



TESIS - TF 142510

**FIBER OPTIK BERSTRUKTUR *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) U-BENT*
SEBAGAI SENSOR ALKOHOL**

SEFI NOVENDRA PATRIALOVA
NRP. 2414201007

Pembimbing I:
Agus Muhamad Hatta, ST, M.Si, Ph.D
Pembimbing II:
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc

PROGAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS - TF 142510

FIBER OPTIC WITH *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) U-BENT* STRUCTURED AS AN ALCOHOL SENSOR

SEFI NOVENDRA PATRIALOVA
NRP. 2414201007

Supervisor I:
Agus Muhamad Hatta, ST, M.Si, Ph.D
Supervisor II:
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc

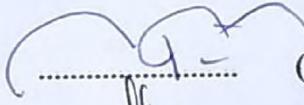
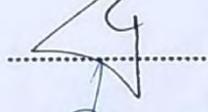
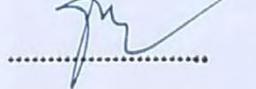
MASTER PROGRAM
INDUSTRIAL INSTRUMENTATION ENGINEER
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:
SEFI NOVENDRA PATRIALOVA
NRP. 2414 201 007**

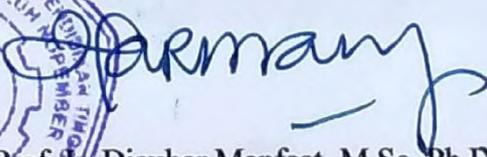
**Tanggal Ujian: 20 Juli 2016
Periode Wisuda: September 2016**

Disetujui oleh:

1. Agus M. Hatta, ST, M.Si, Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002  (Pembimbing I)
2. Prof. Dr. Ir Sekartedjo, M.Sc
NIP. 19500402 197901 1 001  (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Totok Suhartanto, DEA
NIP. 19660116 198903 2 001  (Penguji I)
4. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc
NIP. 19600901 198701 1 001  (Penguji II)

Direktur Program Pascasarjana,




Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 196012021987011001

FIBER OPTIK BERSTRUKTUR *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE* (SMS) *U-BENT* SEBAGAI SENSOR ALKOHOL

Nama Mahasiswa : Sefi Novendra Patrialova
NRP : 2414201007
Pembimbing 1 : Agus Muhamad Hatta, M.Si, Ph.D
Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc

ABSTRAK

Telah diusulkan rancang bangun sebuah sensor kadar alkohol berbasis fiber optik hetero-struktur. Struktur *sensing-probe* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sambungan *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) dan dibengkokkan menyerupai huruf U, yang selanjutnya disebut dengan *u-bent*. Struktur SMS dipilih untuk memperoleh sensitivitas yang tinggi. Penelitian ini memanfaatkan efek makrobending dan prinsip *multimode interference* dimana dilakukan rekayasa medium *cladding* dengan memvariasikan larutan alkohol dari 0% - 5%. Pengujian performansi sensor dilakukan dengan mengukur daya keluaran sensor akibat adanya pengaruh dari parameter panjang MMF-*section*, diameter lengkungan dan konsentrasi alkohol yang digunakan. Cahaya infrared (1310 nm) ditransmisikan melalui fiber optik SMS *u-bent* yang medium *cladding*-nya telah dimodifikasi oleh variasi kadar alkohol. Adanya variasi kadar alkohol menyebabkan karakteristik daya yang ditransmisikan berubah. Dari hasil pengujian sensor secara eksperimen, sensor fiber optik SMS *u-bent* dengan diameter lengkungan 50 mm dan variasi panjang MMF sebesar 63 mm memiliki kinerja yang terbaik ditinjau dari sensitivitas tertinggi yaitu 3.38 dB/%.

Kata kunci: fiber optik, sensor, alkohol, *singlemode-multimode-singlemode*, *u-bent*, *multimode interference*, makrobending

FIBER OPTIC *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE* (SMS) *U-BENT* STRUCTURED AS AN ALCOHOL SENSOR

By : Sefi Novendra Patrialova
Student Identity Number: 2414201007
Supervisor 1 : Agus Muhamad Hatta, M.Si, Ph.D
Supervisor 2 : Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc

ABSTRACT

An alcohol sensor based on fiber optic hetero-structured has been proposed. The structure of sensing probe is Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) which has been bent into U shaped, and soon called as SMS u-bent. SMS structured is used to develop higher sensitivity of sensor. This research utilize the macrobending effect and multimode interference principle by varying alcohol concentration from 0% - 5% as the modified cladding. The performance test of the sensor has been done by measuring power output sensor. The value of power output sensor is affected by the length of MMF-section, bending diameter and alcohol concentration. An infrared (1310 nm) has been excited through fiber optic SMS u-bent which has a modified cladding. The various alcohol concentrations cause the characteristic of transmitted power changed. According to the result of sensor testing experiment, SMS u-bent sensor with 63 mm MMF length and 50 mm bending diameter has the highest sensitivity of 3.38 dB/%.

Keywords : fiber optic, sensor, alcohol, singlemode-multimode-singlemode, u-bent, multimode interference, macrobending

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah swt yang telah memberikan rahmat, kemudahan dan kekuatan kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan tesis ini dengan baik. Tesis yang berjudul “Fiber Optik Berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai Sensor Alkohol” ini diselesaikan demi memenuhi syarat kelulusan tingkat strata-2 di Program Studi Pasca Sarjana Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama proses persiapan, pengerjaan dan penyusunan laporan tesis ini, telah banyak pihak yang memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis. Maka penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orangtua tercinta, Febby Mahendra Putra, SH dan Dra. Sri Ati Soeharningsih, MM, yang telah memberikan motivasi, doa dan dukungan material kepada penulis sehingga dapat melanjutkan pendidikan di tingkat ini.
2. Suami tercinta, Septian Prahastudhi, S.Si yang telah memberikan dukungan material, pengertian, bantuan pikiran maupun tenaga dan motivasi yang selalu membakar semangat.
3. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, M.Si, Ph.D dan Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc selaku dosen pembimbing tesis yang selalu memberikan arahan, ilmu dan saran-saran yang membangun kepada penulis.
4. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas pendanaan yang diberikan kepada penulis selama menyelesaikan tesis di Teknik Fisika ITS melalui program Beasiswa Tesis tahun 2016.
5. Teman seperjuangan, Iftihatur Rofi'ah, S.Si dan Mefina Yulias Rofianingrum, S.Si, atas kerjasama yang baik, bantuan pemikiran dan tenaga, diskusi, serta saran yang diberikan kepada penulis selama pengerjaan tesis.

6. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA dan Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc selaku dosen penguji tesis atas kritik dan saran yang membangun.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Fisika ITS atas ilmu yang bermanfaat selama 2 tahun ini.
8. Teman-teman yang menamakan dirinya sebagai 'Pejuang 114 Serat Optik': Damayanti, Putri, Ashri, Diana, Syafarani, Syanif, Junivan dan Alvian, terima kasih atas kerjasama dan diskusi-diskusinya.
9. Seluruh penghuni Laboratorium Fotonika Jurusan Teknik Fisika ITS.
10. Segenap keluarga besar beserta ayah dan ibu mertua, atas segala doa terbaik dan dukungan yang diberikan.
11. Kawan-kawan mahasiswa program pascasarjana bidang Rekayasa Instrumentasi Industri angkatan 2014, atas kegalauan, keceriaan dan semangat yang telah diberikan selama berjuang bersama demi mencapai gelar baru ini.
12. Bapak dan ibu karyawan di program studi Pasca Sarjana Jurusan Teknik Fisika ITS.
13. Seluruh pihak yang turut membantu, mendukung dan mendoakan penulis dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan tesis ini masih jauh dari sempurna. Sehingga diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kejuan di masa mendatang. Semoga laporan tesis ini bermanfaat bagi pembaca, perkembangan ilmu pengetahuan dan kemajuan Teknik Fisika ITS.

Surabaya, 03 Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka.....	5
2.1.1 Alkohol dalam Minuman.....	5
2.1.2 Prinsip <i>Sensing</i> Alkohol Secara Optik	6
2.1.3 Multimode Interferensi	7
2.1.4 Struktur Fiber Optik Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) <i>U-bent</i>	10
2.2 Dasar Teori.....	14
2.2.1 Fiber Optik Single-mode dan Multimode.....	14
2.2.2 Prinsip Pemanduan Cahaya pada Fiber Optik	15
2.2.3 Daya Optis dalam dB dan dBm.....	17
2.2.4 Ketidakpastian Pengukuran Tipe A.....	19
2.2.5 Karakteristik Sensor	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Studi Literatur	24
3.2 Perancangan Sensor Fiber Optik SMS <i>U-bent</i>	24

3.3 Fabrikasi Sensor Fiber Optik SMS <i>U-bent</i>	26
3.4 Pengujian Respon Fiber Optik terhadap Variasi Panjang MMF dan Diameter Lengkungan <i>U-bent</i>	27
3.5 Pembuatan Variasi Larutan Uji Alkohol	27
3.6 Penyusunan Instrumentasi Penelitian dan Pengujian Sensor terhadap Variasi Larutan Uji.....	28
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Analisis Respon Fiber Optik SMS Sebelum dan Setelah Pembengkokan	31
4.2 Analisis Respon Fiber Optik SMS <i>U-bent</i> terhadap Konsentrasi Larutan Alkohol	33
4.3 Analisis Respon Sensor Fiber Optik SMS <i>U-bent</i> terhadap Panjang MMF <i>coreless</i>	40
4.4 Analisis Karakteristik Sensor dan Pengukuran	42
4.5 Analisis Mekanisme Sensing Pada Sensor SMS <i>U-bent</i>	44
BAB 5 KESIMPULAN	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	53
BIOGRAFI PENULIS	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pergeseran Goos-Haehnchen antara Berkas Datang dan Berkas Pantul pada Perbatasan Medium <i>Core</i> dan <i>Cladding</i> dari Pandu Gelombang Optis, Menghasilkan Stimulasi Medan Gelombang-Evanescent (Fabian et al., 2009).....	7
Gambar 2.2 Mekanisme interferensi multimode yang menghasilkan efek <i>self imaging</i> (www.uni-muenster.de).....	10
Gambar 2.3 Skema <i>Sensing-Probe</i> Berstruktur SMS Sebelum Pembengkokan ...	11
Gambar 2.4 Skema <i>Sensing Probe</i> Berstruktur SMS <i>U-Bent</i>	11
Gambar 2.5 Struktur Fiber Optik <i>Multimode Step Index</i> dan <i>Graded Index</i> Serta Profil Indeks Biasanya (Keiser,1984).....	15
Gambar 2.6 Mekanisme Pemanduan Gelombang Fiber Optik <i>Multimode</i>	16
Gambar 2.7 Contoh Grafik dengan Regresi Linier.....	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2 Perbandingan Struktur Fiber Optik Standar dengan Fiber Optik <i>Multimode Coreless</i> FG125LA (Www.Thorlabs.Com)	25
Gambar 3.3 Skema Variasi Sambungan <i>Sensing Probe</i> SMS <i>U-Bent</i>	26
Gambar 3.4 Hasil Fabrikasi Sensor Fiber Optik SMS <i>U-bent</i> yang Disinari dengan Laser Berpanjang Gelombang 650 nm.	26
Gambar 3.5 Skema Pengujian Respon Fiber Optik Terhadap Variasi Panjang MMF dan Diameter Lengkungan	27
Gambar 3.6 Setup Alat dan Bahan dalam Eksperimen Pengujian Respon Sensor Fiber Optik terhadap Konsentrasi Alkohol	29
Gambar 4.1 Distribusi Medan Evanescent pada Fiber Optik yang Dibengkokkan	32
Gambar 4.2 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS <i>U-Bent</i> terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 50 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier	34

Gambar 4.3 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS U-Bent terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 50 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier	34
Gambar 4.4 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS <i>U-Bent</i> terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 55 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier	36
Gambar 4.5 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS <i>U-Bent</i> terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 55 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier	37
Gambar 4.6 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS <i>U-Bent</i> terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 60 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier	38
Gambar 4.7 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS <i>U-Bent</i> terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 60 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier	39
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Daya Output Sensor Fiber Optik SMS U-bent terhadap Panjang MMF dan Hubungan Selisih Daya Output terhadap Panjang MMF.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Indeks Bias Larutan Alkohol pada Berbagai Konsentrasi dan Panjang Gelombang.....	5
Tabel 2.2 Perbandingan hasil penelitian yang telah dilaporkan dalam berbagai referensi.....	13
Tabel 2.3 Tabel konversi daya optis watt menjadi dBm.....	18
Tabel 3.1 Spesifikasi Fiber Optik yang digunakan.....	25
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Daya Output pada Pengujian Respon Fiber Optik SMS Sebelum dan Setelah Pembengkokan dengan Diameter Bengkokan 50 mm (Daya Input -7 dBm).....	31
Tabel 4.2 Nilai Rata-Rata Daya <i>Output</i> dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing <i>Sensing-Probe</i> dan Variasi Kadar Alkohol.....	35
Tabel 4.3 Nilai Daya <i>Output</i> dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing <i>Sensing-Probe</i> dan Variasi Kadar Alkohol (diameter lengkungan 55 mm).....	37
Tabel 4.4 Nilai Daya <i>Output</i> dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing <i>Sensing-Probe</i> dan Variasi Kadar Alkohol (diameter lengkungan 60 mm).....	39
Tabel 4.5 Nilai Sensitivitas Sensor untuk Beberapa Variasi Panjang MMF <i>coreless</i> dan Diameter Lengkungan.....	40
Tabel 4.6 Karakteristik Sensor Fiber Optik SMS U-bent dalam Berbagai Variasi Panjang MMF <i>coreless</i> dan Diameter Lengkungan.....	42
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Ketidakpastian A_2 untuk Masing-masing <i>Sensing-Probe</i> SMS U-bent.....	43

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alkohol secara kimiawi merupakan suatu senyawa organik yang tersusun atas satu atau lebih gugus hidroksil (-OH) atau etanol dengan rumus kimia C_2H_5OH dan pada umumnya berbentuk larutan. Alkohol memiliki manfaat dalam berbagai macam bidang, misalnya di bidang medis, industri makanan dan minuman. Di bidang medis, alkohol dimanfaatkan untuk sterilisasi peralatan medis. Sedangkan di bidang industri makanan dan minuman, alkohol seringkali ditambahkan karena dinilai mampu menimbulkan efek rileks, serta meningkatkan kehangatan tubuh dan libido. Namun, banyak pula dampak negatif yang disebabkan oleh konsumsi alkohol yaitu dapat merusak daya ingat, menyebabkan kehilangan kesadaran, peradangan sel hati, gangguan jantung dan lain sebagainya.

Islam melarang konsumsi makanan atau minuman yang mengandung alkohol karena dampak negatifnya dalam kesehatan, hal ini dijelaskan melalui Fatwa Majelis Ulama Indonesia (MUI) no 4 tahun 2003 tentang 'Standarisasi Fatwa Halal' menetapkan ketentuan hukum ayat 7: Penggunaan alkohol/etanol hasil industri hasil sintesis kimiawi untuk proses produksi produk makanan, minuman, kosmetika dan obat-obatan, hukumnya: **haram**, apabila secara medis membahayakan. Peraturan mengenai makanan dan minuman beralkohol pun telah dituliskan dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) Republik Indonesia No HK.00.05.23.3644 tentang 'Ketentuan Pokok Pengawasan Makanan' pasal 18 ayat 4 : Makanan dalam bentuk cairan per oral **dilarang** mengandung etil alkohol dengan kadar lebih dari 5% (Kementerian Kesehatan, 1977). Terkait dengan larangan-larangan diatas, maka dibutuhkan metode atau teknik untuk mendeteksi kadar alkohol dalam minuman yang simpel, sensitif dan cepat.

Beberapa penelitian telah melaporkan metode untuk mengetahui kadar alkohol dalam minuman, diantaranya menggunakan metode-metode

kimiawi yaitu distilasi, *enzym method*, dan amperometric (Semwal, Shrivastav, Verma, & Gupta, 2016). Beberapa peneliti juga menilai metode optis sebagai sensor alkohol memiliki kemampuan jauh lebih baik dari pada metode kimiawi. Metode optis yang telah dikembangkan antara lain raman spektroskopi, gas dan *liquid chromatography*. (Saad, Rahman, & Ali, 2013). Namun metode-metode tersebut membutuhkan waktu yang lama, mahal dan membutuhkan perangkat instrumentasi yang rumit. Salah satu jenis perangkat sensor optis yang dapat mengatasi kelemahan dari metode diatas adalah fiber optik. Dalam tiga dekade terakhir, fiber optik mengalami perkembangan yang sangat pesat dan mendapatkan perhatian yang besar karena dianggap mudah digunakan, lebih sensitif, non-konduktif, tidak terpengaruh oleh adanya gelombang elektromagnetik di sekitar sistem, *fast response* dan *low cost* (Girei, Shabaneh, Arasu, Painam, & Yaacob, 2013).

Sensor alkohol berbasis fiber optik yang telah banyak dikembangkan pada umumnya tersusun oleh fiber optik *sensing probe* dengan memodifikasi struktur dan memberikan lapisan material yang sensitif terhadap alkohol (Morisawa & Muto, 2012). Sensitivitas sensor alkohol dikembangkan dan dimodifikasi melalui struktur *sensing probe*. Modifikasi struktur fiber optik *sensing probe* yang telah digunakan adalah POF (*Polymer Optical Fiber*) (Saad et al., 2013), fiber optik *tapered multimode* POF (Girei et al., 2013), *microfiber knot resonator* yang telah dilapisi PANi sebagai material sensing (Siang, Sing, & Wadi, 2014), fiber optik *singlemode* yang *cladding*-nya telah dimodifikasi menggunakan material kimiawi *nano-sized* (Sharifpour-boushehri, Hosseini-golgo, & Sheikhi, 2015), dan fiber optik *multimode* yang dilengkungkan membentuk huruf U tanpa lapisan metal (S.-F. Wang, 2009).

Dari sekian modifikasi struktur fiber optik diatas, fiber optik *multimode u-shaped* dapat mencapai sensitivitas hingga 6300 (degree/RIU) dalam cakupan indeks bias 1.33 – 1.37 (S.-F. Wang, 2009). Liu dkk pada tahun 2014 memanfaatkan struktur fiber optik *singlemode u-bent* sebagai sensor medan magnet dan memiliki sensitivitas yang baik yaitu bernilai 0.374 nm/Oe (Liu, Chen, Han, & Lu, 2014). Bungkukan pada struktur fiber optik *sensing-probe* dapat meningkatkan sensitivitas secara signifikan karena absorbansi moda evanescence yang terukur lebih besar dari pada moda pada *sensing-probe* tanpa bungkukan (Choudhury & Yoshino, 2003).

Salah satu cara yang saat ini sedang populer dikembangkan untuk meningkatkan sensitivitas sensor fiber optik adalah dengan modifikasi fiber optik berbasis hetero struktur. Zhang dkk pada tahun 2014 memanfaatkan fiber optik hetero-struktur, yaitu *singlemode-multimode-singlemode* (SMS), sebagai sensor medan magnet (Zhang, Liu, Han, Chen, & Li, 1882). Selain itu, fiber optik SMS telah dimanfaatkan dalam deteksi kadar larutan (Zhao, Jin, Wang, & Dong, 2013), sensor pergeseran (R. Wang, Qiao, Zhang, Zhou, & Yang, 2011), dan sensor getaran (Guzman-Sepulveda, Hernandez-Romano, Torres-Cisneros, & May-Arrijoja, 2012). Struktur SMS difabrikasi dengan cara menyambungkan sebuah fiber optik *multimode*, yang memiliki panjang tertentu, dengan dua buah fiber optik *singlemode* pada masing-masing ujung fiber optik *multimode*. Pengembangan struktur SMS ini tidak hanya menggunakan fiber optik *multimode step-index* saja, namun juga *multimode graded-index* dan sambungan dengan FBG. Struktur SMS ini memanfaatkan prinsip interferensi *multimode* (MMI) yang terjadi pada medium *core* fiber *multimode* (Gao et al., 2012). Interferensi antar moda di fiber optik *multimode* akan mengakibatkan pola-pola interferensi yang disebut dengan *self imaging*. Selain fabrikasi yang mudah, kelebihan utama dari fiber optik SMS adalah memiliki sensitivitas yang tinggi.

Fiber optik berstruktur *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) *U-bent* dalam usulan ini memiliki berbagai macam kelebihan sebagai sensor, diantaranya lebih sensitif, moda yang terpandu lebih mudah dimanipulasi daripada fiber biasa karena menggunakan prinsip interferensi *multimode*. Hal-hal inilah yang mendasari penelitian ini diusulkan.

1.2 Permasalahan

Permasalahan dalam penelitian ini adalah:

1. bagaimana merancang fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai sensor alkohol,
2. bagaimana mengkarakterisasi fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai sensor alkohol.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah:

1. didapatkan rancangan fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai sensor alkohol,
2. didapatkan karakterisasi fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai sensor alkohol.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi sensor kadar alkohol dalam larutan berbasis fiber optik.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini meliputi:

1. Konfigurasi *sensing probe* fiber optik yang digunakan berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent*.
2. Alkohol yang dideteksi menggunakan fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* hanya dalam fasa larutan.
3. Jenis alkohol yang digunakan dalam penelitian ini adalah ethyl-alcohol (C_2H_5OH) atau Ethanol.
4. Konsentrasi alkohol yang digunakan adalah 0% - 5%.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Alkohol dalam Minuman

Alkohol merupakan suatu senyawa organik yang tersusun atas satu atau lebih gugus hidroksil (-OH) dengan rumus kimia C_2H_5OH dan pada umumnya berbentuk larutan. Secara kimiawi, alkohol memiliki nama lain yaitu ethanol. Alkohol dalam bentuk larutan tidak memiliki warna, sangat mudah larut dalam air, mudah menguap dan mudah terbakar (Girei et al., 2013). Dalam kehidupan sehari-hari, alkohol dapat ditemukan dalam berbagai macam minuman, misalnya bir, wine, whisky dan suplemen makanan. Kandungan alkohol dalam minuman tersebut dihasilkan dari fermentasi karbohidrat atau hidrasi etilen (Morisawa & Muto, 2012).

Alkohol dalam fasa larutan memiliki sifat optis yang berbeda tergantung dari konsentrasinya. Sifat optis tiap konsentrasi dinyatakan oleh indeks bias yang merupakan salah satu parameter optis. Indeks bias menyatakan kecepatan cahaya dalam larutan tersebut dibandingkan dengan kecepatan cahaya di ruang hampa. Ketika konsentrasi suatu larutan bertambah, maka kepadatan mediumnya pun meningkat sehingga menyebabkan cahaya merambat lebih lambat. Indeks bias berbagai konsentrasi alkohol ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Indeks Bias Larutan Alkohol pada Berbagai Konsentrasi dan Panjang Gelombang

Konsentrasi Alkohol (%)	Indeks Bias pada Panjang Gelombang		
	589.29 nm	1310 nm	1550 nm
0	1.3330	1.3247	1.3235
0.5	1.3333	1.3250	1.3238
1	1.3335	1.3252	1.3240
1.5	1.3338	1.3255	1.3243
2	1.3341	1.3258	1.3246
2.5	1.3344	1.3261	1.3249

3	1.3347	1.3264	1.3252
3.5	1.3350	1.3267	1.3255
4	1.3353	1.3270	1.3258
4.5	1.3356	1.3273	1.3261
5	1.3359	1.3276	1.3264

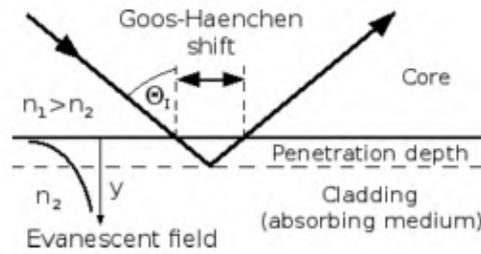
Sumber: Nowakowska, 1939

2.1.2 Prinsip Sensing Alkohol Secara Optik

Sensor alkohol dalam larutan saat ini tengah banyak dikembangkan dalam bidang optis, khususnya fiber optik. Sistem deteksi dalam sensor jenis ini biasanya memanfaatkan prinsip absorpsi spektroskopi gelombang evanescent pada daerah *cladding* (Girei et al., 2013). Pada sensor fiber optik berbasis gelombang evanescent, umumnya terdapat bagian *cladding* yang dihilangkan dan memanfaatkan medium yang melingkupi inti fiber (Sharifpour-boushehri et al., 2015). Sifat optis dan fisis dari medium yang berlaku sebagai pengganti *cladding* dapat mempengaruhi medan evanescent karena telah terjadi perubahan dalam transmisi dan absorpsi spektrum dari gelombang yang ditransmisikan (Siang et al., 2014).

Interaksi cahaya, yang dipandu dalam inti fiber, dengan medium disekitar fiber dicapai dengan memanfaatkan efek yang disebut dengan pergeseran Goos-Haehnchen. Pergeseran ini menggambarkan fenomena yang terjadi di perbatasan medium *core* dan *cladding* dari pandu gelombang optis. Ketika sebuah berkas cahaya mengenai perbatasan medium *core* dan *cladding*, maka akan ada medan yang bocor menembus medium *cladding* dan melemah secara eksponensial sebagai fungsi jari-jari (Fabian, Lewis, Newe, & Lochmann, 2009). Keadaan inilah yang disebut dengan evanescent dan ditunjukkan pada gambar 2.1.

Intensitas gelombang evanescent bergantung pada parameter-parameter fisis dari fiber optik, misalnya indeks bias *core* dan medium yang melingkupinya, diameter *core*, sudut dan panjang gelombang dari berkas cahaya datang.



Gambar 2.1 Pergeseran Goos-Haenchen antara Berkas Datang dan Berkas Pantul pada Perbatasan Medium *Core* dan *Cladding* dari Pandu Gelombang Optis, Menghasilkan Stimulasi Medan Gelombang-Evanescent (Fabian et al., 2009).

Nilai intensitas gelombang $I(z)$ yang meluruh secara eksponensial diekspresikan melalui persamaan berikut:

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \quad (2.1)$$

Dimana I_0 dan d_p adalah intensitas berkas cahaya datang dan kedalaman penetrasi dari medan evanescent. Parameter d_p berkaitan dengan sudut datang pada perbatasan medium *core* dan *cladding* θ , indeks bias *core* n_1 , indeks bias *cladding* n_2 dan panjang gelombang λ (Sharifpour-boushehri et al., 2015). d_p dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{(n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2)}} \quad (2.2)$$

2.1.3 Multimode Interferensi

Multimode interferensi (MMI) telah banyak digunakan dalam implementasi perangkat pandu gelombang optik, misalnya pada pandu gelombang slab dan silinder. Perangkat pandu gelombang yang berbasis MMI telah dikembangkan untuk aplikasi pengolahan sinyal dan *sensing* optis (Hatta, 2009). Sifat dari pandu gelombang multimode adalah memiliki fenomena *self imaging*, dimana profil dari medan input diciptakan kembali dalam bentuk *single* atau *multiple image* pada interval periode tertentu sepanjang propagasinya. Fenomena *self-imaging* ini menyebabkan terjadinya interferensi konstruktif antar moda yang merambat dengan kecepatan fase berbeda satu sama lain. Sehingga interferensi moda-moda tersebut

membentuk satu atau lebih bentuk interferensi yang disebut *multiple image* yang bergantung pada posisi disepanjang sumbu propagasi (Sahodo, 2013).

Dalam fiber optik, MMI dapat diimplementasikan menggunakan fiber hetero-struktur yang tersusun atas struktur *singlemode-multimode-singlemode* berjenis *step-index*. Fiber hetero-struktur dapat difabrikasi dengan cara menyambung fiber optik *singlemode* dengan *multimode* secara sempurna (Hatta, 2009). Jumlah moda yang dapat terpandu dalam fiber optik hetero-struktur dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya diameter *core*, panjang gelombang cahaya yang dipandu (λ_0), serta indeks bias *core* dan *cladding* dari fiber optik *multimode* (Sudarsono, 2009). Jika sambungan fiber optik hetero-struktur dianggap tersambung sempurna tanpa *misalignment*, maka pada sambungan *singlemode-multimode* ($z = 0$) diasumsikan memiliki distribusi medan $\psi(r, 0)$. Distribusi medan ini dianggap sama dengan moda dasar yang terpandu pada LP_{0m} . Profil medan pada daerah sambungan *singlemode-multimode* dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\psi(y, 0) = \psi_s = \sum C_m \psi_m(r) \quad (2.3)$$

Dengan ψ_s adalah medan moda dari fiber optik *singlemode* dengan menggunakan pendekatan Gaussian, ψ_m adalah medan moda fiber optik *multimode* dan C_m adalah koefisien medan eksitasi, yang dapat dinyatakan melalui

$$C_m = \frac{\int_0^\infty \psi(r, 0) \psi_m(r) r dr}{\int_0^\infty \psi_m(r)^2 r dr} \quad (2.4)$$

Pada panjang $z = L$, yaitu pada sambungan *multimode – singlemode*, profil medan dapat dinyatakan sebagai superposisi dari seluruh distribusi moda yang terpandu (Soldano & Pennings, 1995)

$$\psi(y, L) = \sum C_m \psi_m e^{-i\beta_m L} \quad (2.5)$$

Pada sambungan bagian kedua, yaitu pada *multimode – singlemode*, medan akan kembali menjadi *fundamental mode* dan memasuki fiber optik *singlemode* (Kumar, Varshney, C, & Sharma, 2003). Medan moda dasar fiber optik *singlemode* dan *multimode* dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$\psi_s(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_s} \exp\left(-\frac{r^2}{w_s^2}\right) \quad (2.6)$$

$$\psi_m(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_m} L_m\left(-\frac{2r^2}{w_m^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w_m^2}\right) \quad (2.7)$$

dengan w_s dan w_m berturut-turut adalah nilai *gaussian spot size* dari fiber optik *singlemode* dan *multimode*. Nilai *gaussian spot size* tersebut dinyatakan dengan persamaan di bawah ini (Soldano & Pennings, 1995) :

$$w_s = \left[0,65 + \frac{1,619}{V_s^{\frac{3}{2}}} + \frac{2,979}{V_s^6} \right] r_s \quad (2.8)$$

$$w_m = r_m \sqrt{\frac{2}{V_m}} \quad (2.9)$$

dengan r_s dan r_m adalah jari-jari *core* fiber optik *singlemode* dan *multimode*, V_s dan V_m merupakan frekuensi ternormalisasi atau disebut dengan *V number* untuk fiber optik *singlemode* dan *multimode*. Nilai dari *V number* dapat dihitung melalui persamaan

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.10)$$

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

$$P_{out}(L) = 10 \log(|\sum_{n=1}^N \eta_n^2 \exp(j\beta_n L)|^2) \quad (2.11)$$

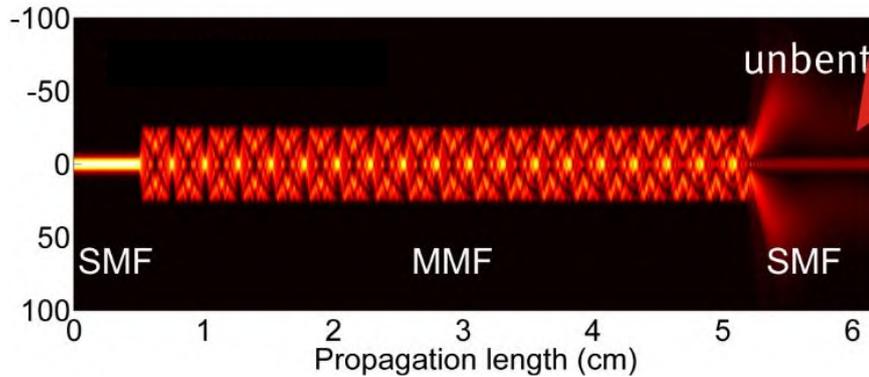
Secara fisis, pada sambungan fiber optik hetero struktur akan mengalami fenomena interferensi multimode dan *self imaging*. Dalam medium *core* dan *cladding*, cahaya mengalami pemantulan secara periodik di daerah perbatasan mediumnya. Jika hal itu terjadi dalam fiber optik *multimode*, maka akan terjadi interferensi karena fiber optik *multimode* mampu memandu lebih dari satu moda cahaya. Interferensi antar moda itulah yang menghasilkan pola gelap terang yang berulang. Pola gelap dan terang akibat interferensi destruktif dan konstruktif tersebut ditentukan oleh jari-jari *core*, panjang gelombang dan panjang fiber optik. Interferensi konstruktif yang terjadi secara periodik disebut dengan fenomena *self-imaging* seperti yang ditampilkan pada gambar 2.2.

Pada panjang fiber multimode tertentu $z = L$, fenomena *self imaging* akan terbentuk sebanyak n kali secara periodik. Jarak antar pola terang *self imaging* dinyatakan dengan L dan dapat diketahui melalui persamaan

$$L = \frac{2\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (2.12)$$

dengan β_0 dan β_1 adalah konstanta propagasi dari dua moda terendah dalam fiber optik multimode. Nilai konstanta propagasi dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$(\beta_0 - \beta_1) = \frac{v(v+2)\pi}{3L} \quad (2.13)$$



Gambar 2.2 Mekanisme interferensi multimode yang menghasilkan efek *self imaging* (www.uni-muenster.de)

Interferensi antar moda menyebabkan *self imaging* pada posisi spesial (L) sepanjang fiber optik multimode. Jika *lead-in* fiber optik *singlemode* disambungkan pada posisi spesial (L) ini maka daya keluaran akan maksimum dan perbandingan daya transmisi dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

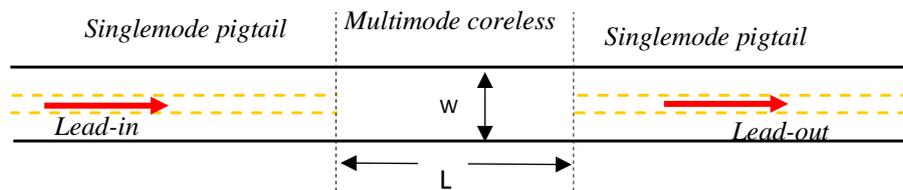
$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10 \log \left\{ \frac{|\int_0^\infty \psi(r,L) \psi_0(r)r dr|^2}{\int_0^\infty |\psi(r,L)|^2 r dr \int_0^\infty |\psi_0(r)|^2 r dr} \right\} \quad (2.14)$$

dengan P_{in} adalah daya masukan dari fiber *singlemode*. Profil medan dari fiber *multimode* ψ_m ditentukan oleh parameter fiber *multimode* seperti indeks bias *core*, *cladding* dan diameter *multimode* (Gao et al., 2012).

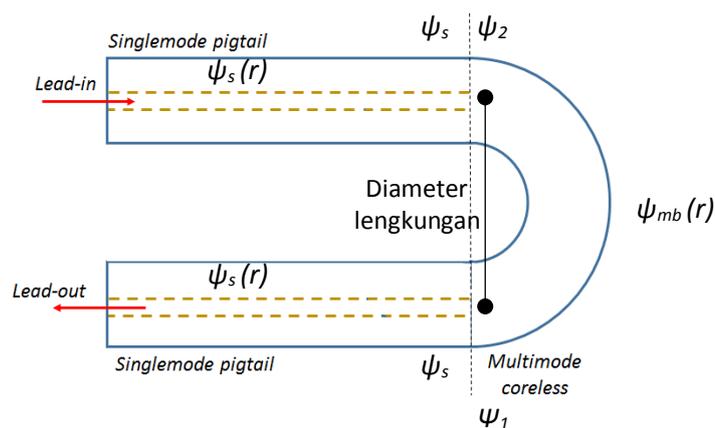
2.1.4 Struktur Fiber Optik Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) *U-bent*

Fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) difabrikasi dengan cara menyambungkan dua buah *pigtail* fiber optik SMF dengan sebuah fiber optik MMF dan dibengkokkan menyerupai huruf U, yang selanjutnya disebut dengan *u-bent*. Fiber optik struktur SMS dapat memanfaatkan profil *graded-index* maupun *step-index* MMF, namun pada penelitian ini digunakan jenis

fiber optik MMF *coreless*. Beberapa penelitian telah mengembangkan struktur bengkokan dalam penggunaan fiber optik SMF, MMF, dan fiber optik plastik. Bengkokan pada fiber optik menyebabkan terjadinya *loss* daya transmisi dan menurunkan performansinya, yang mana merupakan kelemahan dalam komunikasi optik. Namun dalam bidang sensor fiber optik, hal ini justru dimanfaatkan sebagai prinsip operasi sensor di berbagai bidang (Stupar et al., 2012). Hal ini dilakukan karena lengkungan pada struktur fiber optik mampu memperkecil sudut datang cahaya yang ditransmisikan dalam fiber dan menyebabkan absorpsi gelombang bocor oleh material *modified cladding* semakin besar (Gupta & Ratnanjali, 2001). Sehingga SMS *u-bent* mampu meningkatkan sensitivitasnya sebagai sensor jika dibandingkan dengan struktur fiber optik lurus (tanpa lengkungan). Gambar 2.3 dan 2.4 menunjukkan skema perbedaan *sensing-probe* berstruktur SMS ketika sebelum dilengkungkan dan setelah dilengkungkan.



Gambar 2.3 Skema *Sensing-Probe* Berstruktur SMS Sebelum Pembengkokan



Gambar 2.4 Skema *Sensing Probe* Berstruktur SMS *U-Bent*

Sistem makrobending fiber optik dimodelkan melalui gambar 2.4, dilakukan pendekatan persamaan perubahan moda fiber optik akibat lengkungan dan persamaan transmisi fiber optik dalam keadaan lurus. Salah satu parameter yang mempengaruhi medan penjalaran pada fiber optik adalah *V-number*. Ketika lengkungan diberikan pada fiber optik, maka moda-moda di dalamnya akan berubah sehingga nilai *V-number* pun berubah. Perubahan parameter tersebut-lah yang menyebabkan perubahan medan pada tiap sambungan fiber optik (Kumar et al., 2003). Pemodelan pada gambar 2.4 dapat di Analisis melalui kondisi batas antar sambungan sebagai berikut:

1. Batas fiber optik *singlemode lead-in* dengan *multimode coreless*

Pada batas sambungan ini, berlaku beberapa persamaan medan moda dasar fiber optik *singlemode* yaitu

$$\psi_s(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_s} \exp\left(-\frac{r^2}{w_s^2}\right) \quad (2.15)$$

dengan w_s adalah nilai *gaussian spot size* dari fiber optik *singlemode* yang tertulis pada persamaan 2.8. Saat terjadi lengkungan, terjadi perubahan jumlah moda terpandu dalam fiber optik *multimode*. Persamaan jumlah moda yang terpandu pada fiber yang telah dilengkungkan (m_b) merupakan fungsi jari-jari lengkungan (R) (Gloge, 1972). Perubahan jumlah moda tersebut menyebabkan perubahan konstanta propagasi cahaya dalam fiber optik *multimode step-index core* yang dinyatakan melalui persamaan

$$\beta_{m_b}^2 = (nk)^2 \left(\frac{\pi m_b}{2a}\right)^2 \quad (2.16)$$

dengan nilai jumlah moda dalam fiber optik *multimode u-bend* (m_b) berprofil *step-index*

$$m_b = \left(\frac{2akn}{\pi}\right) \theta \quad (2.17)$$

Pada kasus fiber optik dengan profil *core step-index*, θ diketahui sebagai sudut propagasi gelombang yang merupakan moda dalam *core* (Gloge, 1972).

Persamaan medan moda pada fiber optik *multimode-bent* dinyatakan sebagai berikut:

$$\psi_{m_b}(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_{mb}} L_{m_b} \left(-\frac{2r^2}{w_{mb}^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{w_{mb}^2}\right) \quad (2.18)$$

Dengan nilai *gaussian spot size* (w_{mb}) adalah

$$w_{mb} = a_m \cdot m_b^{-1/4} \quad (2.19)$$

Sehingga medan moda pada kondisi batas sambungan fiber optik *singlemode lead-in* dan *multimod* yang mengalami lengkungan dinyatakan oleh persamaan berikut

$$\psi_1(z=0) = \psi_s = \sum C_m \psi_{mb}(r) \quad (2.20)$$

2. Batas fiber optik *multimode coreless* dengan *singlemode lead-out*

Pada kondisi batas antara fiber optik *multimode coreless* yang telah dilengkungkan dengan *singlemode lead-out*, dapat diketahui daya keluaran optisnya. Daya keluaran untuk *overlap* medan fiber optik *multimode* dengan *singlemode lead-out* (ψ_s) ditunjukkan oleh persamaan berikut (Rahmah, 2015):

$$P = \frac{\left| \int_0^\infty \psi_s \psi_2(z=L) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |\psi_2|^2 r dr \int_0^\infty |\psi_s|^2 r dr} \quad (2.21)$$

Dengan medan moda pada batas sambungan adalah

$$\psi_2(z=L) = \sum C_m \psi_{mb} e^{-i\beta_{mb}L} \quad (2.22)$$

Penelitian yang memanfaatkan fiber optik *u-bent* sebagai sensor ditampilkan pada tabel 2.2 sebagai literatur perbandingan. Hasil-hasil penelitian ditampilkan dalam parameter karakteristik sensor, yaitu sensitivitas dan resolusi, mengingat tujuan utama dari bengkokan struktur adalah untuk meningkatkan sensitivitas.

Tabel 2.2 Perbandingan hasil penelitian yang telah dilaporkan dalam berbagai referensi

No	Jenis Sensor	Sensitivitas	Resolusi	Referensi
1	Sensor fiber optik multimode u-shaped dalam interferometri heterodinamik	6300 °/RIU	2×10^{-6}	(S.-F. Wang, 2009)
2	Fiber optik singlemode u-bent sebagai sensor medan magnet	-0.421 dB/oe	-	(Liu et al., 2014)

3	Fiber optik multimode u-shaped sebagai sensor salinitas air	-	1×10^{-3}	(Stupar et al., 2012)
4	Fiber optik plastik POF u-bent sebagai sensor indeks bias	5.57 A/RIU	1×10^{-3}	(Gowri & Sai, 2016)
5	Fiber optik u-bent sebagai biosensor LSPR	35 A/RIU	3.8×10^{-5}	(Sai, Kundu, & Mukherji, 2009)
6	Fiber optik SMS u-bent sebagai sensor medan magnet	$5,6 \text{ dB/mT}$	-	(Zhang et al., 1882)

2.2 Dasar Teori

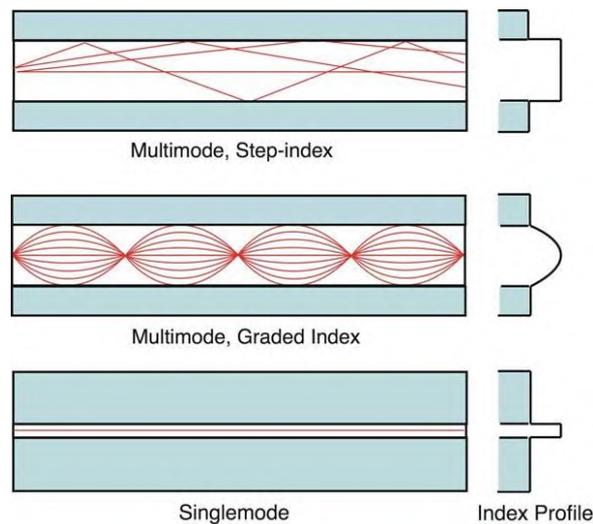
2.2.1 Fiber Optik Single-mode dan Multimode

Fiber optik merupakan suatu perangkat pandu gelombang yang berfungsi sebagai medium penjalaran gelombang cahaya. Bentuk fisik fiber optik berupa silinder, menyerupai kabel yang terbuat silica atau plastik. Fiber optik dapat digolongkan berdasarkan struktur dan sifat transmisinya, yaitu *single mode fiber* (SMF) dan *multimode fiber* (MMF) (Keiser, 1984). Pada SMF, ukuran inti kecil sehingga pada fiber hanya dapat menjalar satu moda. Sedangkan pada MMF, moda yang menjalar dalam fiber lebih dari satu. Skala ukuran dari SMF adalah mikrometer, sedangkan untuk MMF adalah milimeter (Crisp dan Elliott, 2005).

Selain itu, berdasarkan penjalaran gelombang yang melalui inti, fiber optik juga dapat di bagi menjadi dua macam, yaitu fiber optik *step index* dan fiber optik *graded-index*. Fiber optic jenis *step index* adalah fiber optik yang memiliki indeks bias seragam sepanjang *core* sedangkan pada jenis *graded index*, indeks bias *core* beragam sebagai fungsi jarak dari pusatnya. Perbandingan struktur fiber optik

multimode step-index dan *graded-index* serta distribusi index bias diperlihatkan pada Gambar 2.5.

Berdasarkan gambar 2.5, indeks bias *graded-index* fiber semakin menurun seiring dengan bertambahnya jari-jari. Indeks bias *cladding* bernilai tetap dan lebih kecil dibandingkan *core*, walaupun indeks bias *core* menurun namun penurunannya tidak akan lebih kecil atau sama dengan indeks bias *cladding*.



Gambar 2.5 Struktur Fiber Optik *Multimode Step Index* dan *Graded Index* Serta Profil Indeks Biasnya (Keiser,1984)

Nilai indeks bias *core* ditunjukkan melalui fungsi jari-jari berikut:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2 \left(1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^p \cdot \Delta \right), & 0 \leq r \leq a \\ n_1^2 (1 - 2\Delta), & r \geq a \end{cases} \quad (2.23)$$

dimana

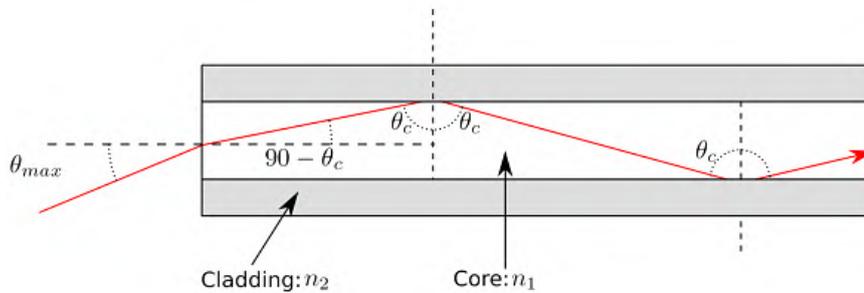
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.24)$$

2.2.2 Prinsip Pemanduan Cahaya pada Fiber Optik

Proses pemanduan gelombang cahaya dalam fiber optik didasarkan pada prinsip pemantulan dalam total (*total internal reflection*) pada bidang batas *core* dan *cladding* sesuai dengan hukum Snellius tentang pemantulan dan pembiasan.

Apabila nilai $n_1 > n_2$ maka sudut biasnya akan selalu lebih besar dari sudut datang. Sedangkan apabila sudut biasnya 90° , sudut datang akan kurang dari 90° . Maka pada kondisi seperti ini sudut tersebut disebut sudut kritis (Keiser, 2000). Dengan kata lain, sudut kritis merupakan sudut yang menentukan terjadinya pemantulan dalam total.

Gambar 2.6 merupakan proses terjadinya transmisi cahaya dalam fiber optik *step index*. Sinar membentur dengan sudut θ_c pada muka *core* dan *cladding* di dalam fiber optik. Cahaya pada fiber optik akan terdistribusi secara merata pada seluruh ruang, sehingga apabila θ_a semakin besar maka akan semakin banyak pula cahaya yang di tampung dalam fiber optik.



Gambar 2.6 Mekanisme Pemanduan Gelombang Fiber Optik *Multimode*

Mekanisme pemandun gelombang ditunjukkan melalui hukum Snellius berikut:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta \quad (2.25)$$

Apabila $\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_c$, sehingga persamaan (2.26) menjadi:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c \quad (2.26)$$

Perhitungan dilakukan menggunakan hubungan trigonometri:

$$\sin^2 \theta_c + \cos^2 \theta_c = 1 \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) disubstitusikan ke persamaan (2.28), sehingga menjadi:

$$\frac{n_0}{n_1} \sin \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (2.28)$$

$$n_0 \sin \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \quad (2.29)$$

$$n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA \quad (2.30)$$

Persamaan (2.30) merupakan persamaan dari *Numerical Aperture (NA)*. *Numerical Aperture* merupakan hubungan antara sudut penerima dan indeks bias ketiga media (*core*, *cladding*, dan udara). Selain itu, *Numerical Aperture (NA)* tidak tergantung pada dimensi fiber optik (Keiser, 2000). *Numerical Aperture (NA)* juga berfungsi untuk mendeskripsikan *coupling losses* dari sumber yang masuk ke dalam fiber optik. Didefinisikan bahwa beda indeks bias antara *core* dan selubung (Δ) menurut persamaan:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.31)$$

Antara nilai n_1 dan n_2 sangat kecil, sehingga nilai Δ juga kecil. Sehingga bentuk persamaan (2.31) menjadi:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.32)$$

Besarnya nilai Δ berkisar antara 1% dan 3% untuk fiber optik *multimode* dan 0,2% sampai 1% untuk fiber optik *single-mode* (Keiser, 2000). Untuk fiber optik *step-index* nilai NA berkisar antara 0,2 – 0,5, sedangkan fiber optik *graded-index* memiliki nilai NA berkisar antara 0,2 (Hoss & Edward A, n.d.). Fiber optik *step-index multimode* dari bahan plastik dengan diameter *core* besar memiliki nilai NA sebesar 0,3 – 0,5 (Krohn, 2000).

Nilai indeks bias juga mempengaruhi konstanta propagasi cahaya dalam fiber. Jika nilai indeks bias susunan pandu gelombang berubah, maka konstanta propagasi dapat dihitung dari persamaan berikut (Sahodo, 2013):

$$\beta = \frac{\omega}{c} n_{eff} \quad (2.33)$$

dengan n_{eff} menyatakan indeks bias efektif dari fiber. Indeks bias efektif adalah nilai perbandingan kecepatan cahaya yang mewakili seluruh bagian penyusun pandu gelombang.

2.2.3 Daya Optis dalam dB dan dBm

Dalam sistem optis, terdapat beberapa satuan penting yang perlu diperhatikan untuk menyatakan suatu besaran optis. Satuan dB dan dBm pada umumnya digunakan untuk menyatakan besaran daya optis. Jika daya biasanya dinyatakan dalam satuan Watt, maka daya dalam satuan desibel dinyatakan secara logaritmik. Desibel (dB) adalah sebuah satuan yang digunakan untuk menyatakan nilai selisih

relatif dari daya sinyal masukan dan keluaran atau disebut dengan nilai rugi daya optis (Massa, 2000).

$$dB = 10 \text{ Log } \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.34)$$

Daya optis dalam sistem fiber optik dapat dinyatakan dalam dBm, dimana diasumsikan bahwa daya masukan sebesar 1 miliwatt (Thompson & Taylor, 2008). Daya optis disini dapat merujuk pada daya yang dihasilkan oleh sumber laser atau daya yang terukur setelah melewati perangkat optis dalam sistem.

$$dBm = dB \text{ milliwatt} = 10 \text{ Log } \left(\frac{P \text{ (in mW)}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3.35)$$

Berdasarkan persamaan diatas yang mengacu pada daya input sebesar 1 miliwatt, maka perlu diingat bahwa daya masukan sebesar 1 mW dapat dinyatakan sebagai 0 dBm. Nilai konversi daya optis watt menjadi dBm ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Tabel konversi daya optis watt menjadi dBm

Daya (watt)	Daya (dBm)
1 W	+30 dBm
100 mW	+20 dBm
10 mW	+10 dBm
5 mW	+7 dBm
2 mW	+3 dBm
1 mW	0 dBm
500 μW	-3 dBm
200 μW	-7 dBm
100 μW	-10 dBm
50 μW	-13 dBm
10 μW	-20 dBm
5 μW	-23 dBm
1 μW	-30 dBm
500 nW	-33 dBm
100 nW	-40 dBm

2.2.4 Ketidakpastian Pengukuran Tipe A

Suatu sistem pengukuran pada umumnya bertujuan untuk menetapkan nilai dari suatu besaran ukur. Namun dalam pengukuran, nilai riil dari suatu besaran sangat sulit ditentukan. Sehingga diperlukan proses perulangan pengukuran dan suatu metode pendekatan untuk menaksirkan nilai hasil pengukuran yang paling mendekati nilai sesungguhnya. Nilai hasil pengukuran yang baik dinyatakan oleh nilai rata-rata dan disertai dengan ketidakpastiannya.

Ketidakpastian pengukuran adalah rentang nilai disekitar hasil pengukuran yang didalamnya diharapkan terdapat nilai sebenarnya dari besaran ukur (Musyafa', Dharma, & Robandi, 2009). Ketidakpastian pengukuran diklasifikasikan menjadi 2 jenis menurut metode taksiran numeriknya, yaitu tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A dievaluasi dengan analisis statistik pengukuran sedangkan ketidakpastian tipe B dievaluasi dengan cara selain Analisis statistik pengukuran (Komite Akreditasi Nasional, 2003).

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran yang berulang sehingga ekspresi ketidakpastian hanya dievaluasi berdasarkan Analisis statistiknya. Dalam pengukuran berulang, nilai hasil pengukuran dinyatakan dengan nilai rata-rata dan simpangan baku. Keduanya dihitung dari variabel acak dan termasuk dalam ketidakpastian A_1 (U_{A_1}). Perhitungan rata-rata dan standar deviasi adalah sebagai berikut:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.36)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.37)$$

dengan \bar{x} adalah rata-rata nilai pengukuran, σ adalah standar deviasi x_i nilai pengukuran ke- i , dan n adalah jumlah pengulangan. Dari kedua parameter diatas, dapat diketahui nilai ketidakpastian A_1 (U_{A_1}) dengan persamaan berikut:

$$U_{A_1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.38)$$

Perhitungan ketidakpastian tipe A berikutnya adalah melalui metode penarikan kurva. Kurva data pengukuran yang telah didapatkan pada umumnya didekati dengan garis lurus atau regresi linier. Perhitungan ketidakpastian ini

disebut dengan ketidakpastian A_2 (U_{A_2}). Pendekatan kurva dengan garis lurus akan dinyatakan dengan suatu persamaan garis linier

$$y = a + bx \quad (2.39)$$

Terdapat perbedaan nilai data aktual dengan nilai data hasil pengukuran yang disebut dengan residual. Nilai residual dinyatakan dengan SRR (*Sum Square of Residual*) sebagai berikut:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (2.40)$$

Setelah didapatkan nilai SRR, maka dapat dihitung nilai ketidakpastian A_2 (U_{A_2}) menggunakan persamaan di bawah ini

$$U_{A_2} = \sqrt{\frac{SSR}{v}} \quad (2.41)$$

dengan v adalah derajat kebebasan yang dinyatakan oleh selisi jumlah titik data n dan jumlah koefisien persamaan garis. Dalam hal ini nilainya 2 untuk garis lurus (koefisien a dan b) (Komite Akreditasi Nasional, 2003).

$$v = n - 2 \quad (2.42)$$

Namun penarikan kurva tidak terbatas pada garis lurus saja, secara umum kurva yang mewakili serangkaian data pengukuran dapat dinyatakan sebagai:

$$y = f(x) \quad (2.43)$$

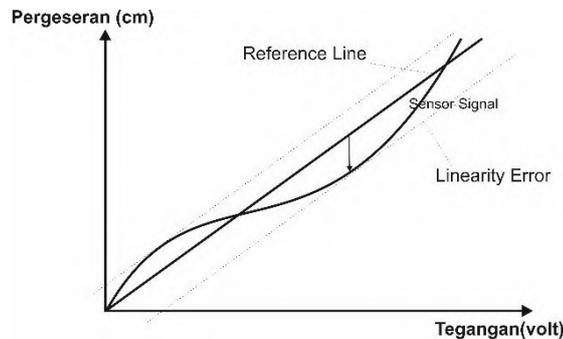
2.2.5 Karakteristik Sensor

Karakterisasi sensor dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem sensor yang telah dirancang. Karakteristiknya ditentukan oleh hubungan antara sinyal keluaran dan masukan. Karakteristik sensor dibagi menjadi dua yaitu karakteristik statik dan dinamik. Karakteristik statik ditentukan oleh sifat sensor yang perubahan responnya tidak berubah terhadap waktu, beberapa hal yang termasuk dalam karakteristik statik sensor meliputi linieritas, sensitivitas, jangkauan pengukuran, saturasi, dan *repeatability*.

Linearitas

Ada banyak sensor yang menghasilkan sinyal keluaran yang berubah secara kontinyu sebagai tanggapan terhadap masukan yang berubah secara kontinyu.

Sebagai contoh, sebuah sensor panas dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan panas yang dirasakannya. Dalam kasus seperti ini, dapat diketahui secara tepat bagaimana perubahan keluaran dibandingkan dengan masukannya berupa sebuah grafik.



Gambar 2.7 Contoh Grafik dengan Regresi Linier

Sensitivitas

Sensitivitas akan menunjukkan seberapa jauh kepekaan sensor terhadap kuantitas yang diukur. Sensitivitas sering juga dinyatakan dengan bilangan yang menunjukkan perubahan keluaran dibandingkan unit perubahan masukan. Linearitas sensor juga mempengaruhi sensitivitas dari sensor. Apabila tanggapannya linear, maka sensitivitasnya juga akan sama untuk jangkauan pengukuran keseluruhan.

Jangkauan Pengukuran

Jangkauan pengukuran masukan merupakan daerah dimana sensor masih dapat mengubah stimulus yang diberikan kepadanya sedangkan jangkauan pengukuran keluaran merupakan perbedaan antara sinyal keluaran yang diukur terhadap stimulus (masukan) maksimum dan minimum.

Saturasi

Setiap sensor mempunyai batas operasi, termasuk sensor yang mempunyai linieritas tinggi. Sensor mengalami titik saturasi ketika sensor tidak lagi memberikan perubahan keluaran ketika diberikan stimulus.

Repeatability

Penyebab *error repeatability* adalah ketika sensor tidak mampu lagi memberikan nilai yang sama pada kondisi yang identik. *Error repeatability* dinyatakan sebagai:

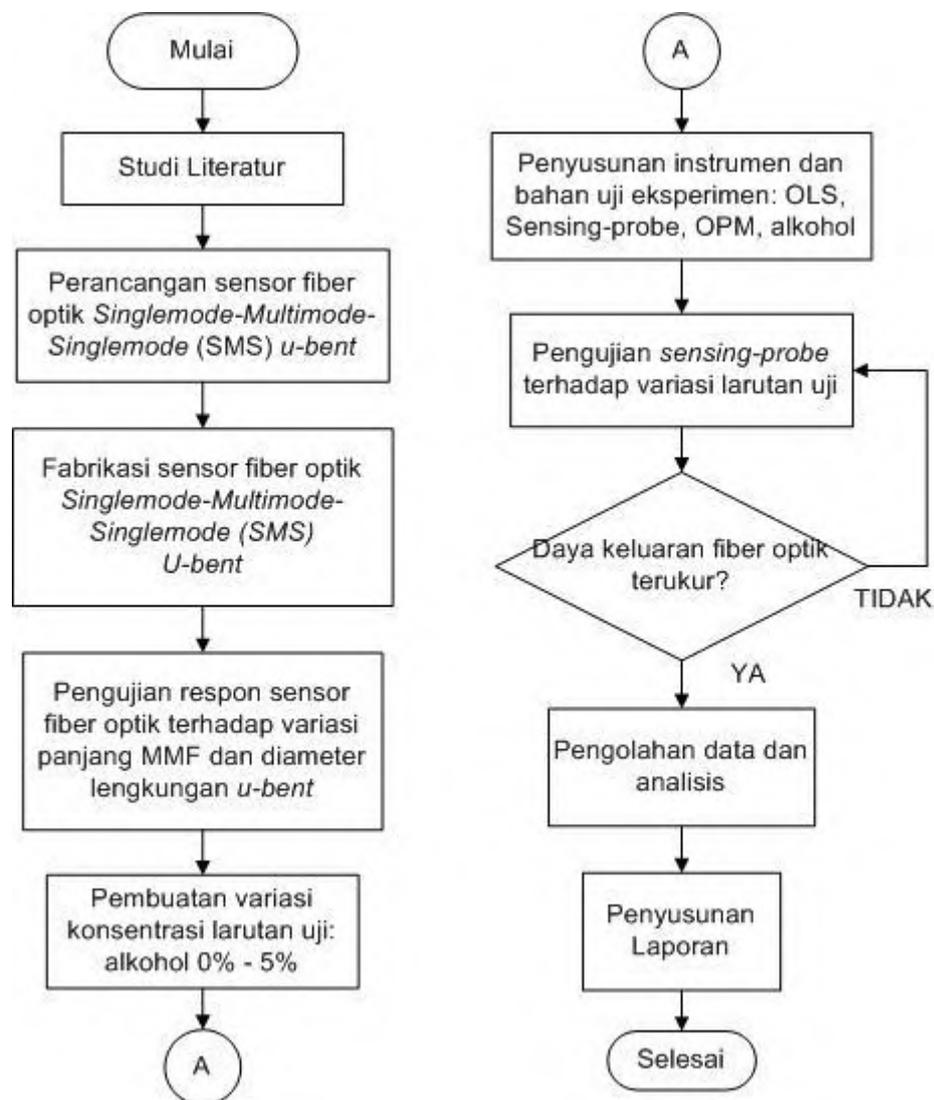
$$\delta = \frac{\Delta}{FS} \times 100\% \quad (2.44)$$

dengan, δ = *error repeatability* (%); Δ adalah daerah dengan stimulus berbeda memberikan tegangan yang hampir sama; FS = jangkauan pengukuran.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai prosedur pengerjaan tesis yang berjudul *Fiber Optik Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) U-bent sebagai Sensor Alkohol dalam Larutan*. Metodologi dalam pengerjaan tesis dapat digambarkan dalam bentuk alur diagram sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan alur diagram alir diatas, dapat dijelaskan sebagai berikut :

3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap awal yang dilakukan untuk menunjang keberhasilan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur atau pengayaan materi dilakukan melalui buku dan artikel publikasi ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian yaitu perkembangan fiber optik sebagai sensor. Teori yang dipelajari meliputi prinsip *multimode interference*, efek *macrobending* pada fiber optik, dan mekanisme *sensing* pada fiber optik SMS. Hal-hal yang telah dipelajari melalui studi literatur telah dipaparkan pada bab 2.

3.2 Perancangan Sensor Fiber Optik SMS *U-bent*

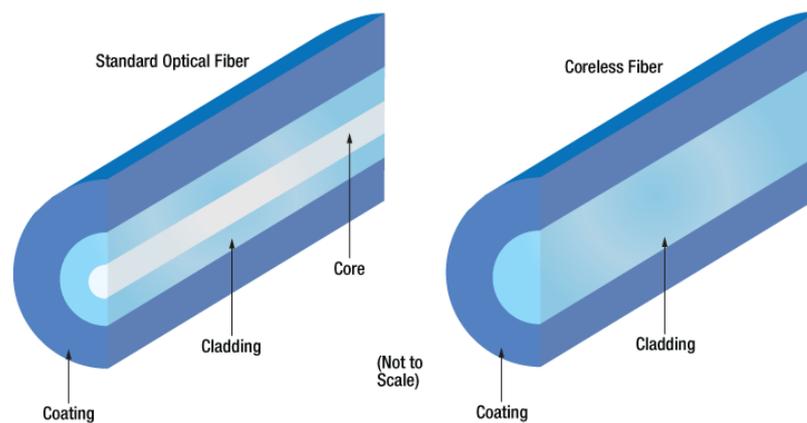
Penentuan struktur fiber optik sebagai *sensing-probe* didasarkan pada hasil studi literatur yang sebelumnya telah dilakukan dengan mempertimbangkan keunggulan struktur fiber optik tersebut, ketersediaan peralatan di Laboratorium Fotonika ITS dan kemungkinan terlaksananya (*feasibility*) penelitian ini. Berdasarkan hal-hal tersebut diatas, maka telah ditentukan struktur fiber optik *sensing-probe* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *u-bent* dengan jenis fiber optik *multimode* yang digunakan adalah *coreless*.

Perancangan sensor fiber optik SMS *u-bent* melibatkan tahap penentuan parameter-parameter fisis dalam sistem. Parameter fisis tersebut meliputi panjang *multimode section*, diameter lengkungan, jenis fiber optik *multimode section* serta indeks bias *core* dan *cladding* dari fiber optik SMF dan MMF yang digunakan. Panjang *multimode section* yang digunakan pada sensor adalah 63 mm, 73 mm dan 83 mm. Sedangkan diameter lengkungan *u-bent* adalah sebesar 50 mm, 55 dan 60 mm. Pada penelitian ini sensor fiber optik SMS *u-bent* menggunakan jenis fiber optik *multimode coreless*. Hal ini didasarkan pada hasil studi literatur yang menyatakan bahwa sensor alkohol berbasis fiber optik memerlukan suatu teknik untuk menghilangkan *cladding* untuk menciptakan *modified cladding* dari alkohol. Teknik untuk menghilangkan *cladding* dari fiber optik silika adalah dengan cara *etching* menggunakan larutan *Hydrofluoric Acid* (HF) yang dikenal sangat berbahaya karena sifatnya yang korosif dan mampu melarutkan kaca (Zaatar et al., 2000). Sehingga digunakanlah jenis fiber optik *multimode coreless* untuk

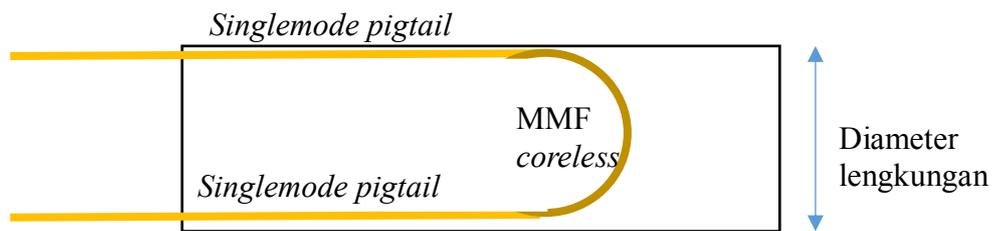
merekayasa *modified cladding*. Struktur fiber optik *multimode coreless* dibandingkan dengan *multimode* standar ditunjukkan pada gambar 3.2. Dengan menggunakan *multimode coreless, cladding* MMF akan berlaku sebagai *core* saat dicelupkan ke dalam larutan alkohol, sedangkan alkohol berlaku sebagai *modified cladding*. Parameter indeks bias dan jari-jari *core* dan *cladding* dari fiber optik yang digunakan ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Fiber Optik yang digunakan

Spesifikasi		
	Singlemode Pigtail	Multimode Coreless
Panjang gelombang	400 – 2400 nm	
Indeks bias core	1.45	-
Indeks bias cladding	1.44	1.444
Diameter core	9 μm	-
Diameter cladding	125 μm	125 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$
Diameter coating	-	250 $\mu\text{m} \pm 5\%$



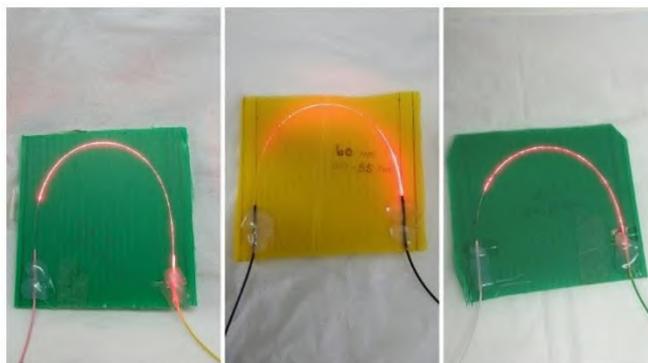
Gambar 3.2 Perbandingan Struktur Fiber Optik Standar dengan Fiber Optik *Multimode Coreless* FG125LA (Www.Thorlabs.Com)



Gambar 3.3 Skema Variasi Sambungan Sensing Probe SMS U-Bent

3.3 Fabrikasi Sensor Fiber Optik SMS U-bent

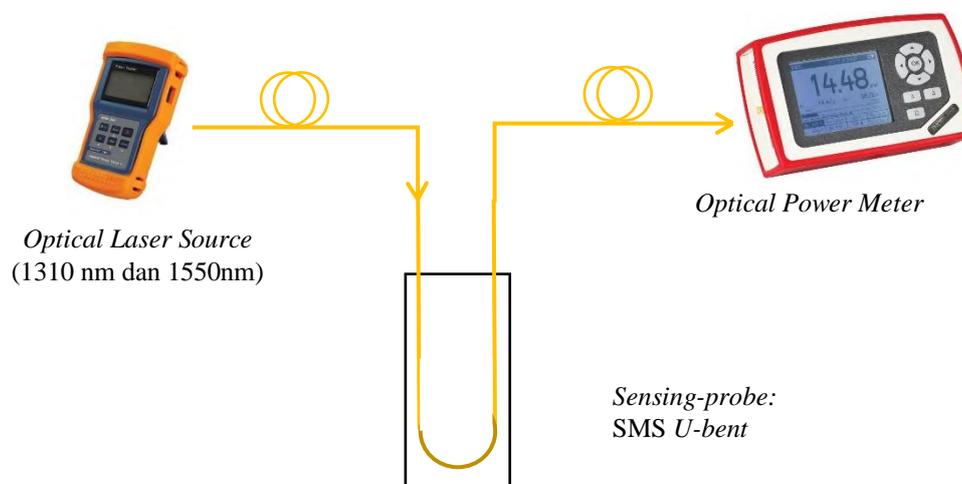
Sensor fiber optik SMS *u-bent* difabrikasi dengan cara menyambungkan dua buah fiber optik *singlemode pigtail* 9/125 μm pada ujung-ujung sebuah *multimode coreless* Thorlabs FG125LA menggunakan alat penyambung *Fusion Splicer*. Sebelum disambung, jaket dan *coat* fiber optik dikupas menggunakan fiber *stripper* dan sisa *coating layer* dibersihkan dengan alkohol 96%. Penyambungan fiber optik membutuhkan potongan fiber optik *multimode* yang presisi dan membutuhkan permukaan ujung fiber optik yang rata, sehingga digunakan *optical fiber cleaver*. Setelah itu, kedua ujung fiber optik siap disambungkan dengan *optical fusion splicer*. Sensor fiber optik SMS *u-bent* difabrikasi sebanyak 9 buah dengan variasi panjang *multimode coreless* 63 mm, 73 mm dan 83 mm, dan variasi diameter lengkungannya sebesar 50 mm, 55 mm dan 60 mm. Hasil fabrikasi sensor fiber optik SMS *u-bent* ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hasil Fabrikasi Sensor Fiber Optik SMS U-bent yang Disinari dengan Laser Berpanjang Gelombang 650 nm.

3.4 Pengujian Respon Fiber Optik terhadap Variasi Panjang MMF dan Diameter Lengkungan *U-bent*

Pengujian respon fiber optik dalam tahap ini dilakukan dengan memvariasikan panjang sambungan MMF *coreless* dan diameter lengkungan. Terdapat tiga buah variasi sambungan MMF *coreless*, masing-masing sepanjang 63 mm, 73 mm dan 83 mm. Kemudian masing-masing panjang MMF diberikan variasi diameter lengkungan sebesar 50 mm, 55 mm dan 60 mm. Sehingga, jumlah variasi *sensing-probe* fiber optik yang digunakan adalah 9 buah. Kesembilan *sensing-probe* secara bergiliran diinputkan cahaya infrared dengan panjang gelombang 1310 nm dan 1550 nm, dan berdaya input -7 dBm dari sebuah *Optical Light Source* (OLS). Daya keluaran fiber optik akan diukur pada salah satu sisi yang lain menggunakan *Optical Power Meter* (OPM). Data daya keluaran direkam sebanyak 200 data selama 1000 detik. Skema pengujian fiber optik tahap ini ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3.5 Skema Pengujian Respon Fiber Optik Terhadap Variasi Panjang MMF dan Diameter Lengkungan

3.5 Pembuatan Variasi Larutan Uji Alkohol

Larutan uji alkohol dimanfaatkan untuk mengetahui respon sensor fiber optik terhadap konsentrasi. Dalam tahapan ini, alkohol akan berlaku sebagai *cladding* untuk fiber MMF *coreless*, sementara *cladding* akan berlaku sebagai *core*.

Dengan kata lain, adanya alkohol dalam tahap ini digunakan sebagai *modified cladding* pada *sensing probe* sehingga indeks bias *cladding* dapat dimanipulasi. Suatu medium dengan kekentalan yang berbeda memiliki indeks bias yang berbeda pula.

Variasi konsentrasi alkohol dibuat dengan metode pengenceran larutan. Metode ini mengacu pada teori kimiawi yang dilakukan untuk mendapatkan konsentrasi yang lebih rendah dari suatu larutan yang memiliki konsentrasi lebih tinggi dengan mencampurkan *diluent*. Persamaan metode pengenceran suatu larutan adalah sebagai berikut:

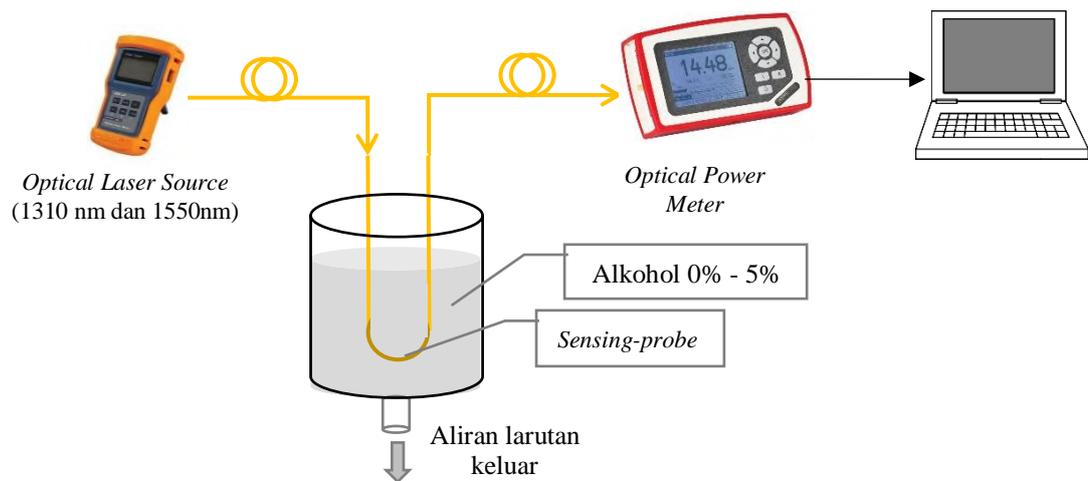
$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (3.1)$$

dimana C adalah konsentrasi larutan (%) dan V adalah volume larutan (Lacher, 2008).

Mengacu pada persamaan diatas, dibuatlah variasi konsentrasi alkohol dengan mengencerkan alkohol 70% dengan aquades sebagai pelarut. Konsentrasi alkohol dibuat dengan 10 jenis variasi antara 0% hingga 4.5% dengan interval 0.5%. Masing-masing variasi konsentrasi alkohol memiliki volume sebesar 300 mL.

3.6 Penyusunan Instrumentasi Penelitian dan Pengujian Sensor terhadap Variasi Larutan Uji

Tahap ini dilakukan setelah perangkat *sensing probe* dan larutan uji siap digunakan. Untuk dapat melakukan pengujian dan karakterisasi sensor, dilakukan penyusunan instrumen berupa *Optical Light Source* (OLS) sebagai sumber cahaya infrared 1310 nm dan 1550 nm, fiber optik *sensing probe* berstruktur SMS *u-bent*, wadah uji, *Optical Power Meter* (OPM) dan *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) sebagai alat untuk mengukur daya dan spektrum sinyal keluaran sensor, dan PC sebagai tampilan respon dari pengujian. Setup alat dan bahan dalam eksperimen ini ditunjukkan pada skema berikut:



Gambar 3.6 Setup Alat dan Bahan dalam Eksperimen Pengujian Respon Sensor Fiber Optik terhadap Konsentrasi Alkohol

Pengujian sensor fiber optik terhadap variasi larutan uji dilakukan dengan cara memasang *sensing probe* SMS *u-bent* ke dalam wadah yang akan diisi oleh larutan. Posisi *sensing-probe* dalam wadah dikondisikan permanen selama pengujian ini. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir gangguan akibat pergeseran atau gerakan. Setelah *sensing-probe* terpasang pada wadah dan peralatan disusun seperti gambar 3.6, larutan uji alkohol dituangkan ke dalam wadah. Cahaya infrared berdaya input -7 dBm yang dihasilkan oleh OLS dilewatkan pada salah satu ujung sensor fiber optik dan daya keluaran diukur menggunakan OPM pada ujung lainnya. Data daya keluaran yang terukur direkam sebanyak 200 data selama 1000 detik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai Analisis data dan pengujian sensor fiber optik SMS *u-bent* sebagai sensor alkohol. Melalui beberapa pengujian, dapat diketahui karakteristik dan performa sensor fiber yang dirancang. Beberapa pengujian yang telah dilakukan antara lain pengujian fiber optik SMS sebelum pembengkokan dan setelah pembengkokan, pengujian respon fiber optik terhadap konsentrasi larutan alkohol dalam berbagai panjang MMF *coreless*.

4.1 Analisis Respon Fiber Optik SMS Sebelum dan Setelah Pembengkokan

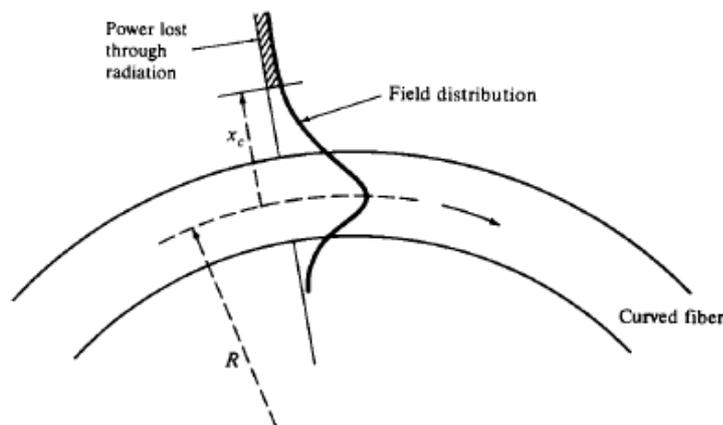
Pengujian respon fiber optik SMS sebelum dan setelah pembengkokan mengacu pada langkah-langkah yang telah dipaparkan dalam sub-bab 3.4 dan menggunakan konfigurasi yang telah ditunjukkan pada gambar 3.4. Terdapat 3 variasi panjang MMF *coreless* pada *sensing-probe* yang telah dibuat dalam penelitian ini. Ketiga variasi MMF *coreless* masing-masing sepanjang 63 mm, 73 mm, dan 83 mm. Variasi diameter bengkokan juga diberikan pada *sensing-probe*, yaitu sebesar 50 mm, 55 mm dan 60 mm. Tahap pengujian ini dilakukan di medium udara, tanpa ada modifikasi medium cladding. Hasil tahap pengujian ini ditampilkan pada tabel berikut ini:

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Daya Output pada Pengujian Respon Fiber Optik SMS Sebelum dan Setelah Pembengkokan dengan Diameter Bengkokan 50 mm (Daya Input -7 dBm)

Panjang MMF <i>coreless</i>	Daya output terukur (dBm)			
	<i>Sensing-probe</i> tanpa bengkokan		<i>Sensing-probe u-bent</i>	
	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm
63 mm	-15.18	-14.50	-18.78	-24.12
73 mm	-16.81	-17.97	-26.68	-33.35
83 mm	-18.08	-15.44	-24.10	-20.10

Dari tabel 4.1 diatas dapat diketahui bahwa fiber optik *sensing-probe* tanpa bengkokan memiliki daya keluaran yang lebih besar dari pada *sensing-probe u-bent*, dimana keduanya jenis *sensing-probe* tersebut diberikan daya input yang sama besar yaitu -7 dBm. Artinya, fiber optik *u-bent* memiliki rugi daya yang lebih besar dari pada tanpa bengkokan. Hal ini sesuai dengan teori rugi daya akibat *macro-bending*. Fiber optik *u-bent* ini dikategorikan sebagai *macro-bending* karena jari-jari lengkungan lebih besar dari pada jari-jari fiber optik, yaitu 25 mm. Dalam fiber optik tanpa bengkokan, distribusi medan untuk moda-moda rendah memiliki ekor medan evanescent pada perbatasan *core dan cladding* yang menurun secara eksponensial di daerah *cladding* sebagai fungsi jarak dari *core*. Hal ini yang sering disebut dengan istilah medan bocor.

Ketika fiber optik dibengkokkan, kebocoran medan evanescent pada daerah *cladding* akan lebih besar dibandingkan sebelumnya. Gambar 4.1 dibawah menunjukkan skema medan evanescent pada fiber optik yang dibengkokkan dan diwakili oleh moda terendah. Pada gambar terlihat bahwa pada saat melalui bengkokan, ekor medan bocor lebih panjang dan pada jarak tertentu dari pusat *core*, energi akan hilang dan itulah yang menyebabkan rugi daya menjadi lebih besar dari pada fiber tanpa bengkokan.

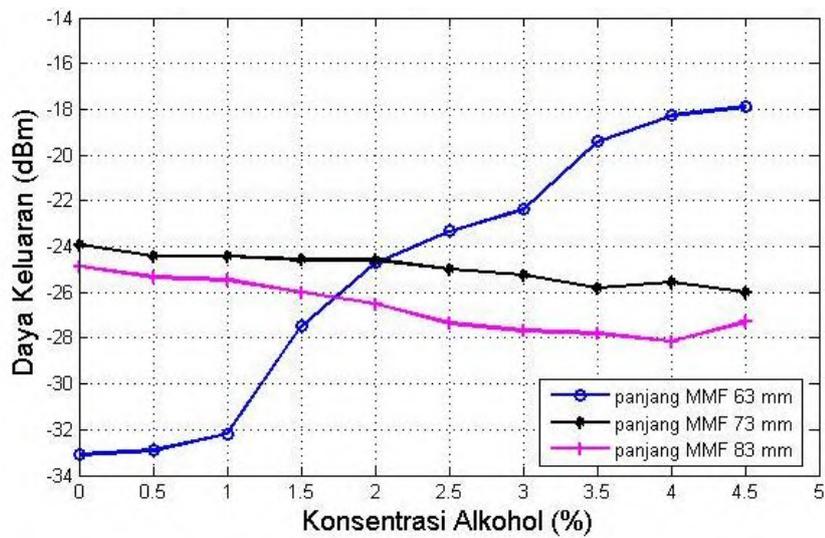


Gambar 4.1 Distribusi Medan Evanescent pada Fiber Optik yang Dibengkokkan

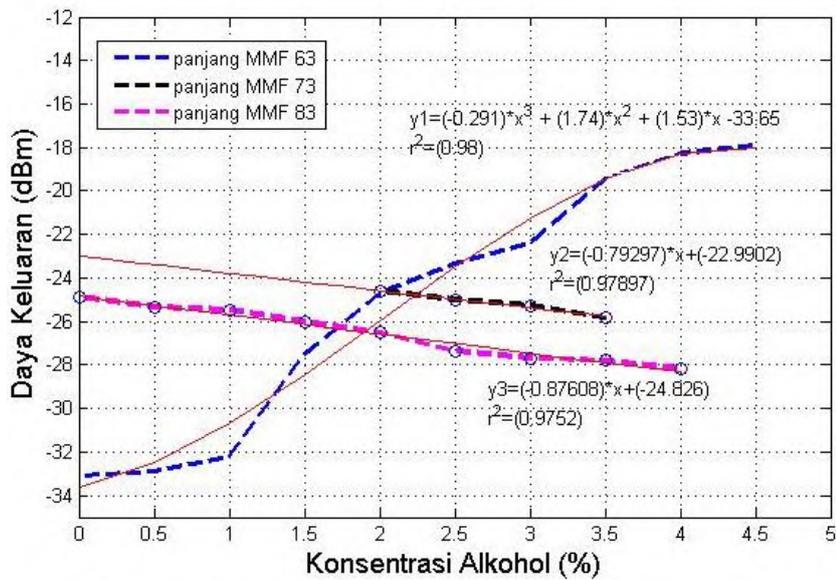
4.2 Analisis Respon Fiber Optik SMS *U-bent* terhadap Konsentrasi Larutan Alkohol

Telah dilakukan pengujian respon SMS *U-bent* terhadap variasi konsentrasi larutan. Larutan yang digunakan dalam tahap ini adalah alkohol. Pembuatan variasi larutan alkohol sesuai dengan tahapan yang telah dipaparkan pada 3.5. Masing-masing konsentrasi larutan memiliki indeks bias yang berbeda. Tabel 2.1 menunjukkan nilai indeks bias untuk masing-masing konsentrasi larutan alkohol pada beberapa panjang gelombang. Konfigurasi yang digunakan dalam pengujian konsentrasi larutan ini diilustrasikan dalam gambar 3.5. Hasil pengujian respon fiber optik SMS *u-bent* terhadap konsentrasi larutan alkohol ditunjukkan pada gambar 4.3. Grafik hasil pengujian tersebut kemudian didekati dengan persamaan garis lurus atau regresi linier. Hal ini dilakukan dengan cara meregresikan titik-titik yang memiliki kecenderungan membentuk garis lurus, sehingga tidak semua titik hasil pengukuran didekati dengan persamaan garis lurus. Nilai kemiringan garis menunjukkan nilai sensitivitas masing-masing sensor. Nilai sensitivitas yang dihasilkan hanya berlaku untuk *range* konsentrasi alkohol tertentu saja. Sebuah sensor yang memiliki sensitivitas yang tinggi pada umumnya memiliki *range* pengukuran yang sempit.

Berdasarkan Gambar 4.2 dan 4.3, dapat diketahui bahwa panjang sensor fiber optik SMS *u-bent* dengan panjang MMF *coreless* sepanjang 63 mm memiliki sensitivitas terbesar diantara ketiganya, yaitu 3.38 dB/%. Pada panjang MMF *coreless* 63 mm, grafik menunjukkan tren daya output yang meningkat seiring dengan meningkatnya kadar alkohol. Hal ini dapat dikatakan bahwa rugi daya yang dihasilkan semakin kecil seiring dengan peningkatan konsentrasi alkohol. Sedangkan pada panjang MMF *coreless* 73 mm dan 83 mm memiliki nilai sensitivitas yang lebih kecil, yaitu 0.79 dB/% dan 0.87 dB/%.



Gambar 4.2 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS U-Bent terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 50 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier



Gambar 4.3 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS U-Bent terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 50 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier

Masing-masing titik pada grafik diatas merupakan nilai rata-rata dari pengukuran daya keluaran fiber optik yang berjumlah 200 data selama 1000 detik.

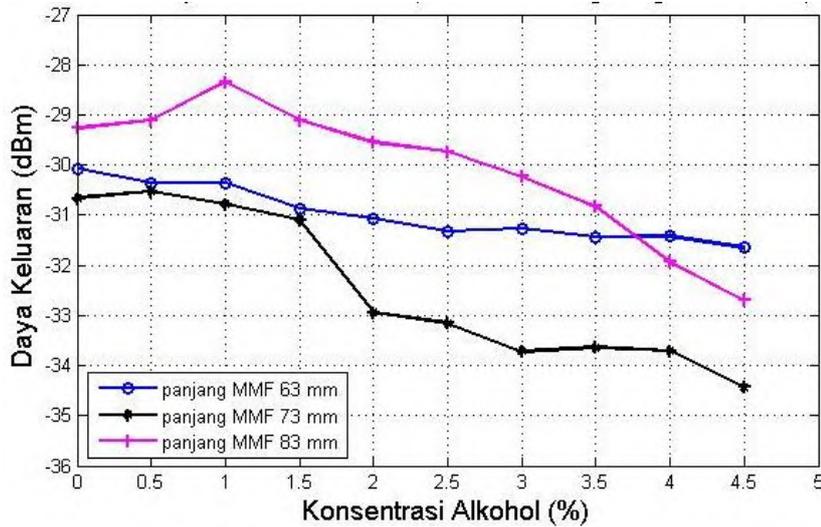
Pengulangan sebanyak 200 kali tersebut dilakukan agar didapatkan nilai rata-rata yang mendekati nilai sebenarnya. Untuk mengetahui besarnya nilai simpangan terhadap rata-ratanya maka dihitunglah standar deviasi dari pengukuran daya tiap variasi kadar alkohol. Standar deviasi ini juga menunjukkan kestabilan data yang direkam. Semakin kecil nilai standar deviasi, maka data yang terrekam semakin stabil terhadap pengulangan. Berikut adalah tabel nilai daya output rata-rata dan standar deviasinya:

Tabel 4.2 Nilai Rata-Rata Daya *Output* dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing *Sensing-Probe* dan Variasi Kadar Alkohol

Kadar Alkohol	Panjang MMF <i>coreless</i>					
	63 mm		73 mm		83 mm	
	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev
0%	-33.11	0.27	-23.92	0.14	-24.86	0.12
0.5%	-32.90	0.34	-24.43	0.19	-25.33	0.059
1%	-32.18	0.11	-24.41	0.19	-25.47	0.063
1.5%	-27.49	0.089	-24.57	0.072	-26.01	0.082
2%	-24.71	0.035	-24.59	0.015	-26.50	0.12
2.5%	-23.33	0.34	-25.00	0.093	-27.36	0.085
3 %	-22.38	0.055	-25.26	0.084	-27.68	0.075
3.5%	-19.41	0.016	-25.82	0.106	-27.79	0.209
4%	-18.27	0.039	-25.57	0.04	-28.15	0.12
4.5%	-17.90	0.078	-26.00	0.037	-17.28	0.004

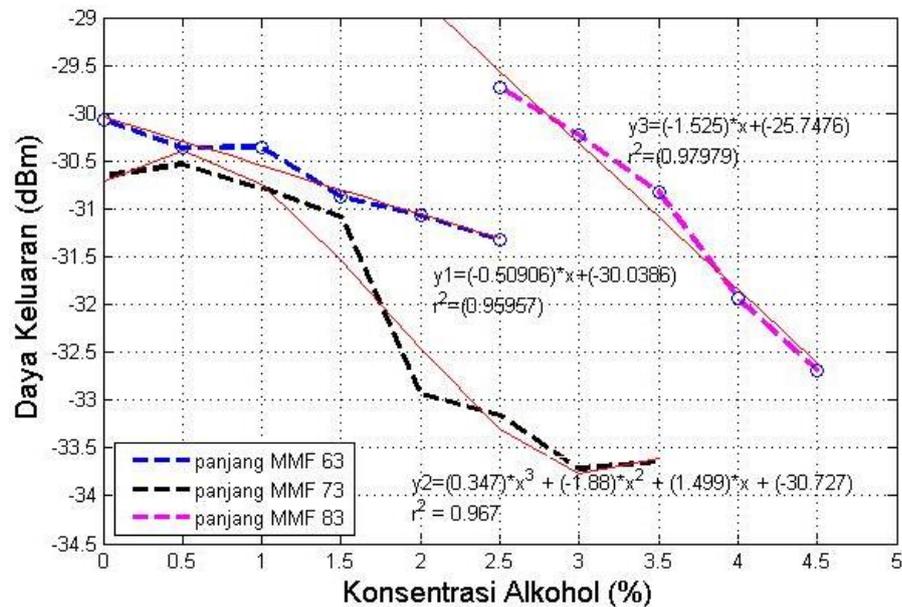
Tahap pengujian dan perlakuan yang sama diberlakukan pada fiber optik *sensing-probe u-bent* dengan diameter lengkungan 55 mm. Hasil pengujian respon fiber optik SMS *u-bent* terhadap kadar alkohol ditunjukkan pada gambar 4.4 dan 4.5. Pada grafik tersebut, nilai sensitivitas sensor SMS *u-bent*, dengan panjang MMF sebesar 63 mm, diketahui sebesar 0.509 dB/%. Sedangkan hasil pengujian

untuk variasi panjang MMF 73 mm dan 83 mm masing-masing memiliki nilai sensitivitas sebesar 0.909 dB/% dan 1.525 dB/%.



Gambar 4.4 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS *U-Bent* terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 55 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier

Dalam gambar 4.4 yang merupakan grafik hasil pengukuran daya keluaran, tren yang ditunjukkan adalah menurun. Artinya nilai daya keluaran semakin menurun saat dilakukan penambahan konsentrasi alkohol. Hal ini terjadi karena penambahan konsentrasi alkohol menyebabkan parameter-parameter fisis dari sensor berubah. Parameter yang dimaksud meliputi indeks bias efektif fiber, konstanta propagasi gelombang dalam fiber, jarak terjadinya *self imaging* dalam *multimode* dan rugi daya. Perubahan parameter tersebut menyebabkan daya output yang terukur oleh OPM semakin menurun. Hubungan ini dijelaskan melalui persamaan 2.10 – 2.13.



Gambar 4.5 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS *U-Bent* terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 55 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier

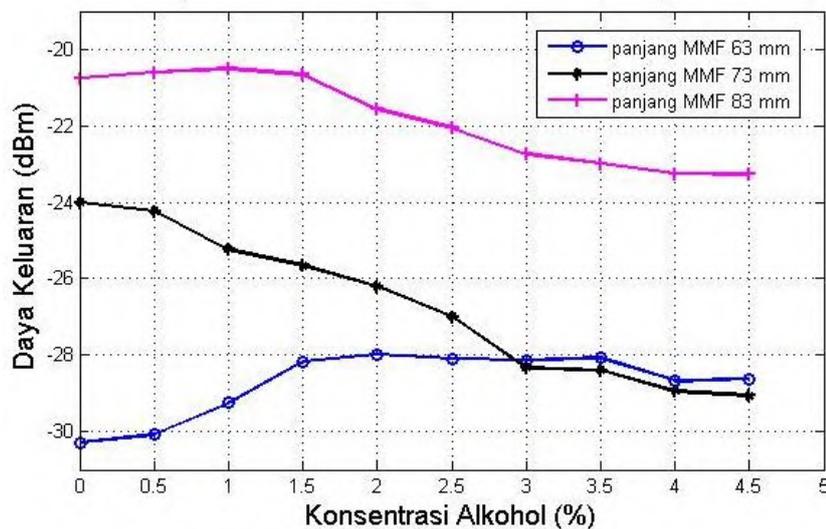
Pada pengujian respon konsentrasi alkohol dengan diameter lengkung 55 cm ini juga dilakukan perhitungan standar deviasi seperti yang tercantum pada tabel 4.3. Tujuan perhitungan rata-rata daya keluaran dan standar deviasi telah dijelaskan sebelumnya, yaitu untuk mengetahui kestabilan data yang diperoleh.

Tabel 4.3 Nilai Daya *Output* dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing *Sensing-Probe* dan Variasi Kadar Alkohol (diameter lengkung 55 mm)

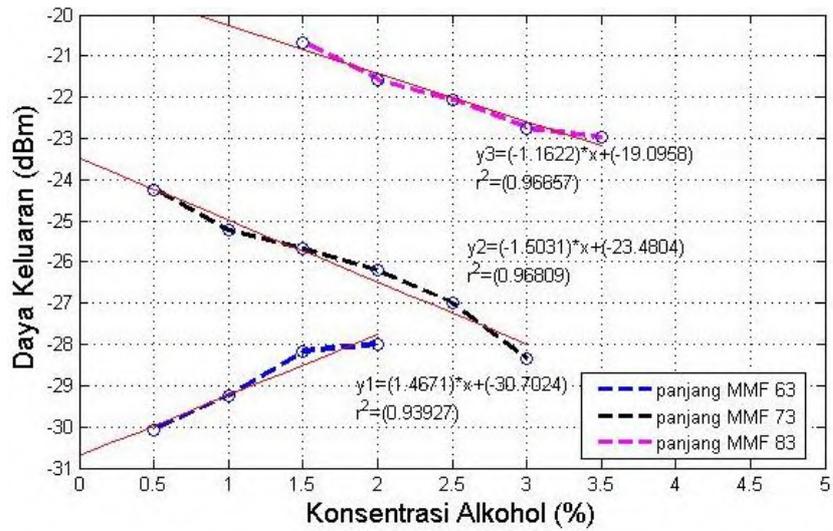
Kadar Alkohol	Panjang MMF <i>coreless</i>					
	63 mm		73 mm		83 mm	
	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev
0%	-30.07	0.015	-30.66	0.25	-29.26	0.21
0.5%	-30.36	0.23	-30.53	0.02	-29.11	0.04
1%	-30.35	0.07	-30.78	0.01	-28.34	0.06
1.5%	-30.86	0.16	-31.09	0.09	-29.11	0.03

2%	-31.06	0.13	-32.93	0.016	-29.54	0.05
2.5%	-31.32	0.003	-33.15	0.105	-29.73	0.03
3 %	-31.26	0.02	-33.71	0.15	-30.23	0.29
3.5%	-31.43	0.08	-33.64	0.08	-30.82	0.06
4%	-31.32	0.09	-33.70	0.11	-31.93	0.11
4.5%	-31.64	0.22	-33.43	0.17	-32.69	0.21

Karakteristik sensor fiber optik SMS *u-bent* dengan variasi diameter lengkungan 60 mm telah diuji dalam berbagai kadar alkohol. Ketiga *sensing-probe* dengan panjang MMF berbeda memberikan karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Pada panjang MMF sebesar 63 mm dan 83 mm memiliki tren daya output yang menurun seiring dengan kenaikan kadar alkohol dan masing-masing memiliki sensitivitas 1.467 dB/% dan 1.162 dB/% . Berbeda dengan *sensing-probe* SMS *u-bent* kedua, dengan panjang MMF 73 mm, tren daya output yang dihasilkan naik seiring dengan kenaikan kadar alkohol dan memiliki sensitivitas sebesar 1.503 dB/% .



Gambar 4.6 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS *U-Bent* terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 60 mm Sebelum Didekati dengan Persamaan Linier



Gambar 4.7 Grafik Daya Output Sensor Fiber Optik SMS *U-Bent* terhadap Kadar Alkohol, dengan Diameter Lengkungan 60 mm Setelah Didekati dengan Persamaan Linier

Nilai daya output untuk masing-masing variasi *sensing-probe* dan konsentrasi alkohol yang tergambar dalam grafik diatas dituliskan dalam tabel 4.4 berikut. Pada tabel dibawah ini, disertakan pula nilai standar deviasi pengulangan data yang menunjukkan tingkat kestabilan daya output selama 1000 detik pengukuran.

Tabel 4.4 Nilai Daya *Output* dan Standar Deviasi Pengukuran untuk Masing-Masing *Sensing-Probe* dan Variasi Kadar Alkohol (diameter lengkungan 60 mm)

Kadar Alkohol	Panjang MMF <i>coreless</i>					
	63 mm		73 mm		83 mm	
	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev	P_{out} (dBm)	Stdev
0%	-30.28	0.22	-24.00	0.07	-20.75	0.08
0.5%	-30.07	0.33	-24.24	0.04	-20.60	0.12
1%	-29.24	0.21	-25.23	0.06	-20.50	0.08
1.5%	-28.16	0.38	-25.66	0.08	-20.66	0.09
2%	-27.98	0.01	-26.21	0.04	-21.57	0.10
2.5%	-28.09	0.43	-26.99	0.07	-22.06	0.12

3 %	-28.13	0.20	-28.34	0.23	-22.74	0.15
3.5%	-28.06	0.05	-28.40	0.16	-22.98	0.07
4%	-28.76	0.10	-28.94	0.04	-23.24	0.09
4.5%	-28.62	0.19	-29.07	0.02	-23.28	0.07

Salah satu karakteristik sensor yang harus diketahui adalah nilai sensitivitas (S). Secara matematis, sensitivitas dinyatakan dengan bilangan yang menunjukkan perubahan parameter keluaran dibandingkan perubahan parameter masukan. Dalam hal ini, perubahan parameter keluaran adalah daya output, sedangkan parameter masukannya adalah konsentrasi larutan alkohol. Dalam grafik, jika data hasil pengukuran menunjukkan respon yang linier, linieritas atau gradien garisnya menunjukkan sensitivitas dari sensor. Nilai sensitivitas sensor fiber optik SMS *u-bent*, yang didapatkan dari grafik hasil pengukuran pada gambar 4.2 – 4.7, ditampilkan pada tabel 4.5.

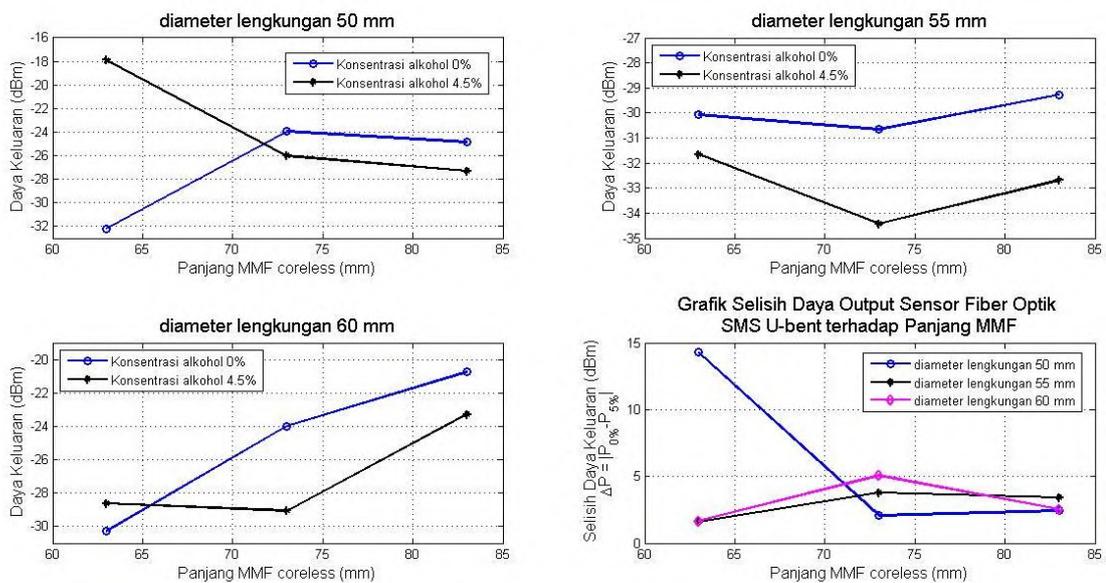
Tabel 4.5 Nilai Sensitivitas Sensor untuk Beberapa Variasi Panjang MMF *coreless* dan Diameter Lengkungan

Panjang MMF <i>coreless</i>	Sensitivitas (dB/%) diameter lengkungan		
	50 mm	55 mm	60 mm
63 mm	3.380	0.509	1.467
73 mm	0.792	0.909	1.503
83 mm	0.876	1.525	1.162

4.3 Analisis Respon Sensor Fiber Optik SMS *U-bent* terhadap Panjang MMF *coreless*

Dalam teori perambatan cahaya dalam fiber optik dan efek interferensi, dinyatakan bahwa dalam fiber optik yang berstruktur hetero akan dihasilkan pola

yang disebut dengan *self-imaging*. Pola tersebut berupa pola cahaya terang yang disebabkan oleh interferensi konstruktif. Pola *self imaging* terjadi pada jarak tertentu dan akan berulang secara periodik. Oleh sebab itu, parameter daya keluaran dipengaruhi oleh panjang fiber optik *multimode*. Untuk mengetahui hubungan tersebut, maka dilakukanlah Analisis hasil eksperimen yang dinyatakan dalam gambar berikut:



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Daya Output Sensor Fiber Optik SMS U-bent terhadap Panjang MMF dan Hubungan Selisih Daya Output terhadap Panjang MMF

Gambar 4.8 menggambarkan grafik hubungan antara panjang *multimode* terhadap daya keluaran yang terukur. Masing-masing panjang dibandingkan berdasarkan diameter lengkungan sensor. Berdasarkan gambar 4.8 diatas, MMF sepanjang 83 mm cenderung memiliki daya keluaran tertinggi pada masing-masing diameter lengkungan. Hal ini sesuai dengan perancangan panjang sensor SMS *u-bent* yang telah dipaparkan pada subbab 3.2. Panjang 83 mm merupakan jarak yang terdekat dengan pola *self imaging*, yang secara teoritis merupakan kelipatan dari panjang 42,3 mm. Pola *self imaging* seharusnya terjadi pada jarak 84,6 mm dimana dihasilkan internsitas paling terang dan daya paling besar. Namun panjang *multimode* secara teoritis tersebut sulit dicapai dalam eksperimen sehingga

pemotongan fiber optik *multimode* kurang presisi. Meskipun bukan merupakan titik *self imaging*, namun panjang 83 mm merupakan yang terdekat dari titik tersebut. Dibutuhkan eksperimen berkelanjutan dengan lebih banyak variasi panjang MMF agar hubungan panjang MMF terhadap daya keluaran secara teoritis dapat dibuktikan secara eksperimen.

4.4 Analisis Karakteristik Sensor dan Pengukuran

Dari hasil penelitian ini, diperoleh beberapa parameter karakteristik sensor. Parameter-parameter tersebut menunjukkan kualitas kinerja sensor fiber optik SMS U-bent yang telah difabrikasi. Parameter karakteristik sensor tersebut adalah nilai sensitivitas, *range* dan *span* sensor. Sensor dinilai memiliki kinerja yang baik apabila memiliki nilai sensitivitas tinggi. Artinya sensor memiliki akurasi yang baik.

Tabel 4.6 Karakteristik Sensor Fiber Optik SMS U-bent dalam Berbagai Variasi Panjang MMF *coreless* dan Diameter Lengkungan

Diameter lengkungan	Panjang MMF	Sensitivitas (dB/%)	Range	Span	R²
50 mm	63 mm	3.38	0% - 4.5%	4.5%	0.98
	73 mm	0.79	2% - 3.5%	1.5%	0.97
	83 mm	0.87	0% - 4%	4%	0.97
55 mm	63 mm	0.509	0% - 2.5%	2.5%	0.96
	73 mm	0.909	0% - 3.5%	3.5%	0.97
	83 mm	1.525	2.5% - 4.5%	2%	0.96
60 mm	63 mm	1.467	0.5% - 2%	1.5%	0.93
	73 mm	1.503	0.5% - 3%	2.5%	0.96
	83 mm	1.162	1.5% - 3.5%	2%	0.96

Nilai-nilai karakteristik sensor diatas didapatkan dari pengukuran daya keluaran secara berulang menggunakan OPM. Secara umum, hasil pengukuran daya keluaran hanya merupakan taksiran atau pendekatan dari nilai yang

sebenarnya. Untuk mengetahui kualitas pengukuran yang telah dilakukan, maka dibutuhkan suatu nilai ketidakpastian. Ketidakpastian pengukuran adalah nilai keraguan yang timbul dari hasil pengukuran. Dalam suatu pengukuran yang berulang akan selalu ada margin nilai keraguan, sehingga perlu diketahui berapa besar margin tersebut dan seberapa burukkah keraguannya.

Pada pengukuran, terdapat dua tipe ketidakpastian untuk mengetahui kualitas pengukuran, yaitu tipe A dan B. Ketidakpastian tipe A menggunakan Analisis metode statistik untuk menaksir nilai numeriknya. Dalam tipe A sendiri, terbagi menjadi dua tipe yaitu A1 dan A2. Ketidakpastian tipe A1 berupa nilai rata-rata nilai pengukuran dan standar deviasi, seperti yang telah ditunjukkan pada tabel 4.3 - 4.5. Sedangkan ketidakpastian tipe A2 didapatkan dari penarikan kurva fitting garis lurus untuk memperoleh persamaan liniernya. Pada gambar 4.3, 4.5 dan 4.7, telah didapatkan persamaan dari kurva. Terdapat nilai konstanta dalam masing-masing kurva. Berdasarkan konstanta tersebut, nilai SSR dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.40. Masing-masing nilai derajat kebebasan ν dan ketidakpastian tipe A2 yang telah dihitung sesuai dengan persamaan 2.42 dan 2.41 ditampilkan dalam tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Ketidakpastian A_2 untuk Masing-masing *Sensing-Probe* SMS U-bent

Diameter lengkungan	Panjang MMF coreless	SSR	Derajat kebebasan ν	Ketidakpastian A_2 (U_{A2}) (dBm)
50 mm	63 mm	6.45	6	1.03
	73 mm	0.01	2	0.09
	83 mm	0.29	7	0.20
55 mm	63 mm	0.04	4	0.11
	73 mm	0.45	4	0.34
	83 mm	0.12	3	0.19
60 mm	63 mm	0.17	2	0.29

	73 mm	0.32	4	0.28
	83 mm	0.11	3	0.19

Berdasarkan nilai ketidakpastian A2 yang diperoleh, maka dapat diketahui kualitas dari sistem pengukuran tersebut. Nilai ketidakpastian yang kecil menunjukkan kualitas yang baik. Sehingga, sensor SMS *u-bent* yang paling baik diantara kesembilannya adalah sensor yang memiliki panjang MMF *coreless* 73 mm dan diameter lengkungan 55 mm karena memiliki nilai ketidakpastian terkecil yaitu 0.09 dBm.

4.5 Analisis Mekanisme Sensing Pada Sensor SMS *U-bent*

Pada penelitian ini, sensor fiber optik SMS *u-bent* dapat dikatakan berbasis medan evanescent yang sensitif terhadap larutan maupun indeks bias. Selain itu, proses interferensi multimode juga memiliki peran dalam sensing alkohol ini. Interferensi multimode yang menghasilkan pola *self imaging* dipengaruhi oleh panjang MMF *section* pada sambungan SMS *u-bent*.

Ditinjau dari efek makrobending, kelengkungan sensor dapat berpengaruh terhadap parameter rugi daya atau daya *output* yang terukur. Rugi daya akibat gelombang evanescent pada fiber optik dimanfaatkan dalam prinsip *sensing* kadar alkohol. Rugi daya tersebut direayasa dengan cara membengkokkan *sensing-probe* fiber optik. Berdasarkan teori pemanduan cahaya pada fiber optik, cahaya mengalami *total internal reflection* (TIR) dan menjalar dalam area *core*. Namun, ada sebagian kecil berkas cahaya yang menjalar dalam *core* akan menembus perbatasan antara *core-cladding* sedalam beberapa mikrometer. Area diluar *core* yang ditembus oleh cahaya inilah yang disebut dengan medan evanescent. Daya gelombang evanescent bergantung pada beberapa parameter fisis dari fiber optik, diantaranya indeks bias *core* dan medium yang melingkupinya, dan panjang gelombang cahaya yang dieksitasi didalamnya. Nilai daya evanescent yang menembus perbatasan *core* dan *cladding* memenuhi persamaan 2.1

Secara fisis, fiber optik SMS *u-bent* mampu memperkecil sudut berkas datang untuk menciptakan medan evanescent yang lebih besar sehingga mampu meningkatkan sensitivitas sensor. Sensor bekerja pada moda bocor, berkas datang

yang mengenai perbatasan medium dan menembus medium *modified cladding* sehingga daya dari berkas akan berkurang. Berkurangnya daya itu disebabkan oleh absorpsi medium *modified cladding*. Prinsip yang diimplementasikan pada sensor adalah berbasis pada rugi daya yang dihasilkan oleh gelombang evanescent ketika *probe* dicelupkan ke dalam larutan alkohol dengan indeks bias tertentu. Adanya variasi larutan alkohol mengubah sifat optis dari sensor sehingga disebut dengan istilah *modified cladding*, dan menghasilkan daya *output* cahaya yang bervariasi.

Pengukuran daya keluaran sensor digunakan untuk mengetahui besarnya rugi daya akibat evanescent dalam medium uji. Sehingga pada gambar 4.2, 4.4 dan 4.6 yang menggambarkan hasil pengukuran dapat dilihat bahwa tren nilai daya *output* menurun seiring dengan kenaikan konsentrasi larutan alkohol. Hal itu berarti, rugi daya semakin besar ketika indeks bias medium *modified cladding* makin besar.

Efek makrobending yang diberikan pada sensor fiber optik SMS u-bent mempengaruhi jumlah moda yang terpandu pada *multimode section*. Semakin kecil jari-jari lengkungan yang diberikan pada fiber optik SMS, maka jumlah moda yang terpandu akan semakin sedikit, begitu juga sebaliknya. Hubungan ini sesuai dengan konsep pada subbab 2.1.4 yang dikutip dari Gloge, 1972.

Jika ditinjau dari prinsip interferensi multimode, ketika variasi konsentrasi alkohol ditingkatkan, maka indeks bias medium akan meningkat. Peningkatan indeks bias tentu saja mempengaruhi penjalaran moda-moda dalam fiber optik. Akibatnya, konstanta propagasi akan meningkat pula sesuai dengan persamaan 2.13. Daya keluaran yang diukur menggunakan OPM pun akan terus meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi sesuai dengan persamaan 2.22. Hasil pengukuran pada grafik 4.2 yang menggambarkan tren peningkatan daya seiring peningkatan konsentrasi alkohol sesuai dengan penjelasan yang telah disebutkan diatas. Sensor SMS u-bent dengan panjang MMF *coreless* 63 mm dan diameter lengkungan 50 mm memiliki tren yang meningkat karena panjang MMF *coreless* mendekati pola *self imaging* sehingga tidak menghasilkan rugi daya yang besar. Ketika MMF *section* memiliki panjang tertentu dan berada di sekitar titik *self imaging*, maka pola interferensi yang terjadi pada titik tersebut adalah pola terang akibat interferensi konstruktif.

Berdasarkan tabel 4.6, diantara kesembilan buah *sensing-probe* fiber optik SMS *u-bent*, yang terbaik adalah *sensing-probe* fiber optik SMS *u-bent* dengan diameter lengkungan 50 mm dan panjang MMF 63 mm. Sensor ini dikatakan terbaik karena dilihat berdasarkan nilai-nilai karakteristik sensor yang ditunjukkan pada tabel, diantaranya nilai sensitivitas yang tinggi mencapai 3.38 dB/% dan *range* yang besar yaitu 0% - 4.5%.

LAMPIRAN
SPESIFIKASI ALAT DAN BAHAN

A. Spesifikasi Fiber Optik Multimode FG125LA

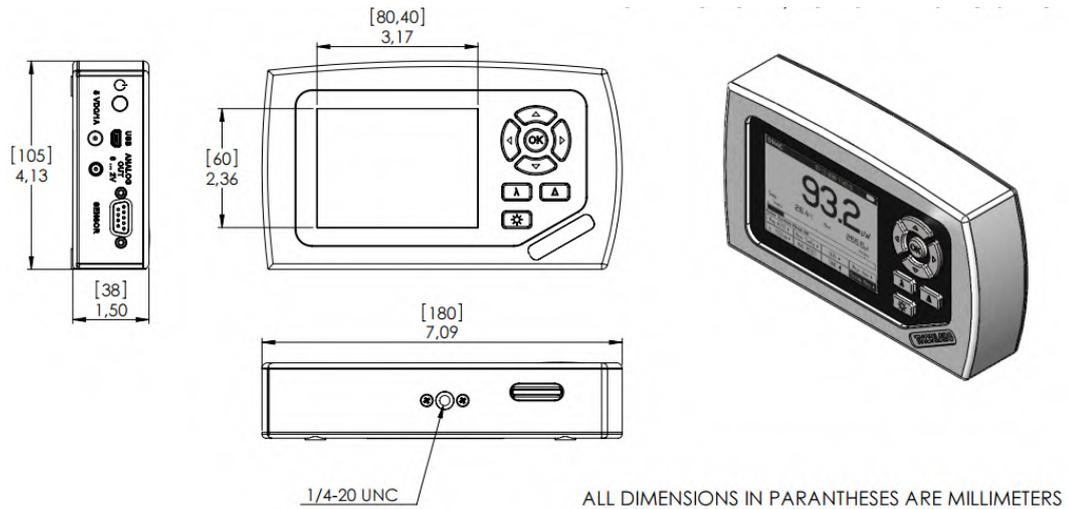
Spesifikasi	
<i>Range Panjang Gelombang</i>	400 – 2400 nm
<i>Return Loss</i>	>65 dB (0.25 m)
<i>Diameter Cladding</i>	125 ± 1 µm
<i>Diameter Coating</i>	250 µm ± 5%
<i>Jenis Coating</i>	Acrylate
<i>Temperatur Kerja</i>	-45 hingga 85° C
<i>Level Uji Tarik</i>	>100 kpsi

B. Spesifikasi *Optical Light Source* Joinwit JW-3109



Type	JW3109			
Wavelengths(nm)	650	1310/1550	850/1300	850/1300/1310/1550
Emitter Type	FP-LD,LED or others please specify			
Typical Output Power (dBm)	0	-7dBm for LD, -20dBm for LED		
Spectral Width(nm)	1. ≤ 10			
Output Stability	± 0.05 dB/15mins; ± 0.1 dB/ 8hours			
Modulation Frequencies	CW,2Hz	CW,270Hz,1KHz,2KHz		
Optical Connector	FC/ universal adaptor	FC/PC		
Power Supply	Alkaline Battery(3 AA 1.5V batteries)			
Battery Operating Time(hour)	45			
Operating Temperature($^{\circ}$ C)	-10~+60			
Storage Temperature($^{\circ}$ C)	-25~+70			
Dimension(mm)	175x82x33			
Weight (g)	295			
Joinwit Recommendation				
JW3109 Handheld Light Source is designed for optimal use with JW3208 Optical Power Meter for measuring optical loss on both single mode and multimode fiber cable.				

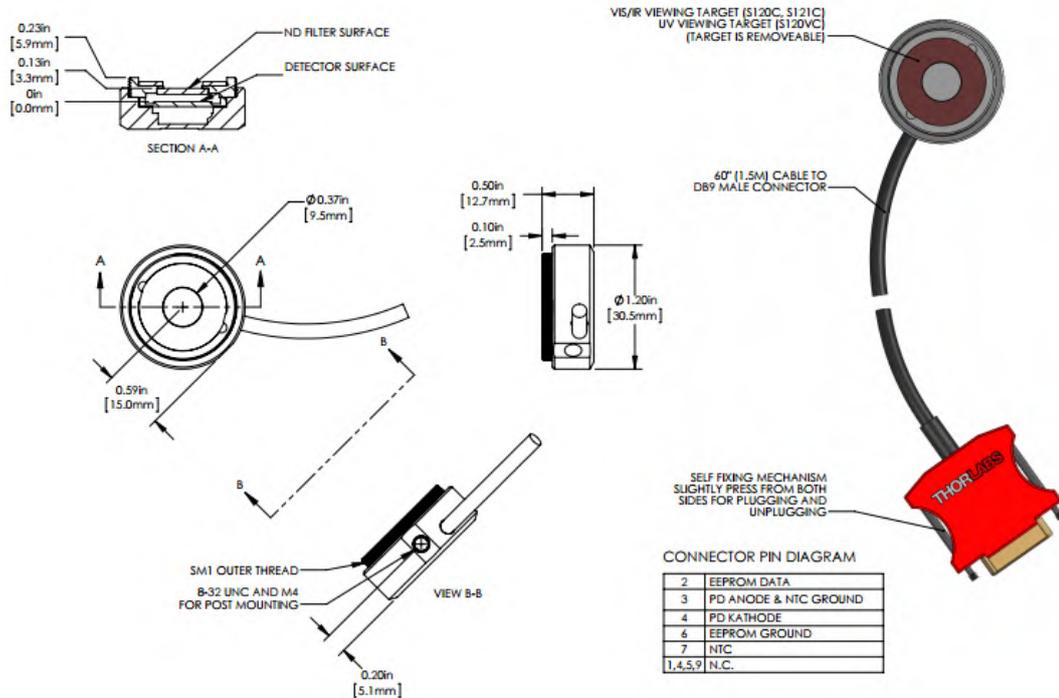
C. Spesifikasi *Optical Light Source* Joinwit JW-3109



Item #	PM100D
Display	
Display Type	Graphical LCD 320 x 240 pixels, LED Backlight
Display Screens	Numerical, Bar Graph, Line Graph, Statistics, Simulated Analog Needle
Viewing Area	81.4 mm x 61.0 mm (3.20" x 2.40")
Refresh Rate	20 Hz
Audio	1x Speaker
Sensor Interface	
Compatible Sensors	All Photodiodes, Thermopiles, and Pyros See Below for Full Sensor Specs
Time Constant Correction	<1 s
AD Converter	16 bit
Trigger (Pulse Measurements, Pyroelectric Sensors)	Adjustable, 0.1 - 100%
Connector	DB9F, Left Side
Sensor Temperature Control	Thermistor
Temperature Range	-10 to 80 °C
Analog Outputs	
Signal	Amplified Input Signal (Not Corrected)
Voltage Range	0 to 2 V
Accuracy	±3%
Bandwidth	Up to 100 kHz, Dependent on Sensor and Settings
Connector	SMA, Left Side
Digital Outputs	
Memory	2 GB Removable SD Card
Connector / Interface	Mini USB / USB 2.0

Power	
Battery	Li-Polymer, 3.7 V, 1300 mAh
Charger / DC Input	5 V / 1 A
Dimensions and Mounting	
Dimensions (L x W x H)	180 mm x 105 mm x 38 mm (7.09" x 4.13" x 1.50")
Weight	<0.5 kg (<1.1 lb)
Mounting Options	Kickstand; 1/4"-20 Post Thread
Operating Temperature>	0 to 40 °C
Storage Temperature	-40 to 70 °C

D. Spesifikasi Standard Photodiode Power Sensor S122C



Detector Type	Germanium Photodiode
Wavelength Range	700 - 1800 nm
Optical Power Working Range	50 nW - 40 mW
Max Average Power Density	10 W/cm ²
Max Pulse Energy	20 µJ
Linearity	± 0.5%
Resolution 1)	2nW
Measurement Uncertainty 2)	±5%
Typical Application	Low Power Lasers
Laser Types	Diode, Diode Arrays, He-Ne, Dye, Ion Lasers (Ar+, Kr+)
Coating /Diffuser	Absorptive ND (Schott NG9)
Cooling	Convection
Head Temperature Measurement	NTC Thermistor 4.7kΩ
Console Compatibility	PM100D, PM100A, PM100USB, PM200, PM320E
Response Time	< 1 µs
Sensor Dimensions	Ø30.5 mm x 12.7 mm
Active Detector Area	9.7 mm x 9.7 mm
Input Aperture	Ø9.5 mm
Cable Length	1.5 m
Connector	Sub-D 9p male
Weight	0.07 kg
Post	#8-32 thread, M4 adapter included
Aperture Thread	SM1, outer thread
Fiber Adapters (optional)	FC, SC, LC, SMA, ST

¹⁾ Measured with PM100D console in bandwidth low setting.

²⁾ Beam diameter > 1mm

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Fiber optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS) *U-bent* sebagai sensor alkohol telah berhasil dirancang dikarakterisasi.
2. Perancangan sensor fiber optik SMS *u-bent* dilakukan dengan menerapkan sistem makrobending dan efek interferensi *multimode*. Perancangan parameter panjang sensor mengacu pada *self imaging* yang terjadi di fiber optik SMS *step-index*. Panjang variasi *multimode section* yang telah dirancang adalah sepanjang 63 mm, 73 mm dan 83 mm.
3. Karakterisasi sensor fiber optik SMS *u-bent* dilakukan dengan pengujian respon sensor terhadap variasi konsentrasi alkohol 0% - 5%. Diperoleh nilai daya keluaran optis sebagai parameter terukur dari pengujian ini. Pengujian respon sensor terhadap variasi konsentrasi menghasilkan nilai karakteristik sensor berupa sensitivitas, *range* dan *span* sensor. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa sensor fiber optik SMS *u-bent* berdiameter lengkungan 50 mm dan panjang MMF 63 mm memiliki sensitivitas terbesar yaitu 3,38 dB/% dalam *range* pengukuran terbesar 0% - 4.5%.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya dapat dikembangkan pemodelan sensor fiber optik SMS *u-bent* secara teoritis dan eksperimen menggunakan *Optical Spectrum Analyzer* untuk mengetahui respon intensitas cahaya terhadap konsentrasi pada berbagai panjang gelombang.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Choudhury, P. K., & Yoshino, T. (2003). On the pH response of fiber optic evanescent field absorption sensor having a U-shaped probe : An experimental analysis. *Optik*, *1*(1), 13–18. Retrieved from <http://www.urbanfischer.de/journals/optik>
- Fabian, M., Lewis, E., Neue, T., & Lochmann, S. (2009). FIBRE-OPTIC EVANESCENT-WAVE FIELD FLUID CONCENTRATION SENSOR. In *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*.
- Gao, R. X., Liu, W. J., Wang, Y. Y., Wang, Q., Zhao, F., & Qu, S. L. (2012). Design and fabrication of SMS fiber refractometer for liquid. *Sensors & Actuators: A. Physical*, *179*, 5–9. <http://doi.org/10.1016/j.sna.2012.02.020>
- Girei, S. H., Shabaneh, A. A., Arasu, P. T., Painam, S., & Yaacob, M. H. (2013). Tapered Multimode Fiber Sensor for Ethanol Sensing Application, (2), 275–277.
- Gloge, D. (1972). Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded Core Index. *Applied Optics*, *11*(11), 2506–2513.
- Gowri, A., & Sai, V. V. R. (2016). Development of LSPR based U-bent plastic optical fiber sensors. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, *230*, 536–543. <http://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.074>
- Gupta, B. D., & Ratnanjali. (2001). A novel probe for a fiber optic humidity sensor. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, *80*(July), 132–135.
- Guzman-Sepulveda, J. R., Hernandez-Romano, I., Torres-Cisneros, M., & May-Arrioja, D. A. (2012). Fiber Optic Vibration Sensor based on Multimode Interference Effects. *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*, *1*, JW2A.117. http://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2012.JW2A.117
- Hatta, A. M. (2009). *Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures for Optical Sensing*. Dublin Institute of Technology.
- Hoss, R. J., & Edward A. (n.d.). *Fiber Optics* (2nd ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Keiser, G. (2000). *Optical Fiber Communications*. (S. W. Director & A. Arbor, Eds.) (3rd editio). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Kementerian Kesehatan. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia tentang Minuman Keras (1977). Indonesia.
- Komite Akreditasi Nasional. (2003). Pedoman Evaluasi dan Pelaporan

Ketidakpastian Pengukuran. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

- Krohn, D. A. (n.d.). *Fiber Optics Sensor: Fundamentals and Applications* (3rd ed.). New York: ISA.
- Kumar, A., Varshney, R. K., C, S. A., & Sharma, P. (2003). Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 219, 215–219. [http://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01289-6](http://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01289-6)
- Lacher, B. E. (2008). Dilution and Concentration. In D. B. Troy, M. L. Brittain, & R. J. Alvarez (Eds.), *Pharmaceutical Calculations for the Pharmacy Technician* (1st ed., pp. 207–240). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Liu, T., Chen, Y., Han, Q., & Lu, X. (2014). Magnetic Field Sensor Based on U-Bent Single-Mode Fiber and Magnetic Fluid Magnetic Field Sensor Based on U-Bent. *IEEE Photonics Journal*, 6(6). <http://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2368781>
- Massa, N. (2000). *Fiber Optic telecommunication*. Springfield, Massachusetts.
- Morisawa, M., & Muto, S. (2012). Plastic Optical Fiber Sensing of Alcohol Concentration in Liquors. *Journal of Sensors*, 2012(1), 1–6. <http://doi.org/10.1155/2012/709849>
- Musyafa', A., Dharma, A., & Robandi, I. (2009). Measurement Uncertainty of Wind-Speed Condition in Three Location in East Java. In M. Hariadi (Ed.), *Proceedings of The 10th Seminar on Intelligent Technology and Its Application*. Surabaya: Electrical Engineering Department ITS Surabaya.
- Nowakowska, J. (1939). *The Refractive Indices of Ethyl Alcohol and Water Mixtures*. Layola University Chicago.
- Rahmah, F. (2015). *Perancangan Sensor Beban Berbasis Mikrobending Pada Serat Optik SInglemode-Multimode-Singlemode (SMS) dengan High Density Polyethylene (HDPE) sebagai Bending Modulator*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Saad, H., Rahman, M. ., & Ali, M. . (2013). Tapered Plastic Optical Fiber Sensor for Detection of Ethanol Concentration H₂O. In *Sevent International Conference in Sensing Technology* (pp. 559–564). IEEE.
- Sahodo, Y. A. (2013). *CHARACTERIZATION PROTOTYPE MULTIMODE INTERFERENCE DEVICE (MMI) FOR OPTICAL POWER DEVIDER*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sai, V. V. R., Kundu, T., & Mukherji, S. (2009). Novel U-bent fiber optic probe for

- localized surface plasmon resonance based biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, 24, 2804–2809. <http://doi.org/10.1016/j.bios.2009.02.007>
- Semwal, V., Shrivastav, A. M., Verma, R., & Gupta, B. D. (2016). Surface plasmon resonance based fiber optic ethanol sensor using layers of silver / silicon / hydrogel entrapped with ADH / NAD. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 230, 485–492. <http://doi.org/10.1016/j.snb.2016.02.084>
- Sharifpour-boushehri, S., Hosseini-golgoo, S. M., & Sheikhi, M. (2015). A low cost and reliable fiber optic ethanol sensor based on nano-sized. *Optical Fiber Technology*, 24, 93–99. <http://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.05.002>
- Siang, Y., Sing, K., & Wadi, S. (2014). Conducting polymer coated optical microfiber sensor for alcohol detection. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 205, 58–62. <http://doi.org/10.1016/j.sna.2013.10.025>
- Soldano, L. B., & Pennings, E. C. M. (1995). Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications. *Lightwave Technology*, 13(4), 615–627.
- Stupar, D. Z., Baji, J. S., Joža, A. V, Daki, B. M., Slankamenac, M. P., & Miloš, B. (2012). Remote monitoring of water salinity by using side-polished fiber-optic U-shaped sensor. In *15th International Power Electronics and Motion Control Conference* (pp. 2–6). Novi Sad, Serbia: IEEE.
- Sudarsono. (2009). *Fabrikasi dan Karakterisasi Devais MMI sebagai Pembagi Daya Modus TE dan Modus TM*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Thompson, A., & Taylor, B. N. (2008). *Guide for the Use of the International System of Units (SI)* (2008 Editi). Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
- Wang, Q., Farrell, G., & Yan, W. (2008). Investigation on Single-Mode – Multimode – Single-Mode Fiber Structure. *Lightwave Technology*, 26(5), 512–519. <http://doi.org/10.1109/JLT.2007.915205>
- Wang, R., Qiao, X., Zhang, J., Zhou, R., & Yang, Y. (2011). Displacement Sensor Based on SMS Fiber Structure. *Lightwave*, (1), 1–3.
- Wang, S.-F. (2009). U-shaped optical fiber sensor based on multiple total internal reflections in heterodyne interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(10), 1039–1043. <http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.010>
- Zaatar, Y., Zaouk, D., Bechara, J., Khoury, A., Llinaress, C., & Charles, J. (2000). Fabrication and characterization of an evanescent wave fiber optic sensor for air pollution control. *Materials Science and Engineering B*, 74, 296–298.

Zhang, R., Liu, T., Han, Q., Chen, Y., & Li, L. (1882). U-bent single-mode–multimode–single-mode fiber optic magnetic field sensor based on magnetic fluid, *072501*.

Zhao, Y., Jin, Y., Wang, J., & Dong, X. (2013). Detection of liquid-level variation using a SMS fiber structure. *Optik*, *124*(18), 3771–3773. <http://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.11.034>

BIOGRAFI PENULIS



Sefi Novendra Patrialova berasal dari Sidoarjo dan dilahirkan di kota Madiun pada 22 November 1991 dari pasangan Febby Mahendra Putra, SH dan Dra. Sri Ati Soeharningsih, MM. Penulis merupakan anak sulung dari empat bersaudara dan telah menempuh pendidikan formal di SDN Tropodo I, SMPN 1 Waru, dan SMAN 1 Sidoarjo. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA-ITS pada tahun 2009 melalui jalur PMDK. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikannya di program Pascasarjana Teknik Fisika ITS 2014. Bidang ilmu yang didalami penulis adalah sensor fiber optik. Dalam menempuh pendidikan di ITS, penulis merupakan asisten laboratorium Fisika Dasar, Optoelektronika, dan Sistem Fotonika. Selain kegiatan akademik, penulis merupakan anggota dari *Optical Society of America* (OSA) dan juga aktif berpartisipasi dalam kepanitiaan ajang olimpiade nasional Fisika dan seminar-seminar internasional.