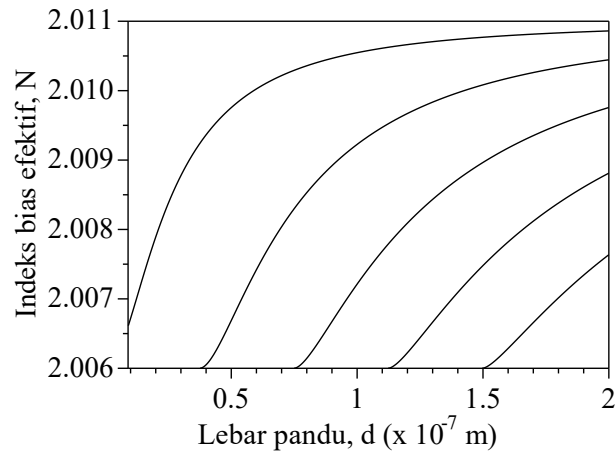
dan panjang gelombang yang digunakan. Selanjutnya, desain pandu gelombang dievaluasi dengan daya keluaran yang didapatkan untuk mendapatkan fungsi pandu gelombang sebagai aplikasi gerbang logika optik. Fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik dimunculkan dalam struktur berbasis *Mach-zehnder*.

Pandu gelombang berstruktur Mach-zehnder yang digunakan dalam penelitian ini mengandung dua pandu gelombang lurus di samping-sampingnya. Desain pandu gelombang dilakukan dengan memperhatikan besaran parameter-parameter yang digunakan dalam struktur pandu gelombang. Parameter-parameter tersebut diantaranya lebar pandu gelombang, sudut percabangan dalam struktur Mach-zehnder, lebar celah antara lengan Mach-zehnder dan pandu gelombang sebelahnya serta panjang lengan Mach zehnder.

### **5.2.1 Parameter Pandu Gelombang Berbahan SnO<sub>2</sub> Literatur**

Analisa pemodelan pertama, yakni dengan material SnO<sub>2</sub> organosol, dilakukan dengan menggunakan panjang gelombang respon pada material tersebut yakni sebesar 1,06  $\mu\text{m}$ . Parameter utama yang dianalisa dalam pembahasan ini adalah lebar pandu gelombang karena parameter ini mempengaruhi banyaknya moda yang akan terpandu.

Lebar pandu gelombang dapat ditentukan dengan analisa relasi dispersi dari moda yang terpandu. Relasi dispersi ini didapatkan dengan memasukkan parameter material penyusun pandu gelombang ke dalam perumusan yang telah dijelaskan pada sub bab 2.9. Relasi dispersi yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 merepresentasikan banyak moda yang terpandu di dalam pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> literatur bergantung pada lebar pandu gelombang. Moda dasar dari perhitungan tersebut didapatkan pada pandu gelombang dalam rentang 0.9–3.9  $\mu\text{m}$ . Lebar pandu yang digunakan pada penelitian ini sebesar 1–2  $\mu\text{m}$  agar pandu gelombang dapat memandu moda tunggal. Pada lebar pandu 2  $\mu\text{m}$  didapatkan indeks bias efektif sebesar  $\beta/k_0 = 2,00789266697578$ . Sudut percabangan diatur sekecil mungkin untuk mengurangi penyebaran cahaya optik di percabangan. Parameter-parameter pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> literatur disebutkan pada Tabel 5.1. Dalam penelitian ini, sudut percabangan diambil sebesar 0.5° berdasar pada penelitian dari sebelumnya yakni oleh Pramono, 2001.



Gambar 5.1 Relasi dispersi pada desain pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> literatur

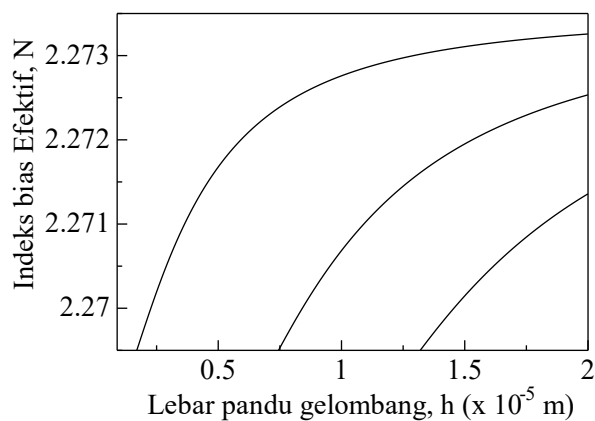
Tabel 5.1 Parameter material pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> literatur

Parameter Material	Nilai
Indeks bias inti (SnO <sub>2</sub> )	2.011
Indeks bias klading (SnO <sub>2</sub> didoping)	2,006
Panjang gelombang respon	1.06 μm
Lebar pandu gelombang moda tunggal	0.9–3.9 μm

### 5.2.2 Parameter Pandu Gelombang Berbahan SnO<sub>2</sub> Hasil Fabrikasi

Pemodelan pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi menggunakan panjang gelombang sebesar 1550 nm karena panjang gelombang ini lebih sesuai dengan aplikasi sistem komunikasi optik. Moda dasar pada pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> hasil karakterisasi didapatkan pada lebar pandu gelombang dalam rentang 1.7–7.45 μm. Lebar pandu yang digunakan pada penelitian ini sebesar 5 μm agar pandu gelombang dapat memandu moda tunggal. Lebar pandu tersebut diambil juga untuk mempermudah proses fabrikasi pandu gelombang selanjutnya serta mempermudah proses pengkoplingan laser ke pandu gelombang saat proses karakterisasi pandu gelombang. Pada lebar pandu 5 μm didapatkan indeks bias efektif sebesar  $\beta/k_0 = 2.00789266697578$ . Parameter-parameter pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi disebutkan pada Tabel 5.2. Dalam penelitian ini,

sudut percabangan lebih kecil dari  $0.5^\circ$  yang terdapat pada penelitian semula (Pramono, 2001) sehingga ditentukan sebagai 0.006 radian. Parameter lebar celah antara lengan Mach-zehnder dan pandu gelombang sebelahny serta panjang lengan Mach zehnder bergantung pada fenomena pergeseran cahaya akibat efek kopling dan nonlinearitas. Panjang lengan Mach-zehnder diatur sedikit melebihi panjang lengan dimana cahaya mulai bergeser. Panjang dapat diperoleh dengan mengasumsikan kedua pandu berdekatan sebagai pandu gelombang multimode nonlinear. Cahaya akan bergeser sepenuhnya setelah satu siklus hasil superposisi dua moda terendah yang menjalar.



Gambar 5.2 Relasi dispersi pada desain pandu gelombang berbahan  $\text{SnO}_2$  hasil fabrikasi

Tabel 5.2 Parameter material pandu gelombang berbahan  $\text{SnO}_2$  hasil fabrikasi

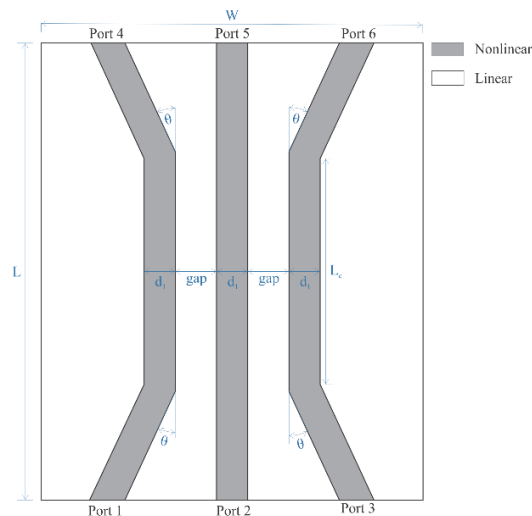
Parameter Material	Nilai
Indeks bias inti ( $\text{SnO}_2$ )	2.2735
Indeks bias klading ( $\text{SnO}_2$ didoping)	2,2685
Panjang gelombang respon	1550 nm
Lebar pandu gelombang moda tunggal	1.7–7.45 $\mu\text{m}$

### 5.3 Analisa Penjalaran Gelombang dalam Pandu Gelombang

Analisa selanjutnya dilakukan dengan pemodelan penjalaran gelombang pada pandu gelombang. Pemodelan pada penelitian ini terbagi berdasarkan parameter material yang digunakan, yakni pada SnO<sub>2</sub> organosol dari literatur dan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi. Pemodelan dengan parameter SnO<sub>2</sub> organosol dilakukan dengan dua struktur, yakni struktur *Directional coupler* (DC) ganda dan struktur berbasis *Mach Zehnder*. Struktur berbasis *Mach Zehnder* juga dianalisa pada pandu gelombang berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi.

#### 5.3.1 Pandu Gelombang Nonlinear struktur *Directional Coupler* Ganda Berbahan SnO<sub>2</sub> literatur

Pandu gelombang berbasis *Directional coupler* (DC) ganda pada penelitian ini terdiri dari tiga pandu gelombang lurus yang tersusun paralel seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 5.3. Pandu gelombang ini dapat dibedakan dalam tiga daerah yakni daerah masukan, daerah kopling, dan daerah keluaran. Daerah kopling yang berada di bagian tengah mengandung tiga pandu gelombang lurus yang memiliki panjang kopling terbesar  $L_g$  dan terpisah pada jarak yang sama sebesar  $gap$ . Pemisah pandu gelombang pada daerah masukan dan keluaran diatur dengan memberikan sudut tertentu sebesar  $\theta$  untuk menghindari efek kopling antar pandu gelombang di daerah tersebut. Parameter pandu gelombang struktur ini terangkum pada Tabel 5.3.



Gambar 5.3 Struktur pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur



Tabel 5.3 Parameter pandu gelombang nonlinear berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur

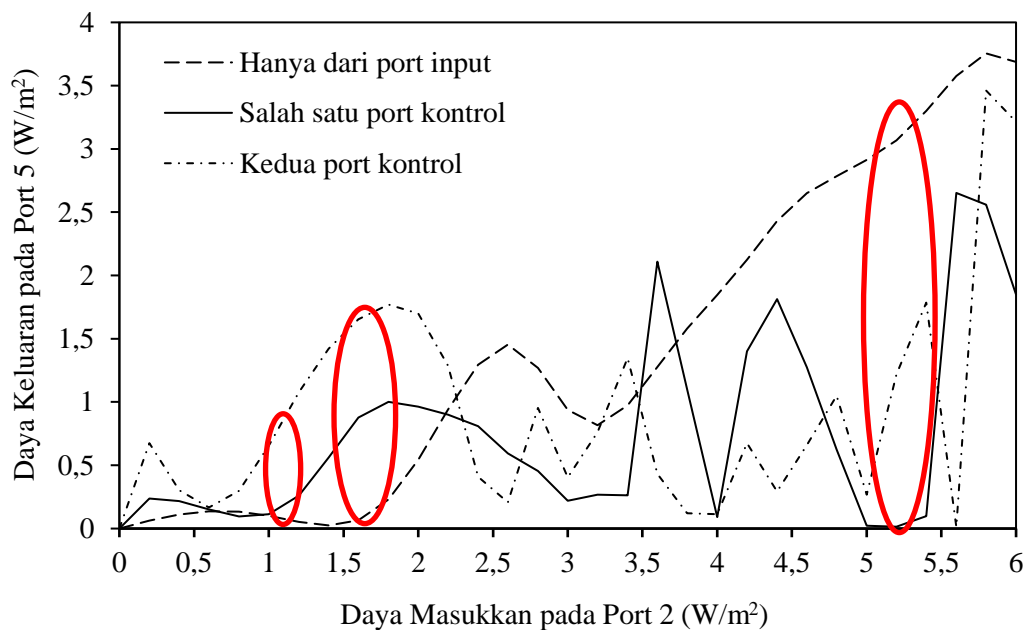
Parameter	Nilai
Panjang Pandu Gelombang	$L = 3000 \mu\text{m}$
Panjang Kopling bagian tengah	$Lg = 2500 \mu\text{m}$
Lebar pandu gelombang	$W = 50 \mu\text{m}$
Lebar bagian pemandu	$d = 2.0 \mu\text{m}$
Lebar pemisah	$gap = 5.2 \mu\text{m}$
Sudut pada daerah masukan dan keluaran	$\theta = 0.5^\circ$

Pandu gelombang ini memiliki enam buah port yang terdiri dari tiga buah port masukan dan tiga buah port keluaran. Dua port masukan di bagian samping, yakni port 1 dan port 3 berperan sebagai port control untuk operasi gerbang logika. Keduanya menunjukkan nilai logika “1” ketika sinar masukan diberikan dan nilai logika “0” ketika tidak ada sinar yang diberikan. Sinar yang diberikan pada kedua port tersebut memiliki daya masukan yang diatur bernilai tetap yakni  $1 \text{ W/m}^2$ . Sedangkan, port masukan bagian tengah diberi sinar masukan yang nilai dayanya sengaja dirubah.

Gambar 5.4 menunjukkan hasil pengukuran nilai keluaran yang dihitung dari port 5 dibandingkan dengan variasi nilai daya masukan dari port 2. Pengukuran daya keluaran ini dilakukan pada tiga kondisi yang berbeda sehingga menghasilkan tiga grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.4. Ketiga kondisi tersebut dipengaruhi oleh operasi logika yang diberikan oleh daya masukan dari port kontrol (port 1 dan port 3).

Daya keluaran pada port 5 memiliki nilai yang berubah secara periodik seiring dengan meningkatnya nilai masukan dari port 2. Hal ini dapat dikarenakan efek kopling antar pandu gelombang. Efek kopling ini lazim terjadi ketika ketiga pandu gelombang tersebut berada berdekatan. Ketidakteraturan sifat periodik dari nilai keluaran ini dapat disebabkan akibat efek nonlinieritas Kerr. Efek nonlinieritas ini dapat mengubah fase sinar akibat perubahan indeks bias yang terjadi seiring dengan meningkatnya daya input yang diberikan. Meningkatnya daya yang diberikan dapat menyebabkan rekombinasi indeks bias pada pandu gelombang yang

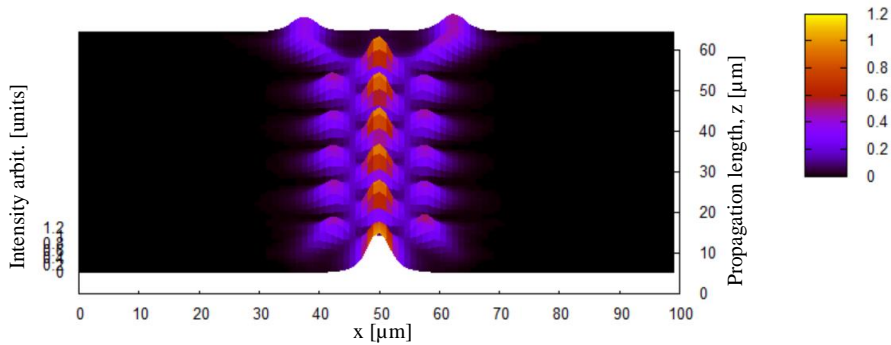
berpotensi menjadi penyebab fase cahaya berubah (Liu dkk., 2004). Rekombinasi ini akan menjadi lebih cepat dengan adanya gangguan dari pandu gelombang disampingnya akibat efek kopling. Gejala ini juga ditampakkan pada Gambar 5.4 dimana puncak daya keluaran timbul lebih banyak saat kedua port kontrol menyala. Efek kedua port menyala menimbulkan delapan puncak saat daya input meningkat hingga  $6 \text{ W/m}^2$ . Kecepatan rekombinasi yang bertambah akibat kopling juga ditunjukkan pada daya masukan dimana daya keluaran mulai berubah. Daya keluaran mulai berubah saat daya masukan dari port 2 sebesar  $0.2 \text{ W/m}^2$  ketika kedua port control dinyalakan. Nilai ini lebih kecil dibandingkan jika salah satu port kontrol dinyalakan dan jika kedua port dimatikan. Daya keluaran mulai berubah saat daya masukan sebesar  $0,4 \text{ W/m}^2$  saat salah satu port kontrol dimatikan dan  $0,6 \text{ W/m}^2$  saat kedua port kontrol dimatikan.



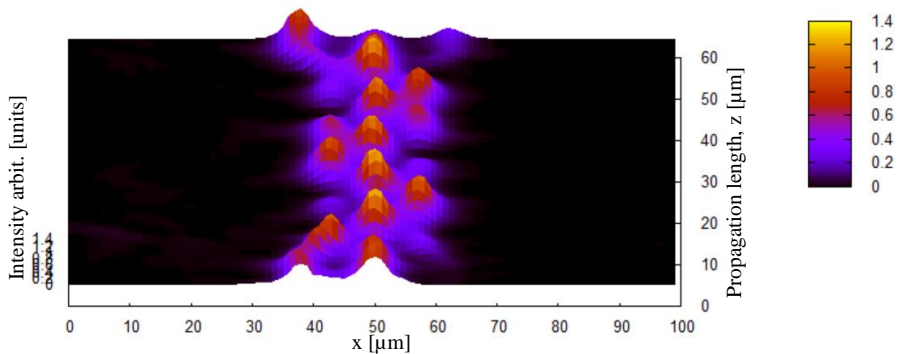
Gambar 5.4 Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur

Saat kondisi kedua port kontrol dimatikan, nilai daya keluaran akan mencapai nilai minimum saat daya masukan dari port 2 mencapai nilai  $1,2 \text{ W/m}^2$ . Hal ini menunjukkan bahwa pada daya masukan tersebut, daya masukan mengalami pergeseran (*switching*) ke pandu gelombang kontrol yang berada di

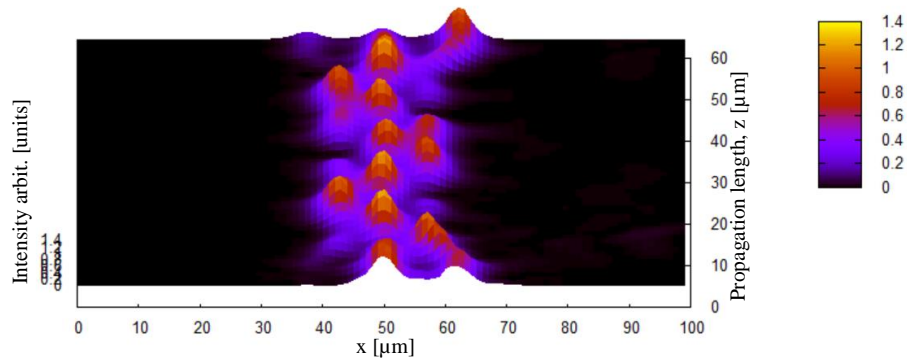
sebelah-sebelahnya sehingga sinar masuk menjalar dan keluar melalui pandu gelombang tersebut. Gambar 5.5 menunjukkan penjalaran sinar tersebut bergeser secara berkala. Hal ini yang menunjukkan bahwa panjang kopling di bagian tengah merupakan kelipatan panjang kopling dari efek kopling.



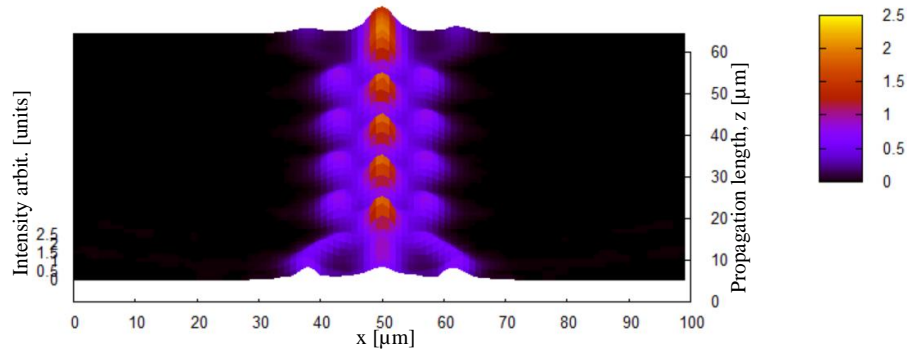
Gambar 5.5 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukan  $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.6 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukan  $P_2 = 1.2 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.7 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1.2 W/m<sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan

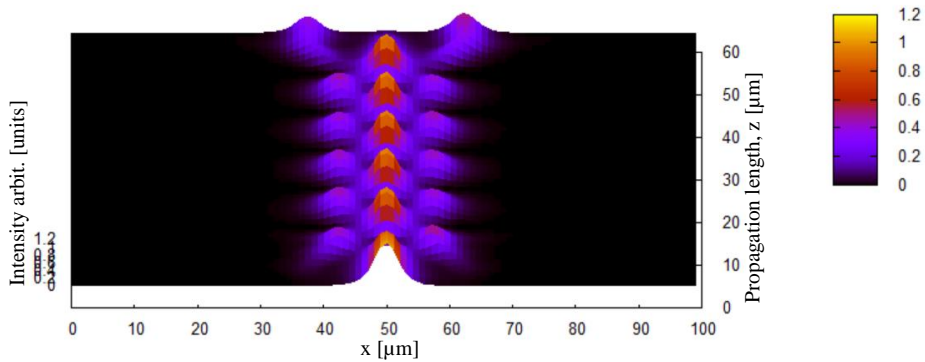


Gambar 5.8 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika AND ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1.2 W/m<sup>2</sup> dan kedua port kontrol dinyalakan

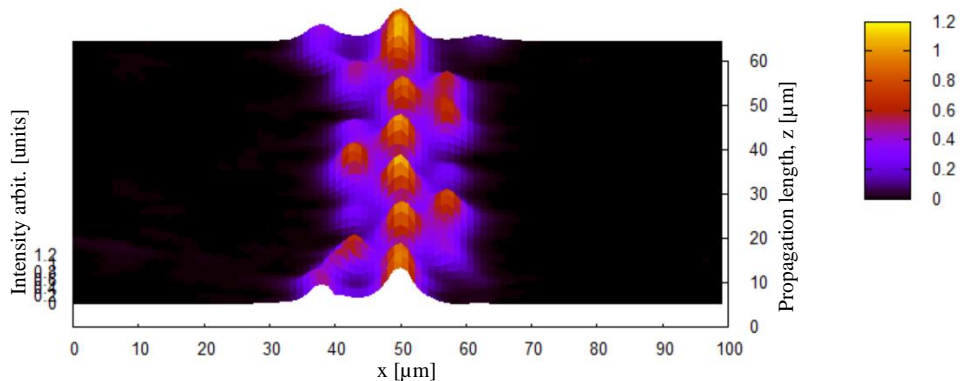
Tabel 5.4 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika AND ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1.2 W/m<sup>2</sup>

Input power		Output Power (Port 5)	
Port 1	Port 2	State	Power (W/m <sup>2</sup> )
0	0	0	0.05
1	0	0	0.23
0	1	0	0.26
1	1	1	1.08

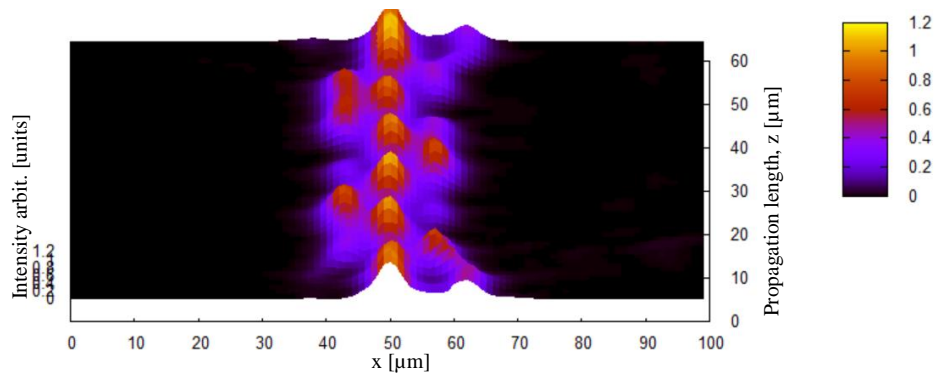
Daya masukan tersebut juga memberikan daya keluaran minimum pada kondisi salah satu port kontrol diberikan. Pemberian salah satu port kontrol memberikan gangguan pada penjalaran cahaya. Hal ini menyebabkan penjalaran gelombang menjadi sedikit tidak beraturan sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 5.6 dan 5.7. Akan tetapi ketika kedua sinar dari port kontrol diberikan, daya keluaran didapatkan nilai maksimum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.8. Ketiga daya masukan pada ketiga pandu terkopling dan menyatu pada pandu gelombang tengah saat mencapai daerah keluaran. Semua perilaku cahaya tersebut menunjukkan operasi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik operasi dimana data daya keluarannya terangkum pada Tabel 5.4.



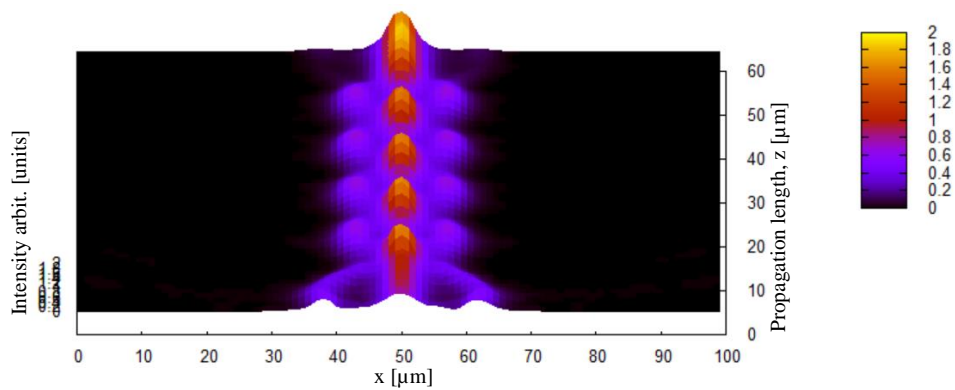
Gambar 5.9 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan  $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.10 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan  $P_2 = 1.6 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.11 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1.6 W/m<sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan

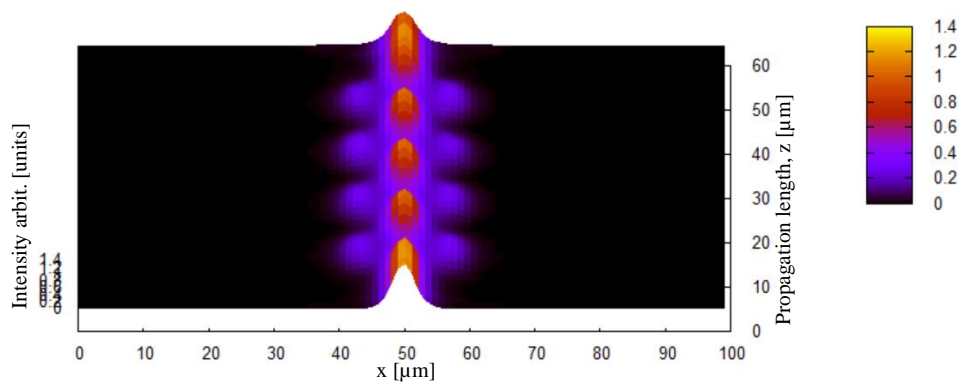


Gambar 5.12 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1.6 W/m<sup>2</sup> dan kedua port kontrol dinyalakan

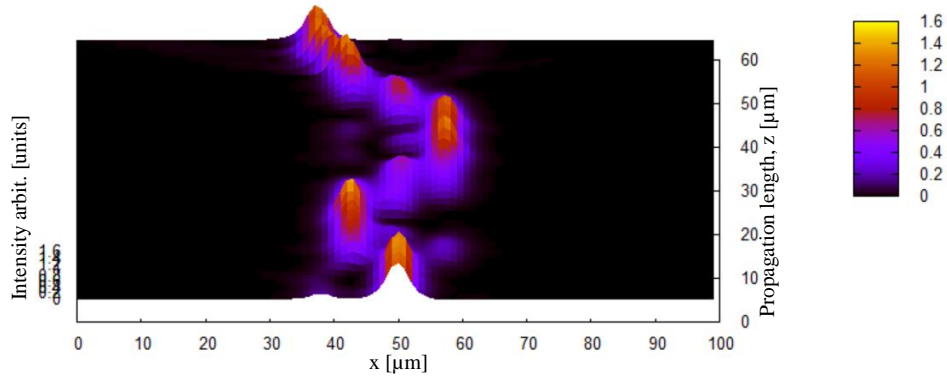
Tabel 5.5 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 1,6 W/m<sup>2</sup>

Input power		Output Power (Port 5)	
Port 1	Port 2	State	Power (W/m <sup>2</sup> )
0	0	0	0.07
1	0	1	0.79
0	1	1	0.88
1	1	1	1.66

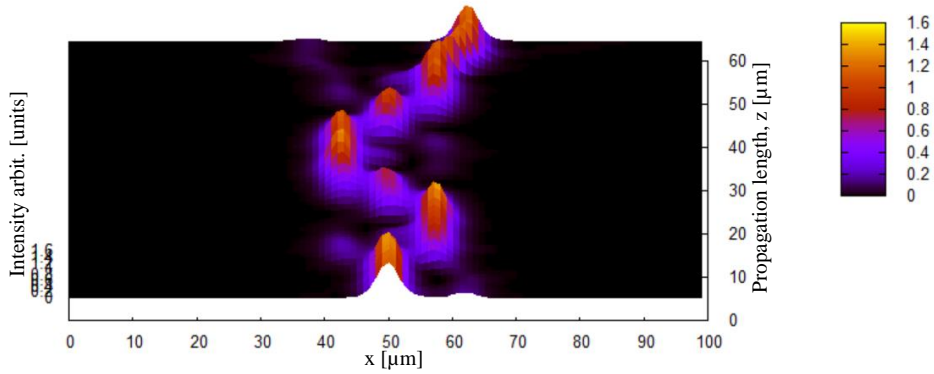
Fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika pada penelitian ini diberikan dengan menggunakan batas ambang (*threshold*) untuk daya keluaran yang dihasilkan sebesar  $0,5 \text{ W/m}^2$ . Daya keluaran di atas  $0,5 \text{ W/m}^2$  akan memberikan keadaan logika “1” dan kebalikannya. Daya keluaran mulai meningkat hingga diatas batas ambang saat salah satu port kontrol dinyalakan. Daya tersebut terjadi saat daya masukan dari port 2 sedikit meningkat hingga sebesar  $1,6 \text{ W/m}^2$ . Hal ini mengindikasikan adanya efek nonlinearitas Kerr yang dapat menyebabkan sinar masuk pada salah satu port kontrol terkopel dengan sinar masuk dari port 2 ketika mencapai daerah keluaran sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5.10 dan 5.11. Sedangkan, ketika ketiga sinar melewati ketiga pandu gelombang didapatkan nilai maksimum seperti pada Gambar 5.12. Daya keluaran yang didapatkan pada keadaan ini tidak jauh berbeda dengan kondisi saat daya masukan sebesar  $1,2 \text{ W/m}^2$ . Semua perilaku cahaya tersebut menunjukkan fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik operasi OR dimana data daya keluaran terangkum pada Tabel 5.5.



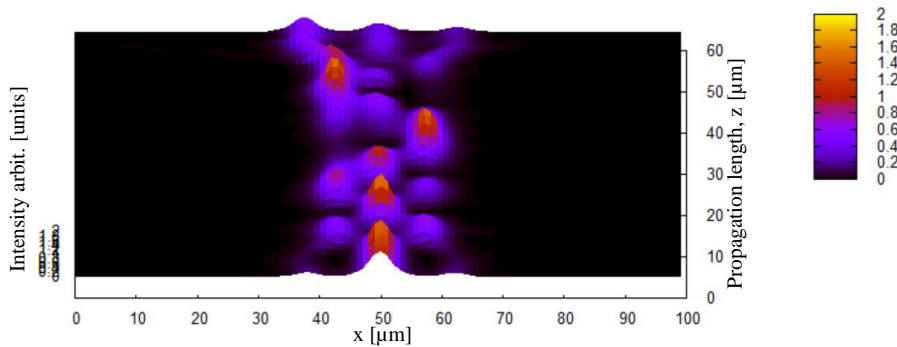
Gambar 5.13 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.14 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.15 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



Gambar 5.16 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 5.4 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dinyalakan



Tabel 5.6 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang berstruktur DC ganda berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika XNOR ketika daya masukkan P<sub>2</sub> = 5.4 W/m<sup>2</sup>

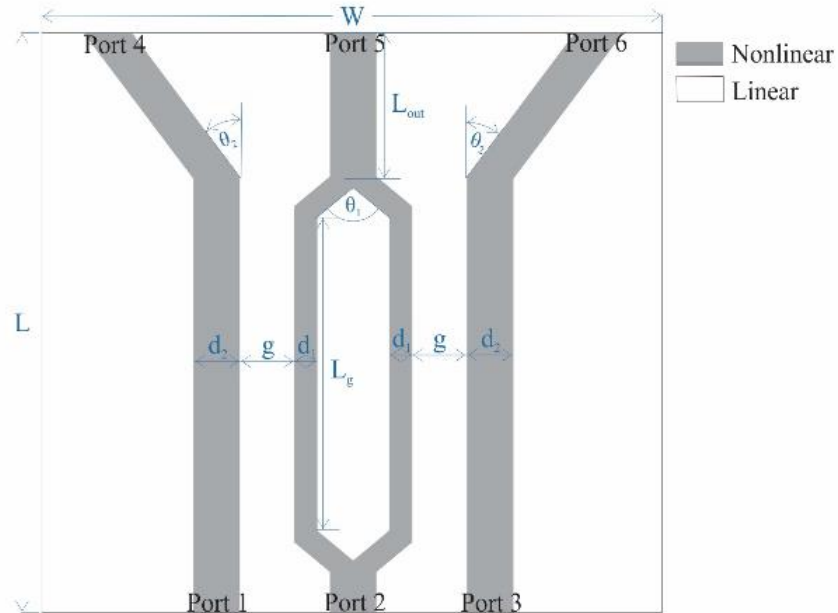
Input power		Output Power (Port 5)	
Port 1	Port 2	State	Power (W/m <sup>2</sup> )
0	0	1	3.07
1	0	0	0.09
0	1	0	0.01
1	1	1	1.22

Fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik juga didapatkan pada salah satu nilai minimum dari daya keluaran yang didapatkan saat salah satu port kontrol dihidupkan. Daya keluaran minimum tersebut didapatkan dengan nilai masukkan pada port 2 sebesar 5,2 W/m<sup>2</sup>. Pandu gelombang dapat berperan sebagai gerbang logika operasi XNOR dengan menggunakan daya masukkan tersebut. Perilaku penjalaran gelombang pada operasi logika ini ditunjukkan pada Gambar 12-15 Sedangkan, daya keluarannya terangkum pada Tabel 5.4. Pembahasan di atas menunjukkan desain pandu gelombang nonlinear *Directional Coupler* berstruktur ganda pada penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam mendesain gerbang logika optik dimana operasi dapat dimunculkan hanya dengan mengubah nilai daya masukan.

### 5.3.2 Pandu Gelombang Nonlinear struktur *Mach-zehnder* Ganda Berbahan SnO<sub>2</sub> literatur

Pandu gelombang nonlinear pada penelitian ini juga didesain dengan menggunakan struktur berbasis *Mach-zehnder* (MZ). Desain pandu gelombang tersebut terdiri dari pandu gelombang berstruktur *Mach-zehnder* di bagian tengah dengan dua pandu gelombang lurus di samping-sampingnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.17. Sebagaimana yang dilakukan pada desain pandu gelombang DC di pembahasan sebelumnya, jarak pemisah antar pandu gelombang di daerah keluaran pada desain ini juga diatur dengan menggunakan sudut tertentu  $\theta_2$  untuk menghindari efek kopling antar pandu gelombang. Lebar pandu yang

digunakan dalam desain ini adalah sebesar  $d_1 = 2 \mu\text{m}$ , kecuali pada bagian percabangan dan lengan Mach-zehnder menggunakan lebar lebih kecil yakni sebesar  $d_2 = 1 \mu\text{m}$ .



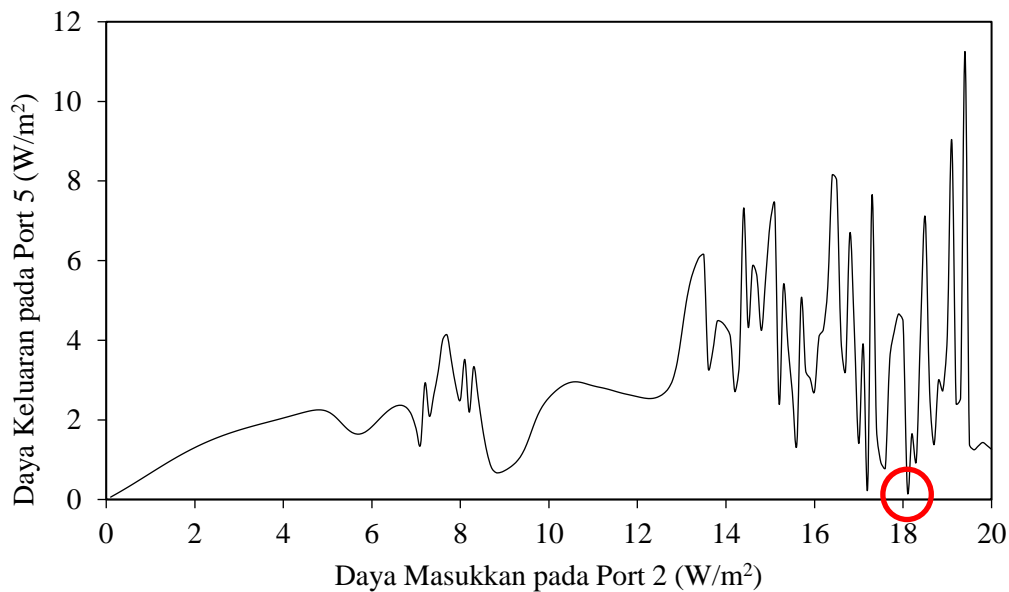
Gambar 5.17 Struktur pandu gelombang berbasis MZ berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur

Tabel 5.7 Parameter pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur

Parameter	Nilai
Panjang pandu gelombang	$L = 4250 \mu\text{m}$
Panjang lengan Mach-Zehnder	$Lg = 2500 \mu\text{m}$
Lebar pandu gelombang	$W = 150 \mu\text{m}$
Lebar bagian pandu	$d_1 = 2,0 \mu\text{m}$
Lebar pandu di daerah lengan Mach-zehnder dan percabangan	$d_2 = 1,0 \mu\text{m}$
Lebar celah	$g = 4,0 \mu\text{m}$
Sudut percabangan Mach-zehnder	$\theta_1 = 1^\circ$
Sudut pada daerah keluaran	$\theta_2 = 0,25^\circ$
Panjang pandu di daerah keluaran	$L_{out} = 1000 \mu\text{m}$

Parameter tersebut diambil karena diasumsikan bahwa cahaya yang menjalar pada bagian-bagian tersebut mengandung konstanta propagansi setengah

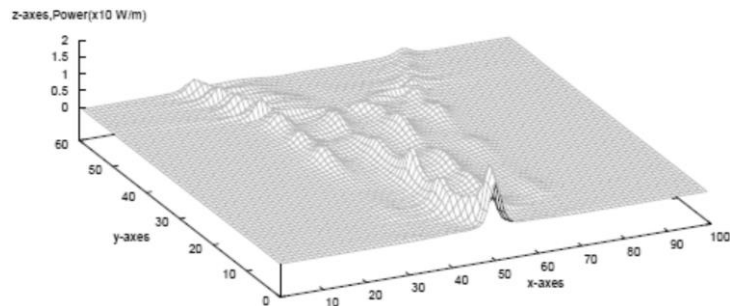
kali konstanta propagansi cahaya masukkan akibat percabangan. Akan tetapi keduanya masih memiliki sifat moda tunggal sesuai dengan relasi dispersi yang telah dibahas pada sub-bab 2.8. Keseluruhan parameter desain pandu gelombang berstruktur Mach-zehnder ini terangkum pada Tabel 5.7. Pandu gelombang dengan desain ini juga mengandung enam port yang masing-masing memiliki fungsi yang sama dengan port yang ada pada desain DC ganda sebelumnya.



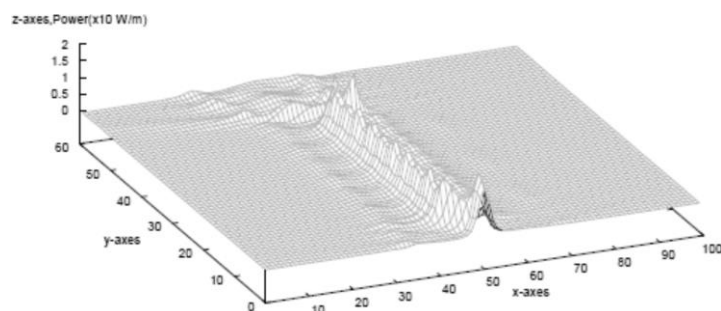
Gambar 5.18 Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur saat kedua port kontrol dimatikan

Gambar 5.18 menunjukkan karakteristik daya keluaran saat daya masukan diberikan pada pandu gelombang tanpa daya port kontrol dari kedua pandu gelombang lurus di samping-samping pandu gelombang Mach-zehnder. Grafik tersebut menunjukkan pergeseran daya mulai terjadi pada daya masukan sebesar 5.10 W/m<sup>2</sup>. Hal ini ditunjukkan dengan mulai ketidakberaturannya daya yang didapatkan. Ketidakberaturan daya keluaran makin bertambah pada daerah daya masukan tinggi yakni pada rentang 13 W/m<sup>2</sup> hingga 20 W/m<sup>2</sup>. Hal ini dapat dikarenakan efek nonlinearitas Kerr yang dapat merubah fase dari cahaya masukan. Daya keluaran terendah didapatkan pada daya masukan dari port 2 sebesar 18.1 W/m<sup>2</sup> dengan nilai keluaran sebesar 0.21 W/m<sup>2</sup>. Hal ini

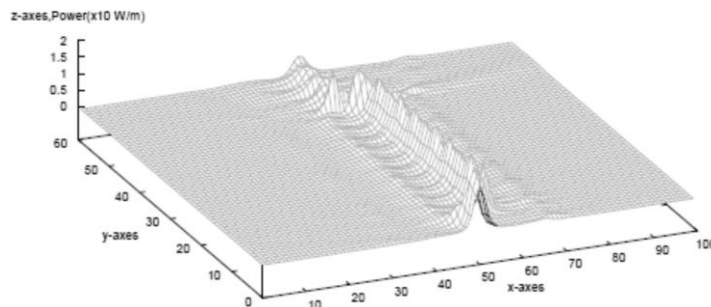
mengindikasikan cahaya masukan yang sudah terbagi akibat cabang Mach-zehnder di daerah masukan telah mengalami pergeseran fase saat melalui lengan Mach-zehnder dan perbedaan fase antar keduanya mencapai nilai maksimum. Oleh karena itu, keduanya mengalami interferensi *destructive* yang saling menghilangkan saat keduanya bertemu kembali di cabang Mach-zehnder di daerah keluaran. Akan tetapi, daya tersebut tidak sepenuhnya menghilang akibat interferensi. Sebagian daya juga mengalami pergeseran ke pandu gelombang kontrol akibat efek kopling, sebagaimana dapat dilihat dari penjalaran cahaya pada pandu gelombang yang ditunjukkan pada Gambar 5.19.



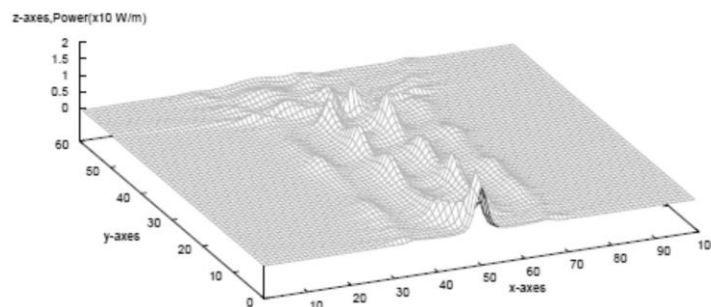
Gambar 5.19 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan  $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.20 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan  $P_2 = 18.1 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.21 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 18.1 W/m<sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



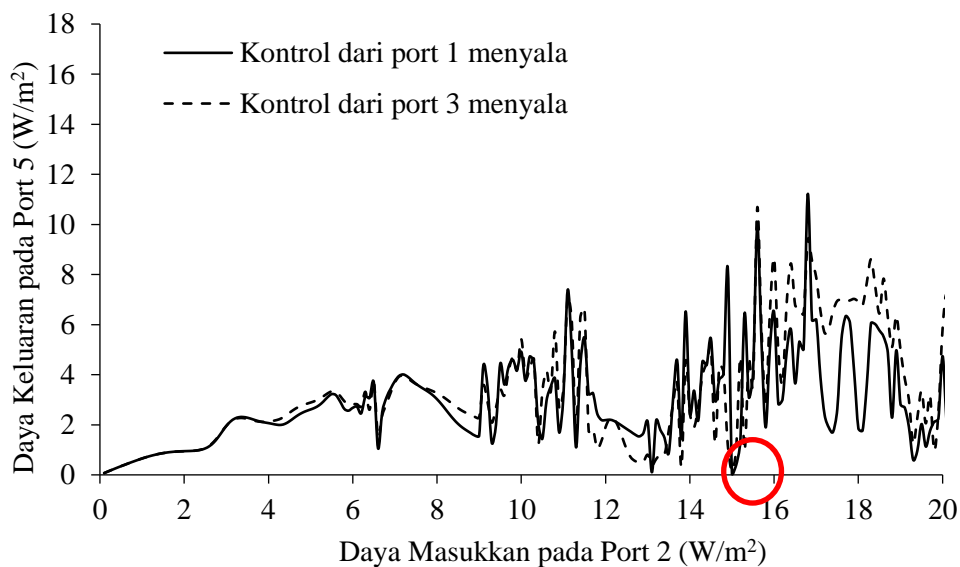
Gambar 5.22 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 18.1 W/m<sup>2</sup> dan kedua port kontrol dihidupkan

Tabel 5.8 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika OR ketika daya masukan P<sub>2</sub> = 18.1 W/m<sup>2</sup>

Daya masukan		Daya keluaran (Port 5)	
Port 1	Port 2	Keadaan	Nilai daya (W/m <sup>2</sup> )
0	0	0	0,21
1	0	1	1,77
0	1	1	6,77
1	1	1	1,67

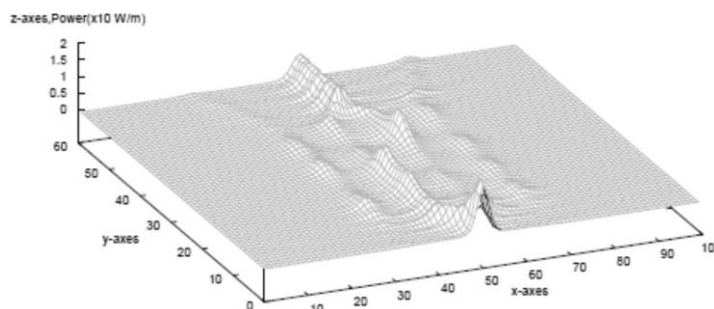
Operasi gerbang logika optik didapatkan dengan menggunakan ambang batas sebagaimana yang digunakan pada desain pandu gelombang DC yakni

sebesar  $0,5 \text{ W/m}^2$ . Daya keluaran didapatkan berada di atas batas ambang saat daya kontrol dinyalakan baik salah satu maupun keduanya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.20 hingga Gambar 5.22. Ketika salah satu port kontrol dinyalakan, cahaya yang menjalar di salah satu lengan Mach-zehnder akan mengalami gangguan dari cahaya yang menjalar pada pandu gelombang kontrol di sampingnya. Gelombang pada pandu gelombang kontrol terkopling dan mengalami pergeseran daya optik sehingga sebagian gelombang juga menjalar ke lengan Mach-zehnder. Penjalaran gelombang tersebut menyebabkan perubahan pada perbedaan fase gelombang yang menjalar melalui kedua lengan Mach-zehnder. Perbedaan fase tersebut tidak mencapai maksimum sehingga interferensi keduanya tidak sepenuhnya menghilangkan keduanya. Penambahan daya optik ini juga memberikan penambahan pada daya yang terukur pada port keluaran (Port 5). Fenomena tersebut juga berlaku saat kedua port kontrol dinyalakan. Kedua cahaya pada pandu gelombang port terkopling ke kedua lengan Mach-zehnder. Akan tetapi perubahan perbedaan daya optik yang menjalar melalui kedua lengan Mach-zehnder tidak sebesar saat salah satu port kontrol yang menyala sehingga daya keluaran yang dihasilkan lebih kecil. Pandu gelombang nonlinear Mach-zehnder pada daya masukan ini menunjukkan operasi gerbang logika optik OR dimana data daya keluaran terangkum dan ditunjukkan Tabel 5.8.

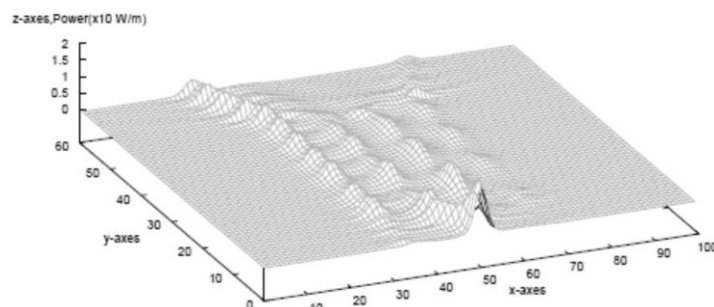


Gambar 5.23 Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbasis  $\text{SnO}_2$  literatur saat salah satu port kontrol dinyalakan

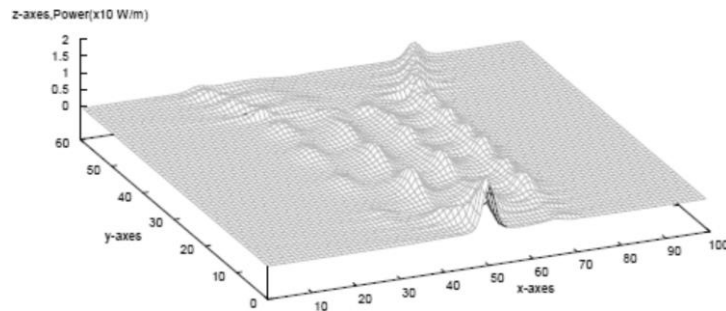
Karakteristik daya keluaran saat salah satu port kontrol dinyalakan ditunjukkan pada Gambar 5.23 dimana grafik lurus dan putus-putus masing-masing menunjukkan port kontrol dari port 1 atau port 3. Perbedaan daya keluaran ini dapat diakibatkan efek nonlinear yang menyebabkan pergeseran fase gelombang yang menjalar di antara keduanya. Perbedaan fase tersebut juga memberikan perbedaan respon pada cahaya gangguan yang berasal dari pandu gelombang kontrol. Perbedaan tersebut timbul setelah daya masukan mencapai nilai cukup tinggi dimana penelitian ini terjadi pada  $4 \text{ W/m}^2$ . Semakin tinggi daya masukan semakin terlihat perbedaan antara keduanya. Hal ini juga dapat menjadi alasan mengapa daya keluaran pada operasi gerbang logika OR terutama saat salah satu port kontrol dihidupkan, didapatkan daya keluaran yang cukup banyak berbeda.



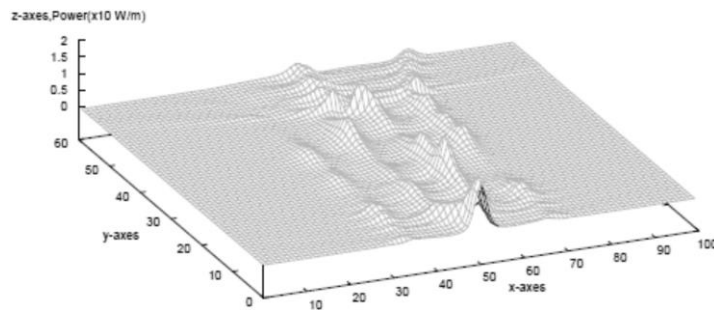
Gambar 5.24 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 15 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.25 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan  $\text{SnO}_2$  literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukan  $P_2 = 15 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.26 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P<sub>2</sub> = 15 W/m<sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



Gambar 5.27 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika XNOR ketika daya masukkan P<sub>2</sub> = 15 W/m<sup>2</sup> dan kedua port dinyalakan

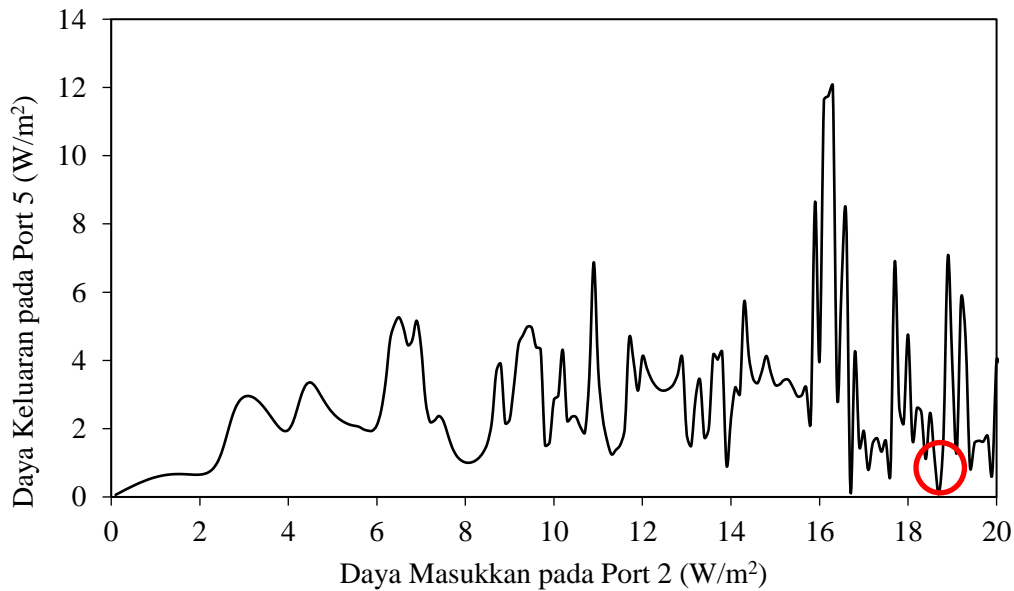
Tabel 5.9 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika XNOR ketika daya masukkan P<sub>2</sub> = 15 W/m<sup>2</sup>

Daya masukkan		Daya keluaran (Port 5)	
Port 1	Port 2	Keadaan	Nilai daya (W/m)
0	0	1	6,96
1	0	0	0,05
0	1	0	0,15
1	1	1	3,28

Daya keluaran terendah yang didapatkan pada kondisi salah satu port kontrol menyala terjadi saat diberikan daya masukkan sebesar 15 W/m<sup>2</sup>. Penggunaan daya masukkan ini memberikan fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik operasi XNOR. Penjalaran cahaya pada pandu gelombang

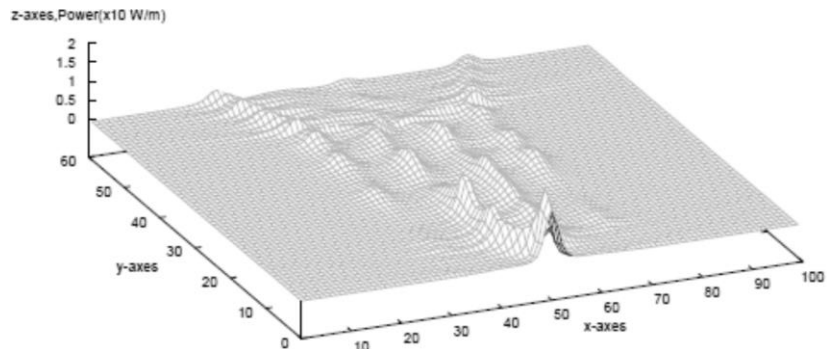


dengan aplikasi daya masukan tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.24 – 5.27. Sedangkan, data daya keluaran terangkum dalam tabel 5.9.

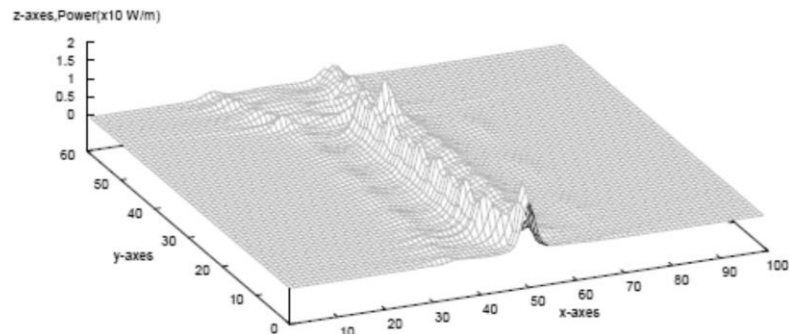


Gambar 5.28 Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbasis SnO<sub>2</sub> literatur saat kedua port kontrol dinyalakan

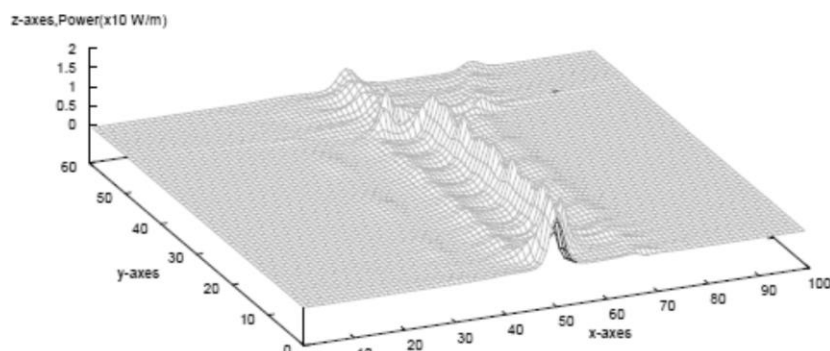
Frekuensi osilasi nilai daya keluaran dari port 2 menjadi lebih besar saat kedua port kontrol dihidupkan seperti yang ditunjukkan grafik pada Gambar 2.28. Hal ini dapat dikarenakan gangguan yang disebabkan oleh kedua port kontrol seperti fenomena pada pandu gelombang DC ganda. Nilai daya keluaran telah mulai berosilasi bahkan pada daya masukan cukup kecil yakni sebesar 3,4 W/m<sup>2</sup>. Kecepatan mulainya osilasi ini dapat disebabkan karena semakin cepatnya rekombinasi indeks pada material nonlinear akibat gangguan tersebut. Gambar 5.29 hingga 5.31 menunjukkan penjalaran gelombang pada pandu gelombang dengan menggunakan daya masukan sebesar 18,7 W/m<sup>2</sup>. Nilai daya masukan ini didapatkan saat daya keluaran mencapai nilai minimum. Daya keluaran tetap terdeteksi pada kondisi yang lainnya (ketika kedua port kontrol dimatikan dan ketika salah satu port kontrol dinyalakan). Karakteristik pemanduan gelombang pada daya masukan ini memberikan fungsi pandu gelombang sebagai gerbang logika optik NAND dimana data daya keluaran telah terangkum pada tabel 5.10.



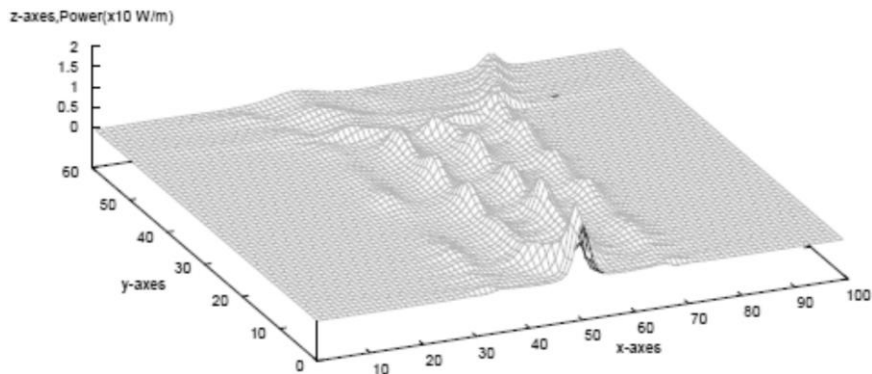
Gambar 5.29. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukan  $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$  dan kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.30. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukan  $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



Gambar 5.31. Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi logika NAND ketika daya masukan  $P_2 = 18.7 \text{ W/m}^2$  dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



Gambar 5.32 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang nonlinear MZ dengan operasi logika NAND ketika daya masukan P2 = 18.7 W/m<sup>2</sup> dan salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan

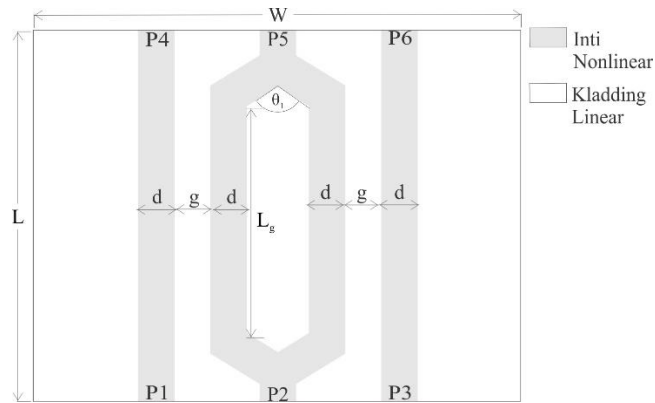
Tabel 5.10 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO<sub>2</sub> literatur dengan operasi gerbang logika NAND ketika daya masukan P2 = 18.7 W/m<sup>2</sup>

Daya masukan		Daya keluaran (Port 5)	
Port 1	Port 2	Kondisi	Nilai daya (W/m <sup>2</sup> )
0	0	1	1,37
1	0	1	4,87
0	1	1	6,28
1	1	0	0,09

### 5.3.3 Pandu Gelombang Nonlinear struktur *Mach-zehnder* Berbahan SnO<sub>2</sub> Hasil Fabrikasi

Pandu gelombang nonlinear pada penelitian ini juga didesain dengan menggunakan struktur berbasis *Mach-zehnder* (MZ). Struktur pandu gelombang Mach Zehnder merupakan struktur pandu gelombang paling sederhana untuk menginvestigasi perilaku *switching* akibat pergeseran fase pada gelombang nonlinear karena struktur ini terdiri dua struktur inti dalam desain pandu gelombang yakni percabangan (struktur Y) dan pandu gelombang sejajar (struktur *directional coupler*) (Miyata, 1992). Desain pandu gelombang tersebut terdiri dari pandu

gelombang berstruktur *Mach-zehnder* di bagian tengah dengan dua pandu gelombang lurus di sampingnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.33.

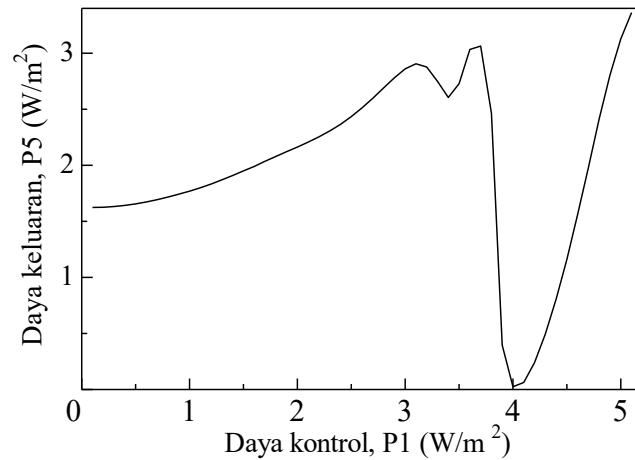


Gambar 5.33 Struktur pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO2 hasil fabrikasi

Tabel 5.11 Parameter pandu gelombang struktur berbasis MZ berbahan SnO2 hasil fabrikasi

Parameter	Nilai
Panjang pandu gelombang	$L = 3500\mu\text{m}$
Panjang lengan Mach-Zehnder	$Lg = 1500\mu\text{m}$
Lebar pandu gelombang	$W = 150\mu\text{m}$
Lebar bagian pandu	$d = 5.0\mu\text{m}$
Lebar celah	$g = 3.0\mu\text{m}$
Sudut percabangan Mach-zehnder	$\theta_l = \tan^{-1}(0.006)$

Keseluruhan parameter desain pandu gelombang berstruktur Mach-zehnder ini terangkum pada Tabel 5.11. Pandu gelombang dengan desain ini juga mengandung enam port yang masing-masing memiliki fungsi yang sama dengan pemodelan sebelumnya. Sinyal masukan diberikan ke port tengah (Port 2) dengan nilai tetap, dalam penelitian ini diambil  $2\text{ W/m}^2$  sebagai daya dari sinyal masukan. Fungsi logika optik dibangun dengan memberikan gangguan pada sinyal masukan tersebut dengan sinyal kontrol. Perubahan daya diamati pada port keluaran yang sejalan dengan masukan (Port 5).

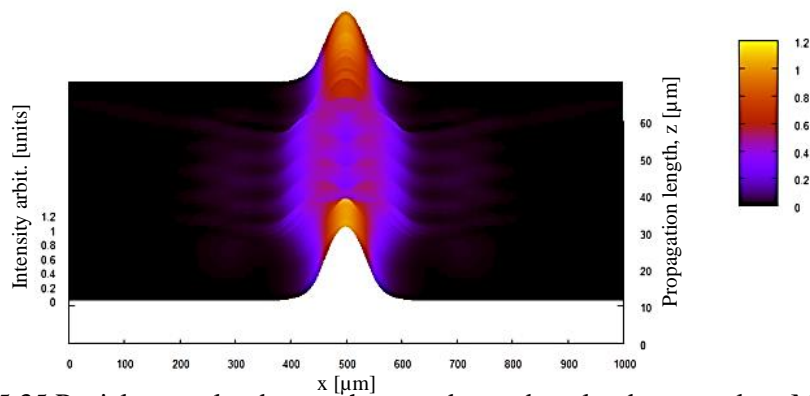


Gambar 5.34. Karakteristik daya keluaran pada pandu gelombang struktur *Mach-zehnder* berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi saat salah satu port kontrol diberikan

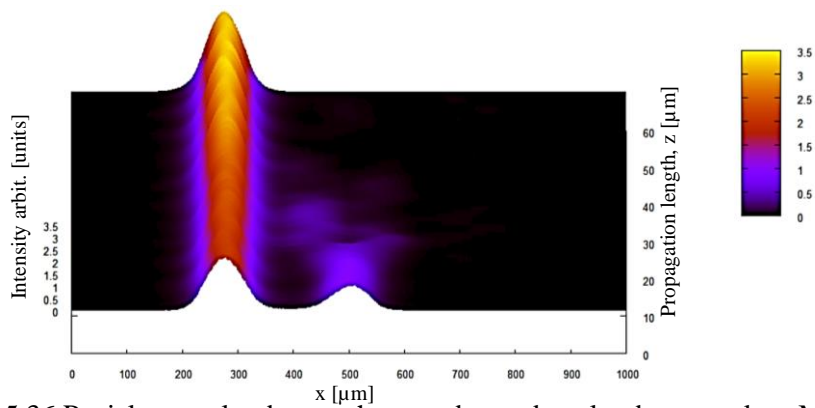
Gambar 5.34 menunjukkan karakteristik daya keluaran saat salah satu sinyal kontrol diberikan. Daya keluaran ketika sinyal kontrol belum diberikan, didapatkan kurang dari besar daya masukan. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal masukan telah mengalami kehilangan daya selama proses penjalaran. Rugi-rugi daya dapat disebabkan akibat pembelokan sinyal pada struktur pandu gelombang. Efek gangguan dari sinyal kontrol yang berasal dari salah satu pandu gelombang lurus samping dapat dilihat dari perubahan yang tak linear pada daya keluaran. Pada daya rendah, sinyal kontrol sebagian bergeser dan terkopling dengan sinyal masukan. Hal ini dapat terlihat dengan kenaikan grafik daya keluaran secara eksponensial. Semakin besar daya sinyal kontrol yang diberikan, efek nonlinearitas mulai muncul. Efek ini dapat dilihat dengan mulai naik turunnya daya keluaran yang terlihat mulai terjadi pada daya 3 W/m<sup>2</sup>. Pada daya tersebut, indeks bias pada pandu gelombang kontrol mulai berubah dan mengganggu proses pengkoplingan daya. Indeks bias dari pandu gelombang kontrol akibat meningkatnya daya kontrol. Kontras/perbedaan indeks bias antara pandu gelombang kontrol dan pandu gelombang dapat menstimulasi penggeseran sinyal optik dari satu pandu gelombang satu ke pandu gelombang sebelahnya karena perbedaan indeks bias ini memicu perbedaan konstanta/fase gelombang yang menjalar keduanya (Liu, 2004).

Setelah satu siklus tepatnya saat daya kontrol mencapai 4 W/m<sup>2</sup>, penggeseran daya terdapat pada indeks bias tertinggi. Hal ini dapat ditunjukkan

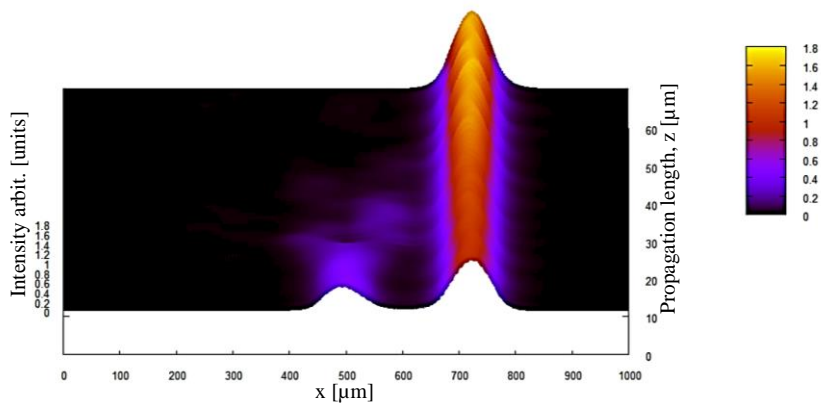
dengan sangat kecilnya daya keluaran yang terdeteksi atau dengan kata lain sinyal masukkan hampir seluruhnya bergeser ke pandu gelombang kontrol. Penjalaran cahaya pada fenomena ini lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.35 dan 5.36. Saat kedua sinyal kontrol diberikan, hasil penggabungan sinyal di daerah kopling yang awalnya berkumpul di pandu gelombang kontrol akan saling berinteraksi kembali pada pandu gelombang tengah Mach-zehnder. Fenomena ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Kalonakis, 2005). Penjalaran gelombang saat kedua sinyal kopling dihidupkan, ditunjukkan pada Gambar 5.37. Berdasarkan penjalaran cahaya tersebut, daya kontrol  $4 \text{ W/m}^2$  dapat membangkitkan fungsi gerbang logika XNOR. Keadaan mati-nyala dilihat dari besarnya daya keluaran dibandingkan dengan daya masukkan. Batas keadaan mati-nyala dilihat daya masukkan dan mempertimbangkan rugi-rugi penjalaran gelombang, sehingga diasumsikan setengah dari nilai sinyal masukkan yakni  $1 \text{ W/m}^2$ . Data daya keluaran pada fungsi gerbang logika ini terangkum pada Tabel 5.12.



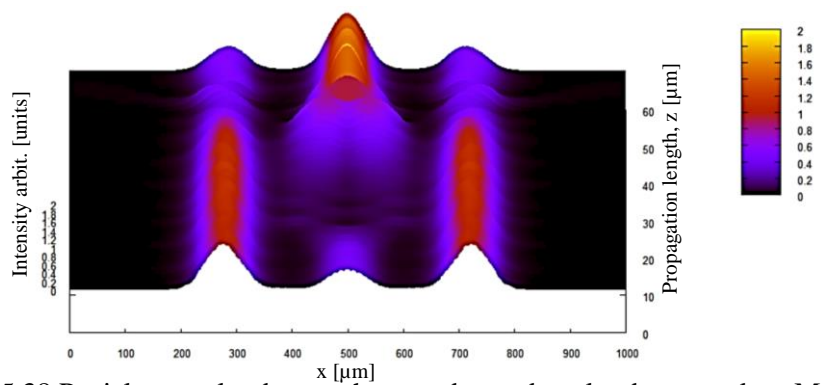
Gambar 5.35 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan  $\text{SnO}_2$  hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika kedua port kontrol dimatikan



Gambar 5.36 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika salah satu port kontrol (port 1) dinyalakan



Gambar 5.37 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika salah satu port kontrol (port 3) dinyalakan



Gambar 5.38 Penjalaran gelombang cahaya pada pandu gelombang struktur MZ berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR ketika kedua port kontrol dihidupkan

Tabel 5.12 Keadaan mati-nyala dan data daya keluaran pada pandu struktur MZ  
berbahan SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi dengan operasi logika XNOR

Daya masukan		Daya keluaran (Port 5)	
Port 1	Port 2	Keadaan	Nilai daya (W/m <sup>2</sup> )
0	0	1	1.64
1	0	0	0.03
0	1	0	0.03
1	1	1	4.44

Pembahasan pada bab ini mengungkapkan bahwa pandu gelombang nonlinear berstruktur Mach-zehnder pada penelitian ini dapat digunakan sebagai gerbang logika optik dengan operasi XNOR. Perbandingan hasil dengan penelitian sebelumnya ditunjukkan pada Tabel 5.13. Struktur pandu gelombang pada pandu gelombang ini memiliki kelebihan pada parameter lebar pandu untuk moda tunggal cukup lebar sehingga memudahkan proses fabrikasi pandu gelombang dan proses pengkoplingan sinyal optik ke dalam pandu gelombang. Fungsi gerbang logika juga dibangun dengan daya kontrol yang lebih kecil dari penelitian-penelitian sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi gerbang logika optik pada penelitian juga memiliki keunggulan akan kebutuhan energi yang lebih rendah.

Tabel 5.13 Komparasi hasil penelitian dengan referensi

Sumber	Daya Masukkan	Operasi Logika
(Pramono, 2001)	15 W/m <sup>2</sup>	XNOR
(Yabu, 2002)	38.134 W/m <sup>2</sup>	XOR
	30.000W/m <sup>2</sup>	XNOR
(Fu, 2003)	-	NOT
(Wu, 2007)	-	Switching
(Wu, 2008)	(a) 102.7 W/m <sup>2</sup>	XOR/XNOR
	(b) 90 W/m <sup>2</sup>	AND/NAND
	(c) 109.2 W/m <sup>2</sup>	OR/NOR



(Wu, 2015)	(a) 65 W/m <sup>2</sup>	XOR/XNOR
	(b) 77 W/m <sup>2</sup>	AND/NAND
	(c) 79 W/m <sup>2</sup>	OR/NOR
(Khoiro, 2018)	15,00 W/m <sup>2</sup>	XNOR
	18,10 W/m <sup>2</sup>	OR
	18,70 W/m <sup>2</sup>	NAND
Penelitian ini	4 W/m <sup>2</sup>	XNOR

## **BAB 6**

### **KESIMPULAN**

#### **6.1 Kesimpulan**

Penelitian ini telah menunjukkan teknik fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> dan pemodelan penjalaran pandu gelombang dengan material SnO<sub>2</sub>. Berdasarkan tujuan penelitian dapat dirumuskan kesimpulan sebagai berikut :

1. Lapisan tipis SnO<sub>2</sub> telah berhasil difabrikasi dari material timah murni menggunakan *vacuum evaporation deposition* dan teknik oksidasi termal dengan tiga tahap kalsinasi di atas substrat kaca *kuarsa*. Lapisan tipis tin murni bertransformasi menjadi SnO struktur ortorombik mulai pada suhu kalsinasi 400°C dan sepenuhnya bertransformasi menjadi SnO<sub>2</sub> pada suhu 600°C. Semakin tinggi suhu sintering semakin berkurang kekasaran permukaan. Teknik oksidasi termal dapat memunculkan pori-pori pada permukaan lapisan, tapi pori-pori tersebut berkurang seiring dengan semakin tingginya suhu sintering. Sifat optik lapisan tipis menunjukkan bahwa lapisan memiliki indeks bias tinggi, transmitansi rendah saat observasi dilakukan pada lapisan dan substrat secara paralel, dan absorbansi tinggi pada rentang UV. Rentang absorbansi ini sangat cocok dengan aplikasi solar sel komersial pada penelitian sebelumnya. Fabrikasi lapisan tipis SnO<sub>2</sub> pada penelitian berhasil menghasilkan lapisan tipis *cassiterite*, homogen dan berstruktur tetragonal yang berpotensi untuk aplikasi perangkat optik terutama pandu gelombang dan solar sel.
2. Perangkat pandu gelombang yang mengandung material nonlinear berbahan SnO<sub>2</sub> organosol telah didesain dalam struktur berbasis *directional coupler* ganda dan dianalisa menggunakan FD-BPM. Desain ini dapat diaplikasikan untuk berbagai gerbang logika optik operasi AND, OR, dan XNOR. Desain pandu gelombang ini dapat dijadikan salah satu desain perangkat gerbang logika optik multifungsi.

3. Perangkat pandu gelombang yang mengandung material nonlinear SnO<sub>2</sub> juga telah didesain dalam struktur berbasis Mach-zehnder dan dimodelkan menggunakan FD-BPM. Aplikasi pandu gelombang optik sebagai gerbang logika optik didapatkan perbedaan respon daya keluaran pada setiap daya masukan. Pemodelan menggunakan parameter SnO<sub>2</sub> literatur dihasilkan dapat membentuk fungsi gerbang logika optik OR, XNOR, dan NAND, sedangkan dengan parameter SnO<sub>2</sub> hasil fabrikasi didapatkan fungsi gerbang logika XNOR. Penelitian ini menunjukkan bahwa perangkat multi-fungsi dapat dilakukan pada pandu gelombang optik tunggal dengan kebutuhan energi lebih kecil.

## 6.2 Saran

Penelitian ini masih belum benar-benar sempurna dan hasilnya belum bisa diaplikasikan secara langsung. Oleh karena itu, dibutuhkan beberapa penelitian lanjutan. Beberapa saran penelitian lanjutan yang dapat dilakukan antara lain (1) pengukuran suseptibilitas orde ketiga lapisan tipis SnO<sub>2</sub> untuk panjang gelombang yang sering digunakan dalam sistem komunikasi optik, (2) Fabrikasi pandu gelombang berstruktur DC ganda optik dengan bahan SnO<sub>2</sub> dan karakterisasinya, serta (3) Fabrikasi pandu gelombang berstruktur Mach-zehnder optik dengan bahan SnO<sub>2</sub> dan karakterisasinya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdeldayem, Hossin A., dan Donald O. Frazier. (2008). *Nonlinear Optics and Applications*. New York: NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD.
- Abdelkrim, Allag, Saâd Rahmane, Ouahab Abdelouahab, Nadjate Abdelmalek, dan Gasmi Brahim. (2016). "Effect of Solution Concentration on the Structural, Optical and Electrical Properties of SnO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis." *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 127 (5): 2653–2658.
- Acioli, L. H., A. S. L. Gomes, JR Rios Leite, dan Cid B. De Araujo. (1990). "Ultrafast  $\chi^{(3)}$  related processes in semiconductor doped glasses." *IEEE Journal of Quantum Electronics* 26 (7): 1277–1284.
- Al-hemyari, K., J.S. Aitchison, C.N. Ironside, G.T. Kennedy, R.S. Grant, dan W. Sibbett. (1992). "Ultrafast All-Optical Switching in GaAlAs Integrated Interferometer in 1.55 Mm Spectral Region." *Electronics Letters* 28 (12): 1090.
- Anonim. (2013). "Tin Oxide (SnO<sub>2</sub>) Nanoparticles – Properties, Applications." diakses pada tanggal 2 Juli 2013. <http://www.azonano.com>.
- Anonim. (2016). "Gerbang Logika Dasar Elektronika Digital." t.t. Diakses 11 Juni 2016. <http://elektronika-dasar.web.id/>
- Arivuoli, D. (2001). "Fundamentals of Nonlinear Optical Materials." *Pramana* 57 (5–6): 871–83.
- Armenise, M.N. (1988). "Fabrication Techniques of Lithium Niobate Waveguides." *IEEE Proceedings J Optoelectronics* 135 (2): 85.
- Aziz, Madzlan, Saad Saber Abbas, dan Wan Rosemaria Wan Baharom. (2013). "Size-controlled synthesis of SnO<sub>2</sub> nanoparticles by sol–gel method." *Materials Letters* 91: 31–34.
- Baco, Satri, Abdullah Chik, dan Fouziah Md Yassin. (2012). "Study on optical properties of tin oxide thin film at different annealing temperatur." *Journal of Science and Technology* 4 (1).
- Barbier, D., M. Green, dan S.J. Madden. (1991). "Waveguide Fabrication for Integrated Optics by Electron Beam Irradiation of Silica." *Journal of Lightwave Technology* 9 (6): 715–20.
- Baur, W. H. (1956). "Über die Verfeinerung der Kristall struktur bestimmung einiger Vertreter des Rutiltyps: TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub> und MgF<sub>2</sub>." *Acta Crystallographica* 9 (6): 515–520.

- Berakdar, Jamal, dan Anita Thakur. (2010). "Self-Focusing and Defocusing of Twisted Light in Non-Linear Media." *Optics Express* 18 (26): 27691.
- Benson, D.J. (2004). "Finite Element Methods with B-Splines." *Applied Mechanics Reviews* 57(2): B9–B12.
- Bernard C. Kress. (2019). "Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations." . *Proceeding of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)* 11062.
- Bharti, Gaurav Kumar, Madan Pal Singh, dan Jayanta Kumar Rakshit. (2019). "Design and Modeling of Polarization-Conversion Based All-Optical Basic Logic Gates in a Single Silicon Ring Resonator." *Silicon*, 1-10.
- Bierlein, John D, August Ferretti, Lothar H Brixner, dan William Y Hsu. (1987). "Fabrication and Characterization of Optical Waveguides in KTiOPO<sub>4</sub>," 4.
- Butt, Faheem K., Chuanbao Cao, Waheed S. Khan, Zulfiqar Ali, Tariq Mahmood, R. Ahmed, Sajad Hussain, dan Ghulam Nabi. (2012). "Fabrication of Novel SnO<sub>2</sub> Nanofibers Bundle and Their Optical Properties." *Materials Chemistry and Physics* 136 (1): 10–14.
- Chang, William S. C. (2010). *Fundamentals of Guided-Wave Optoelectronic Devices*. London: Cambridge University Press.
- Chetri, Pawan, dan Amarjyoti Choudhury. (2013). "Investigation of optical properties of SnO<sub>2</sub> nanoparticles." *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 47: 257–263.
- Chung, Youngchul, dan Nadir Dagli. (1990). "An assessment of finite difference beam propagation method." *IEEE Journal of quantum electronics* 26 (8): 1335–1339.
- CNBC Indonesia. (2019). "Duh! Harga Timah Dunia Masih Amsyong, Begini Strategi TINS," Oktober 2019, bag. Market. diakses pada tanggal 3 Januari 2020. <https://www.cnbcindonesia.com/>
- Cotter, D., M. G. Burt, dan R. J. Manning. (1992). "Below-Band-Gap Third-Order Optical Nonlinearity of Nanometer-Size Semiconductor Crystallites." *Physical Review Letters* 68 (8): 1200–1203.
- Cross, M., dan M. J. Adams. (1974). "Effects of Doping and Free Carriers on the Refractive Index of Direct-Gap Semiconductors." *Opto-Electronics* 6 (3): 199–216.
- Czapla, A., E. Kusior, dan M. Bucko. (1989). "Optical Properties of Non-Stoichiometric Tin Oxide Films Obtained by Reactive Sputtering." *Thin Solid Films* 182 (1–2): 15–22.

- Daniyati, R. (2015). "Fabrikasi Pandu Gelombang TiO<sub>2</sub> Nano Y-Branch dengan Metode Lithography sebagai Power Divider." Tesis, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Diéguez, A, A Romano-Rodríguez, J.R Morante, L Sangaletti, L.E Depero, E Comini, G Faglia, dan G Sberveglieri. (2000). "Influence of the Completion of Oxidation on the Long-Term Response of RGTO SnO<sub>2</sub> Gas Sensors." *Sensors and Actuators B: Chemical* 66 (1–3): 40–42.
- Ding, Jianfeng, Lin Yang, Qiaoshan Chen, Lei Zhang, dan Ping Zhou. (2015). "Demonstration of a directed XNOR/XOR optical logic circuit based on silicon Mach–Zehnder interferometer." *Optics Communications*, 395: 183–187.
- Du, Lifei, Shaomei Yang, Xinwen Zhu, Jing Jiang, Qian Hui, dan Huiling Du. (2018). "Pore deformation and grain boundary migration during sintering in porous materials: a phase-field approach." *Journal of Materials Science* 53: 1–11.
- Faridawati, F. (2009). "Prosedur Penentuan Tipe moda Terpandu pada Pandu Gelombang Nonlinear Lima Lapis Struktur L-NL-L-NL-L." Tesis, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Fraga, W. B., J. W. M. Menezes, M. G. da Silva, C. S. Sobrinho, dan A. S. B. Sombra. (2006). "All optical logic gates based on an asymmetric nonlinear directional coupler." *Optics Communications* 262 (1): 32–37.
- Fu, Q. (2015). *Radiation Transfer In The Atmosphere: Cloud-Radiative Processes*, Washington: Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Elsevier.
- Ghadi, Amin, dan Saeed Mirzanejad. (2011). "All-optical logic gates using semiconductor-based three-coupled waveguides nonlinear directional coupler." *Optics Communications* 284 (1): 432–35.
- Giallorenzi, Thomas G., dan Joel M. Schnur. (1973). *Liquid crystal waveguide*. Paten: US3963310A.
- Gordillo, G., L.C. Moreno, W. de la Cruz, dan P. Teheran. (1994). "Preparation and Characterization of SnO<sub>2</sub> Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis from SnCl<sub>2</sub> and SnCl<sub>4</sub> Precursors." *Thin Solid Films* 252 (1): 61–66.
- Gupta, Man Mohan, dan Sarang Medhekar. (2016). "All-optical NOT and AND gates using counter propagating beams in nonlinear Mach–Zehnder interferometer made of photonic crystal waveguides." *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 127 (3): 1221–28.
- Hagerhorst-Trewhella, J.M., J. D. Gelorme, B. Fan, A. Speth, D. Flagello, dan M. M. Oprysko. (1990). "Polymeric optical waveguides." *Proceedings of*

*International Society for Optics and Photonics: Integrated Optics and Optoelectronics*. 1177:379–386.

- Handoko, Natanael Roni Budi, K. Sofjan Firdausi, dan Evi Setiawati. (2006). “Penentuan Nilai Koefisien Linear Magneto Optik Bahan Transparan Menggunakan Interferometer Michelson.” Semarang: *Universitas Dipenogoro*.
- Hanim, Abdul Razak. (2014). “Pemodulat optik interferometer mach zehnder (MZI) suntikan pembawa di atas silikon-di atas-penebat (SOI).” Kuala Lumpur: UTeM.
- Hashishin, Takeshi, dan Jun Tamaki. (2009). “Chemical Modification of Carbon Nanotubes for NO<sub>2</sub> Detection.” *Sensors and Materials* 21 (5): 265–80. <https://doi.org/10.18494/SAM.2009.612>.
- Helmi, Ja’far. (2013). “Karakteristik Pandu Gelombang Y-Branch dengan Taper dan Cladding Bahan Tak Linier untuk Gerbang Logika X-OR.” Skripsi, Jember: Universitas Jember.
- Herdianto, H. (2007). “InterferometerMach Zehnder sebagai Sensor Serat Optik” *Fakultas Teknik UKSW* (1): 17–30.
- Huda, Adri, Chanel T. Handoko, Muhammad Djoni Bustan, Bambang Yudono, dan Fakhili Gulo. (2018). “New Route in the Synthesis of Tin(II) Oxide Micro-Sheets and Its Thermal Transformation.” *Materials Letters* 211 (Januari): 293–95. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.10.029>.
- Jalil, M. A., I. S. Amiri, C. Teeka, J. Ali, dan P. P. Yupapin. (2011). “All-optical Logic XOR/XNOR Gate Operation using Microring and Nanoring Resonators.” *Physics Express* (1): 15–22.
- Jarzebski, Z. M. (1976). “Physical Properties of SnO<sub>2</sub> Materials.” *Journal of The Electrochemical Society* 123 (10): 333C.
- Jones, William B. (1987). *Introduction to Optical Fiber Communication Systems*., New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- Jui-Ming Hsu, dan Ching-Ting Lee. (1998). “Systematic Design of Novel Wide-Angle Low-Loss Symmetric Y-Junction Waveguides.” *IEEE Journal of Quantum Electronics* 34 (4): 673–79.
- Kabir, A., D. Boulainine, I. Bouanane, G. Schmerber, dan B. Boudjema. (2017). “Physical Properties of SnO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Isothermal Oxidation of Vacuum Evaporated Sn.” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 28 (3): 2481–86.

- Kalonakis, Konstantinos G., dan Emmanuel Paspalakis. (2005). "Optical Switching in a Symmetric Three-Waveguide Nonlinear Directional Coupler." *Journal of Modern Optics* 52 (13): 1885–92.
- Kawachi, Masao. (1990). "Silica Waveguides on Silicon and Their Application to Integrated-Optic Components." *Optical and Quantum Electronics* 22 (5): 391–416.
- Kawano, K., dan T. Kitoh. (2004). *Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equation and the Schrödinger Equation*. New York: Wiley. Inc.
- Kemenperin, Kementerian Perindustrian Indonesia. (2009). "Pohon Industri Timah." Website organisasi. 11 Maret 2009. <https://kemenperin.go.id/pohon-industri>.
- Khoiro, Muhimmatul, Melania Suweni Muntini, dan Yono Hadi Pramono. (2018). "OR, XNOR, and NAND Optical Logic Gates in Mach-Zehnder Waveguiding Structure Consisting of Nonlinear Material." *International Journal of Microwave and Optical Technology* 13 (5): 462–69.
- Khoiro, Muhimmatul, Takeshi Hashishin, Melania Suweni Muntini, dan Yono Hadi Pramono. (2020). "Morphological and Optical Properties Of Tin Oxide Nanomaterial Thin Film Deposited Using Vacuum Evaporation". *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 128(3):158–163.
- Khoiro, Muhimmatul, Nur Abdillah Siddiq, Jhelang Annovasho, Melania Suweni Muntini, dan Yono Hadi Pramono. (2017). "All-optical logic gates in directional coupler waveguide consisting of nonlinear material." *IEEE International Conference: The 2nd International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)*. 1:174–79.
- Kogelnik, H. (1988). "Theory of Optical Waveguides." dalam *Guided-Wave Optoelectronics*, disunting oleh Theodor Tamir Ph D, 7–88. Jerman: Springer Berlin Heidelberg.
- Kumar, Anil, M. Kamal Warshi, Vikash Mishra, Shailendra K. Saxena, Rajesh Kumar, dan Pankaj R. Sagdeo. (2017). "Strain Control of Urbach Energy in Cr-Doped PrFeO<sub>3</sub>." *Applied Physics A* 123 (9).
- Kumar, Santosh. (2016). "Design of an Optical 4-Bit Binary to BCD Converter Using Electro-Optic Effect of Lithium Niobate Based Mach-Zehnder Interferometers." *Optics Communications*, Juli.
- Laghrib, Souad, Hania Amardjia-Adnani, Djamila Abdi, Jean-Mark Pelletier, dan Delloula Lakhdari. (2010). "Thermal Oxidation of Tin Layers and Study of the Effect of Their Annealings on Their Structural and Electrical



- Properties.” *Materials Science in Semiconductor Processing* 13 (5–6): 364–70.
- Li, Zhen, Jinquan Wei, Peixu Li, Luhui Zhang, Enzheng Shi, Chunyan Ji, Jiang Liu, dkk. (2012). “Solution-Processed Bulk Heterojunction Solar Cells Based on Interpenetrating CdS Nanowires and Carbon Nanotubes.” *Nano Research* 5 (9): 595–604.
- Liu, Gang Jun, Bin Ming Liang, Guo Liang Jin, dan Qu Li. (2004). “Switching characteristics of variabel coupling coefficient nonlinear directional coupler.” *Journal of lightwave technology* 22 (6): 1591.
- Lotfi Orimi, R., dan M. Maghouli. (2016). “Optical Characterization of SnO<sub>2</sub> Nanostructure Thin Films, Annealed at Different Temperatures.” *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 127 (1): 263–266.
- Marcuse. (1974). *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Second. New York, New York: Academic Press.
- Medhekar, S., dan P. P. Paltani. (2009). “Novel All-Optical Switch Using Nonlinear Mach-Zehnder Interferometer.” *Fiber and Integrated Optics* 28 (3): 229–236.
- Mehraj, Sumaira, M. Shahnawaze Ansari, dan Alimuddin. (2015). “Annealed SnO<sub>2</sub> Thin Films: Structural, Electrical and Their Magnetic Properties.” *Thin Solid Films* 589 (Agustus): 57–65.
- Miller, David A. B. (2010). “Are optical transistors the logical next step?” *Nature Photonics* 4(1): 3–5.
- Miyata, Seizō, ed. (1992). *Nonlinear Optics: Fundamentals, Materials, and Devices: Proceedings of the Fifth Toyota Conference on Nonlinear, Optical Materials, Aichi-Ken, Japan, 6-9 October 1991*. New York: North-Holland.
- Nishihara, Hiroshi, Masamitsu Haruna, dan Toshiaki Suhara. (1989). *Optical Integrated Circuits*. New York: McGraw Hill Professional.
- Noda, Juichi, Naoya Uchida, Shoichi Saito, Tadashi Saku, dan Makoto Minakata. (1975). “Electro-optic Amplitude Modulation Using Three-dimensional LiNbO<sub>3</sub> Waveguide Fabricated by TiO<sub>2</sub> Diffusion.” *Applied Physics Letters* 27 (1): 19–21.
- Orlandi, Marcelo Ornaghi, Antonio José Ramirez, Edson Roberto Leite, dan Elson Longo. (2008). “Morphological Evolution of Tin Oxide Nanobelts after Phase Transition.” *Crystal Growth & Design* 8 (3): 1067–72.
- Paschotta, R. (2008). *Field Guide to Lasers*. Washington: SPIE Press.

- Patnaik, Pradyot. (2003). *Handbook of inorganic chemicals*. McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill.
- Pramono, Y. H., M. Geshiro, T. Kitamura, dan S. Sawa. (2000). "Optical logic OR-AND-NOT and NOR gates in waveguides consisting of nonlinear material." *IEICE TRANSACTIONS on Electronics* E83-C(11): 1755–1760.
- Pramono, Yono Hadi. (2000). "Studies on All Optical Switching in Crossing Waveguides Consisting of Nonlinear Material." Dissertation, Japan: Osaka Prefecture University.
- Pramono, Yono Hadi. (2001). "Nonlinear Waveguides For Optical Logic And Computation." *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 10 (02): 209–22.
- Pramono, Yono Hadi, Masahiro Geshiro, Toshiaki Kitamura, dan Shinnosuke Sawa. (1999). "Self-Switching in Crossing Waveguides with Three Channels Consisting of Nonlinear Material." *IEICE TRANSACTIONS on Electronics* E82-C (1): 111–118.
- Raghuwanshi, S.K., V. Kumar, Devendra Chack, dan Santosh Kumar. (2012). "Propagation Study of Y-Junction Optical Splitter Using BPM." *IEEE International Conference. 2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies* 1:625–29.
- Rahal, Achour, Atmane Benhaoua, Mohamed Jlassi, dan Boubaker Benhaoua. (2015) "Structural, Optical and Electrical Properties Studies of Ultrasonically Deposited Tin Oxide (SnO<sub>2</sub>) Thin Films with Different Substrate Temperatures." *Superlattices and Microstructures* 86: 403–411.
- Rajan, R., P. Babu, dan K. Senthilnathan. (2018). "All-optical logic gates show promise for optical computing." *Photonics Spectra* 52 (April): 62–65.
- Rinawati, R. (2007). "Fabrikasi dan Karakterisasi Directional Coupler Struktur Stak berbasis Polimer Polystyrene dan Polymethyl Methacrylate (PMMA)." Tesis, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rohedi, Ali Yunus, Gatut Yudoyono, Suryadi Suryadi, dan Agus Rubiyanto. (2005). "Formulasi Analitis Tetapan Propagasi Efektif Modus TE untuk Directional Coupler Linier Diturunkan dengan Metode Matrik Karakteristik Lapis Jamak." *Jurnal Fisika dan Aplikasinya* 1 (2): 050204.
- Rubiyanto, Agus, dan Ali Yunus Rohedi. (2003). *Buku Ajar-Optika Terpadu*. Surabaya: Jurusan Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sakhare, R. D., G. D. Khuspe, S. T. Navale, R. N. Mulik, M. A. Chougule, R. C. Pawar, C. S. Lee, Shashwati Sen, dan V. B. Patil. (2013). "Nanocrystalline SnO<sub>2</sub> thin films: Structural, morphological, electrical transport and optical studies." *Journal of Alloys and Compounds* 563 (Juni): 300–306.

- Salim, Zamroni, ed. (2015). *Info komoditi pakaian jadi*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Pengembangan Kebijakan Perdagangan : Al Mawardi Prima.
- Scherrer, P. (1920). *Zsigmondy, Kolloidchemie*. 3<sup>rd</sup> edition:387.
- Shamir, Joseph. (1999). *Optical Systems and Processes*. New York: SPIE Press.
- Sharifpour-Boushehri, Sara, Seyed Mohsen Hosseini-Golgoo, dan Mohammad-Hossein Sheikhi. (2015). "A Low Cost and Reliable Fiber Optic Ethanol Sensor Based on Nano-Sized SnO<sub>2</sub>." *Optical Fiber Technology* 24: 93–99.
- Siddiq, N. A., W. Y. Chong, Y. K. Yap, Y. H. Pramono, dan H. Ahmad. (2018). "Tin(IV) oxide nanoparticles as a saturable absorber for a Q-switched erbium-doped fiber laser." *Laser Physics* 28 (12): 125104.
- Srivastava, Arpita, Man Mohan Gupta, dan S. Medhekar. 2012. "Signal Amplification Based on the Local Nonlinear Mach–Zehnder Interferometer." *Optics & Laser Technology* 44 (2): 492–496. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.08.020>.
- Srivastava, Arpita, dan S. Medhekar. (2011). "Switching of One Beam by Another in a Kerr Type Nonlinear Mach–Zehnder Interferometer." *Optics & Laser Technology* 43 (1): 29–35.
- Studeniyak, Ihor, Mladen Kranjcec, dan Mykhailo Kurik. (2014). "Absorption Edge, Urbach Rule, Exciton (Electron)-Phonon Interaction, Disorder." *International Journal of Optics and Applications* 4: 76–83.
- Sun, X. Q., C. M. Chen, F. Wang, J. Sun, W. N. Gao, L. Gao, H. L. Zheng, C. P. Kang, dan D. M. Zhang. (2010). "A multimode interference polymer-silica hybrid waveguide 2x2 thermo-optic switch." *Optica Applicata* 40 (3): 737–745.
- Takafuji, Makoto, Maino Kajiwara, Nanami Hano, Yutaka Kuwahara, dan Hirohiko Ihara. (2019). "Preparation of High Refractive Index Composite Films Based on Titanium Oxide Nanoparticles Hybridized Hydrophilic Polymers." *Nanomaterials* 9 (4): 514.
- Teertsra, D.K. (2008). "Photon Refraction in Dielectric Crystals Using a Modified Gladstone-Dale Relation". *Journal of Physical Chemistry C* 112(20): 7757–7760.
- Thylen, Lars. (1983). "The beam propagation method: an analysis of its applicability." *Optical and quantum electronics* 15 (5): 433–439.
- Uysal, Bengü Özüğür, dan Ümit Özlem Akkaya Arıer. (2015). "Structural and optical properties of SnO<sub>2</sub> nano films by spin-coating method." *Applied Surface Science* 350: 74–78.

- Vilpara, Anjana, dan Vishal Sorathiya. (2015). "A novel design of AND and OR optical logic gates using Silicon on insulator material." *2015 Twelfth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 1–5. Bangalore, India: IEEE.
- Wang, Boyi, Md Aatur Rahman, Yasumasa Nara, Takeshi Hashishin, Dzung Viet Dao, dan Yong Zhu. (2019). "Palladium Microfiber Network as a Platform for Hydrogen Sensing Applications." *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 131: 50–54.
- Wu, Jian-Wei, dan Amarendra K. Sarma. (2010). "Ultrafast All-Optical XOR Logic Gate Based on a Symmetrical Mach-Zehnder Interferometer Employing SOI Waveguides." *Optics Communications* 283 (14): 2914–2917.
- Wu, X., B. Zou, J. Xu, B. Yu, G. Tang, G. Zang, dan W. Chen. (1997). "The nonlinear optical properties of nanometer-sized SnO<sub>2</sub> Organosol." *Optik* 104 (4): 142–44.
- Wu, Yaw-Dong, Tien-Tsorng Shih, dan Mao-Hsiung Chen. (2008). "New All-Optical Logic Gates Based on the Local Nonlinear Mach-Zehnder Interferometer." *Optics Express* 16 (1): 248.
- Yabu, Tetsuro, Masahiro Geshiro, Toshiaki Kitamura, Kazuhiro Nishida, dan Shinnosuke Sawa. (2002). "All-optical logic gates containing a two-mode nonlinear waveguide." *IEEE Journal of Quantum electronics* 38 (1): 37–46.
- Yariv, A. (1973). "Coupled-Mode Theory for Guided-Wave Optics." *IEEE Journal of Quantum Electronics* 9 (9): 919–33.
- Yariv, A., dan P. Yeh. (2006). *Photonics: optical electronics in modern communications (the oxford series in electrical and computer engineering)*. New York: Oxford University Press, Inc.
- Yokota, Hirohisa, Masafumi Hira, dan Sadao Kurazono. (1995). "Iterative Finite Difference Beam Propagation Method Analysis of Nonlinear Optical Waveguide Excitation Problem." *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)* 78 (1): 73–80.
- Yu, Bao-long, Gui-lan Zhang, Guo-qing Tang, Xiao-chun Wu, Wen-ju Chen, Binzhou Yang, dan Ping Zhao. (1996). "Third-Order Nonlinear Optical Properties of SnO<sub>2</sub> Nanoparticles." *Acta Phys. Sin. (Overseas Edn)* 5 (5): 377.
- Zhang, H., Jiaming Liu, Lin Jian, Wenxiu Li, Xia Xue, Anping Huang, dan Zhisong Xiao (2016). "Optical waveguide materials, structures, and dispersion modulation." *Proceedings of International Society for Optics and Photonics: Integrated Optics and Optoelectronics*. 10027

Zhao, Qinqin, Lisha Ma, Qiang Zhang, Chenggang Wang, dan Xijin Xu. (2015). "SnO<sub>2</sub>-Based Nanomaterials: Synthesis and Application in Lithium-Ion Batteries and Supercapacitors." *Journal of Nanomaterials* 2015: 1–15.

Zhdanov, Michael S. (2018). *Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods (Second Edition)*. Disunting oleh Michael S. Zhdanov. Second Edition. Elsevier.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## LAMPIRAN 1.

Tabel 1. Ukuran Kristal SnO<sub>2</sub>

Temperatur	Indeks Miller (hkl)	Posisi Puncak 2θ (°)	Intensitas	FWHM B <sub>size</sub> (°)	Ukuran kristal (nm)
600	101	33.80	50148.7	0.08610	99.17
700	101	33.80	284977.0	0.08280	103.19
800	101	34.18	7050.0	0.26892	30.74
900	101	34.18	11462.5	0.26168	31.63
1000	101	34.18	62983.3	0.15132	55.82

Tabel 2. Parameter Kisi SnO<sub>2</sub>

Temperatur	Indeks Miller (hkl)	Posisi Puncak ICDD	Posisi Puncak 2θ (°)	Intensitas	Jarak antar bidang (Å)
600	110	27.00	26.52	6245.37	3.3583210
	101	34.20	33.80	50148.70	2.6497874
	211	52.23	51.70	3216.32	1.7666735
	202	71.40	71.22	3812.30	1.3229357
700	110	27.00	26.50	7595.00	3.3608101
	101	34.20	33.80	284977.00	2.6497874
	211	52.23	51.72	4209.13	1.7660374
	202	71.40	71.22	18086.70	1.3229357
800	110	27.00	26.90	6612.50	3.3117363
	101	34.20	34.18	7050.00	2.6211924
	200	38.27	38.26	1858.33	2.3505319
	211	52.23	52.06	2875.00	1.7553004
	220	54.94	55.04	1275.00	1.6671038
	310	61.80	62.16	1254.17	1.4921497
	112	64.68	65.02	1204.17	1.4332563
	301	66.23	66.22	1191.67	1.4101631
900	202	71.40	71.54	1050.00	1.3178026
	110	27.00	26.90	6816.67	3.3117363
	101	34.20	34.18	11462.50	2.6211924
	200	38.27	38.24	1791.67	2.3517153
	211	52.23	52.06	2745.83	1.7553004
	220	54.94	55.04	1308.33	1.6671038
	002	57.95	58.08	1037.50	1.5868708
	310	61.80	62.12	1100.00	1.4930144
	112	64.68	65.00	1175.00	1.4336489
	301	66.23	66.20	1200.00	1.4105406
202	71.40	71.52	1400.00	1.3181219	

1000	110	27.00	26.90	5416.67	3.3117363
	101	34.20	34.18	62983.30	2.6211924
	200	38.27	38.36	1545.83	2.3446341
	211	52.23	52.06	2245.83	1.7553004
	220	54.94	55.06	1075.00	1.6665456
	301	66.23	66.24	1112.50	1.4097858
	202	71.40	71.54	4691.67	1.3178026

Tabel 3. *Kristal Strain SnO<sub>2</sub>*

<b>Temperatur</b>	<b>Posisi Puncak 2θ (°)</b>	<b>FWHM B<sub>size</sub> (°)</b>	<b>Ukuran kristal (nm)</b>	<b><i>strain</i></b>	<b><i>absolute strain</i> (10<sup>3</sup>)</b>
600	33.80	0.08610	99.17	-0.0000768305	0.076830537
700	33.80	0.08280	103.19	-0.0000710117	0.071011675
800	34.18	0.26892	30.74	-0.0007651125	0.765112495
900	34.18	0.26168	31.63	-0.0007234934	0.723493354
1000	34.18	0.15132	55.82	-0.0002370588	0.237058813

## LAMPIRAN 2.

Tabel 1. Data Daya Pemodelan Pandu Gelombang Nonlinear *Directional Coupler* Ganda

Daya Masukan (W/m <sup>2</sup> )	Daya Keluaran saat		
	Port kontrol dimatikan (W/m <sup>2</sup> )	Salah satu port kontrol hidup (W/m <sup>2</sup> )	Kedua port kontrol hidup (W/m <sup>2</sup> )
0.0	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.2	0.062071427	0.237291798	0.674075105
0.4	0.110684497	0.216318459	0.302632542
0.6	0.137039129	0.150883588	0.167361201
0.8	0.133534719	0.096205813	0.297746252
1.0	0.100835589	0.112109045	0.653921677
1.2	0.053828990	0.260311305	1.076896094
1.4	0.025841005	0.560375193	1.421243800
1.6	0.065769493	0.878022880	1.653977667
1.8	0.229653345	1.002307255	1.770411292
2.0	0.543231241	0.964113508	1.698700215
2.2	0.940995019	0.899109745	1.285961265
2.4	1.295608204	0.808921536	0.409438979
2.6	1.454213695	0.595132110	0.206327747
2.8	1.270260657	0.454719675	0.952442395
3.0	0.936976295	0.219502580	0.405178748
3.2	0.817226796	0.267535100	0.761280316
3.4	0.974177866	0.262052654	1.348244528
3.6	1.275727243	2.110169244	0.430799049
3.8	1.579917519	1.100009398	0.119832449
4.0	1.845818791	0.091406999	0.112496823
4.2	2.123687413	1.401048199	0.674135736
4.4	2.429035794	1.813575274	0.293266146
4.6	2.649966417	1.274529633	0.659172328
4.8	2.785187583	0.625037084	1.048726959
5.0	2.914392277	0.021774653	0.268786421
5.2	3.066512758	0.014229310	1.219740389
5.4	3.299149648	0.098698321	1.784425488
5.6	3.576729016	2.652143082	0.013254364
5.8	3.754735676	2.558711226	3.461421337
6.0	3.686147517	1.849694818	3.215058238
6.2	3.600722897	4.011205920	4.885412742
6.4	3.884263880	3.966852189	3.507567374
6.6	4.002355133	4.103845206	4.771735270
6.8	4.004383453	4.304022245	3.776975340



7.0	3.898991404	4.018788218	3.752937590
7.2	4.067351517	3.883715620	3.961085644
7.4	4.569436952	4.538534837	3.513504259
7.6	4.493918862	5.119919274	4.302462093
7.8	4.111403238	5.141240018	5.368012673
8.0	4.253780536	4.367523029	5.900051487
8.2	5.188452137	3.954147546	6.402169923
8.4	4.726231729	3.944983895	6.498696673
8.6	4.388765934	5.486751222	5.605589398
8.8	5.550882646	4.960591756	5.177365696
9.0	5.051156145	4.189113790	5.962401547
9.2	5.108522071	5.449859814	3.642585446
9.4	5.900374383	4.799418525	4.56417787
9.6	5.363447734	5.660373851	6.086674199
9.8	6.116966569	5.921848640	4.353954197
10.0	5.958526941	5.446348912	5.144593511
10.2	6.076817946	6.559792619	7.351152021
10.4	6.582027353	5.715501446	5.346317799
10.6	6.206001153	7.239206159	7.151864562
10.8	6.637152272	6.070792796	6.288192446
11.0	6.976491591	6.957367428	6.269835987
11.2	6.477565805	7.412134748	8.072331611
11.4	6.831234360	6.449540807	7.482760918
11.6	7.455703127	6.924606310	6.123505140
11.8	6.983434053	7.735613067	6.458787284
12.0	6.821964811	7.615265554	7.425795477
12.2	7.811290853	6.612385713	8.380133116
12.4	7.422129555	7.985037931	8.554979304
12.6	7.115582376	7.980954806	6.301701000
12.8	8.227310723	6.973932443	8.306030274
13.0	7.358455137	8.713144808	8.821145467
13.2	8.205256890	7.475063698	6.334704155
13.4	8.158256225	8.388081742	9.311681006
13.6	7.804388234	8.563933917	6.606521765
13.8	8.854970371	7.530561396	9.560824188
14.0	8.006516725	9.369441840	7.010111854
14.2	8.928352885	7.916049062	10.14943617
14.4	8.932606912	9.429512525	7.824880838
14.6	8.320366354	8.949149981	9.043142623
14.8	9.474452727	8.258751743	9.598834626
15.0	9.270706372	10.08493696	7.693951632
15.2	8.640753608	9.057646035	9.467766166

15.4	9.787181995	8.557240321	10.34626709
15.6	9.727063872	10.38250287	8.573950959
15.8	9.010720939	9.731138017	7.962821885
16.0	10.25754512	8.706100651	10.91241435
16.2	9.932132966	10.47451163	9.921636010
16.4	9.589564998	10.18564100	8.363421719
16.6	10.84866106	9.108068469	10.99160100
16.8	9.914184685	11.34751816	9.791026778
17.0	10.73918197	9.897604067	9.286693053
17.2	10.81106451	10.53822602	11.40257695
17.4	10.39324092	11.15610423	9.276235747
17.6	11.52753044	10.29293430	12.21242987
17.8	10.75564831	11.81955683	9.879404465
18.0	11.26563346	10.62238958	11.74160958
18.2	11.76258580	11.87986763	11.40523089
18.4	10.96691347	11.57792922	10.30522377
18.6	11.88731278	11.02155716	12.86872692
18.8	12.04897387	12.72307842	11.03494373
19.0	11.26571952	11.57850738	11.18390357
19.2	12.37059616	10.86741381	13.22065462
19.4	12.27279267	13.12385029	11.64078498
19.6	11.64900165	12.18913623	10.92573757
19.8	12.98208291	11.72609513	13.56241123
20.0	12.27582437	13.00421092	12.02594404

Tabel 2. Data Daya Pemodelan Pandu Gelombang Nonlinear Mach-Zehnder

<b>Daya Masukan (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Daya Keluaran saat port kontrol dimatikan (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Port Kontrol P1 hidup (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Port Kontrol P3 hidup (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Daya Keluaran saat kedua port kontrol hidup (W/m<sup>2</sup>)</b>
0.1	0.0603664710	0.0710716595	0.0708740857	0.0629771497
0.2	0.1224292116	0.1414865247	0.1430363178	0.1302405439
0.3	0.1861063615	0.2108924577	0.2129548471	0.1989511493
0.4	0.2512785334	0.2801001927	0.2820223411	0.2640024813
0.5	0.3177825391	0.3459627362	0.3488050636	0.3264672227
0.6	0.3854565107	0.4089981086	0.4110119641	0.3879161269
0.7	0.4540321801	0.4745936832	0.4757052378	0.4420691484
0.8	0.5232839990	0.5368521077	0.5381120454	0.4940606396
0.9	0.5929413429	0.5965144098	0.5980001915	0.5405551369
1.0	0.6626653990	0.6536058052	0.6550439891	0.5783538373
1.1	0.7321882076	0.7068749927	0.7085254467	0.6114278113
1.2	0.8011962351	0.7563368591	0.7548017744	0.6360619949

1.3	0.8693971964	0.7989959100	0.7990697388	0.6542812243
1.4	0.9364983858	0.8396419656	0.8372175588	0.6655580748
1.5	1.0022508219	0.8692518245	0.8678763617	0.6700071647
1.6	1.0664229297	0.8950916751	0.8928559563	0.6687284983
1.7	1.1287494661	0.9152111231	0.9122008134	0.6634738797
1.8	1.1891023081	0.9302515676	0.9258965782	0.6560794893
1.9	1.2473348360	0.9402173793	0.9357422730	0.6506463995
2.0	1.3034066506	0.9465465067	0.9418508242	0.6541834453
2.1	1.3572211045	0.9520112976	0.9480422439	0.6744736250
2.2	1.4087214191	0.9594163682	0.9580487198	0.7252970503
2.3	1.4579127195	0.9744637536	0.9763293464	0.8293134674
2.4	1.5048223878	1.0032654364	1.0108532046	1.0181672507
2.5	1.5494968338	1.0571556853	1.0713376717	1.3276480718
2.6	1.5919396650	1.1483204601	1.1712584134	1.7576084168
2.7	1.6322971526	1.2907253229	1.3204345382	2.2206805279
2.8	1.6707316974	1.4888754964	1.5200325063	2.5918616554
2.9	1.7073728473	1.7241264503	1.7466722228	2.8198964844
3.0	1.7424591675	1.9525098035	1.9590889107	2.9315445376
3.1	1.7760804836	2.1331037935	2.1221381441	2.9581529907
3.2	1.8084066554	2.2483372742	2.2236143359	2.9206092609
3.3	1.8396796551	2.3039350657	2.2674391428	2.8319090990
3.4	1.8701129250	2.3101517612	2.2667772087	2.7022698461
3.5	1.8998353791	2.2817372168	2.2358703153	2.5435975744
3.6	1.9290364954	2.2329135458	2.1917746729	2.3660427845
3.7	1.9581743146	2.1781453454	2.1488999602	2.1862766135
3.8	1.9872783630	2.1307828190	2.1221755095	2.0276315151
3.9	2.0167678865	2.0959076934	2.1173678038	1.9352830441
4.0	2.0466700641	2.0675158883	2.1325268719	1.9624055915
4.1	2.0769897946	2.0345542114	2.1566113623	2.1735234920
4.2	2.1077093373	2.0015739921	2.1903405855	2.5733542800
4.3	2.1386490487	1.9957817883	2.2528190808	3.0074307680
4.4	2.1692268664	2.0433091835	2.3550966100	3.2844655629
4.5	2.1983509186	2.1422769192	2.4803857316	3.3544973535
4.6	2.2240722451	2.2649970986	2.6005654534	3.2515227393
4.7	2.2433376276	2.3822955894	2.6995154280	3.0480752031
4.8	2.2514323059	2.4786025140	2.7754014278	2.8301767790
4.9	2.2422308477	2.5517285695	2.8351871234	2.6304490759
5.0	2.2084511018	2.6125743647	2.8883450801	2.4658531195
5.1	2.1440488170	2.6795863790	2.9479910693	2.3370281491
5.2	2.0495786153	2.7772901701	3.0273430041	2.2389033687
5.3	1.9357986804	2.9226460948	3.1326527878	2.1656907164
5.4	1.8198134888	3.0974113917	3.2500961257	2.1127045548

5.5	1.7224869092	3.2231854088	3.3321717525	2.0839591384
5.6	1.6601522442	3.1834486316	3.3107343599	2.0544478929
5.7	1.6413327351	2.9295537632	3.1531486825	1.9793262867
5.8	1.6674836674	2.6347090017	2.9400750035	1.9429851931
5.9	1.7328068485	2.5642950429	2.8200181918	1.9421695579
6.0	1.8276140674	2.6770686760	2.8148058323	2.1009894957
6.1	1.9391071644	2.7225927702	2.8236316497	2.5464684470
6.2	2.0548138945	2.4540544270	2.7267226659	3.3874724859
6.3	2.1634892725	3.1299030108	3.3179400123	4.6088955395
6.4	2.2566313077	3.0735358172	2.6027735204	5.0598061549
6.5	2.3260679316	3.6945053020	3.7126443712	5.2616339353
6.6	2.3634943077	1.0600028304	1.5339484253	4.9583958765
6.7	2.3577477228	2.5116645955	2.3802873332	4.4530296893
6.8	2.2886385207	3.0877843918	2.8267965831	4.5900471513
6.9	2.1174962240	3.4399437461	3.2821827663	5.1622946004
7.0	1.7774323364	3.7450555477	3.6872553444	4.3771325357
7.1	1.3814060590	3.9532253121	3.9236888644	2.8226911898
7.2	2.9254249589	4.0085376894	3.9563567832	2.2056590271
7.3	2.0905986510	3.9242981802	3.8627178704	2.2356680916
7.4	2.6315354034	3.7793819851	3.7360418226	2.3706019342
7.5	3.2186894222	3.6374717884	3.6255004231	2.2346090771
7.6	4.0070749504	3.5193794192	3.5414481563	1.8402535136
7.7	4.1309965273	3.4157133538	3.4743818859	1.4557431951
7.8	3.4712840189	3.3082437039	3.4115582739	1.2097492763
7.9	2.8361818699	3.1799810938	3.3427850015	1.0753034364
8.0	2.5036550470	3.0216338993	3.2620446072	1.0120832420
8.1	3.5171279193	2.8326453519	3.1638833328	1.0035061067
8.2	2.1934167267	2.6233003543	3.0491817047	1.0449299355
8.3	3.3348958855	2.4093107776	2.9212313215	1.1393721505
8.4	2.5838992634	2.2093459072	2.7890479040	1.3019217184
8.5	1.7995146339	2.0358357307	2.6640075669	1.5869038851
8.6	1.1939523341	1.8936239883	2.5562799428	2.2222644389
8.7	0.8078622267	1.7771373140	2.4681975283	3.6730652900
8.8	0.6790867138	1.6713695307	2.3908978865	3.8865247288
8.9	0.6782207160	1.5681529815	2.3143241570	2.1685335684
9.0	0.7249482998	1.5591114185	2.2914403213	2.2635758156
9.1	0.7921586614	4.3696096467	3.5792451554	3.2921130835
9.2	0.8766548909	3.5106931533	2.8999660213	4.4628491010
9.3	0.9899392161	1.2761704685	2.0873404293	4.7361520084
9.4	1.1548845952	1.9996450415	2.6932731948	4.9855108525
9.5	1.3924466661	4.4336849722	3.3982022967	4.9563355847
9.6	1.6914968554	3.6041154837	3.1754443185	4.3814520764

9.7	1.9920125897	4.3237470239	4.1455470546	4.3205512711
9.8	2.2362392709	4.5916786907	4.6836948443	1.5195833558
9.9	2.4174060169	4.2164340223	4.1693107925	1.5860093844
10.0	2.5563155205	4.9174518448	5.4140534568	2.8431839946
10.1	2.6713115379	3.7529535007	3.8910598241	2.9789576721
10.2	2.7688878176	4.7261569439	4.2390594466	4.3059574528
10.3	2.8490696663	4.5136519320	4.6131762577	2.2311051626
10.4	2.9079760118	2.0998631439	1.2455717684	2.3469270029
10.5	2.9443326095	1.4419023500	3.3316927036	2.3388682343
10.6	2.9564280577	2.9724775864	4.1495074218	2.0472921653
10.7	2.9459923778	3.5244514268	3.3270989209	1.8855776071
10.8	2.9198757641	3.8422667652	5.7177705800	3.5310346311
10.9	2.8863413344	1.6916097087	2.6678040686	6.8775759039
11.0	2.8557660367	3.1403002707	3.4334381068	3.7462307407
11.1	2.8290141079	7.3731299426	7.0843723796	2.3422499522
11.2	2.8064402568	4.8905238357	6.1100076629	1.6631236438
11.3	2.7807296439	1.0967815537	1.6592201062	1.2515219846
11.4	2.7506694752	4.3547358672	6.2564697951	1.3768137352
11.5	2.7175806996	5.4784703188	6.6201115943	1.5291835448
11.6	2.6860630384	3.2345781646	1.7408042720	2.0031142511
11.7	2.6574401636	3.2696994562	1.8415280312	4.6361884809
11.8	2.6331404027	2.4556827655	1.0656299611	3.9745177998
11.9	2.6080537558	2.1958327206	1.3435205116	3.1154791452
12.0	2.5825940230	2.1860039123	1.9050294652	4.1200424820
12.1	2.5586238709	2.2034907261	2.2564600720	3.7711902060
12.2	2.5406733000	2.1558618699	2.2324225527	3.4509881773
12.3	2.5359680495	2.0597124205	1.9287892979	3.2495420822
12.4	2.5523534043	1.9480321548	1.4823557699	3.1374016958
12.5	2.5950406108	1.8350392112	1.0179865961	3.1167856736
12.6	2.6685871827	1.7236223423	0.6979107471	3.1715016680
12.7	2.7903487816	1.6088788513	0.5538787113	3.2993446978
12.8	3.0156664162	1.5362875272	0.4994252358	3.5989644696
12.9	3.4558655931	1.6722362182	0.5352588023	4.0814783477
13.0	4.1703591256	2.1215394229	0.8046063205	1.8387412838
13.1	4.9375286186	0.1029094361	0.3976254699	1.4952487422
13.2	5.4929463960	2.1669929179	0.6283076670	2.8811943898
13.3	5.8466024731	1.7957099185	0.8228700246	3.4302784808
13.4	6.0920027676	1.4767968245	0.8225336206	1.7441702201
13.5	6.1445278011	0.8686638832	1.7693757772	2.0198271217
13.6	3.2990626641	2.9774752156	2.7984757693	4.1692479049
13.7	3.7175463452	4.5695947268	3.6636647883	4.0232461383
13.8	4.4725755022	1.4660918500	0.3177369204	4.2523069486

13.9	4.4570858687	6.5179597057	4.5403431770	0.9339435377
14.0	4.3266490360	2.4765237927	2.4755222550	2.2968679275
14.1	4.0797021716	3.3629917035	1.9076948047	3.2174188588
14.2	2.7116731493	2.1704636007	2.7341474871	3.0089124079
14.3	3.3896401776	4.5274985053	3.9775300617	5.7301823548
14.4	7.3186801684	4.3825259218	4.4761490127	4.1712969712
14.5	4.3430453238	5.4442490026	5.0755619651	3.4648352876
14.6	5.8577434296	2.9710468687	1.2670882765	3.3340247939
14.7	5.6017229834	3.8220952887	4.3481841667	3.6881978500
14.8	4.2463963346	4.0390571126	4.0956754192	4.1312318874
14.9	5.6197884832	8.2683098416	1.2069803889	3.6439406654
15.0	6.9635132981	0.0586930512	0.1494647655	3.2832077046
15.1	7.4228309243	0.3944532150	1.0008594537	3.2984725657
15.2	2.4119885658	1.3747044115	4.6941421311	3.4270221534
15.3	5.3916688305	6.4580389086	0.9725799812	3.4288327172
15.4	3.8760071107	3.0999573944	4.6745660957	3.2096062593
15.5	2.6835936045	4.0660564562	3.5412728299	2.9533713626
15.6	1.3736314165	9.9122559128	10.6663362429	2.9805935509
15.7	5.0458750225	5.3502177167	5.9075049867	3.2099611639
15.8	3.2373221803	1.8948050376	2.7988793504	2.1879237180
15.9	3.0454268614	5.0364000029	6.4835860702	8.6431406501
16.0	2.7175898868	6.4929786521	8.6326995736	3.9846564658
16.1	4.0789009568	2.8432962216	4.9355084507	11.6269551562
16.2	4.2714967612	3.0075857023	3.6356278544	11.7423267374
16.3	5.3513823823	4.9301440441	6.8841998041	12.0547257654
16.4	8.1462907527	5.8069460149	8.4424780703	2.9289442752
16.5	8.0158091201	3.6514100494	6.7725756437	6.2595655800
16.6	4.0041691453	5.3234952610	6.6639787720	8.2592739611
16.7	3.2296636665	5.0216764043	6.4266406022	0.1703907041
16.8	6.6949458085	11.2119363857	9.3764042756	4.2569874295
16.9	4.2366490859	6.1776798626	8.5437681077	1.4651283897
17.0	1.4074174469	6.2040932370	7.8811600971	1.9362623717
17.1	3.9029745477	3.9009262416	6.5490079914	0.7938064783
17.2	0.2850280046	2.3841367965	5.6656832261	1.5625904366
17.3	7.6493891305	1.8859698935	5.8437040347	1.7203784398
17.4	1.8051130735	1.7191475168	6.5494572496	1.3246581174
17.5	0.9251681308	2.6289341393	6.9476302385	1.6444524464
17.6	0.7929462719	5.4274484240	6.9668517384	0.6510937206
17.7	3.5225912245	6.3408235434	6.9227875205	6.8903349026
17.8	4.2123934213	6.0745946542	6.9676100558	2.6599299491
17.9	4.6635556865	4.1078748886	7.0253223238	2.1471452625
18.0	4.4737611185	1.8568247025	6.9218704228	4.7594924709

18.1	0.2104352844	1.7731120033	6.7671897838	1.6673960463
18.2	1.6473917705	3.5805716525	7.6646116049	2.6025151432
18.3	0.9761330406	6.0531944787	8.6075961466	2.4895961161
18.4	4.4019692980	6.0180497315	7.5400319984	1.1128794914
18.5	7.0957747561	5.7660426791	6.4421221152	2.4639064888
18.6	2.7235973123	5.5108074241	7.8362126526	1.1149678696
18.7	1.3764120222	4.8753707710	6.2793606152	0.0851685696
18.8	2.9897794947	2.2834667226	5.1086651772	1.7463442559
18.9	2.7404858543	4.9723831100	6.3519765281	7.0619243639
19.0	4.1276607712	2.8220353807	4.9919673598	3.8769011715
19.1	9.0295466209	2.6911598539	3.8537704539	1.3047616469
19.2	2.4073943585	1.9091384445	2.9991691056	5.8157839500
19.3	2.5494138715	0.6054102536	1.2452105476	4.6635937650
19.4	11.2520807208	0.9662144771	2.2814727437	0.8790472690
19.5	1.3889798995	2.0305154995	3.3529081300	1.5732989645
19.6	1.2487366260	1.1290491004	2.0580259928	1.6445093705
19.7	1.3436801585	1.7522622321	3.1570298691	1.6201004736
19.8	1.4312857619	2.1182552654	0.9697347200	1.7823444470
19.9	1.3525430083	2.2515096062	2.5159250779	0.6500158771
20.0	1.2596010485	4.7387408412	5.8633672162	4.0352746648

## BIODATA PENULIS



Penulis, Muhimmatul Khoiro, merupakan anak pertama dari 4 bersaudara, lahir di Probolinggo pada tanggal 18 Maret 1992. Penulis menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN Jati V selama 3 tahun dan sisanya di SDN Tisnonegaran I, lalu dilanjutkan dengan pendidikan lanjut di SMP Negeri 1 Probolinggo, dan SMA Negeri 1 Probolinggo.

Tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan di jurusan Fisika FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan mendapatkan beasiswa PPA di tahun kedua dan beasiswa KSE hingga lulus pada tahun 2014. Penulis berkesempatan untuk melanjutkan pendidikan magister sekaligus doktoral dengan jalur PMDSU pada tahun 2015. Selama penulis menjadi mahasiswa S3, penulis telah menghasilkan beberapa artikel ilmiah baik di jurnal internasional maupun konferens. Selain itu, penulis juga berkesempatan untuk mengikuti beberapa pengalaman lainnya seperti pelatihan dan PKPI.

### **Publikasi**

1. **Khoiro, M.**, Muntini, M.S., Pramono, Y.H., (2018). “OR, XNOR, and NAND Optical Logic Gates in Mach-Zehnder Waveguiding Structure Consisting of Nonlinear Material”. *International Journal of Microwave and Optical Technology*. 13(5):462–469.
2. **Khoiro, M.**, Hashishin, T., Muntini, M.S., Pramono, Y.H. (2020) “Morphological and Optical Properties of Tin Oxide Nanomaterial Thin Film Deposited using Vacuum Evaporation”. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 128(3):158–163.
3. **Khoiro, M.**, Siddiq, N. A., Annovasho, J., Muntini, M. S., & Pramono, Y. H. (2017, August). “All-optical logic gates in directional coupler waveguide consisting of nonlinear material”. *2017 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)* (pp. 174-179). IEEE.



4. Siddiq, N.A., **Khoiro, M.**, Muntini, M. S., & Pramono, Y. H. (2017, August). “All-optical logic gates based optimized XY-branch waveguide utilizing SnO<sub>2</sub> nonlinear material”. *2017 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)* (pp. 169-173). IEEE.
5. Annovasho, J., Buka, O., **Khoiro, M.**, Pramono, Y.H., (2017, August). “Design and optimization high-performance bi-circular loop antenna with plane reflector and coaxial feed line at 2.45 GHz frequency”. *2017 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM)* (pp. 154–158). IEEE.
6. Sari, U., Siddiq, N. A., **Khoiro, M.**, Hidayat, A. S., & Julianitasari, D. (2017) “Analisis Jumlah Laser Dioda Terhadap Amplifikasi Daya Intensity Tunable Laser Pada Aplikasi Sumber Cahaya Pandu Gelombang Optik Berbasis Material Nonlinear”. In *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)* (Vol. 2, pp. 250-256).
7. **Khoiro, M.**, Muntini, M. S., Pramono, Y. H. “Optical Logic Gates in Mach-zehnder Structuring Waveguide Utilizing High Refractive Index of SnO<sub>2</sub> Nonlinear Material”. (Draft)

#### **Lain-lain**

1. Workshop Penulisan Artikel Ilmiah untuk Publikasi Jurnal Internasional di Fisika ITS pada tanggal 14 September 2016
2. Seminar Optik dan Fotonik 2016 di LIPI Puspitek Serpong pada tanggal 22 September 2016
3. Program PKPI (Sandwich-like) di Kumamoto University, Jepang selama 6 bulan periode September 2018 hingga Maret 2019

#### **Beasiswa**

1. Karya Salemba Empat pada tahun 2012-2014
2. Program Menuju Doktor Sarjana Unggul pada tahun 2015-2019