

**OPTIMASI DESAIN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK
MENGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN*
(FDTD) UNTUK MENDETEKSI KONSENTRASI INTERLEUKIN-17**

SKRIPSI

Oleh:
ALIFA RAISAN NAFILA
NIM. 220604110056



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN JUDUL

**OPTIMASI DESAIN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK
MENGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN*
(FDTD) UNTUK MENDETEKSI KONSENTRASI INTERLEUKIN-17**

SKRIPSI

**Diajukan Kepada:
Fakultas Sains Dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
ALIFA RAISAN NAFILA
NIM. 220604110056**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

OPTIMASI DESAIN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK
MENGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)
UNTUK MENDETEKSI KONSENTRASI INTERLEUKIN-17

SKRIPSI

Oleh:

ALIFA RAISAN NAFILA

NIM. 220604110056

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji
Pada tanggal 18 Juni 2026

Pembimbing I

Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si.

NIP. 19871502 202321 2 031

Pembimbing II

Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I.

NIP. 19790502 202321 2 024



Mengetahui,
Ketua Program Studi

Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T.

NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

OPTIMASI DESAIN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK
MENGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)
UNTUK MENDETEKSI KONSENTRASI INTERLEUKIN-17

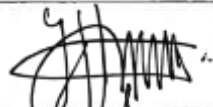
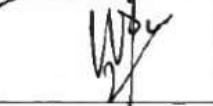
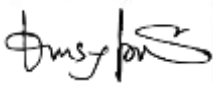
SKRIPSI

Oleh:

ALIFA RAISAN NAFILA

NIM. 220604110056

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal 26 Juni 2026

Penguji Utama :	<u>Dr. Imam Tazi, M.Si.</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
Ketua Penguji :	<u>Khusnul Yakin, M.Si., Ph.D.</u> NIP. 19910103 201903 1 009	
Sekretaris Penguji :	<u>Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si.</u> NIP. 19871502 202321 2 031	
Anggota Penguji :	<u>Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I.</u> NIP. 19790502 202321 2 024	



Mengesahkan,
Ketua Program Studi


Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T.
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Alifa Raisan Nafila
NIM : 220604110056
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Optimasi Desain Sensor SPR berbasis Fiber Optik
menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain*
(FDTD) untuk Mendeteksi Konsentrasi Interleukin-17

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar Pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 26 Juni 2026
Yang membuat Pernyataan



Alifa Raisan Nafila
220604110056

MOTTO

"All our dreams can come true, if we have the courage to pursue them."

"Semua impian kita dapat menjadi kenyataan jika kita memiliki keberanian untuk
mengejarinya."

Walt Disney

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Mama tercinta Ibu Kurratul Aini, perempuan pertama yang mengajarkan arti kasih sayang, ketulusan, dan kekuatan. Terima kasih atas setiap doa yang tak pernah putus mengiringi setiap langkahku, atas setiap air mata yang diam-diam Mama sembunyikan, serta setiap pengorbanan yang mungkin tak akan pernah mampu kubalas seumur hidup. Terima kasih telah menjadi rumah ternyaman, tempatku pulang ketika lelah, dan penyemangat terbesar di setiap proses yang kulalui. Aku tahu perjalanan ini bukan hanya tentang perjuanganku, tetapi juga tentang perjuangan Mama yang dengan penuh kesabaran dan keikhlasan mendampingi hingga mampu berdiri di titik ini. Terima kasih karena telah mempercayaku, menguatkan ketika aku hampir menyerah, dan selalu mengusahakan yang terbaik demi pendidikanku. Semoga setiap lelah yang Mama rasakan dibalas Allah Swt. dengan kesehatan, kebahagiaan, umur yang penuh keberkahan, serta surga yang telah dijanjikan-Nya. Skripsi ini adalah salah satu wujud kecil dari rasa terima kasih dan baktiku untuk Mama.
2. Ayah tercinta Bapak Abdul Kadir Djailani, sosok yang mungkin tidak selalu banyak mengungkapkan perasaan melalui kata-kata, tetapi selalu membuktikan kasih sayangnya melalui setiap tetes keringat, kerja keras, dan pengorbanan. Terima kasih karena telah menjadi tulang punggung keluarga, bekerja tanpa mengenal lelah, serta mengorbankan begitu banyak hal agar aku dapat memperoleh pendidikan dan menggapai cita-cita. Di balik setiap langkah yang berhasil kutempuh hingga hari ini, ada perjuangan Ayah yang sering kali tidak terlihat. Ada doa yang diam-diam dipanjatkan, ada rasa lelah yang

disembunyikan, dan ada harapan besar yang selalu Ayah titipkan untuk masa depanku. Terima kasih karena tidak pernah berhenti percaya bahwa aku mampu menyelesaikan perjalanan ini. Semoga Allah Swt. membalas setiap pengorbanan Ayah dengan kesehatan, rezeki yang berlimpah, kebahagiaan, serta keberkahan dalam setiap langkah kehidupan. Semoga pencapaian ini menjadi awal dari kemampuanku untuk membahagiakan Ayah dan membalas sedikit dari begitu besarnya pengorbanan yang telah Ayah berikan.

3. Adik-adikku tersayang Alifani Najwa Zaida dan Alif Fauzan Al Azmi, terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidupku, menghadirkan tawa di tengah lelah, dan menjadi penyemangat untuk terus berjuang. Semoga apa yang telah kuapai hari ini dapat menjadi motivasi bagi kalian untuk terus belajar, berusaha, dan tidak pernah menyerah dalam meraih impian. Teruslah menjadi pribadi yang baik, rendah hati, dan membanggakan keluarga.
4. Untuk seseorang yang telah hadir dan menjadi bagian dari perjalanan penulis selama hampir dua tahun terakhir, Aldhito Rizq Maulana, terima kasih karena tidak pernah lelah mendengarkan setiap keluhan kesah, merangkul setiap keraguan, dan menguatkan setiap kali aku hampir menyerah. Terima kasih karena selalu memilih untuk tetap ada, bukan hanya pada hari-hari yang mudah, tetapi juga pada hari-hari ketika aku dipenuhi rasa lelah, takut, dan ragu.
5. Tak lupa juga kepada diri saya sendiri Alifa Raisan Nafila, terima kasih karena telah bertahan sejauh ini. Terima kasih karena memilih untuk bangkit setiap kali merasa lelah, tetap melangkah meskipun sering dihipnotis rasa takut dan ragu, serta tidak menyerah pada setiap tantangan yang datang. Perjalanan ini tidak selalu mudah, tetapi kamu berhasil melewatinya dengan segala kekuatan yang

kamu miliki. Skripsi ini menjadi bukti bahwa setiap usaha, doa, air mata, dan kesabaran tidak pernah sia-sia. Semoga pencapaian ini menjadi awal dari perjalanan yang lebih indah, pengingat untuk selalu bersyukur, terus belajar, serta tidak pernah berhenti mengejar mimpi. Terima kasih telah bertahan hingga hari ini.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'ālamīn, segala puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala limpahan rahmat, karunia, taufik, hidayah, serta kasih sayang-Nya, sehingga penulis diberikan kekuatan, kesehatan, dan kemudahan dalam menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Desain Sensor Surface Plasmon Resonance (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan *Metode Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) untuk Mendeteksi Konsentrasi Interleukin-17”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad saw., beserta keluarga, para sahabat, dan seluruh umatnya yang istiqamah mengikuti ajaran beliau hingga akhir zaman.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, arahan, bimbingan, doa, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada: Allah Swt. yang senantiasa melimpahkan rahmat, nikmat, serta pertolongan-Nya, sehingga setiap kesulitan yang dihadapi dapat dilalui dengan baik dan skripsi ini dapat terselesaikan.

1. Ibu Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Bapak Dr. H. Agus Mulyono, M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3. Bapak Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T., selaku Ketua Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan motivasi dengan penuh kesabaran selama proses penyusunan skripsi ini hingga dapat terselesaikan dengan baik.
5. Ibu Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I., selaku dosen pembimbing integrasi yang telah memberikan bimbingan, dan berbagai masukan yang membangun dengan penuh kesabaran selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si. selaku dosen penguji utama dan bapak Khusnul Yakin, M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji anggota. Terima kasih atas berbagai saran dan masukan yang diberikan sebagai bahan evaluasi dalam penyempurnaan skripsi ini.
7. Ibu Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si. selaku dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan, perhatian, serta dukungan yang senantiasa diberikan kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan.
8. Segenap dosen, laboran, dan tenaga kependidikan Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah memberikan ilmu, bantuan, serta pelayanan kepada penulis selama menempuh pendidikan.
9. Ayah, Mama, Adik-adik dan keluarga besar yang senantiasa mendoakan, memberikan kasih sayang, kepercayaan, motivasi, serta dukungan yang tiada henti, baik secara moral maupun material.

10. Teman-teman peminatan Elektronika dan Instrumentasi yang telah menjadi rekan belajar, berdiskusi, bertukar ilmu, serta saling memberikan dukungan, motivasi, dan semangat selama proses penyusunan skripsi ini.
11. Teman-teman aasexy, yang telah menemani perjalanan penulis sejak awal menjadi mahasiswa hingga akhirnya menyelesaikan studi ini.
12. Teman-teman biofisika di lab medan magnet, yang telah menemani dan membantu proses penyusunan skripsi ini.
13. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, dukungan, doa, dan kontribusi selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki berbagai keterbatasan dan jauh dari kata sempurna. Hal tersebut tidak terlepas dari keterbatasan pengetahuan, pengalaman, serta kemampuan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, penulis dengan segala kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan di masa yang akan datang. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi salah satu referensi yang berguna bagi pembaca maupun bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Fisika.

Malang, 26 Juni 2026
Penulis,

Alifa Raisan Nafila

DAFTAR ISI

COVER	1
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
مستخلص البحث.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. <i>Surface Plasmon Resonance</i> (SPR)	7
2.1.1. Persamaan Maxwell.....	7
2.1.2. Gelombang Cahaya.....	13
2.1.3. Fenomena Eksitasi <i>Surface Plasmons</i> (SPs).....	15
2.1.4. Karakteristik Logam Ag, Au, dan Cu	16
2.1.5. Sensor <i>Surface plasmon resonance</i> berbasis Fiber Optik.....	18
2.1.6. Parameter Sensor <i>Surface Plasmon Resonance</i>	21
2.2. <i>Finite-Difference Time-Domain</i> (FDTD)	23
2.3. Konsentrasi Interleukin-17.....	25
2.3.1. Fungsi Biologis dan Peran sebagai Biomarker	26
2.4. Keterkaitan Penelitian dalam Prespektif Islam	29
BAB III METODE PENELITIAN	32
3.1. Jenis Penelitian.....	32
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....	32
3.3. Alat dan Bahan.....	32
3.3.1. Mengukur Indeks Bias Interleukin-17	32
3.3.2. Simulasi <i>Software Ansys Lumerical</i> FDTD	33
3.4. Diagram Alir Penelitian	33
3.4.1. Mengukur Indeks Bias Interleukin-17	34
3.4.2. Simulasi <i>Software Ansys Lumerical</i> FDTD	34
3.5. Prosedur Penelitian	34
3.5.1. Pengambilan Data	35

3.5.2.	Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17.....	35
3.5.3.	Simulasi <i>Software Ansys Lumerical FDTD</i>	36
3.6.	Pengambilan Data	37
3.7.	Analisis Data.....	39
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1.	Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17.....	41
4.2.	Hasil Pengujian Variasi Jenis Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR	42
4.3.	Hasil Pengujian Variasi Ketebalan Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR.....	45
4.4.	Hasil Pengujian Variasi Panjang <i>Probe Sensing</i> terhadap Kinerja Sensor SPR	47
4.5.	Hasil Pengujian Variasi Indeks Bias Interleukin-17	50
4.6.	Pembahasan.....	54
4.6.1.	Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17.....	54
4.6.2.	Pengujian Variasi Jenis Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR	55
4.6.3.	Pengujian Variasi Ketebalan Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR	58
4.6.4.	Pengujian Variasi Panjang <i>Probe Sensing</i> terhadap Kinerja Sensor SPR	61
4.6.5.	Pengujian Variasi Indeks Bias	64
4.6.6.	Keterkaitan Hasil Penelitian dalam Prespektif Islam	68
BAB V	PENUTUP	78
5.1.	Kesimpulan	78
5.2.	Saran	79
DAFTAR PUSTAKA		81
LAMPIRAN.....		84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Aftab et al., 2024).....	13
Gambar 2.2	Struktur Dasar Fiber Optik (Topani et al., 2017)	19
Gambar 2.3	Keluarga Sitokin dan Reseptor Interleukin-17 (Beringer et al., 2016).....	25
Gambar 2.4	Berbagai Target dan Antagonis Jalur IL-23/IL-17 (Yeremenko et al., 2014).....	27
Gambar 3.1	Diagram Alir Mengukur Indeks Bias Interleukin17.....	34
Gambar 3.2	Diagram Alir Simulasi menggunakan <i>Software Ansys Lumerical FDTD</i>	34
Gambar 3.3	Desain SPR berbasis Fiber Optik pada <i>Software Ansys Lumerical FDTD</i>	36
Gambar 4.1	Grafik Konsentrasi dengan Indeks Nilai Bias Interleukin-17	42
Gambar 4.2	Spektrum transmitansi SPR pada material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga).....	43
Gambar 4.3	Grafik Nilai <i>Figure of Merit</i> , <i>Detection Accuracy</i> dan <i>Quality Factor</i> material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga).	44
Gambar 4.4	Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga).....	44
Gambar 4.5	Spektrum transmitansi SPR pada material logam Au (emas) dengan ketebalan 10 – 80 nm.....	45
Gambar 4.6	Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) dengan ketebalan 10 – 80 nm.	46
Gambar 4.7	Grafik Nilai <i>Figure of Merit</i> , <i>Detection Accuracy</i> dan <i>Quality Factor</i> material logam Au dengan ketebalan 10 – 80 nm.	47
Gambar 4.8	Spektrum transmitansi SPR material logam Au (emas) dengan ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 100 – 300 μm	48
Gambar 4.9	Grafik Nilai <i>Figure of Merit</i> , <i>Detection Accuracy</i> dan <i>Quality Factor</i> pada ketebalan 40 nm dengan panjang probe sensing 100 – 300 μm	49
Gambar 4.10	Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) pada ketebalan 40 nm dengan panjang probe sensing 100 – 300 μm	49
Gambar 4.11	Spektrum transmitansi SPR pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm	51
Gambar 4.12	Grafik Nilai <i>Figure of Merit</i> , <i>Detection Accuracy</i> dan <i>Quality Factor</i> pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm dengan variasi indeks bias IL-17.	53
Gambar 4.13	Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm	52
Gambar 4.14	Grafik Hubungan antara Konsentrasi Interleukin-17 terhadap Transmitansi minimum resonansi.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17.....	37
Tabel 3.2	Data Pengaruh Jenis Logam terhadap Performa Sensor	38
Tabel 3.3	Data Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan Logam terhadap Performa Sensor	38
Tabel 3.4	Data Pengaruh Variasi Panjang <i>Probe Sensing</i> terhadap Performa Sensor	38
Tabel 4.1	Data Hasil Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17	41
Tabel 4.2	Kesesuaian Penelitian dengan <i>Maqāṣid asy-Syarī'ah</i>	75

ABSTRAK

Nafila, Alifa Raisan. 2026. Optimasi Desain Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) untuk Mendeteksi Konsentrasi Interleukin-17. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si. (II) Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I.

Kata Kunci: *Surface Plasmon Resonance* (SPR), Fiber Optik, *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD), Interleukin-17.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 (IL-17). Optimasi dilakukan melalui variasi jenis material plasmonik, ketebalan lapisan logam, dan panjang *probe sensing*. Material yang digunakan meliputi perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu), dengan variasi ketebalan lapisan logam 10–80 nm serta panjang *probe sensing* 100–300 μm . Kinerja sensor dievaluasi berdasarkan parameter sensitivitas (S), *Detection Accuracy* (DA), *Quality Factor* (QF), dan *Figure of Merit* (FoM). Hasil simulasi menunjukkan bahwa material emas (Au) menghasilkan performa sensor terbaik dibandingkan Ag dan Cu. Variasi ketebalan lapisan logam menunjukkan bahwa ketebalan 40 nm memberikan respons resonansi yang paling optimal dengan sensitivitas tertinggi dan karakteristik spektrum yang baik. Variasi panjang *probe sensing* menunjukkan bahwa panjang 300 μm menghasilkan sensitivitas, QF, dan FoM tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Pengujian terhadap variasi indeks bias IL-17 memperlihatkan terjadinya perubahan intensitas secara konsisten seiring peningkatan indeks bias, yang menunjukkan kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan konsentrasi IL-17. Konfigurasi sensor SPR berbasis fiber optik dengan material emas (Au), ketebalan lapisan logam 40 nm, dan panjang *probe sensing* 300 μm merupakan desain optimum untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 secara sensitif dan akurat.

ABSTRACT

Nafila, Alifa Raisan. 2026. **Optimization of a Fiber Optic-Based SPR Sensor Design Using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Detecting Interleukin-17 Concentration.** Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Supervisors: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si. (II) Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I.

Keywords: Surface Plasmon Resonance (SPR), Fiber Optic, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Interleukin-17.

This study aims to optimize the design of a fiber optic-based Surface Plasmon Resonance (SPR) sensor using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method for detecting Interleukin-17 (IL-17) concentration. The optimization was carried out by varying the type of plasmonic material, metal layer thickness, and sensing probe length. The plasmonic materials investigated were silver (Ag), gold (Au), and copper (Cu), with metal layer thicknesses ranging from 10 to 80 nm and sensing probe lengths ranging from 100 to 300 μm . Sensor performance was evaluated based on sensitivity (S), *Detection Accuracy* (DA), *Quality Factor* (QF), and *Figure of Merit* (FoM). The simulation results showed that gold (Au) exhibited the best sensor performance compared to Ag and Cu. The variation in metal layer thickness indicated that a thickness of 40 nm provided the most optimal resonance response, yielding the highest sensitivity and favorable spectral characteristics. Furthermore, the variation in sensing probe length demonstrated that a probe length of 300 μm produced the highest sensitivity, QF, and FoM among all investigated configurations. The analysis of IL-17 refractive index variations revealed a consistent change in intensity with increasing refractive index, indicating the sensor's capability to detect changes in IL-17 concentration. A fiber optic-based SPR sensor configuration employing gold (Au) as the plasmonic material, a metal layer thickness of 40 nm, and a sensing probe length of 300 μm was found to be the optimum design for sensitive and accurate detection of Interleukin-17 concentration.

مستخلص البحث

نافيلا، أليفا رايسان. ٢٠٢٦. تحسين تصميم مستشعر الرنين البلازموني السطحي (SPR) المعتمد على الألياف البصرية باستخدام طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDTD) للكشف عن تركيز الإنترلوكين-17. البحث الجامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرفان: (الأولى) ويويس ساسميتانينغهدايه، الماجستير، (الثانية) مبشرة، الماجستير

الكلمات المفتاحية: الرنين البلازموني السطحي (SPR)، الألياف البصرية، طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDTD)، الإنترلوكين-17.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين تصميم مستشعر الرنين البلازموني السطحي (SPR) المعتمد على الألياف البصرية باستخدام طريقة الفروق المحدودة في المجال الزمني (FDTD) للكشف عن تركيز الإنترلوكين-17. (IL-17) وقد أُجريت عملية التحسين من خلال دراسة تأثير نوع المادة البلازمونية، وسمك الطبقة المعدنية، وطول منطقة الاستشعار. وشملت المواد البلازمونية المستخدمة الفضة (Ag)، والذهب (Au)، والنحاس (Cu)، مع تغيير سمك الطبقة المعدنية بين ١٠ و ٨٠ نانومتر، وطول منطقة الاستشعار بين ١٠٠ و ٣٠٠ ميكرومتر. وتم تقييم أداء المستشعر اعتمادًا على معايير الحساسية (S)، ودقة الكشف (DA)، ومعامل الجودة (QF)، ومعيار الجدارة (FoM). أظهرت نتائج المحاكاة أن الذهب (Au) حقق أفضل أداء للمستشعر مقارنةً بالفضة والنحاس. كما بينت دراسة تأثير سمك الطبقة المعدنية أن السمك البالغ ٤٠ نانومتر أعطى أفضل استجابة رنينية، حيث حقق أعلى حساسية وخصائص طيفية جيدة. كذلك أظهرت دراسة تأثير طول منطقة الاستشعار أن الطول البالغ ٣٠٠ ميكرومتر حقق أعلى قيم للحساسية ومعامل الجودة ومعيار الجدارة مقارنةً ببقية الأطوال المدروسة. وأظهرت اختبارات تغير معامل الانكسار الخاص بالإنترلوكين-17 حدوث تغير منتظم في شدة الإشارة مع زيادة معامل الانكسار، مما يدل على قدرة المستشعر على الكشف عن التغيرات في تركيز الإنترلوكين-17. وتبين أن التصميم الأمثل لمستشعر SPR المعتمد على الألياف البصرية يتمثل في استخدام الذهب (Au) كمادة بلازمونية، وسمك طبقة معدنية قدره ٤٠ نانومتر، وطول منطقة استشعار يبلغ ٣٠٠ ميكرومتر، لما يوفره من حساسية ودقة عاليتين في الكشف عن تركيز الإنترلوكين-17.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi biosensor dalam bidang biomedis telah menunjukkan adanya kemajuan, terutama dalam upaya mendeteksi biomarker penyakit secara cepat, sensitif, dan non-invasif. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah *surface plasmon resonance* (SPR), sebuah fenomena optik yang terjadi akibat resonansi antara gelombang elektromagnetik dan elektron bebas pada permukaan logam. Perubahan resonansi tersebut sangat sensitif terhadap variasi indeks bias di sekitar permukaan sensor, sehingga SPR menjadi metode unggulan untuk mendeteksi interaksi biomolekul secara real-time dan label-free (Homola, 2008; Rahman et al., 2022). Inovasi dalam bidang kesehatan semakin pesat dan mendukung adanya teknologi pendeteksi biomarker yang lebih efisien, cepat, dan mudah diintegrasikan ke perangkat portabel.

Salah satu biomarker sitokin pro-inflamasi adalah Interleukin-17 (IL-17), yang berperan penting dalam patogenesis berbagai penyakit kronis seperti psoriasis, rheumatoid arthritis, kanker, penyakit autoimun, serta komplikasi metabolik (Beringer et al., 2016). Deteksi IL-17 pada serum darah sangat penting untuk diagnosis dini dan pemantauan perkembangan penyakit. Selama ini metode ELISA masih sering digunakan, namun teknik tersebut memiliki beberapa keterbatasan seperti waktu proses yang lama, kebutuhan sampel yang banyak, biaya tinggi, serta tidak mendukung pemantauan secara real-time (Leng et al., 2008). Sensor SPR berbasis fiber optik menjadi salah satu solusi karena menggabungkan sensitivitas tinggi SPR dengan fleksibilitas dan ukuran kecil dari fiber optik. Sensor ini dapat

dimodifikasi melalui pelapisan logam seperti emas (Au), perak (Ag), atau tembaga (Cu), yang masing-masing memiliki karakteristik plasmonik berbeda. Emas memiliki stabilitas kimia yang baik, perak memberikan sensitivitas tinggi namun mudah teroksidasi, sedangkan tembaga lebih ekonomis tetapi kurang stabil (Lismont et al., 2012).

Penelitian oleh Hua et al. (2022) memanfaatkan fiber optik untuk mendeteksi biomarker inflamasi yang mengembangkan aptasensor berbasis fiber optik-SPR untuk mendeteksi biomarker inflamasi, namun penelitian tersebut tidak melakukan optimasi numerik maupun analisis struktur sensor secara komprehensif. Penelitian lain oleh Szymanska et al. (2022) memanfaatkan Array-SPRi untuk mendeteksi sitokin IL-6 dalam plasma darah, tetapi platform yang digunakan masih berbasis permukaan planar, sehingga tidak mendukung fleksibilitas dan miniaturisasi seperti pada fiber optik. Selanjutnya, Marzano et al. (2025) berhasil mendeteksi IL-17A menggunakan biochip nanoplasmonik berbasis struktur pollen dengan sensitivitas sangat tinggi, namun teknologi tersebut tidak menerapkan fiber optik serta tidak melibatkan metode simulasi numerik seperti FDTD dalam perancangan sensornya. Lismont et al. (2012) telah membandingkan performa plasmonik Au, Ag, dan Cu menggunakan simulasi FDTD, tetapi penelitian tersebut hanya berfokus pada karakteristik optik material dan tidak diarahkan pada aplikasi biosensing biologis seperti deteksi sitokin. Selain itu, penelitian Aprilina (2025) membahas sensor SPR berbasis fiber optik telah berhasil dilakukan, namun tidak memfokuskan diri pada deteksi biomarker biologis, tidak menargetkan IL-17. Belum ada penelitian yang secara komprehensif menggabungkan sensor SPR berbasis fiber optik, metode simulasi *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) yang merupakan metode

numerik mensimulasikan interaksi gelombang elektromagnetik dengan struktur sensor secara detail sehingga dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter desain seperti ketebalan logam, panjang gelombang resonansi, serta distribusi medan elektromagnetik (Taflove & Hagness, 2005), variasi material plasmonik, dan pengujian terhadap biomarker Interleukin-17.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) berbasis fiber optik yang memanfaatkan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Tujuan utama penelitian ini adalah merancang dan mengoptimalkan kinerja sensor untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Evaluasi kinerja sensor dilakukan melalui analisis beberapa parameter, yaitu sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), faktor kualitas (QF), dan *Figure of Merit* (FOM). Melalui proses optimasi desain dan karakteristik sensor, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan metode deteksi konsentrasi Interleukin-17 yang lebih akurat dan efisien, serta memiliki potensi untuk diterapkan secara praktis dalam pengembangan sistem deteksi biomolekul berbasis fiber optik.

Pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi merupakan bagian dari upaya manusia dalam memahami ciptaan Allah serta memberikan manfaat bagi kehidupan. Sebagaimana firman Allah SWT dalam Q.S. Al-Mujadilah (58): 11:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَافْسَحُوا يَفْسَحِ اللَّهُ لَكُمْ وَإِذَا قِيلَ انشُرُوا فَانْشُرُوا يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ ﴿١١﴾

“Wahai orang-orang yang beriman, apabila dikatakan kepadamu “Berilah kelapangan di dalam majelis-majelis,” lapangkanlah, niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Apabila dikatakan, “Berdirilah,” (kamu) berdirilah. Allah niscaya akan mengangkat orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-

orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Allah Maha teliti terhadap apa yang kamu kerjakan.” (Q.S. Al-Mujadilah (58): 11).

Q.S. Al-Mujadilah ayat 11 menjelaskan bahwa Allah akan meninggikan derajat orang-orang yang beriman dan berilmu. Ayat ini menunjukkan bahwa ilmu pengetahuan memiliki kedudukan yang sangat mulia karena melalui ilmu manusia dapat memahami ciptaan Allah serta memberikan manfaat bagi sesama. Orang yang memiliki ilmu juga dianjurkan untuk memiliki adab yang baik, menghormati orang lain, dan memanfaatkan ilmunya untuk kebaikan (Ibnu Katsir, 2005). Dalam penelitian ini, ayat tersebut berkaitan dengan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang kesehatan, khususnya dalam perancangan sensor *Surface Plasmon Resonance* berbasis fiber optik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* untuk mendeteksi biomarker penyakit berupa Interleukin-17. Penelitian ini merupakan bentuk pemanfaatan ilmu fisika untuk membantu pengembangan teknologi deteksi penyakit yang lebih sensitif dan efisien sehingga dapat memberikan manfaat bagi masyarakat di bidang kesehatan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana menentukan indeks bias isolate Interleukin-17 (IL-17)?
2. Bagaimana optimasi jenis bahan lapisan tipis logam perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu) untuk deteksi konsentrasi Interleukin-17?
3. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan lapisan logam terhadap perubahan intensitas dalam mendeteksi konsentrasi IL-17?
4. Bagaimana respons panjang *probe sensing* terhadap sensitivitas sensor akibat konsentrasi IL-17?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Untuk menentukan indeks bias isolate Interleukin-17 (IL-17).
2. Untuk mengetahui optimasi jenis bahan lapisan tipis logam perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu) untuk deteksi konsentrasi Interleukin-17.
3. Untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan lapisan logam terhadap perubahan intensitas dalam mendeteksi konsentrasi IL-17.
4. Untuk menganalisis respons panjang *probe sensing* terhadap sensitivitas sensor akibat konsentrasi IL-17.

1.4. Batasan Masalah

1. Simulasi FDTD dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak Ansys *Lumerical* FDTD pada model 2D menggunakan material pelapis perak (Ag), emas (Au) dan tembaga (Cu) dengan ketebalan dari 10 nm – 80 nm dengan interval 10 nm.
2. Fiber optik yang dimodelkan adalah *single mode* dan sumber cahaya yang diinjeksikan memiliki panjang gelombang broadband dengan rentang 300 – 1200 nm.
3. Panjang *probe sensing* divariasikan pada panjang 100 μm , 200 μm , dan 300 μm .
4. Parameter yang digunakan dalam analisis sensor SPR untuk mendeteksi konsentrasi interleukin-17 adalah sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), faktor kualitas (QF) dan *Figure of Merit* (FOM).
5. Indeks bias hanya pada *Phosphate-Buffered Saline* (PBS) dan interleukin-17 dengan konsentrasi 50 pg/mL, 100 pg/mL, 150 pg/mL dan 200 pg/mL.
6. Observasi sinyal sensor hanya terbatas pada respon optik.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu memberikan kontribusi dalam penerapan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) untuk optimasi desain sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) berbasis fiber optik, meningkatkan akurasi dan sensitivitas deteksi biomarker seperti IL-17, memperkaya pengetahuan teknik dalam optimasi desain sensor optik pada metode simulasi FDTD, dan meningkatkan inovasi teknologi kesehatan yang lebih terjangkau dan akurat, berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup pasien serta kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Surface Plasmon Resonance* (SPR)

Sensor *surface plasmon resonance* (SPR) merupakan teknologi biosensing optik yang mendeteksi perubahan indeks bias di permukaan logam akibat interaksi antara molekul target dan ligan yang terimmobilisasi. Ketika cahaya terpolarisasi diarahkan pada lapisan logam (biasanya emas) melalui prisma atau serat optik, akan terjadi penurunan intensitas refleksi pada sudut tertentu yang disebut *resonance angle*. Pergeseran sudut ini menunjukkan adanya perubahan massa atau konsentrasi molekul di permukaan sensor akibat peristiwa pengikatan biomolekul. SPR memiliki keunggulan karena bersifat *label-free*, mampu memberikan data kinetika secara real time, dan sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam indeks bias (hingga 10^{-8} RIU) (Schasfoort et al., 2017).

Sensor *surface plasmon resonance* (SPR) beroperasi dengan memantau perubahan indeks bias dari sampel atau analit yang diuji. Ketika indeks bias analit mengalami penurunan, karakteristik gelombang *surface plasmon* turut berubah sehingga menggeser kondisi resonansi antara plasmon permukaan dan cahaya yang datang. Pergeseran resonansi ini menjadi dasar utama dari mekanisme deteksi SPR. Karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan pada skala nanometer, teknologi ini sangat potensial untuk berbagai aplikasi, terutama dalam mendeteksi keberadaan dan konsentrasi analit pada sampel cair (Tazi, 2023).

2.1.1. Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan dasar utama dalam memahami fenomena *surface plasmon resonance* (SPR) karena menjelaskan interaksi antara medan

elektromagnetik dan elektron bebas di permukaan logam. Dalam konteks sensor SPR, Persamaan ini digunakan untuk menggambarkan bagaimana gelombang elektromagnetik (cahaya datang) berinteraksi dengan permukaan logam dan menimbulkan osilasi kolektif elektron yang disebut *surface plasmon polariton* (SPP) (Aftab et al., 2024).

Persamaan Maxwell pertama diperkenalkan pada tahun 1861 dan memberikan prediksi teoretis mengenai keberadaan gelombang elektromagnetik (EM). Fenomena ini kemudian dibuktikan secara eksperimental oleh Hertz pada tahun 1886. Persamaan Maxwell menjadi dasar bagi perkembangan komunikasi nirkabel, fotonik, dan teknologi komunikasi berbasis cahaya. Pada tahun 1861, Maxwell juga memperkenalkan arus perpindahan $\partial D/\partial t$ dalam Hukum Ampere untuk memenuhi prinsip kekekalan muatan, di mana D merupakan vektor perpindahan listrik. Secara umum, Persamaan Maxwell membentuk teori fundamental gelombang dan cahaya elektromagnetik, sehingga memiliki peran penting dalam bidang komunikasi dan optik (Wang, 2020).

Dalam teori elektromagnetik, terdapat tiga hukum yang menjadi dasar pembentukan konsep medan listrik dan magnet. Pertama, Hukum Faraday menjelaskan fenomena induksi elektromagnetik, yaitu munculnya gaya gerak listrik pada suatu kumparan akibat perubahan fluks magnet yang melintasinya. Kedua, Hukum Ampere menyatakan bahwa integral garis dari medan magnet di sepanjang lintasan tertutup yang mengelilingi arus listrik sebanding dengan besar arus yang melewati lintasan tersebut. Ketiga, Hukum Gauss berhubungan dengan distribusi medan listrik dan magnet yang secara khusus, hukum ini menyatakan bahwa fluks listrik yang menembus suatu permukaan tertutup berbanding lurus

dengan jumlah muatan listrik total yang berada di dalam permukaan tersebut. Maka, Persamaan Maxwell dalam satuan Standart Internasional adalah sebagai berikut (Siregar, 2016):

$$\oint_C \vec{F} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \int_A \left(\vec{j} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \hat{n} dA \quad \nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon \int_A \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \int_V \rho dV \quad \nabla \times \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\int_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA = 0 \quad \nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Pada Persamaan diatas, $\vec{E}$ menyatakan medan listrik, $\vec{H}$ menyatakan medan magnet, $\vec{D}$ merupakan kerapatan fluks listrik, dan $\vec{B}$ merupakan kerapatan fluks magnet, $\vec{j}$ menyatakan rapat arus listrik dan ρ merupakan rapat muatan listrik dalam medium.

Hubungan antara medan listrik dan medan magnet dengan sifat material dinyatakan melalui Persamaan konstitutif sebagai berikut:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

dimana ε merupakan permitivitas medium dan μ merupakan permeabilitas medium. Kedua parameter ini digunakan untuk menentukan bagaimana gelombang elektromagnetik merambat di dalam suatu material. Untuk memperoleh Persamaan elektromagnetik, dilakukan operasi curl terhadap Persamaan Faraday pada Persamaan 2.1:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) \quad (2.7)$$

dengan menggunakan identitas vektor:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \cdot \vec{E} \quad (2.8)$$

pada medium tanpa muatan bebas ($\rho = 0$), berlaku:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

sehingga Persamaan (2.8) menjadi:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla^2 \cdot \vec{E} \quad (2.10)$$

selanjutnya, dengan mensubstitusikan Persamaan (2.1) ke Persamaan (2.10), diperoleh:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (2.11)$$

dengan menggunakan hubungan konstitutif $\vec{B} = \mu \vec{H}$ serta Persamaan Maxwell (2.2), maka diperoleh:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \nabla \times \vec{H} \quad (2.12)$$

pada medium tanpa arus listrik bebas ($J = 0$), Persamaan (2.2) menjadi:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.13)$$

karena $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, maka

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

sehingga

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

dengan mensubstitusikan Persamaan (2.15) ke Persamaan (2.11), diperoleh

$$-\nabla^2 \cdot \vec{E} = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

atau dapat dituliskan sebagai

$$\nabla^2 \cdot \vec{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) merupakan Persamaan gelombang elektromagnetik, yang menunjukkan bahwa medan listrik merambat dalam medium dengan kecepatan

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.18)$$

Energi yang dibawa oleh gelombang elektromagnetik dinyatakan melalui vektor Poynting, yang didefinisikan sebagai:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.19)$$

Vektor ini menunjukkan rapat aliran energi elektromagnetik yang melewati suatu permukaan. Pada analisis domain frekuensi, nilai rata-rata waktu dari vector Poynting dinyatakan sebagai:

$$\vec{S}_{avg} = \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (2.20)$$

di mana Re menyatakan bagian real dari hasil perkalian vektor dan H^* merupakan kompleks konjugat dari medan magnet.

Daya optik yang melewati suatu permukaan A dapat dihitung dengan mengintegralkan fluks vektor Poynting terhadap luas permukaan tersebut sehingga diperoleh:

$$P(f) = \int_A \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \hat{n} dA \quad (2.21)$$

Dalam simulasi menggunakan metode Finite-Difference Time-Domain, nilai medan listrik dan medan magnet dihitung secara numerik berdasarkan Persamaan Maxwell pada domain waktu dan ruang. Nilai medan tersebut kemudian digunakan untuk menghitung daya yang melewati suatu permukaan monitor melalui integral vektor Poynting. Transmisi optik didefinisikan sebagai perbandingan antara daya yang melewati monitor transmisi terhadap daya yang dipancarkan oleh sumber gelombang. Secara matematis, transmisi dinyatakan sebagai:

$$P(f) = \frac{P_{monitor}(f)}{P_{source}} \quad (2.22)$$

Dalam perangkat lunak Ansys *Lumerical* FDTD, Persamaan transmisi dituliskan sebagai:

$$P(f) = \frac{\frac{1}{2} \text{real}(P(f)_{\text{monitor}})}{\text{source power}} \quad (2.23)$$

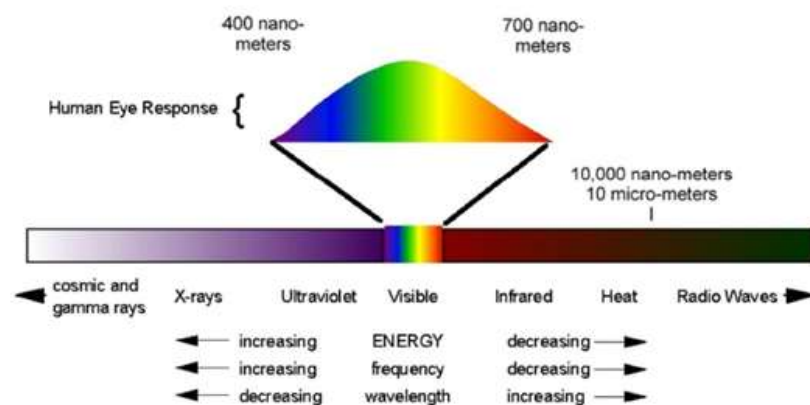
di mana $P(f)_{\text{monitor}}$ merupakan daya yang dihitung dari integral vektor Poynting pada permukaan monitor. Nilai transmisi ini kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik spektrum transmisi dari struktur optik yang disimulasikan. Besarnya daya transmisi yang terukur dinyatakan dalam bentuk daya ternormalisasi, yang dihitung menggunakan Persamaan (2.24):

$$T(f) = \frac{\frac{1}{2} \text{real}(P(f)^{\text{Monitor}}) \cdot dS}{\text{source power}} \quad (2.24)$$

di mana $T(f)$ menyatakan daya transmisi ternormalisasi sebagai fungsi frekuensi, $T(f)$ merupakan vektor poynting yang merepresentasikan aliran daya elektromagnetik, dan dS adalah elemen permukaan normal pada bidang monitor (Al-Qazwini et al., 2013). Nilai daya transmisi ternormalisasi ini digunakan untuk membentuk kurva transmisi SPR, sehingga posisi minimum resonansi dapat diidentifikasi dan dianalisis lebih lanjut.

2.1.2. Gelombang Cahaya

Gelombang cahaya pada dasarnya merupakan getaran periodik yang merambat melalui ruang dan membawa energi tanpa memerlukan medium material. Cahaya menunjukkan sifat-sifat gelombang seperti interferensi, difraksi, dan polarisasi sehingga memperkuat pemahamannya sebagai fenomena gelombang fisik. Pemahaman ini berkembang ketika James Clerk Maxwell menjelaskan bahwa cahaya merupakan bagian dari spektrum gelombang elektromagnetik, yaitu gelombang yang muncul dari perubahan medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus serta merambat pada kecepatan cahaya di ruang hampa. Dengan demikian, cahaya dapat dipandang sebagai manifestasi dari dinamika elektromagnetik yang diatur oleh Persamaan Maxwell dan menjadi dasar berbagai teknologi optik modern, termasuk sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik (Tachibana et al., 2017).



Gambar 2.1 Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Aftab et al., 2024)

Gelombang elektromagnetik merupakan bentuk energi yang merambat melalui ruang dalam bentuk osilasi medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus serta tidak memerlukan medium perambatan. Spektrum elektromagnetik mencakup berbagai panjang gelombang mulai dari gelombang radio, gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak, ultraviolet, sinar-X hingga

sinar gamma, dengan masing-masing memiliki karakteristik energi dan frekuensi yang berbeda-beda. Dalam konteks ilmiah, gelombang elektromagnetik dibedakan menjadi non-ionizing radiation seperti cahaya tampak dan inframerah, serta ionizing radiation seperti sinar-X dan sinar gamma yang memiliki energi tinggi dan mampu memengaruhi struktur molekul. Energi elektromagnetik ini memiliki peran penting dalam berbagai disiplin ilmu, termasuk bioteknologi, kedokteran, dan fisika material, karena kemampuannya berinteraksi dengan sistem biologis dan material melalui mekanisme eksitasi elektron dan medan elektromagnetik (Zhong et al., 2021).

Gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan melalui Persamaan Maxwell, baik dalam bentuk diferensial maupun integral. Namun, proses untuk memperoleh solusi analitik dari Persamaan tersebut cukup kompleks karena melibatkan banyak variabel dan kondisi batas. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan berbasis komputasi yang dikenal sebagai komputasi elektromagnetik, yaitu metode yang digunakan untuk menganalisis dan memodelkan perilaku gelombang elektromagnetik secara numerik. Salah satu metode komputasi numerik yang umum digunakan dalam analisis ini adalah *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) (Shabrina, 2017).

Fenomena gelombang elektromagnetik dalam konteks fisika terapan dimanfaatkan pada teknologi *Surface plasmon resonance* (SPR) yang berfungsi mendeteksi perubahan indeks bias akibat interaksi antara cahaya terpolarisasi p dengan permukaan logam. Gelombang permukaan plasmon (surface plasmon wave) merupakan bentuk gelombang elektromagnetik yang terlokalisasi di antarmuka antara logam dan medium dielektrik, di mana energi cahaya diserap

untuk membangkitkan osilasi elektron bebas. Dalam konfigurasi Kretschmann, sistem prisma logam–dielektrik digunakan untuk mengeksitasi gelombang plasmon, dan perubahan indeks bias pada lapisan dielektrik menyebabkan pergeseran sudut resonansi SPR. Pergeseran ini dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi biomolekul seperti antigen, antibodi, maupun protein tertentu sehingga menjadikan SPR sebagai teknologi sensor optik yang sangat sensitif dan selektif (Anam et al., 2013).

2.1.3. Fenomena Eksitasi *Surface Plasmons* (SPs)

Menurut Clark (2018), Surface Plasmons (SPs) merupakan osilasi kolektif elektron bebas yang terkuantisasi dan terjadi pada batas antara dua medium, yaitu medium dielektrik dengan permitivitas positif (seperti udara, air, atau kaca) dan medium logam dengan permitivitas negatif (seperti emas atau perak). SPs termasuk dalam jenis gelombang elektromagnetik permukaan yang merambat sepanjang antarmuka kedua medium tersebut, dengan amplitudo yang menurun secara eksponensial menjauhi bidang antarmuka. Eksitasi SPs terjadi ketika vektor gelombang foton dari cahaya datang dapat disesuaikan dengan vektor gelombang SPs. Namun, kondisi ini tidak dapat dicapai hanya dengan penyinaran langsung pada permukaan logam karena adanya ketidakcocokan momentum (*momentum mismatch*).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pada aplikasi sensor seperti *Surface plasmon resonance* (SPR), digunakan teknik kopling prisma yang dikenal sebagai konfigurasi Kretschmann. Pada konfigurasi ini, cahaya difokuskan melalui prisma dengan sudut datang lebih besar dari sudut kritis sehingga menghasilkan gelombang *evanescent* yang menembus lapisan logam tipis.

Gelombang *evanescent* ini memiliki vektor gelombang yang lebih besar, dan pada sudut datang tertentu, komponen vektor gelombang sejajar permukaan (komponen-x) akan identik dengan vektor gelombang SPs. Ketika kondisi pencocokan momentum tercapai, terjadi resonansi di mana energi foton ditransfer secara efisien ke SPs, menyebabkan penurunan tajam intensitas cahaya pantulan yang dikenal sebagai resonance dip pada SPR (Shih & Sanders, 2024).

Fenomena eksitasi ini sangat peka terhadap perubahan indeks bias pada medium dielektrik di sekitar permukaan logam. Dengan demikian, setiap perubahan komposisi atau konsentrasi analit pada medium dielektrik, seperti interaksi biomolekul dengan permukaan sensor, akan memengaruhi vektor gelombang SPs dan menggeser sudut resonansi. Sensitivitas tinggi terhadap perubahan tersebut menjadikan mekanisme eksitasi SPs sebagai dasar utama pengembangan sensor optik ultra-sensitif, khususnya pada biosensor berbasis SPR yang memungkinkan deteksi analit tanpa pelabelan (*label-free detection*), sebagaimana dijelaskan dalam berbagai penelitian mengenai sensor SPR dengan material dielektrik berindeks bias tinggi.

2.1.4. Karakteristik Logam Ag, Au, dan Cu

Secara umum, logam emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) memiliki karakteristik optik yang sangat signifikan terhadap fenomena *Surface plasmon resonance* (SPR) yang menjadi dasar kerja sensor optik berbasis metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Ketiga logam ini termasuk dalam golongan konduktor dengan densitas elektron bebas yang tinggi, sehingga mampu menimbulkan osilasi kolektif elektron bebas saat berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu. Fenomena tersebut

menghasilkan puncak serapan khas pada daerah tampak (VIS) yang disebut *Localized Surface plasmon resonance* (LSPR), di mana intensitas dan posisi puncaknya dipengaruhi oleh ukuran partikel, panjang gelombang cahaya, serta lingkungan dielektriknya. Perubahan puncak LSPR ini dapat digunakan untuk mendeteksi variasi indeks bias akibat adanya biomolekul seperti interleukin-17, menjadikan Au, Ag, dan Cu material penting dalam pengembangan sensor berbasis SPR yang berorientasi pada pengukuran sensitivitas optik tinggi (Tan et al., 2019).

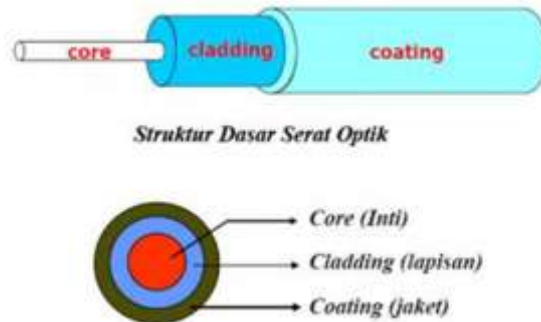
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Tan et al. (2019), nanopartikel emas (AuNPs) menunjukkan puncak serapan kuat pada sekitar 518 nm dengan ukuran partikel rata-rata lebih kecil saat disintesis menggunakan laser 532 nm (sekitar 5 nm) dibandingkan 1064 nm (sekitar 12 nm), menunjukkan efisiensi ablasinya yang tinggi pada panjang gelombang lebih pendek. Nanopartikel perak (AgNPs) memiliki puncak SPR pada kisaran 417 – 421 nm dengan ukuran partikel antara 19 – 32 nm dan konduktivitas listrik serta optik yang tinggi, menjadikannya material unggul dalam menghasilkan respon plasmonik tajam dan redaman optik rendah. Sementara itu, nanopartikel tembaga (CuNPs) memiliki puncak serapan pada rentang 393 – 650 nm dengan kemampuan plasmonik menyerupai Au dan Ag, meskipun kestabilan kimianya lebih rendah akibat kecenderungan oksidasi di lingkungan berair. Dengan demikian, pemilihan Au, Ag, dan Cu sebagai kandidat material dalam optimasi desain sensor SPR berbasis FDTD sangat relevan karena ketiganya mampu menampilkan resonansi optik yang kuat dan sensitif terhadap perubahan indeks

bias, sehingga efektif dalam pengukuran konsentrasi biomolekul seperti interleukin-17.

2.1.5. Sensor *Surface plasmon resonance* berbasis Fiber Optik

Menurut Lee et al. (2021), Sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) berbasis fiber optik merupakan salah satu pengembangan teknologi biosensor optik yang menggabungkan prinsip resonansi plasmon permukaan dengan sistem transmisi serat optik untuk mendeteksi perubahan indeks bias akibat interaksi antara cahaya dan material pada antarmuka logam–dielektrik. Prinsip dasar kerja sensor ini adalah terjadinya resonansi antara gelombang elektromagnetik terpolarisasi transversal magnetik (*transverse magnetic*, TM) dengan elektron bebas pada permukaan logam tipis yang dilapisi pada bagian inti serat optik. Resonansi ini terjadi ketika momentum foton yang datang sama dengan momentum gelombang plasmon permukaan, yang menyebabkan penurunan intensitas cahaya pantul secara signifikan pada panjang gelombang tertentu yang dikenal sebagai panjang gelombang resonansi (λ_{SPR}). Sensor ini memanfaatkan gelombang *evanescent* yang dihasilkan oleh refleksi total internal dalam serat optik untuk menginduksi plasmon permukaan, dan karakteristik resonansinya sangat dipengaruhi oleh jenis logam, ketebalan lapisan, serta lingkungan dielektriknya. Secara umum, fiber optik tersusun atas tiga bagian utama, yaitu inti (*core*), kulit (*cladding*), dan jaket (*coating*). Inti berperan sebagai jalur utama perambatan cahaya dan memiliki nilai indeks bias paling tinggi. Struktur inti berbentuk silinder dan umumnya dibuat dari material silika. Di sekelilingnya terdapat *cladding* yang memiliki indeks bias lebih rendah, berfungsi menjaga dan mempertahankan pemanduan cahaya di dalam inti. Bagian terluar adalah *coating*,

yang berfungsi melindungi inti dan *cladding* dari kerusakan fisik maupun gangguan lingkungan (Hafida & Rubiyanto, 2018).



Gambar 2.2 Struktur Dasar Fiber Optik (Topani et al., 2017)

Ketebalan lapisan logam plasmonik berperan sangat penting dalam menentukan efisiensi resonansi pada sensor SPR berbasis fiber optik, karena lapisan ini merupakan tempat terjadinya interaksi antara gelombang elektromagnetik dan elektron bebas. Ketebalan yang terlalu tipis akan menyebabkan hilangnya energi cahaya akibat redaman tinggi dan eksitasi plasmon yang tidak optimal, sedangkan lapisan yang terlalu tebal akan mengurangi penetrasi medan *evanescent* ke medium sensitif sehingga menurunkan sensitivitas sensor. Nilai ketebalan optimum untuk logam emas (Au) umumnya berada pada kisaran 40 – 60 nm, karena pada rentang tersebut diperoleh keseimbangan antara daya pantul optik dan efisiensi resonansi. Pemilihan jenis logam juga berpengaruh terhadap karakteristik resonansi, emas memiliki stabilitas kimia tinggi dan tahan oksidasi, sedangkan perak (Ag) memiliki respons plasmon yang lebih tajam namun rentan terhadap degradasi oksidatif (Zhou et al., 2019). Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa variasi panjang probe dan material logam dapat mengubah sensitivitas hingga puluhan persen, menunjukkan pentingnya optimasi desain pada tahap simulasi maupun realisasi sensor.

Menurut Scherino et al. (2019), Konfigurasi geometris serat optik memengaruhi distribusi medan *evanescent* yang terbentuk di sekitar lapisan logam dan menentukan seberapa kuat interaksi antara cahaya dan medium sensitif. Desain D-shaped fiber sering digunakan karena bagian inti serat langsung bersentuhan dengan lapisan logam, memungkinkan penetrasi medan *evanescent* yang lebih besar dan peningkatan sensitivitas terhadap perubahan indeks bias. Pada desain *tapered* fiber, diameter serat dipersempit di bagian sensor untuk memusatkan energi optik di area sensing, sedangkan *U-shaped probe* dan *side-polished* fiber meningkatkan interaksi optik melalui pemantulan internal ganda di area berlapis logam. Variasi bentuk geometris ini menentukan posisi puncak resonansi, lebar pita serapan, dan nilai sensitivitas yang diperoleh dari pergeseran panjang gelombang resonansi (λ SPR) akibat perubahan indeks bias medium.

Indeks bias medium sensitif dan lapisan tambahan merupakan faktor yang sangat menentukan posisi dan intensitas puncak resonansi karena memengaruhi kondisi kopling antara foton dan plasmon pada antarmuka logam–dielektrik. Ketika terjadi perubahan indeks bias di sekitar permukaan sensor, misalnya akibat interaksi antara biomolekul seperti interleukin-17 dengan permukaan logam, maka panjang gelombang resonansi akan bergeser secara proporsional terhadap nilai perubahan tersebut. Untuk meningkatkan interaksi optik, sering digunakan lapisan tambahan seperti graphene, oksida logam (misalnya TiO_2 , ZnO , ITO), atau polimer sensitif yang berfungsi memperluas penetrasi medan *evanescent* sekaligus meningkatkan kestabilan kimia sensor.

Penentuan kombinasi material, ketebalan, dan struktur lapisan ini dapat dioptimalkan menggunakan metode simulasi *Finite-Difference Time-Domain*

(FDTD) agar diperoleh desain sensor dengan sensitivitas tinggi dan respon linear terhadap variasi konsentrasi biomolekul. Melalui metode ini, parameter seperti ketebalan lapisan logam, panjang probe fiber, serta jenis material plasmonik dapat diuji secara sistematis untuk menentukan konfigurasi dengan sensitivitas dan *Figure of Merit* (FoM) tertinggi (Shen, 2013). Dalam pengukuran biomolekul seperti interleukin-17 (IL-17), simulasi FDTD dapat digunakan untuk memprediksi respon optik terhadap variasi indeks bias akibat perubahan konsentrasi IL-17 dalam larutan, sehingga desain sensor dapat dioptimalkan agar memiliki kemampuan deteksi hingga level picomolar atau lebih rendah. Dengan demikian, metode FDTD berperan penting dalam merancang sensor SPR berbasis fiber optik yang presisi dan efisien untuk aplikasi biosensing modern.

2.1.6. Parameter Sensor *Surface Plasmon Resonance*

Kinerja sensor SPR berbasis optik dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti sensitivitas, selektivitas, batas dan akurasi deteksi, resolusi, *repeatability*, *reproducibility*, tingkat kebisingan, rentang operasi, waktu respons, linearitas, deviasi, faktor kualitas, dan *Figure of Merit*. Namun, tidak semua parameter tersebut dapat dievaluasi melalui simulasi. Oleh karena itu, penelitian ini hanya memfokuskan pada beberapa parameter yang dapat dihitung melalui simulasi, yaitu sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), faktor kualitas (QF), dan *Figure of Merit* (FOM), yang masing-masing dinyatakan melalui Persamaan sebagai berikut (Mauludi et al., 2024).

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta n} \quad (2.25)$$

$$DA = \frac{1}{FWHM} \quad (2.26)$$

$$QF = \frac{S}{FWHM} \quad (2.27)$$

$$FOM = S \times \left(\frac{1-T_{min}}{FWHM} \right) \quad (2.28)$$

Sensitivitas adalah perubahan sinyal keluaran yang dapat diukur akibat adanya perubahan satu satuan pada besaran analit. Pada sensor SPR berbasis serat optik dengan metode interogasi panjang gelombang, sensitivitas (S) dihitung menggunakan Persamaan 2.25. Akurasi deteksi (DA) menggambarkan kemampuan sensor dalam mendeteksi analit atau konsentrasi analit secara tepat. Nilai DA , sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan 2.26, merupakan rasio antara pergeseran panjang gelombang resonansi dan *full width half maximum* (FWHM). Berdasarkan definisi tersebut, akurasi meningkat ketika perubahan panjang gelombang resonansi semakin besar dan FWHM semakin kecil. Faktor kualitas (QF), yang menunjukkan kualitas keluaran sensor. Nilai QF akan tinggi apabila sensor memiliki sensitivitas besar dan FWHM yang sempit, sesuai dengan Persamaan 2.27. Sementara itu, *Figure of Merit* (FOM) dihitung berdasarkan sensitivitas (S), FWHM, dan nilai transmitansi minimum, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.28. Dari formula tersebut, FOM dikatakan tinggi apabila sensitivitas meningkat, FWHM mengecil, dan transmitansi minimum T_{min} pada panjang gelombang resonansi λ_{spr} semakin dalam (Riana, 2023).

Selain parameter performa, respons sensor SPR dapat diamati menggunakan beberapa metode interogasi, yaitu *wavelength interrogation*, *angular interrogation*, *phase interrogation*, dan *intensity interrogation*. Pada metode *wavelength interrogation*, perubahan indeks bias medium sensing dideteksi melalui pergeseran panjang gelombang resonansi SPR. Metode ini merupakan teknik yang paling banyak digunakan karena mampu memberikan sensitivitas yang tinggi. Sementara itu, *angular interrogation* dilakukan dengan

mengamati perubahan sudut resonansi akibat perubahan indeks bias medium sensing pada panjang gelombang tetap. Metode *phase interrogation* memanfaatkan perubahan fase cahaya yang terjadi di sekitar kondisi resonansi sehingga mampu menghasilkan sensitivitas yang sangat tinggi, meskipun sistem pengukurannya relatif lebih kompleks (Homola, 2018).

Berbeda dengan ketiga metode tersebut, *intensity interrogation* mendeteksi perubahan indeks bias berdasarkan perubahan intensitas cahaya yang terukur pada panjang gelombang atau sudut tertentu. Perubahan indeks bias akan memengaruhi kondisi resonansi SPR sehingga menyebabkan perubahan nilai transmitansi atau reflektansi cahaya. Metode ini banyak digunakan karena mekanisme pengukurannya relatif sederhana serta tidak memerlukan analisis pergeseran panjang gelombang maupun sudut resonansi secara langsung (Cennamo et al., 2017).

2.2. *Finite-Difference Time-Domain (FDTD)*

Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) digunakan sebagai pendekatan komputasi utama untuk menganalisis serta mengoptimalkan kinerja sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) berbasis serat optik. Metode ini merupakan teknik numerik yang efektif dalam menyelesaikan Persamaan Maxwell pada domain waktu dan ruang dengan cara mendiskretisasi medan listrik dan medan magnet dalam bentuk jaringan spasial yang dikenal sebagai yee cell. Kedua medan tersebut dihitung secara bergantian pada setiap interval waktu diskrit untuk memperoleh gambaran evolusi gelombang elektromagnetik (Lotan, 2017). Dalam penelitian ini, metode FDTD digunakan untuk mensimulasikan interaksi antara gelombang cahaya yang merambat di dalam serat optik dengan lapisan logam tipis

(bahan plasmonik) dan medium sekitarnya (analit), sehingga memungkinkan analisis karakteristik optik sensor secara akurat.

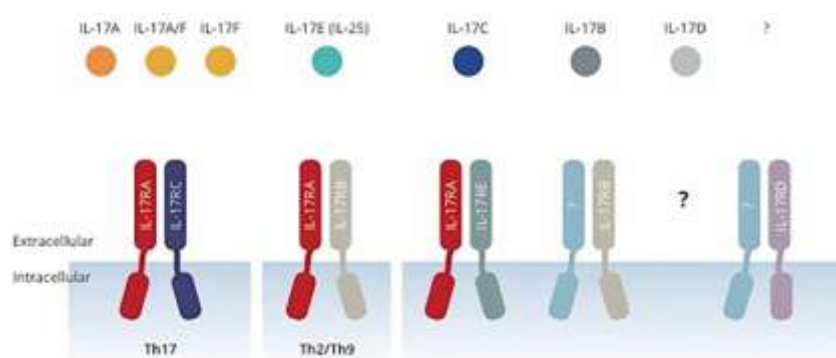
Menurut Wan et al. (2017), penerapan metode FDTD pada simulasi sensor SPR berbasis serat optik sangat penting karena mampu menggambarkan fenomena eksitasi *Surface Plasmon* (SP) secara visual maupun kuantitatif. Simulasi diawali dengan penyuntikan pulsa gelombang elektromagnetik ke dalam serat optik, kemudian metode FDTD menghitung penyebaran gelombang *evanescent* yang muncul dari inti serat dan berinteraksi dengan elektron bebas di permukaan logam. Dalam tahap optimasi, parameter desain seperti ketebalan lapisan logam, jenis bahan dielektrik, serta bentuk geometris serat divariasikan untuk memperoleh hasil yang paling sensitif. Melalui proses ini, peneliti dapat mempelajari kondisi pencocokan momentum antara foton dan elektron bebas, serta menghitung parameter performa sensor seperti sensitivitas dan *Figure of Merit* (FOM) berdasarkan spektrum transmisi yang dihasilkan pada ujung serat optik.

Kelebihan utama penggunaan metode FDTD dalam penelitian ini adalah kemampuannya untuk menganalisis struktur sensor dengan bentuk kompleks dan memberikan solusi waktu-nyata dari Persamaan Maxwell, sehingga dapat merepresentasikan fenomena fisik yang terjadi secara lebih menyeluruh. Berbeda dengan pendekatan analitik yang memiliki keterbatasan asumsi, metode FDTD memungkinkan evaluasi desain sensor dengan mempertimbangkan faktor kerugian optik (*losses*) dan dispersi material pada panjang gelombang tertentu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, FDTD digunakan untuk memprediksi desain sensor SPR dengan performa terbaik, khususnya yang memiliki sensitivitas paling tinggi, sebelum dilakukan proses fabrikasi yang memerlukan biaya dan waktu besar

(McCoy et al., 2021). Dengan demikian, penggunaan metode ini membantu mencapai tujuan optimasi desain sensor SPR secara efisien, akurat, dan terarah.

2.3. Konsentrasi Interleukin-17

Interleukin-17 (IL-17) merupakan kelompok sitokin proinflamasi yang memiliki peran penting dalam sistem imun, terutama dalam mengatur respons tubuh terhadap infeksi bakteri dan jamur serta berkontribusi terhadap patogenesis berbagai penyakit inflamasi dan autoimun. Sitokin ini pada awalnya diidentifikasi sebagai produk dari sel T helper tipe 17 (Th17), namun juga dapat dihasilkan oleh beberapa jenis sel imun lain seperti sel CD8⁺ T, sel natural killer (NK), dan sel innate lymphoid (ILC3). Interleukin-17 berfungsi menstimulasi sel epitel, fibroblas, dan makrofag untuk memproduksi berbagai mediator proinflamasi, seperti IL-6, TNF- α , dan IL-1 β , yang berperan dalam perekrutan neutrofil ke area infeksi. Aktivitas biologis tersebut berkontribusi terhadap perlindungan tubuh dari mikroorganisme patogen. Namun, apabila kadar IL-17 meningkat secara berlebihan, sitokin ini dapat memicu proses inflamasi kronis yang berujung pada timbulnya penyakit autoimun, seperti psoriasis, rheumatoid arthritis, dan multiple sclerosis (Ruiz et al., 2020).



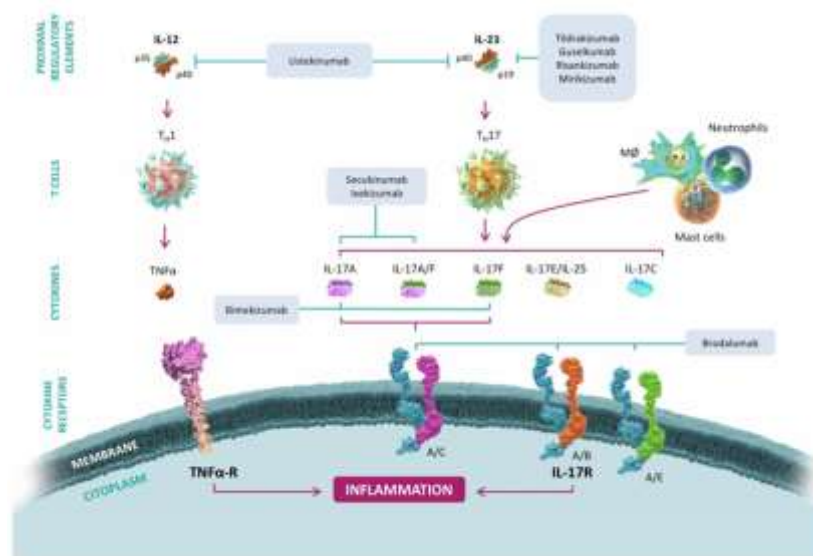
Gambar 2.3 Keluarga Sitokin dan Reseptor Interleukin-17
(Beringer et al., 2016)

Secara struktural, IL-17 terdiri atas enam anggota keluarga (IL-17A hingga IL-17F), dengan IL-17A merupakan bentuk yang paling aktif secara biologis. Protein ini tersusun atas 177 asam amino dan membentuk struktur homodimer melalui lipatan khas yang dikenal sebagai “*cysteine-knot fold*”, yang distabilkan oleh dua jembatan disulfida pada residu sistein tertentu (Zhang et al., 2011). Struktur tersebut menghasilkan empat untaian β antiparalel serta bagian fleksibel yang disebut “*skirt region*”, yang berfungsi membantu IL-17 dalam berinteraksi dengan reseptor spesifiknya, yaitu IL-17RA dan IL-17RC (Gaffen, 2015). Sifat biofisiknya yang bersifat polar, fleksibel, dan stabil memungkinkan IL-17 mempertahankan aktivitas biologis yang efektif dalam menyalurkan sinyal inflamasi pada berbagai jaringan tubuh. Gabungan antara kestabilan struktur dan kemampuan pengikatan reseptor menjadikan IL-17 berperan penting tidak hanya dalam respons imun protektif, tetapi juga dalam kondisi patologis apabila regulasi ekspresinya mengalami gangguan (Zhang et al., 2011).

2.3.1. Fungsi Biologis dan Peran sebagai Biomarker

Interleukin-17 (IL-17) memiliki fungsi biologis utama sebagai mediator proinflamasi yang menjembatani sistem imun bawaan dan adaptif dalam mempertahankan tubuh terhadap patogen eksternal seperti bakteri dan jamur. IL-17A, anggota paling dominan dari keluarga IL-17, diproduksi oleh sel T helper 17 (Th17) serta beberapa jenis sel imun lain seperti $CD8^+$ T, sel NK, dan $\gamma\delta$ T, yang bekerja sama mengaktifkan sel epitel, fibroblas, dan makrofag untuk memproduksi berbagai sitokin dan kemokin proinflamasi (Ruiz et al., 2020). Secara fisiologis, fungsi ini berperan melindungi tubuh dari infeksi dan memperkuat sawar epitel mukosa, namun dalam kondisi patologis, peningkatan

produksi IL-17 dapat menyebabkan aktivasi berlebihan dari jalur pensinyalan NF- κ B dan MAPK, sehingga memicu peradangan kronis dan kerusakan jaringan. Dengan kemampuannya menstimulasi ekspresi IL-6, TNF- α , dan G-CSF, IL-17 berperan dalam rekrutmen neutrofil dan pemeliharaan inflamasi yang berkelanjutan.



Gambar 2.4 Berbagai Target dan Antagonis Jalur IL-23/IL-17 (Yeremenko et al., 2014)

Dalam konteks klinis, IL-17 kini diakui sebagai biomarker yang dapat mencerminkan aktivitas imunologis dan tingkat inflamasi pada berbagai penyakit kronis. Kadar IL-17 yang tinggi dalam serum, cairan sinovial, atau jaringan pasien sering kali berkorelasi dengan tingkat keparahan penyakit seperti psoriasis, rheumatoid arthritis, multiple sclerosis, penyakit Crohn, dan ankylosing spondylitis. Selain pada penyakit autoimun, IL-17 juga memiliki relevansi klinis yang signifikan dalam bidang onkologi. Penelitian oleh Popović et al. (2023) menunjukkan bahwa peningkatan ekspresi IL-17 di jaringan kanker berhubungan dengan progresivitas tumor, angiogenesis, dan resistensi terhadap terapi, sehingga kadar IL-17 dapat dijadikan biomarker untuk memantau perkembangan penyakit

serta efektivitas pengobatan. Aktivitas IL-17 dalam mikro-lingkungan tumor berpotensi menstimulasi sel imun dan sitokin lain yang mendorong proliferasi sel kanker, sehingga menjadikannya target potensial untuk terapi imunomodulator masa depan.

Karakteristik biofisik dan struktur Interleukin-17 (IL-17) menjadikannya target biomolekul yang potensial untuk dideteksi menggunakan sistem sensor berbasis *surface plasmon resonance* (SPR). IL-17 merupakan sitokin proinflamasi yang relatif kecil dengan struktur dimer dan kestabilan tinggi karena adanya ikatan disulfida yang mempertahankan konformasi tiga dimensinya dalam lingkungan fisiologis. Sifat ini penting dalam sistem SPR karena kestabilan struktur memungkinkan terjadinya interaksi antigen–antibodi yang konsisten pada permukaan sensor logam (biasanya emas), sehingga perubahan indeks bias akibat pengikatan dapat diamati dengan akurasi tinggi (Gaffen, 2015). Dalam konteks biomedis, konsentrasi IL-17 yang meningkat dalam serum atau cairan sinovial pasien berhubungan erat dengan proses inflamasi kronis dan perkembangan penyakit autoimun seperti rheumatoid arthritis (RA) dan berbagai jenis kanker (Wu et al., 2019).

Sensor *surface plasmon resonances* bekerja berdasarkan prinsip resonansi plasmon permukaan, di mana perubahan indeks bias pada antarmuka logam-dielectric akibat pengikatan biomolekul mengubah sudut atau intensitas pantulan cahaya. Karena IL-17 memiliki afinitas tinggi terhadap reseptor spesifik (IL-17RA/RC) serta sifat polar yang memudahkan interaksi elektrostatik dengan antibodi penangkap, sensor SPR dapat mendeteksi interaksi ini secara label-free dan real-time dengan sensitivitas tinggi. Penelitian mengenai biosensor optik

menunjukkan bahwa penggunaan biomarker berbasis sitokin seperti IL-17 memberikan hasil yang signifikan dalam memantau aktivitas penyakit melalui deteksi optik yang stabil, spesifik, dan dapat diulang (Imas et al., 2020). Oleh karena itu, karakteristik fisik dan kimiawi IL-17 sangat relevan dalam pengembangan sistem sensor *Surface Plasmon Resonances* sebagai platform diagnostik dini yang akurat dan efisien untuk penyakit inflamasi dan kanker.

2.4. Keterkaitan Penelitian dalam Prespektif Islam

Islam memandang bahwa ilmu pengetahuan dan pemanfaatan fenomena alam merupakan bagian dari upaya manusia dalam memahami kebesaran Allah Swt. Berbagai fenomena fisika seperti cahaya, gelombang elektromagnetik, dan interaksi material dapat dipelajari dan dikembangkan menjadi teknologi yang bermanfaat dalam kehidupan, termasuk pada bidang kesehatan. Penelitian mengenai sensor *Surface Plasmon Resonance* berbasis fiber optik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 merupakan salah satu bentuk penerapan ilmu fisika dan teknologi dalam pengembangan biosensor. Penerapan ilmu pengetahuan dan pemanfaatan fenomena alam dalam penelitian ini memiliki keterkaitan dengan nilai-nilai yang terkandung dalam Al-Qur'an, sebagaimana dijelaskan pada Q.S. An-Nur (24): 35:

اللَّهُ نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ ۚ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكُوهٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ ۚ الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبَارَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهُ نَارٌ ۚ نُورٌ عَلَى نُورٍ ۚ يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَنْ يَشَاءُ ۚ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ ﴿٣٥﴾

“Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya-Nya, seperti sebuah lubang yang tidak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam tabung kaca, dan tabung kaca itu bagaikan bintang yang berkilauan, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang diberkahi, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di timur dan tidak pula di barat, yang minyaknya (saja) hampir-

hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis). Allah memberi petunjuk kepada cahaya-Nya bagi orang yang Dia kehendaki, dan Allah membuat perumpamaan-perumpamaan bagi manusia. Dan Allah Maha Mengetahui segala sesuatu.” (QS. An-Nur (24): 35).

Menurut M. Quraish Shihab dalam Tafsir Al-Misbah, cahaya dalam ayat tersebut tidak hanya dimaknai sebagai cahaya fisik, tetapi juga sebagai simbol ilmu pengetahuan, petunjuk, dan sarana manusia dalam memahami alam semesta. Cahaya menjadi salah satu bentuk kekuasaan Allah Swt. yang memungkinkan manusia memperoleh pengetahuan serta mengembangkan teknologi untuk kemaslahatan hidup. Keterkaitan ayat ini dengan penelitian terletak pada prinsip kerja sensor SPR berbasis fiber optik yang memanfaatkan gelombang cahaya sebagai media utama dalam mendeteksi perubahan indeks bias biomolekul IL-17. Gelombang cahaya yang merambat di dalam fiber optik menghasilkan gelombang *evanescent* yang berinteraksi dengan lapisan logam sehingga memunculkan resonansi plasmon permukaan. Perubahan resonansi tersebut digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi IL-17 melalui pergeseran panjang gelombang resonansi. Dengan demikian, penelitian ini merupakan bentuk pemanfaatan fenomena cahaya yang diciptakan Allah Swt. dalam pengembangan teknologi biosensor di bidang kesehatan.

Selain itu, Allah Swt. juga berfirman dalam Q.S. Ali Imran (3): 190:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمُوتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَبْصَارِ ﴿١٩٠﴾

“*Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal.” (Q.S. Ali Imran (3): 190).*

Menurut Hamka dalam Tafsir Al-Azhar, ayat tersebut menjelaskan bahwa manusia diperintahkan untuk mengamati, mempelajari, dan memahami fenomena alam menggunakan akal dan ilmu pengetahuan. Orang yang berakal adalah mereka

yang mampu meneliti ciptaan Allah Swt. dan mengambil manfaat dari hukum-hukum alam yang telah diciptakan-Nya. Keterkaitan ayat ini dengan penelitian terletak pada penggunaan metode FDTD untuk menganalisis fenomena gelombang elektromagnetik, interaksi cahaya dengan logam, serta perubahan indeks bias akibat keberadaan biomolekul IL-17. Penelitian ini menunjukkan bahwa ilmu fisika dan simulasi numerik dapat digunakan untuk memahami fenomena alam secara ilmiah dan mengembangkannya menjadi teknologi sensor yang bermanfaat dalam bidang kesehatan, khususnya untuk mendukung deteksi biomarker penyakit secara dini.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi. Metode simulasi digunakan untuk menganalisis kinerja optimal desain sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) berbasis fiber optik untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 berdasarkan pada perbandingan nilai S, DA, QF dan FOM. Metode simulasi yang digunakan adalah simulasi numerik dengan pendekatan *Finite Difference Time Domain* (FDTD) melalui *Software Ansys Lumerical FDTD*.

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Instrumentasi Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3. Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan beberapa alat dan bahan yang mendukung proses pengambilan data indeks bias interleukin-17 dan simulasi pada *Software Ansys Lumerical FDTD*. Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan diantaranya:

3.3.1. Mengukur Indeks Bias Interleukin-17

Alat dan bahan yang digunakan untuk mengukur indeks bias interleukin-17 antara lain:

1. Interleukin-17
2. *Phosphate-Buffered Saline* (PBS)
3. Refraktometer Digital

4. Pipet
5. Pengaduk
6. Botol
7. Sarung Tangan

3.3.2. Simulasi *Software Ansys Lumerical FDTD*

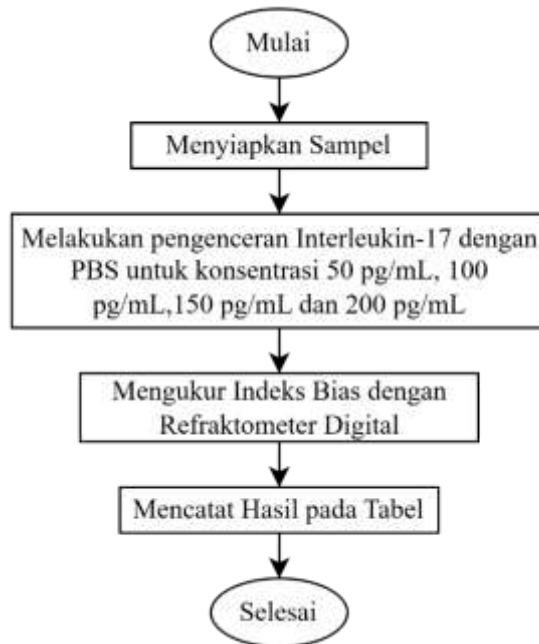
Alat dan bahan yang digunakan untuk simulasi *Software* antara lain:

1. Laptop
2. *Software Ansys Lumerical FDTD*
3. *Software Origin*

3.4. Diagram Alir Penelitian

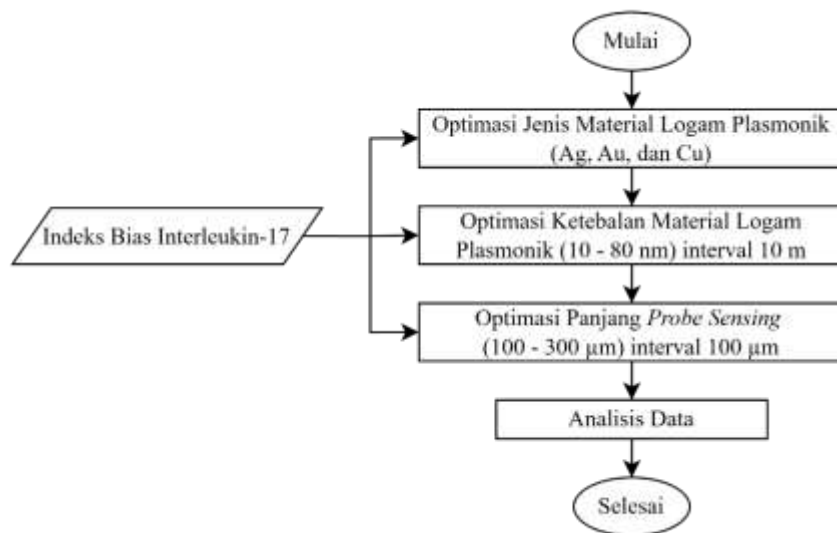
Penelitian mengenai optimasi desain sensor SPR berbasis fiber optik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) untuk mendeteksi konsentrasi interleukin-17 disusun melalui tahapan penelitian yang digambarkan dalam diagram alir, sehingga proses penelitian dapat berlangsung secara lebih terstruktur dan mudah dipahami. Adapun diagram alir penelitian sebagai berikut:

3.4.1. Mengukur Indeks Bias Interleukin-17



Gambar 3.1 Diagram Alir Mengukur Indeks Bias Interleukin17

3.4.2. Simulasi *Software* Ansys *Lumerical* FDTD



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi menggunakan *Software* Ansys *Lumerical* FDTD

3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini disusun secara sistematis agar setiap tahap dapat dilaksanakan secara tepat dan terukur. Metode komputasi FDTD digunakan untuk

memodelkan respons fenomena SPR pada struktur berlapis yang berinteraksi dengan variasi konsentrasi Interleukin-17. Adapun tahapan utama yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi beberapa proses berikut:

3.5.1. Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa proses salah satunya adalah pengambilan data indeks bias interleukin-17 dengan berbagai konsentrasi menggunakan Refraktometer Digital, pencarian material logam, ketebalan lapisan dan panjang *probe sensing* yang lebih sensitif untuk SPR berbasis fiber optik dengan metode FDTD ini dievaluasi dengan melihat panjang gelombang transmisi yang diperoleh, kemudian dianalisis lebih lanjut melalui perhitungan performa sensor.

3.5.2. Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17

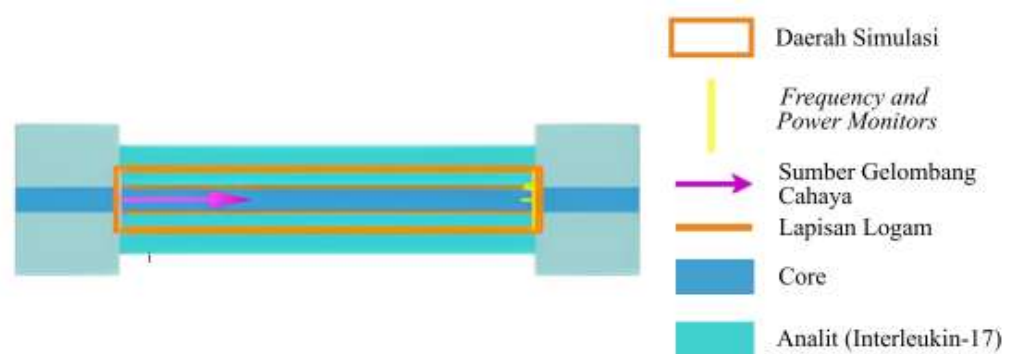
Untuk melakukan pengukuran indeks bias interleukin-17 ini dilakukan beberapa tahap, diantaranya:

1. Memakai sarung tangan sesuai dengan prosedur praktikum.
2. Menyiapkan alat dan bahan seperti, Refraktometer Digital, gelas ukur, dan pengaduk.
3. Mengencerkan interleukin-17 dengan PBS untuk konsentrasi 50 pg/mL, 100 pg/mL, 150 pg/mL dan 200 pg/mL.
4. Mengambil larutan interleukin-17 menggunakan pipet dan meletakkan pada prisma Refraktometer Digital.
5. Menutup prisma kemudian melihat nilai indeks bias yang terlihat pada skala melalui lensa refraktometer.
6. Mencatat nilai indeks bias pada Tabel 3.1.

3.5.3. Simulasi *Software Ansys Lumerical FDTD*

Simulasi ini dilakukan menggunakan *Software Ansys Lumerical* dengan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Adapun Langkah simulasi yang dilakukan sebagai berikut:

1. Merancang desain sensor SPR berbasis fiber optik pada *Software Ansys Lumerical FDTD*.



Gambar 3.3 Desain SPR berbasis Fiber Optik pada *Software Ansys Lumerical FDTD*

2. Mengatur parameter simulasi seperti daerah simulasi, mesh, boundary condition dan parameter lainnya menggunakan *object simulation*.
3. Mengatur parameter sumber gelombang cahaya yang diinjeksikan seperti panjang gelombang, geometri, dan mode menggunakan *object source*.
4. Mengatur jenis material pelapis Ag (Perak), Au (Emas), dan Cu (Tembaga) pada *object material*.
5. Mengatur ketebalan lapisan logam dari 10 – 80 nm dengan interval 10 nm.
6. Mengatur panjang *probe sensing* dari 100 – 300 μm dengan interval 100 μm menggunakan jenis dan ketebalan material yang paling optimal.
7. Memasukkan nilai indeks bias PBS dan interleukin-17 untuk konsentrasi 50 pg/mL, 100 pg/mL, 150 pg/mL dan 200 pg/mL pada *object analit-up* dan *analit-bot*.

8. Menjalankan program simulasi untuk menentukan panjang gelombang menggunakan *object run*.
9. Memvisualisasikan hasil dalam bentuk txt, grafik, dan gambar pada menu *transmission*.

3.6. Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data pada pengukuran indeks bias interleukin-17 serta pengukuran performa sensor.

1. Pengukuran indeks bias interleukin-17.

Tahap pertama yang dilakukan dalam pengambilan data ini yaitu mengukur indeks bias PBS dan interleukin-17 untuk konsentrasi 50 pg/mL, 100 pg/mL, 150 pg/mL dan 200 pg/mL.

Tabel 3.1 Data Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17

Konsentrasi Interleukin-17	Indeks Bias Interleukin-17
<i>Phosphate-Buffered Saline</i>	
50 pg/mL	
100 pg/mL	
150 pg/mL	
200 pg/mL	

2. Pengukuran jenis lapisan tipis logam.

Setelah mendapatkan nilai indeks bias, dilakukan pengujian terhadap lapisan tipis logam Ag (Perak), Au (Emas), dan Cu (Tembaga) untuk melihat respons terhadap indeks bias interleukin-17. Pengaruh jenis logam terhadap performa sensor *Surface plasmon resonance* (SPR) dianalisis pada ketebalan lapisan logam sebesar 40 nm dengan analit interleukin-17 yang memiliki indeks bias 1,33397 sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Pengaruh Jenis Logam terhadap Performa Sensor

Jenis Logam	Ketebalan (nm)	ΔI_{SPR}	Δn	Sensitivitas
Ag (Perak)	40			
Au (Emas)	40			
Cu (Tembaga)	40			

3. Pengukuran variasi ketebalan lapisan logam.

Setelah mendapatkan jenis lapisan logam yang paling optimal, dilakukan simulasi lanjutan dengan memvariasikan ketebalan lapisan logam dari 10 hingga 80 nm dengan interval 10 nm. Hasil pengaruh variasi ketebalan terhadap pergeseran panjang gelombang resonansi dan sensitivitas sensor disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan Logam terhadap Performa Sensor

Ketebalan (nm)	ΔI_{SPR}	Δn	Sensitivitas
10			
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			

4. Pengukuran panjang *probe sensing*.

Jika ketebalan lapisan logam dan jenis lapisan yang paling optimal sudah didapatkan, dilakukan simulasi dengan memvariasikan panjang *probe sensing* dari 100 – 300 μm dengan interval 100 μm untuk mengetahui respons *probe sensing* terhadap sensitivitas sensor, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Data Pengaruh Variasi Panjang Probe Sensing terhadap Performa Sensor

Panjang <i>Probe Sensing</i> (μm)	ΔI_{SPR}	Δn	Sensitivitas
100			
200			
300			

3.7. Analisis Data

Analisis data dilakukan setelah mendapatkan hasil simulasi. Evaluasi parameter utama sensor SPR berbasis fiber optik dilakukan dalam mendeteksi konsentrasi interleukin-17 menggunakan metode FDTD. Parameter utama sensor yang dianalisis meliputi, jenis material logam, ketebalan lapisan dan panjang *probe sensing*.

1. Analisis indeks bias interleukin-17.

Menentukan variasi indeks bias yang digunakan, dilakukan pengukuran terhadap PBS dan beberapa konsentrasi interleukin-17 diantaranya, 50 pg/mL, 100 pg/mL, 150 pg/mL dan 200 pg/mL.

2. Analisis jenis lapisan tipis logam.

Melakukan analisis jenis lapisan tipis logam yang digunakan untuk memperoleh jenis lapisan yang paling optimal. Jenis lapisan tipis yang memiliki sensitivitas tinggi mampu memberikan performa yang lebih optimal dalam meningkatkan kemampuan deteksi pada sistem sensor.

3. Analisis variasi ketebalan lapisan logam.

Melakukan analisis pada simulasi dengan variasi ketebalan lapisan logam yang paling optimal antara Ag (Perak), Au (Emas), dan Cu (Tembaga) pada ketebalan 10 – 80 nm dengan interval 10 nm untuk menentukan ketebalan yang paling optimal.

4. Analisis panjang *probe sensing*.

Melakukan analisis *probe sensing* untuk mendapatkan panjang *probe sensing* yang optimal menggunakan variasi dari 100 – 300 μm dengan interval

100 μm . Variasi *probe sensing* untuk meningkatkan sensitivitas deteksi dalam mengevaluasi pengaruh *probe sensing* terhadap performa sensor.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

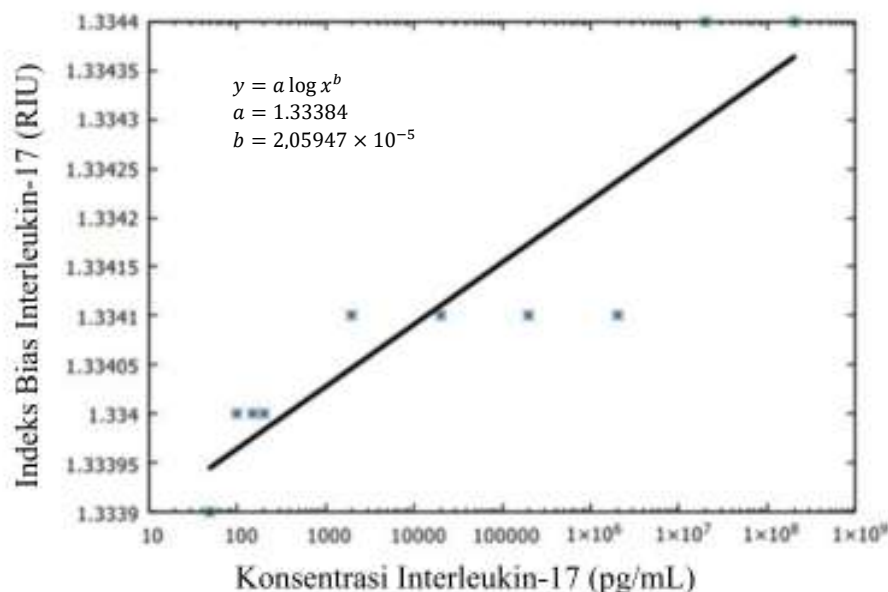
4.1. Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17

Pengukuran indeks bias dilakukan sebagai tahap awal untuk mengetahui respons optik larutan Interleukin-17 (IL-17) terhadap perubahan konsentrasi. Parameter indeks bias sangat penting pada sensor berbasis *Surface Plasmon Resonance* (SPR) karena mekanisme kerja sensor bergantung pada perubahan sifat optik medium di sekitar permukaan logam sensor. Perubahan nilai indeks bias akan memengaruhi karakteristik transmisi maupun posisi resonansi yang dihasilkan oleh sensor SPR. Oleh karena itu, data indeks bias digunakan sebagai parameter masukan dalam proses simulasi dan analisis performa sensor. Hasil pengukuran nilai indeks bias untuk setiap konsentrasi interleukin-17 disajikan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17

Konsentrasi Interleukin-17	Indeks Bias Interleukin-17
<i>Phosphate-Buffered Saline</i>	1,3338
50 pg/mL + PBS	1,33395
100 pg/mL + PBS	1,33397
150 pg/mL + PBS	1,33398
200 pg/mL + PBS	1,33399

Grafik konsentrasi dengan nilai indeks bias interleukin-17 ditampilkan sebagai berikut:



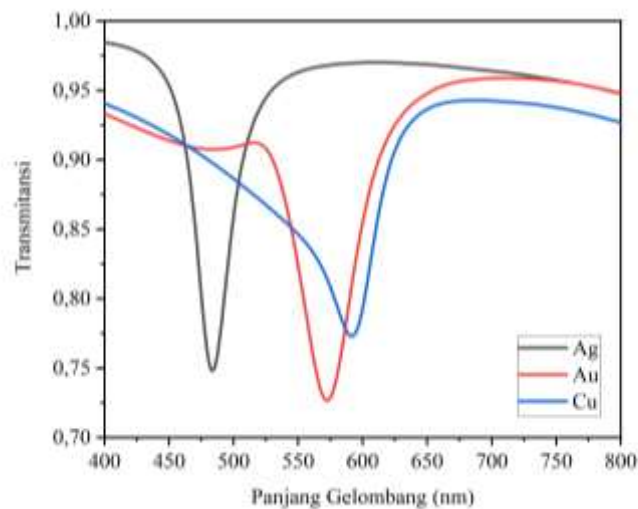
Gambar 4.1 Grafik Konsentrasi dengan Indeks Nilai Bias Interleukin-17

Nilai indeks bias Interleukin-17 diperoleh melalui proses *curve fitting* grafik hubungan antara konsentrasi dan indeks bias Interleukin-17 yang diperoleh pada eksperimen dengan alat refraktometer digital menggunakan fungsi $y = a \log x^b$. Hasil fitting menghasilkan parameter $a = 1.33384$ dan $b = 2,05947 \times 10^{-5}$, sehingga diperoleh Persamaan hubungan antara konsentrasi dan indeks bias Interleukin-17. Berdasarkan Persamaan tersebut, nilai indeks bias untuk setiap variasi konsentrasi Interleukin-17 kemudian dihitung dan disajikan pada Tabel 4.1.

4.2. Hasil Pengujian Variasi Jenis Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR

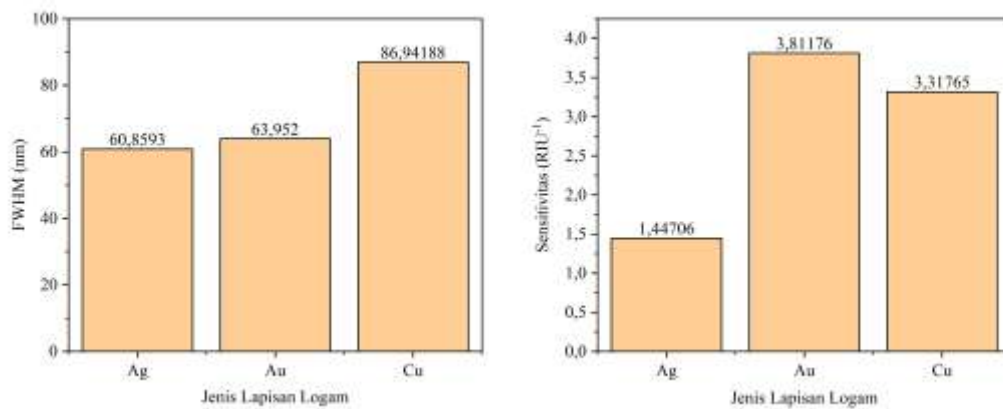
Pengujian karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik terhadap variasi jenis material logam plasmonik dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan material logam yang berbeda terhadap respons transmisi sensor. Dalam penelitian ini digunakan tiga jenis logam plasmonik, yaitu perak (Ag), emas (Au), dan

tembaga (Cu). Karakteristik transmisi dari masing-masing logam diamati untuk menentukan material yang menghasilkan respons resonansi paling baik dan paling sensitif terhadap perubahan medium sensing. Parameter ketebalan lapisan logam, panjang probe sensing, dan indeks bias medium sensing dibuat tetap untuk memfokuskan analisis pada pengaruh jenis material logam terhadap kinerja sensor. Ketebalan lapisan logam ditetapkan sebesar 40 nm, panjang probe sensing sebesar 100 μm , dan indeks bias medium sensing sebesar 1,33397 RIU. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai parameter awal simulasi karena proses optimasi ketebalan lapisan logam dan panjang probe sensing belum dilakukan pada tahap ini.



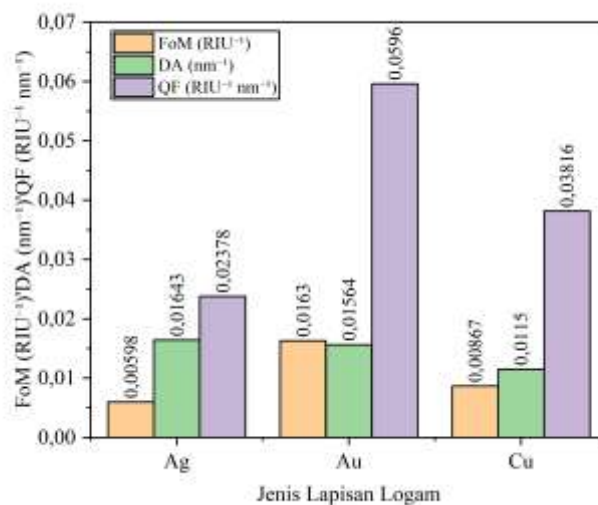
Gambar 4.2 Spektrum transmisi SPR pada material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga)

Spektrum transmisi kemudian dianalisis untuk mengetahui performa sensor SPR berbasis fiber optik terhadap variasi jenis logam. Data spektrum transmisi digunakan mengetahui nilai FWHM dan menentukan nilai sensitivitas yang merupakan salah satu parameter kinerja sensor.



Gambar 4.4 Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga)

Nilai performa sensor lainnya seperti *Figure of Merit*, *Detection Accuracy* dan *Quality Factor* juga digunakan untuk mendukung optimasi jenis lapisan logam. Gambar 4.4 menunjukkan grafik nilai performa sensor pada setiap jenis lapisan logam.



Gambar 4.3 Grafik Nilai *Figure of Merit*, *Detection Accuracy* dan *Quality Factor* material logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga).

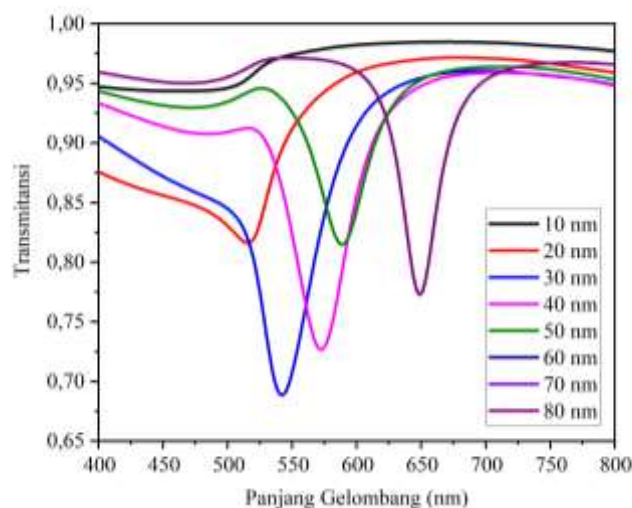
Nilai sensitivitas, FoM, dan QF yang lebih tinggi dibandingkan material lainnya, logam Au menunjukkan performa yang lebih optimal sebagai material plasmonik pada sensor SPR berbasis fiber optik dalam penelitian ini. Di sisi lain, logam Ag memiliki nilai FWHM paling kecil yang menunjukkan kurva resonansi

lebih sempit dan tajam dibandingkan material lainnya serta nilai DA yang tinggi dibanding material lainnya. Namun demikian, nilai sensitivitas, FoM, dan QF pada Ag masih lebih rendah dibandingkan Au, sehingga secara keseluruhan Au dipilih sebagai material plasmonik terbaik untuk tahap pengujian selanjutnya.

4.3. Hasil Pengujian Variasi Ketebalan Material Logam terhadap Kinerja

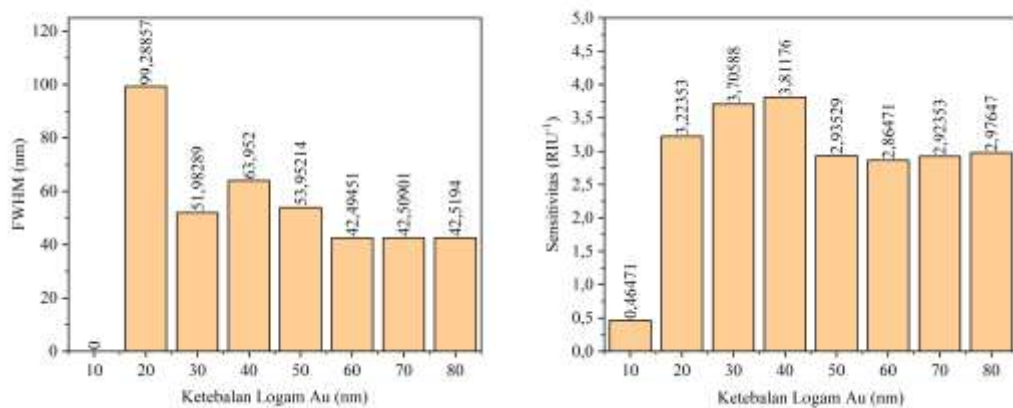
Sensor SPR

Pada penelitian ini digunakan variasi ketebalan lapisan logam Au mulai dari 10 nm hingga 80 nm. Logam Au dipilih berdasarkan hasil pengujian variasi jenis material logam. Pengamatan dilakukan dengan menganalisis perubahan kurva transmitansi terhadap panjang gelombang untuk setiap variasi ketebalan lapisan logam. Variasi ketebalan lapisan plasmonik sangat memengaruhi interaksi antara gelombang *evanescent* dan elektron bebas pada permukaan logam sehingga dapat memengaruhi posisi resonansi, kedalaman dip resonansi, dan kualitas resonansi sensor.



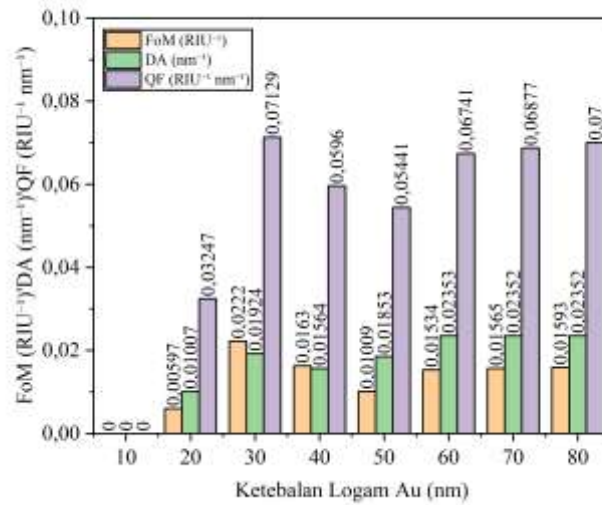
Gambar 4.5 Spektrum transmitansi SPR pada material logam Au (emas) dengan ketebalan 10 – 80 nm.

Untuk mengevaluasi pengaruh ketebalan lapisan logam Au terhadap kinerja sensor SPR berbasis fiber optik, dilakukan analisis FWHM dan sensitivitas pada variasi ketebalan 10 – 80 nm. Hasil perhitungan FWHM dan sensitivitas untuk setiap variasi ketebalan lapisan Au disajikan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) dengan ketebalan 10 – 80 nm.

Selain sensitivitas dan FWHM, performa sensor SPR berbasis fiber optik juga dievaluasi menggunakan parameter *Figure of Merit* (FoM), *Detection Accuracy* (DA), dan *Quality Factor* (QF). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan kualitas respons sensor terhadap perubahan indeks bias pada variasi ketebalan lapisan logam Au. Hasil perhitungan nilai FoM, DA, dan QF untuk setiap variasi ketebalan lapisan Au dalam rentang 10 – 80 nm ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Nilai *Figure of Merit*, *Detection Accuracy* dan *Quality Factor* material logam Au dengan ketebalan 10 – 80 nm.

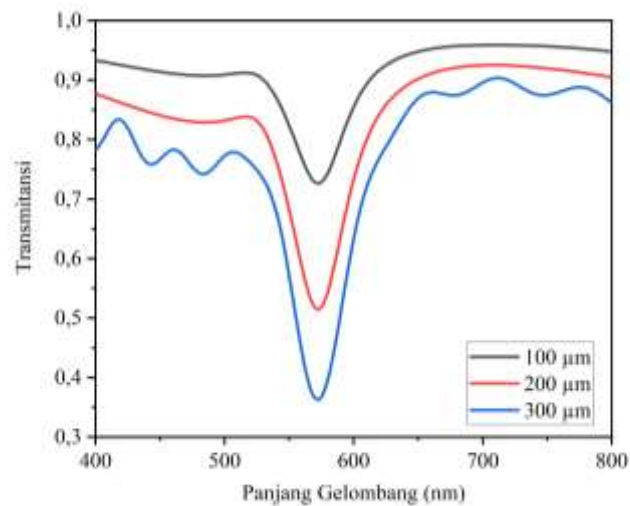
Hasil pengujian variasi ketebalan lapisan logam Au terhadap kinerja sensor SPR berbasis fiber optik menunjukkan bahwa setiap parameter performa mencapai nilai optimum pada ketebalan yang berbeda. Sensitivitas tertinggi diperoleh pada ketebalan Au 40 nm sebesar 3,81176 RIU⁻¹, sedangkan nilai FoM tertinggi sebesar 0,0222 RIU⁻¹ dan QF tertinggi sebesar 0,07129 RIU⁻¹ nm⁻¹ diperoleh pada ketebalan Au 30 nm. Sementara itu, nilai DA tertinggi sebesar 0,02353 nm⁻¹ diperoleh pada ketebalan Au 60 nm. Meskipun demikian, ketebalan Au 40 nm dipilih sebagai ketebalan optimum karena menghasilkan nilai sensitivitas tertinggi. Oleh karena itu, ketebalan Au 40 nm digunakan sebagai parameter tetap pada pengujian selanjutnya.

4.4. Hasil Pengujian Variasi Panjang *Probe Sensing* terhadap Kinerja

Sensor SPR

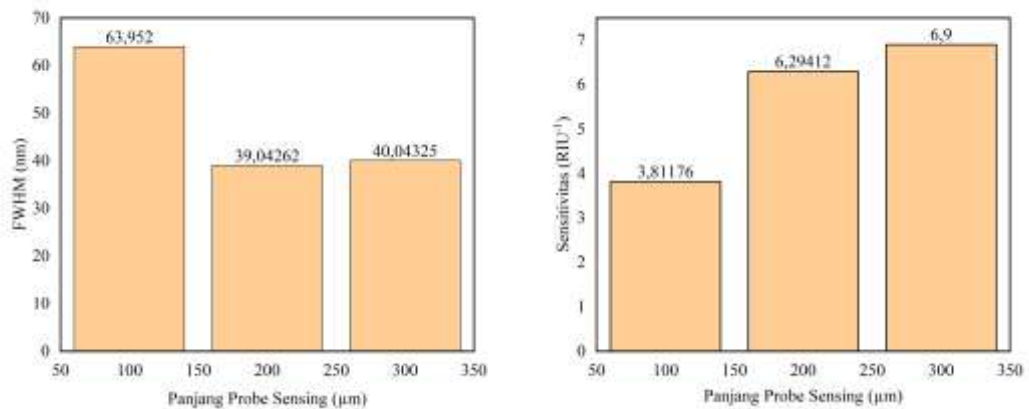
Setelah diperoleh konfigurasi optimum berupa material plasmonik Au dengan ketebalan lapisan 40 nm, dilakukan pengujian lanjutan untuk menganalisis pengaruh variasi panjang probe sensing terhadap kinerja sensor SPR berbasis fiber

optik. Dalam pengujian ini, jenis material dan ketebalan lapisan logam dipertahankan konstan, sedangkan panjang probe sensing divariasikan sebesar 100 – 300 nm. Variasi tersebut dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh panjang daerah sensing terhadap interaksi medan *evanescent* dengan medium yang dideteksi, yang selanjutnya dapat memengaruhi karakteristik resonansi sensor. Hasil simulasi spektrum transmitansi pada masing-masing variasi panjang probe sensing ditunjukkan pada Gambar 4.8.



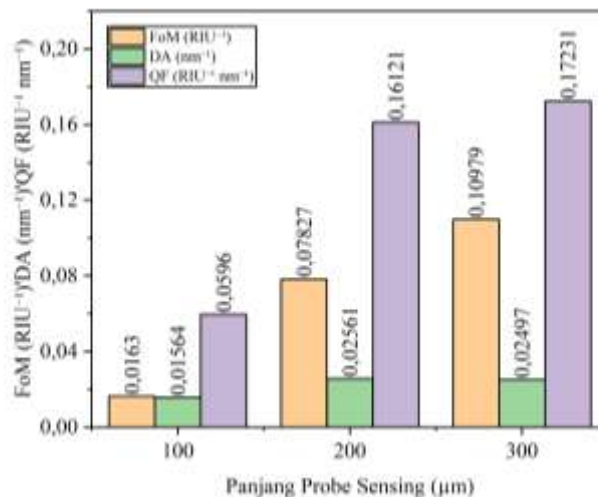
Gambar 4.8 Spektrum transmitansi SPR material logam Au (emas) dengan ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 100 – 300 μm .

Spektrum transmitansi yang diperoleh pada masing-masing variasi panjang probe sensing kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan parameter karakteristik sensor berupa FWHM dan sensitivitas. Nilai FWHM digunakan untuk mengevaluasi ketajaman kurva resonansi, sedangkan sensitivitas menunjukkan tingkat respons sensor terhadap perubahan indeks bias medium. Adapun hasil perbandingan kedua parameter tersebut pada variasi panjang probe sensing 100 μm , 200 μm , dan 300 μm disajikan pada grafik berikut.



Gambar 4.10 Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) pada ketebalan 40 nm dengan panjang probe sensing 100 – 300 μm.

Nilai sensitivitas dan *Full Width at Half Maximum* (FWHM) yang telah diperoleh selanjutnya dianalisis melalui parameter *Figure of Merit* (FoM), *Detection Accuracy* (DA), dan *Quality Factor* (QF). Pengaruh variasi panjang probe sensing terhadap nilai FoM, DA, dan QF dianalisis untuk menentukan konfigurasi yang mampu memberikan performa sensor terbaik. Hasil analisis tersebut disajikan pada grafik berikut.



Gambar 4.9 Grafik Nilai *Figure of Merit*, *Detection Accuracy* dan *Quality Factor* pada ketebalan 40 nm dengan panjang probe sensing 100 – 300 μm.

Peningkatan panjang probe sensing dari 100 μm hingga 300 μm memberikan pengaruh positif terhadap performa sensor. Spektrum transmitansi menunjukkan

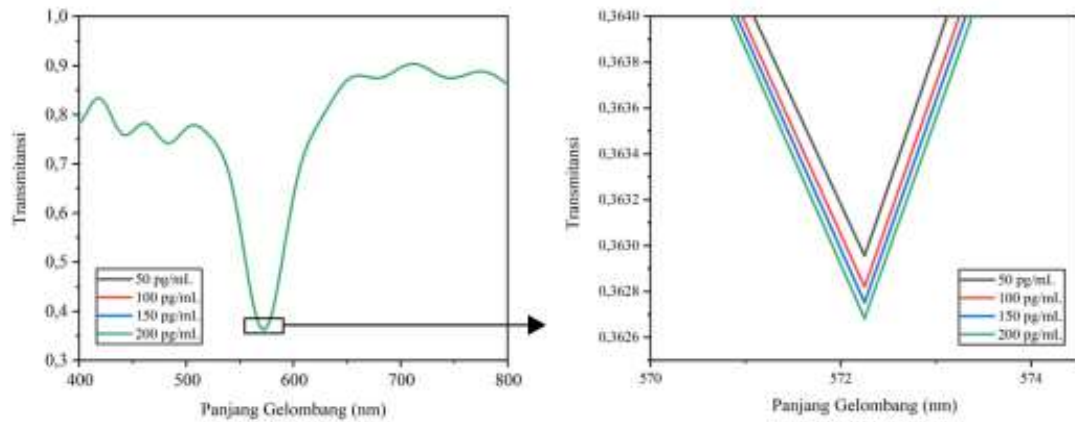
bahwa semakin panjang probe sensing, resonansi yang terbentuk menjadi semakin dalam dengan transmitansi minimum yang semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara medan *evanescent* dan medium sensing berlangsung lebih optimal pada panjang probe sensing yang lebih besar.

Hasil parameter sensor menunjukkan bahwa panjang probe sensing 300 μm menghasilkan sensitivitas tertinggi sebesar $6,9 \text{ RIU}^{-1}$ dibandingkan variasi lainnya. Selain itu, nilai *Figure of Merit* (FoM), *Detection Accuracy* (DA), dan *Quality Factor* (QF) juga menunjukkan nilai tertinggi pada panjang probe sensing 300 μm , masing-masing sebesar $0,10979 \text{ RIU}^{-1}$, $0,02497 \text{ nm}^{-1}$, dan $0,17231 \text{ RIU}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$. Sementara itu, nilai FWHM terendah diperoleh pada panjang probe sensing 200 μm sebesar 39,04262 nm yang menunjukkan resonansi paling tajam. Panjang probe sensing 300 μm dipilih sebagai kondisi optimum karena menghasilkan resonansi paling dalam, sensitivitas tertinggi, serta performa sensor terbaik berdasarkan parameter FoM dan QF dalam mendeteksi perubahan indeks bias IL-17.

4.5. Hasil Pengujian Variasi Indeks Bias Interleukin-17

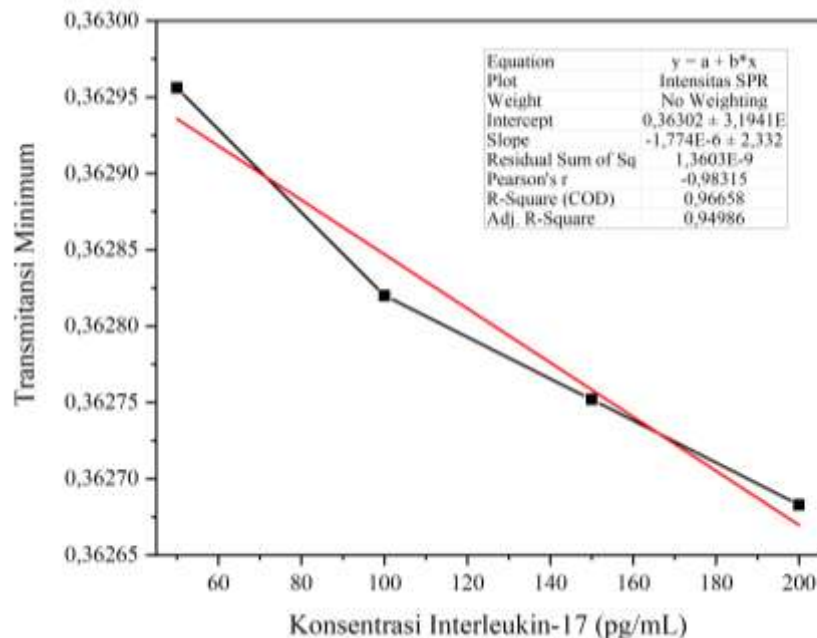
Tahap pengujian variasi indeks bias dilakukan setelah diperoleh konfigurasi sensor optimum dari hasil optimasi parameter struktur sensor. Hasil pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan material emas (Au) dengan ketebalan lapisan logam 40 nm dan panjang probe sensing 300 μm menghasilkan kinerja sensor terbaik. Oleh karena itu, konfigurasi tersebut digunakan pada tahap pengujian variasi indeks bias untuk mengamati perubahan respons sensor SPR terhadap medium sensing dengan indeks bias konsentrasi Interleukin-17 (IL-17) yang berbeda. Variasi indeks bias diberikan pada rentang $1,33395 - 1,33399 \text{ RIU}$,

kemudian respons yang dihasilkan diamati melalui spektrum transmitansi serta parameter kinerja sensor yang meliputi sensitivitas, FWHM, FoM, DA, dan QF.



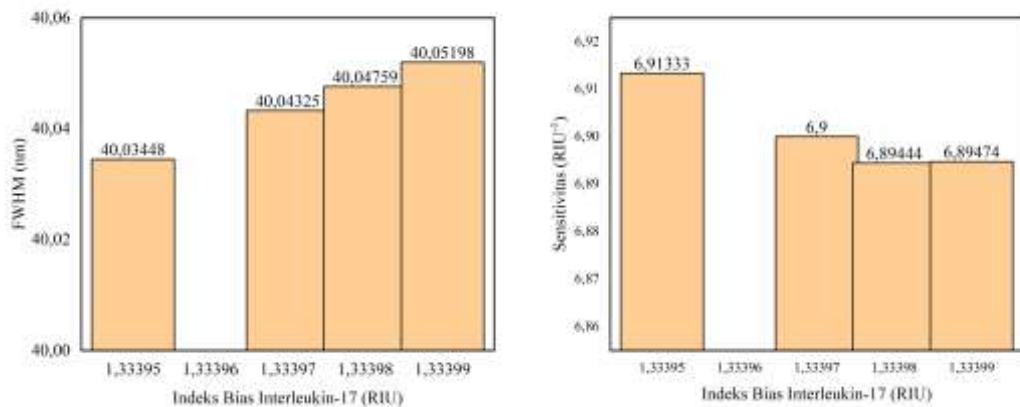
Gambar 4.11 Spektrum transmitansi SPR pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm dengan variasi indeks bias IL-17.

Untuk mengevaluasi respons sensor SPR berbasis serat optik terhadap perubahan konsentrasi Interleukin-17, dilakukan analisis hubungan antara konsentrasi IL-17 dan transmitansi minimum resonansi yang divisualisasikan pada Gambar 4.12.



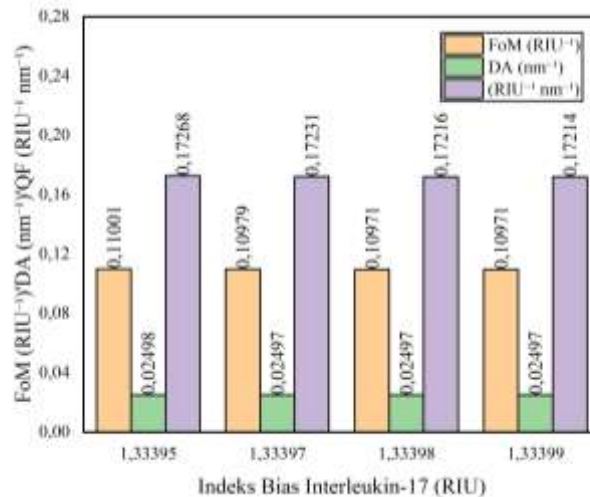
Gambar 4.12 Grafik Hubungan antara Konsentrasi Interleukin-17 terhadap Transmitansi minimum resonansi

Berdasarkan spektrum transmitansi yang diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan parameter kinerja sensor berupa sensitivitas dan *Full Width at Half Maximum* (FWHM) melihat kemampuan sensor dalam merespons perubahan indeks bias dan lebar kurva resonansi yang terbentuk. Hasil perhitungan sensitivitas dan FWHM untuk setiap variasi indeks bias ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik FWHM dan Sensitivitas pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm dengan variasi indeks bias IL-17.

Untuk melengkapi evaluasi kinerja sensor, dilakukan perhitungan parameter *Figure of Merit* (FoM), *Detection Accuracy* (DA), dan *Quality Factor* (QF) pada setiap variasi yang diuji. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai indikator tambahan dalam menilai kualitas respons sensor terhadap perubahan indeks bias medium sensing. Hasil perhitungan FoM, DA, dan QF pada setiap variasi indeks bias ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Nilai *Figure of Merit*, *Detection Accuracy* dan *Quality Factor* pada material logam Au (emas) ketebalan 40 nm pada panjang probe sensing 300 μm dengan variasi indeks bias IL-17.

Variasi indeks bias IL-17 pada rentang 1,33395 – 1,33399 RIU menghasilkan perubahan pada karakteristik spektrum transmitansi dan parameter kinerja sensor. Posisi panjang gelombang resonansi cenderung tetap pada rentang indeks bias yang diuji, namun terjadi perubahan pada nilai transmitansi resonansi. Nilai sensitivitas mengalami penurunan dari 6,91333 RIU⁻¹ menjadi 6,89474 RIU⁻¹, sedangkan nilai FWHM meningkat dari 40,03448 nm menjadi 40,05198 nm. Selain itu, nilai FoM menurun dari 0,11001 RIU⁻¹ menjadi 0,10971 RIU⁻¹, nilai DA berada pada kisaran 0,02497–0,02498 nm⁻¹, dan nilai QF menurun dari 0,17268 RIU⁻¹ nm⁻¹ menjadi 0,17214 RIU⁻¹ nm⁻¹. Meskipun perubahan yang terjadi relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu merespons variasi indeks bias yang diberikan serta mempertahankan karakteristik resonansi yang relatif stabil pada rentang pengujian yang dilakukan.

4.6. Pembahasan

4.6.1. Pengukuran Indeks Bias Interleukin-17

Pengukuran indeks bias Interleukin-17 (IL-17) dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat optik larutan akibat variasi konsentrasi biomolekul IL-17 di dalam media larutan. Indeks bias merupakan parameter yang sangat penting karena perubahan kecil pada indeks bias medium dapat memengaruhi kondisi resonansi permukaan dan menyebabkan pergeseran karakteristik spektrum sensor. Oleh karena itu, data indeks bias IL-17 diperlukan sebagai parameter masukan dalam proses simulasi maupun analisis performa sensor SPR yang dikembangkan.

Indeks bias suatu larutan dipengaruhi oleh konsentrasi zat terlarut di dalamnya. Semakin tinggi konsentrasi biomolekul protein dalam larutan, maka kerapatan optik medium meningkat sehingga nilai indeks bias juga cenderung mengalami kenaikan. Fenomena ini terjadi karena molekul protein memiliki kemampuan polarisasi terhadap gelombang elektromagnetik yang melewati medium tersebut (Barer et al., 2019).

Nilai indeks bias terlihat mengalami peningkatan (Tabel 4.1) seiring bertambahnya konsentrasi Interleukin-17. Larutan *Phosphate-Buffered Saline* (PBS) sebagai larutan dasar memiliki indeks bias sebesar 1,3338. Setelah ditambahkan IL-17 dengan konsentrasi 50 pg/mL, indeks bias meningkat menjadi 1,33395. Pada konsentrasi 100 pg/mL, 150 pg/mL, dan 200 pg/mL, indeks bias berturut-turut meningkat menjadi 1,33397; 1,33398; dan 1,33399. Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan molekul IL-17 memberikan kontribusi terhadap perubahan sifat optik larutan. Meskipun perubahan yang

terjadi berada pada orde 10^{-4} , perubahan ini tetap signifikan karena sensor SPR memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan indeks bias medium (Huaying et al., 2022).

Hubungan antara konsentrasi Interleukin-17 (IL-17) dan indeks bias ditunjukkan pada Gambar 4.1. Grafik memperlihatkan bahwa peningkatan konsentrasi IL-17 diikuti oleh kenaikan nilai indeks bias larutan, yang ditunjukkan oleh garis regresi linear dengan tren positif. Kondisi ini terjadi karena bertambahnya jumlah molekul protein dalam larutan sehingga meningkatkan kerapatan optik medium dan responsnya terhadap gelombang cahaya (Khago et al., 2018). Hasil tersebut sesuai dengan teori *refractive index increment* (dn/dc) yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi protein akan menyebabkan kenaikan indeks bias secara linier (Tan et al., 2006). Karakteristik ini mendukung penggunaan IL-17 sebagai analit dalam sensor SPR karena perubahan indeks bias dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan dan konsentrasi biomolekul target.

4.6.2. Pengujian Variasi Jenis Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR

Simulasi desain sensor SPR berbasis fiber optik dilakukan pada material logam perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu) untuk mengetahui pengaruh penggunaan material logam terhadap karakteristik resonansi dan performa sensor SPR. Desain awal sensor SPR menggunakan ketebalan logam 40 nm, panjang *probe sensing* 100 μm dan analit berupa interleukin-17 pada konsentrasi 100 pg/mL dengan indeks bias sebesar $n_a = 1.33397$.

Setiap material logam terlihat menghasilkan posisi dan kedalaman resonansi yang berbeda pada Gambar 4.2. Material Ag menghasilkan resonansi pada panjang gelombang 482,907 nm dengan transmitansi minimum 0,748303. Material Au menghasilkan resonansi pada panjang gelombang 572,249 nm dengan transmitansi minimum 0,726465, sedangkan material Cu menghasilkan resonansi pada panjang gelombang 591,104 nm dengan transmitansi minimum 0,772796. Resonansi yang lebih dalam pada material Au menunjukkan bahwa proses transfer energi dari gelombang *evanescent* menuju gelombang plasmon permukaan berlangsung lebih efektif dibandingkan material lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan Au mampu menghasilkan kopling energi yang lebih kuat sehingga menghasilkan penurunan transmitansi yang lebih besar pada daerah resonansi (Maier, 2007).

Perbedaan karakteristik resonansi tersebut berkaitan dengan sifat optik masing-masing logam. Logam Ag diketahui memiliki *optical loss* yang rendah sehingga mampu menghasilkan resonansi yang tajam. Namun demikian, Ag memiliki kestabilan kimia yang lebih rendah karena mudah mengalami oksidasi ketika berinteraksi dengan lingkungan (Homola, 2016). Sebaliknya, Au memiliki kestabilan kimia yang sangat baik serta mampu menghasilkan resonansi yang kuat pada daerah spektrum tampak sehingga banyak digunakan sebagai material plasmonik pada biosensor SPR. Sementara itu, Cu memiliki karakteristik plasmonik yang baik, tetapi cenderung mengalami oksidasi yang dapat menurunkan kualitas resonansi yang terbentuk (Maier, 2017).

Material Au menghasilkan sensitivitas tertinggi sebesar $3,81176 \text{ RIU}^{-1}$, diikuti oleh Cu sebesar $3,31765 \text{ RIU}^{-1}$ dan Ag sebesar $1,44706 \text{ RIU}^{-1}$. Tingginya

sensitivitas pada material Au menunjukkan bahwa perubahan indeks bias medium sensing mampu menghasilkan perubahan respons transmitansi yang lebih besar dibandingkan material lainnya. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Huraiya et al., 2026). Selain sensitivitas, kualitas resonansi juga dievaluasi menggunakan parameter FWHM. Nilai FWHM yang diperoleh berturut-turut adalah 60,8593 nm untuk Ag, 63,952 nm untuk Au, dan 86,9418 nm untuk Cu. Nilai FWHM yang lebih kecil menunjukkan kurva resonansi yang lebih sempit dan tajam sehingga kemampuan sensor dalam membedakan perubahan indeks bias menjadi lebih baik. Ag menghasilkan FWHM terkecil, sedangkan Cu menghasilkan FWHM terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa resonansi yang dihasilkan Cu cenderung lebih lebar dibandingkan Ag dan Au sehingga ketajaman resonansinya lebih rendah.

Parameter FoM, DA, dan QF digunakan untuk mengevaluasi performa sensor secara menyeluruh dengan mempertimbangkan sensitivitas dan kualitas resonansi yang dihasilkan. Material Au menghasilkan nilai FoM tertinggi sebesar $0,01630 \text{ RIU}^{-1}$, DA tertinggi sebesar $0,01564 \text{ nm}^{-1}$, dan QF tertinggi sebesar $0,05960 \text{ RIU}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan Ag maupun Cu. Tingginya nilai FoM menunjukkan bahwa peningkatan sensitivitas yang diperoleh Au masih diimbangi dengan kualitas resonansi yang baik. Selain itu, nilai DA yang lebih tinggi menunjukkan bahwa resonansi yang terbentuk masih cukup tajam untuk mendeteksi perubahan indeks bias secara akurat.

Material Ag menghasilkan nilai FWHM yang lebih kecil dibandingkan Au, namun sensitivitasnya jauh lebih rendah sehingga menyebabkan nilai FoM dan QF yang dihasilkan juga lebih rendah. Sebaliknya, Cu memiliki sensitivitas

yang cukup tinggi, tetapi nilai FWHM yang besar menyebabkan kualitas resonansi menurun sehingga nilai FoM, DA, dan QF yang diperoleh lebih rendah dibandingkan Au. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan material sensor tidak hanya ditentukan oleh sensitivitas yang tinggi, tetapi juga harus mempertimbangkan ketajaman resonansi yang dihasilkan.

Material Au memberikan performa terbaik dibandingkan Ag dan Cu karena menghasilkan sensitivitas tertinggi, nilai FoM tertinggi, nilai DA tertinggi, serta nilai QF tertinggi. Meskipun Ag menghasilkan resonansi yang lebih tajam dan Cu memiliki sensitivitas yang cukup tinggi, kombinasi antara sensitivitas dan kualitas resonansi yang dimiliki Au menjadikannya material plasmonik yang paling optimal untuk digunakan pada sensor SPR berbasis serat optik dalam penelitian ini.

4.6.3. Pengujian Variasi Ketebalan Material Logam terhadap Kinerja Sensor SPR

Ketebalan Material disimulasikan dengan variasi sebesar 10 nm sampai 80 nm menggunakan material logam Au yang telah ditentukan sebagai material optimum berdasarkan pengujian sebelumnya. Indeks bias IL-17 sebesar 1.33397 digunakan sebagai analit pada simulasi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketebalan material logam terhadap karakteristik resonansi SPR yang dihasilkan sensor.

Spektrum transmitansi yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 memperlihatkan bahwa setiap variasi ketebalan menghasilkan karakteristik resonansi yang berbeda, baik dari segi kedalaman resonansi maupun posisi panjang gelombang resonansi. Pada ketebalan 10 nm, resonansi yang terbentuk

masih relatif dangkal dengan nilai transmitansi minimum yang cukup tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan logam yang terlalu tipis belum mampu mendukung eksitasi plasmon permukaan secara optimal karena jumlah elektron bebas yang berinteraksi dengan medan *evanescent* masih terbatas. Akibatnya, transfer energi dari gelombang optik menuju gelombang plasmon permukaan berlangsung kurang efektif sehingga lembah resonansi yang dihasilkan belum terbentuk secara jelas (Maier, 2006).

Ketika ketebalan lapisan logam ditingkatkan menjadi 20 nm hingga 40 nm, resonansi terlihat semakin dalam dan lebih terdefinisi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kopling energi antara gelombang *evanescent* dan elektron bebas pada permukaan logam berlangsung semakin efektif. Bertambahnya ketebalan lapisan Au menyebabkan jumlah elektron bebas yang berpartisipasi dalam pembentukan gelombang plasmon permukaan meningkat sehingga energi optik yang ditransfer ke lapisan logam menjadi lebih besar. Akibatnya, terjadi penurunan transmitansi yang lebih signifikan pada daerah resonansi dan sensor menjadi lebih responsif terhadap perubahan indeks bias medium sensing.

Pada ketebalan di atas 40 nm, khususnya pada rentang 50 – 80 nm, posisi resonansi mengalami pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*). Pergeseran ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan logam memengaruhi kondisi resonansi sistem. Meskipun resonansi masih terbentuk dengan baik, lapisan logam yang semakin tebal menyebabkan sebagian energi optik teredam sebelum mencapai antarmuka logam dan medium sensing. Fenomena ini sejalan dengan penelitian (Sharma et al., 2007) yang menyatakan bahwa peningkatan ketebalan lapisan logam hingga mencapai

kondisi optimum dapat meningkatkan efisiensi eksitasi plasmon permukaan dan menghasilkan sensitivitas yang lebih tinggi. Namun, ketika ketebalan lapisan logam melebihi nilai optimum, sebagian energi optik akan mengalami redaman di dalam lapisan logam sehingga efisiensi kopling energi menurun dan performa sensor menjadi kurang optimal.

Peningkatan ketebalan lapisan Au dari 10 nm hingga 40 nm menyebabkan sensitivitas sensor meningkat secara signifikan dari $0,44671 \text{ RIU}^{-1}$ menjadi $3,81176 \text{ RIU}^{-1}$. Peningkatan ini menunjukkan bahwa interaksi antara medan *evanescent* dan gelombang plasmon permukaan menjadi semakin efektif seiring bertambahnya ketebalan lapisan logam. Ketebalan yang lebih besar memungkinkan transfer energi yang lebih optimal dari gelombang optik menuju elektron bebas pada permukaan logam sehingga perubahan indeks bias medium sensing menghasilkan perubahan respons resonansi yang lebih besar (Maharana, 2015). Namun, setelah mencapai ketebalan 40 nm, sensitivitas mengalami penurunan dan berada pada rentang $2,86 - 2,98 \text{ RIU}^{-1}$ untuk ketebalan 50 – 80 nm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lapisan logam yang terlalu tebal menyebabkan sebagian energi optik mengalami redaman di dalam lapisan logam sehingga efisiensi kopling energi berkurang.

Parameter *Full Width at Half Maximum* (FWHM) digunakan untuk mengevaluasi ketajaman kurva resonansi yang dihasilkan sensor. Nilai FWHM cenderung menurun seiring bertambahnya ketebalan lapisan Au, dari 99,28557 nm pada ketebalan 20 nm menjadi sekitar 42 – 43 nm pada ketebalan 60 – 80 nm. Penurunan nilai FWHM menunjukkan bahwa kurva resonansi menjadi semakin sempit dan tajam, sehingga kemampuan sensor dalam membedakan

perubahan indeks bias yang kecil menjadi lebih baik. Hal ini terjadi karena peningkatan ketebalan lapisan logam hingga rentang tertentu mampu meningkatkan kualitas kopling energi pada antarmuka logam dan medium dielektrik sehingga resonansi yang terbentuk menjadi lebih terdefinisi. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian (Gupta et al., 2009) yang menyatakan bahwa nilai FWHM yang lebih kecil menunjukkan kualitas resonansi yang lebih baik dan resolusi deteksi yang lebih tinggi. Meskipun demikian, ketebalan yang menghasilkan FWHM terkecil tidak selalu memberikan performa sensor terbaik karena perlu dipertimbangkan bersama parameter sensitivitas untuk memperoleh kondisi optimum sensor secara keseluruhan.

Variasi ketebalan lapisan Au memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik resonansi dan performa sensor SPR berbasis serat optik. Ketebalan yang terlalu tipis menyebabkan eksitasi plasmon permukaan belum terbentuk secara optimal, sedangkan ketebalan yang terlalu besar meningkatkan redaman optik di dalam lapisan logam sehingga menurunkan efisiensi kopling energi. Ketebalan 40 nm menghasilkan kombinasi terbaik antara kedalaman resonansi, sensitivitas, dan kualitas spektrum.

4.6.4. Pengujian Variasi Panjang *Probe Sensing* terhadap Kinerja Sensor SPR

Panjang probe sensing divariasikan dari 100 μm sampai 300 μm . Desain sensor SPR pada pengujian ini menggunakan material logam Au dengan ketebalan 40, dimana keduanya merupakan material dan ketebalan optimum yang dihasilkan dari pengujian sebelumnya. Nilai indeks bias IL-17 sebesar 1.33397 pada konsentrasi 100 pg/mL tetap digunakan pada pengujian ini.

Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa adanya peningkatan panjang probe sensing dari 100 μm menjadi 300 μm menyebabkan dip resonansi menjadi semakin dalam. Pada panjang probe sensing 100 μm , transmitansi minimum berada pada 0,727113, kemudian menurun menjadi 0,515587 pada panjang 200 μm , dan mencapai sekitar 0,363993 pada panjang 300 μm . Penurunan transmitansi minimum ini menunjukkan bahwa semakin besar energi cahaya yang ditransfer ke mode plasmon permukaan sehingga intensitas cahaya yang diteruskan melalui serat optik semakin berkurang (Maier, 2007). Dalam metode *intensity interrogation*, kedalaman resonansi menjadi indikator penting karena perubahan intensitas transmitansi digunakan sebagai parameter utama untuk mendeteksi perubahan indeks bias medium sensing. Dengan demikian, resonansi yang lebih dalam menunjukkan interaksi plasmonik yang lebih kuat dan respons sensor yang lebih mudah diamati. Selain menghasilkan resonansi yang lebih dalam, peningkatan panjang probe sensing juga menyebabkan bentuk kurva resonansi menjadi lebih tegas dan kontras dibandingkan panjang probe sensing yang lebih pendek (Homola, 2006). Hal ini terjadi karena medan *evanescent* memiliki daerah interaksi yang lebih luas dengan medium sensing sehingga proses transfer energi menuju gelombang plasmon berlangsung lebih efisien.

Peningkatan panjang probe sensing pada Gambar 4.9 menyebabkan nilai FWHM menurun dari 63,952 nm pada panjang 100 μm menjadi 39,04262 nm pada 200 μm , kemudian sedikit meningkat menjadi 40,04325 nm pada 300 μm . Penurunan FWHM menunjukkan bahwa kurva resonansi menjadi lebih sempit dan tajam sehingga resonansi SPR dapat diamati dengan lebih jelas. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan panjang probe sensing mampu

meningkatkan efisiensi kopling antara medan *evanescent* dan gelombang plasmon permukaan karena daerah interaksi yang semakin luas (Homola, 2006). Meskipun terjadi sedikit kenaikan pada panjang 300 μm , nilai FWHM yang diperoleh masih relatif rendah sehingga kualitas resonansi tetap terjaga dengan baik.

Sensitivitas sensor meningkat seiring bertambahnya panjang probe sensing, yaitu dari 3,81176 RIU^{-1} pada 100 μm menjadi 6,29412 RIU^{-1} pada 200 μm dan mencapai 6,9 RIU^{-1} pada 300 μm . Peningkatan sensitivitas ini menunjukkan bahwa daerah interaksi yang lebih panjang memungkinkan medan *evanescent* berinteraksi lebih kuat dengan medium sensing, sehingga perubahan indeks bias menghasilkan perubahan transmitansi yang lebih signifikan (Sharma, 2007). Hasil tersebut sesuai dengan teori SPR yang menyatakan bahwa peningkatan panjang daerah sensing dapat meningkatkan interaksi plasmonik dan memperbesar respons sensor terhadap perubahan indeks bias medium.

Evaluasi performa sensor juga dilakukan menggunakan parameter *Figure of Merit* (FoM), *Detection Accuracy* (DA), dan *Quality Factor* (QF) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2. Ketiga parameter tersebut menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya panjang probe sensing. Nilai FoM meningkat dari 0,0163 RIU^{-1} pada panjang probe sensing 100 μm menjadi 0,07827 RIU^{-1} pada 200 μm dan mencapai 0,10979 RIU^{-1} pada 300 μm . Peningkatan FoM menunjukkan bahwa kenaikan sensitivitas sensor masih diimbangi oleh kualitas resonansi yang baik. Nilai DA juga meningkat dari 0,01564 nm^{-1} menjadi 0,02561 nm^{-1} pada panjang 200 μm dan tetap tinggi sebesar 0,02497 nm^{-1} pada panjang 300 μm . Kondisi ini mengindikasikan bahwa

sensor memiliki kemampuan yang lebih baik dalam membedakan perubahan respons resonansi akibat variasi indeks bias medium. Sementara itu, nilai QF meningkat secara konsisten dari $0,0596 \text{ RIU}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ menjadi $0,16121 \text{ RIU}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ dan mencapai nilai tertinggi sebesar $0,17231 \text{ RIU}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ pada panjang probe sensing $300 \text{ }\mu\text{m}$. Menurut (Maharanaet et al., 2015), nilai FoM, DA, dan QF yang tinggi menunjukkan bahwa sensor tidak hanya memiliki sensitivitas yang baik, tetapi juga mampu mempertahankan kualitas resonansi sehingga performa deteksi menjadi lebih optimal. Oleh karena itu, berdasarkan ketiga parameter tersebut, panjang probe sensing $300 \text{ }\mu\text{m}$ memberikan performa terbaik dibandingkan variasi lainnya.

4.6.5. Pengujian Variasi Indeks Bias

Perubahan indeks bias medium sensing menyebabkan perubahan karakteristik resonansi pada sensor SPR yang ditunjukkan melalui perubahan nilai transmitansi pada daerah resonansi. Fenomena ini terjadi karena peningkatan indeks bias medium sensing mengubah konstanta dielektrik pada antarmuka logam-dielektrik sehingga memengaruhi kondisi pencocokan momentum (*momentum matching*) antara gelombang *evanescent* dan gelombang plasmon permukaan. Ketika kondisi resonansi berubah, distribusi energi optik yang ditransfer dari gelombang *evanescent* menuju gelombang plasmon permukaan juga mengalami perubahan sehingga menghasilkan perbedaan respons transmitansi yang teramati pada spektrum sensor. Fenomena tersebut sesuai dengan teori (Homola, 2016) yang menyatakan bahwa karakteristik resonansi sangat dipengaruhi oleh perubahan indeks bias medium di sekitar

lapisan logam plasmonik karena medan *evanescent* yang terbentuk sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan optiknya.

Hubungan antara konsentrasi Interleukin-17 dan transmitansi minimum sensor ditunjukkan pada Gambar 4.12. Berdasarkan hasil regresi linear, peningkatan konsentrasi Interleukin-17 dari 50 pg/mL hingga 200 pg/mL menyebabkan transmitansi minimum menurun secara bertahap dari 0,362956 a.u. menjadi 0,362683 a.u. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = 0,36302 - 1,774 \times 10^{-6}x$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,96658 dan koefisien korelasi Pearson (r) sebesar -0,98315. Nilai R^2 menunjukkan bahwa model regresi linear mampu menjelaskan sekitar 96,66% variasi data transmitansi minimum terhadap perubahan konsentrasi Interleukin-17, sedangkan nilai koefisien korelasi yang mendekati -1 menunjukkan adanya hubungan linear negatif yang sangat kuat antara kedua variabel. Hubungan linear tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi konsentrasi Interleukin-17, semakin rendah nilai transmitansi minimum yang dihasilkan sensor, sehingga sensor mampu memberikan respons yang konsisten terhadap perubahan konsentrasi analit pada rentang pengujian yang dilakukan.

Penurunan transmitansi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi IL-17 yang diikuti oleh kenaikan indeks bias medium sensing menyebabkan transfer energi dari gelombang *evanescent* menuju gelombang plasmon permukaan menjadi semakin besar. Akibatnya, energi cahaya yang diteruskan melalui serat optik semakin berkurang sehingga nilai transmitansi minimum yang terukur menjadi lebih rendah. Fenomena ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Homola (2006) bahwa perubahan indeks bias medium

di sekitar lapisan logam akan mengubah kondisi resonansi plasmon permukaan sehingga memengaruhi distribusi energi optik dan respons intensitas yang dihasilkan. Selain itu, hasil regresi yang menunjukkan hubungan linear negatif yang sangat kuat memperlihatkan bahwa metode intensity interrogation mampu mendeteksi variasi konsentrasi Interleukin-17 melalui perubahan intensitas cahaya tanpa memerlukan pergeseran panjang gelombang resonansi. Hasil ini sejalan dengan Gupta dan Verma (2009) yang menyatakan bahwa pada metode intensity interrogation, perubahan indeks bias medium direpresentasikan oleh perubahan intensitas cahaya yang terdeteksi, sehingga hubungan linear antara konsentrasi analit dan transmitansi menjadi indikator bahwa sensor memiliki performa yang baik dalam mendeteksi perubahan konsentrasi biomolekul.

Nilai sensitivitas mengalami penurunan dari $6,913333 \text{ RIU}^{-1}$ menjadi $6,894737 \text{ RIU}^{-1}$ seiring peningkatan indeks bias medium sensing. Penurunan ini menunjukkan bahwa perubahan respons transmitansi yang dihasilkan untuk setiap perubahan indeks bias menjadi sedikit lebih kecil pada rentang indeks bias yang lebih tinggi. Di sisi lain, nilai FWHM meningkat dari $40,03448 \text{ nm}$ menjadi $40,05198 \text{ nm}$. Peningkatan FWHM menunjukkan bahwa kurva resonansi menjadi sedikit lebih lebar sehingga ketajaman resonansi berkurang. Meskipun demikian, perubahan sensitivitas dan FWHM yang diperoleh masih relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa karakteristik resonansi sensor tetap stabil pada rentang indeks bias yang diuji.

Penurunan sensitivitas yang disertai peningkatan FWHM menyebabkan nilai FoM mengalami penurunan dari $0,110008 \text{ RIU}^{-1}$ menjadi $0,109795 \text{ RIU}^{-1}$. Secara teori oleh (Maharana, 2012), FoM dipengaruhi oleh perbandingan antara

sensitivitas dan lebar resonansi, sehingga peningkatan FWHM serta penurunan sensitivitas akan menurunkan kemampuan sensor dalam membedakan perubahan indeks bias secara akurat. Nilai DA juga menunjukkan tren menurun dari $0,024978 \text{ nm}^{-1}$ menjadi $0,024968 \text{ nm}^{-1}$. Parameter DA berkaitan dengan ketajaman kurva resonansi yang terbentuk. Semakin lebar kurva resonansi yang ditunjukkan oleh nilai FWHM yang lebih besar, maka nilai DA akan semakin kecil karena posisi resonansi menjadi kurang terdefinisi dengan baik. Tren serupa ditunjukkan oleh nilai QF yang menurun dari $0,172684 \text{ RIU}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ menjadi $0,172145 \text{ RIU}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Penurunan QF mengindikasikan adanya sedikit penurunan kualitas resonansi sensor akibat perubahan indeks bias medium sensing. Namun demikian, perubahan nilai FoM, DA, dan QF yang relatif kecil menunjukkan bahwa konfigurasi sensor yang digunakan masih mampu mempertahankan kualitas resonansi yang baik dan respons yang stabil terhadap perubahan indeks bias yang diberikan.

Peningkatan indeks bias medium sensing memengaruhi karakteristik resonansi sensor SPR yang ditandai dengan perubahan respons transmitansi, penurunan sensitivitas, FoM, DA, dan QF, serta peningkatan nilai FWHM. Hasil tersebut sejalan dengan teori SPR pada penelitian (Peres, 2012) yang menyatakan bahwa perubahan indeks bias pada medium sensing akan mengubah kondisi resonansi plasmon permukaan dan memengaruhi kualitas resonansi yang terbentuk. Meskipun demikian, perubahan parameter performa yang terjadi relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa sensor dengan material Au, ketebalan lapisan logam 40 nm, dan panjang probe sensing 300 μm masih mampu

mempertahankan respons yang stabil terhadap variasi indeks bias pada rentang pengujian yang dilakukan.

4.6.6. Keterkaitan Hasil Penelitian dalam Prespektif Islam

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik dan kinerja sensor SPR dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti jenis material logam plasmonik, ketebalan lapisan logam, panjang probe sensing, dan indeks bias medium sensing. Setiap parameter menghasilkan respons yang berbeda terhadap performa sensor sehingga diperlukan proses optimasi untuk memperoleh konfigurasi yang memberikan kinerja terbaik. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa perubahan kecil pada suatu parameter dapat menghasilkan perubahan karakteristik sistem secara keseluruhan. Keteraturan hubungan antarparameter tidak hanya dapat dianalisis secara ilmiah tetapi juga berkaitan dengan nilai-nilai Islam. Allah Swt. berfirman dalam Q.S. Al-Qamar (54): 49:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ

“*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran (takdir).*”

(Q.S. Al-Qamar (54): 49).

Menurut M. Quraish Shihab dalam Tafsir Al-Misbah, kata *biqadar* menunjukkan bahwa seluruh ciptaan Allah Swt. berada dalam ketentuan, ukuran, dan sistem yang telah ditetapkan secara sempurna sehingga tidak ada sesuatu yang tercipta secara kebetulan. Setiap fenomena alam memiliki hukum dan keteraturan yang dapat dipelajari melalui ilmu pengetahuan. Dalam penelitian ini, keteraturan tersebut terlihat dari hubungan antara parameter sensor dengan karakteristik resonansi yang dihasilkan. Perubahan jenis material logam, ketebalan lapisan, panjang probe sensing, maupun indeks bias medium sensing

menghasilkan perubahan nilai sensitivitas, FWHM, FoM, DA, dan QF secara terukur. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena interaksi cahaya dengan material plasmonik berlangsung mengikuti hukum-hukum alam yang telah ditetapkan oleh Allah Swt.

Selain menunjukkan adanya keteraturan, penelitian ini juga merupakan bentuk pengkajian terhadap fenomena alam yang dianjurkan dalam Islam. Allah Swt. berfirman dalam Q.S. Ali 'Imran (3): 190 – 191:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمُوتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾
الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمُوتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا
مَا خَلَقْتَ هَذَا بَاطِلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ﴿١٩١﴾

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan pergantian malam dan siang terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri, duduk, atau dalam keadaan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi.” (Q.S. Ali 'Imran (3): 190 – 191).

Tafsir Ibnu Katsir menjelaskan bahwa ayat ini mendorong manusia untuk mengamati, meneliti, dan merenungkan berbagai fenomena alam sebagai sarana untuk memahami kebesaran Allah Swt (Ismail, 2008). Melalui penelitian ini, fenomena interaksi antara gelombang cahaya dan elektron bebas pada permukaan logam dapat dipahami melalui pendekatan ilmiah. Kemampuan sensor SPR dalam mendeteksi perubahan indeks bias yang sangat kecil menunjukkan adanya keteraturan hukum fisika yang bekerja pada skala mikroskopis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan pengetahuan ilmiah, tetapi juga menjadi sarana untuk meningkatkan kesadaran

akan kebesaran dan kekuasaan Allah Swt. yang menciptakan alam semesta dengan sistem yang sangat teratur.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa performa sensor terbaik diperoleh ketika parameter yang digunakan berada pada kondisi yang tepat dan seimbang. Konsep keseimbangan tersebut selaras dengan firman Allah Swt. dalam Q.S. Ar-Rahman (55) ayat 7 – 9:

وَالسَّمَاءَ رَفَعَهَا وَوَضَعَ الْمِيزَانَ ﴿٧﴾ أَلَّا تَطْغَوْا فِي الْمِيزَانِ ﴿٨﴾ وَأَقِيمُوا الْوَزْنَ بِالْقِسْطِ وَلَا تُخْسِرُوا الْمِيزَانَ ﴿٩﴾

“Dan langit telah Dia tinggikan dan Dia ciptakan keseimbangan, agar kamu jangan merusak keseimbangan itu. Dan tegakkanlah keseimbangan itu dengan adil dan janganlah kamu mengurangi keseimbangan itu.” (Q.S. Ar-Rahman (55): 7 – 9).

Menurut Tafsir Al-Misbah, istilah mizan tidak hanya bermakna timbangan dalam arti fisik, tetapi juga mencakup keseimbangan, keteraturan, dan proporsionalitas yang menjadi dasar seluruh sistem kehidupan. Dalam penelitian ini, konsep keseimbangan tersebut tercermin pada proses optimasi sensor, di mana setiap parameter harus berada pada kondisi yang sesuai agar menghasilkan performa terbaik. Material Au, ketebalan lapisan logam 30 nm, dan panjang probe sensing 200 μm menghasilkan kombinasi parameter yang mampu memberikan respons sensor yang optimal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa performa terbaik tidak selalu diperoleh dari nilai parameter yang paling besar atau paling kecil, melainkan dari kombinasi parameter yang berada pada kondisi paling seimbang.

Dalam perspektif Islam, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi tidak hanya dipandang sebagai upaya untuk memperoleh pengetahuan ilmiah semata, tetapi juga sebagai sarana untuk mewujudkan kemaslahatan bagi manusia dan lingkungan. Integrasi antara sains dan nilai-nilai Islam menjadi penting agar perkembangan teknologi tetap berjalan sesuai dengan prinsip kebermanfaatan, keseimbangan, dan tanggung jawab terhadap kehidupan. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam menghubungkan perkembangan sains dengan nilai-nilai Islam adalah melalui konsep *Maqāṣid asy-Syarī'ah*.

Menurut ulama klasik Abu Ishaq al-Syatibi dalam kitab *Al-Muwafaqat fi Ushul al-Syari'ah*, *maqāṣid asy-syarī'ah* adalah tujuan ditetapkan hukum Islam demi mewujudkan kemaslahatan (kabaikan dan kesejahteraan) bagi seluruh umat manusia di dunia dan akhirat serta menjauhkan mereka dari kerusakan. Al-Syatibi membagi *maqāṣid asy-syarī'ah* ke dalam lima aspek utama, yaitu menjaga agama (*ḥifẓ ad-dīn*), menjaga jiwa (*ḥifẓ an-nafs*), menjaga akal (*ḥifẓ al-'aql*), menjaga keturunan (*ḥifẓ an-nasl*), dan menjaga harta (*ḥifẓ al-māl*). Dalam perkembangannya, para ulama kontemporer juga memasukkan aspek menjaga lingkungan (*ḥifẓ al-bi'ah*) dan menjaga kesehatan (*ḥifẓ aṣ-ṣiḥḥah*) sebagai bentuk implementasi *maqāṣid* dalam menghadapi tantangan kehidupan modern, termasuk perkembangan sains dan teknologi (Choiriyah et al., 2025). Konsep tersebut menunjukkan bahwa Islam tidak hanya mengatur hubungan manusia dengan Allah Swt., tetapi juga mengatur bagaimana manusia memanfaatkan ilmu pengetahuan dan teknologi demi kemaslahatan bersama.

Optimasi desain sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik untuk mendeteksi konsentrasi Interleukin-17 (IL-17) memiliki keterkaitan

dengan nilai-nilai *maqāṣid asy-syarī'ah*, terutama pada aspek *ḥifẓ an-nafs* (menjaga jiwa) dan *ḥifẓ aṣ-ṣiḥḥah* (menjaga kesehatan). Sensor SPR yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki kemampuan mendeteksi perubahan indeks bias dalam skala sangat kecil melalui optimasi parameter seperti jenis material logam plasmonik, ketebalan lapisan logam, panjang probe sensing, dan indeks bias medium sensing. Kemampuan tersebut menunjukkan potensi sensor untuk digunakan dalam bidang diagnostik medis dan deteksi biomarker penyakit secara lebih sensitif dan akurat. Dengan demikian, pengembangan teknologi sensor ini dapat menjadi salah satu bentuk upaya ilmiah dalam mendukung perlindungan kesehatan manusia serta pencegahan penyakit melalui metode deteksi dini.

Selain berkaitan dengan perlindungan kesehatan, tercerminkan juga aspek *ḥifẓ al-‘aql* (menjaga akal) karena proses penelitian dilakukan melalui pengkajian ilmiah terhadap fenomena interaksi cahaya dan material plasmonik. Dalam penelitian Choiriyah et al. (2025) dijelaskan bahwa integrasi sains dan Islam memandang ilmu pengetahuan sebagai sarana memahami ayat-ayat kauniyah Allah Swt. melalui pengamatan dan penelitian terhadap fenomena alam. Hal tersebut sejalan dengan penelitian ini, di mana perubahan parameter sensor menghasilkan perubahan karakteristik resonansi secara terukur sehingga menunjukkan adanya keteraturan hukum fisika yang bekerja sesuai ketentuan Allah Swt. Keteraturan tersebut membuktikan bahwa fenomena ilmiah tidak terjadi secara kebetulan, melainkan berlangsung mengikuti sistem dan ukuran yang telah ditetapkan oleh-Nya.

Penelitian ini juga memiliki relevansi dengan *ḥifẓ an-nasl* (menjaga keturunan). Menurut Imam Abu Ishaq al-Syatibi, salah satu tujuan *maqāṣid asy-syarī'ah* adalah menjaga keberlangsungan generasi manusia melalui perlindungan terhadap kesehatan reproduksi dan faktor-faktor yang memengaruhi kualitas keturunan. Dalam bidang kesehatan, Interleukin-17 diketahui berperan dalam mekanisme inflamasi yang tidak hanya berkaitan dengan penyakit autoimun, tetapi juga berhubungan dengan beberapa gangguan pada sistem reproduksi dan komplikasi kehamilan. Oleh karena itu, pengembangan sensor SPR yang mampu mendeteksi biomarker IL-17 secara sensitif berpotensi mendukung deteksi dini terhadap kondisi tersebut. Kemampuan deteksi dini diharapkan dapat membantu proses diagnosis dan penanganan medis secara lebih cepat sehingga dapat meminimalkan risiko gangguan kesehatan yang berpotensi memengaruhi keberlangsungan dan kualitas keturunan.

Aspek *ḥifẓ al-māl* (menjaga harta) juga berkaitan dengan penelitian ini karena pengembangan sensor optik berbasis fiber optik berpotensi menghasilkan teknologi diagnostik yang lebih efisien dan optimal. Proses optimasi parameter menunjukkan bahwa performa terbaik tidak diperoleh dari penggunaan parameter terbesar, melainkan dari kombinasi parameter yang paling seimbang. Prinsip tersebut selaras dengan konsep *mīzān* dalam Islam yang menekankan pentingnya keseimbangan, keteraturan, dan proporsionalitas dalam setiap sistem kehidupan. Selain itu, optimalisasi sensor memungkinkan peningkatan performa tanpa penggunaan sumber daya secara berlebihan sehingga mencerminkan prinsip efisiensi dan kemanfaatan teknologi secara bijaksana.

Dalam perspektif *maqāṣid* kontemporer, penelitian ini juga memiliki keterkaitan dengan *ḥifẓ al-bi'ah* (menjaga lingkungan). Proses optimasi desain sensor dilakukan menggunakan simulasi berbasis metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD), sehingga tidak memerlukan pembuatan prototipe secara berulang maupun penggunaan bahan kimia yang berpotensi menghasilkan limbah selama tahap optimasi. Selain itu, sensor SPR berbasis fiber optik memanfaatkan propagasi cahaya sebagai media deteksi sehingga memiliki kebutuhan energi yang relatif rendah dan tidak menghasilkan polusi selama proses pengukuran. Oleh karena itu, penelitian ini mendukung pengembangan teknologi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Upaya tersebut sejalan dengan tujuan *ḥifẓ al-bi'ah*, yaitu menjaga kelestarian lingkungan melalui pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi secara bertanggung jawab demi kemaslahatan manusia dan keberlangsungan kehidupan.

Pengembangan sensor SPR berbasis fiber optik tidak hanya memiliki nilai ilmiah dalam bidang fisika dan teknologi sensor, tetapi juga mengandung nilai-nilai *maqāṣid asy-syarī'ah* yang berorientasi pada kemaslahatan manusia. Penelitian ini mendukung *ḥifẓ an-nafs* dan *ḥifẓ aṣ-ṣiḥḥah* melalui pengembangan teknologi deteksi biomarker untuk bidang kesehatan, *ḥifẓ an-nasl* melalui potensi penerapannya dalam mendukung kesehatan reproduksi dan keberlangsungan generasi, *ḥifẓ al-'aql* melalui pengembangan ilmu pengetahuan, *ḥifẓ al-māl* melalui optimalisasi teknologi yang efisien, serta *ḥifẓ al-bi'ah* melalui pemanfaatan metode penelitian dan teknologi yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa

perkembangan sains dan teknologi dapat berjalan selaras dengan nilai-nilai Islam dalam mewujudkan kemaslahatan (maṣlaḥah) bagi manusia dan lingkungan.

Pengembangan sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik tidak hanya memberikan kontribusi dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, tetapi juga sejalan dengan tujuan syariat Islam dalam mewujudkan kemaslahatan (maṣlaḥah) bagi manusia. Untuk memberikan gambaran yang lebih sistematis, hasil analisis keterkaitan penelitian dengan aspek-aspek *Maqāṣid asy-Syarī'ah* disajikan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Kesesuaian Penelitian dengan *Maqāṣid asy-Syarī'ah*

No.	<i>Maqāṣid asy-Syarī'ah</i>	Bukti Kesesuaian dengan Penelitian
1.	<i>Ḥifẓ an-Nafs</i> (Menjaga Jiwa)	Penelitian ini mengembangkan sensor Surface Plasmon Resonance (SPR) berbasis fiber optik yang dioptimasi untuk mendeteksi biomarker Interleukin-17 (IL-17). Kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan indeks bias dengan sensitivitas tinggi berpotensi mendukung deteksi dini berbagai penyakit yang berkaitan dengan peningkatan kadar IL-17, sehingga dapat membantu proses diagnosis dan penanganan medis secara lebih cepat sebagai upaya menjaga keselamatan jiwa manusia.
2.	<i>Ḥifẓ aṣ-Ṣiḥḥah</i> (Menjaga Kesehatan)	Optimasi parameter sensor seperti material plasmonik, ketebalan lapisan logam, panjang <i>probe sensing</i> , dan indeks bias menghasilkan konfigurasi sensor dengan performa terbaik. Pengembangan teknologi diagnostik yang lebih sensitif, akurat, dan efisien ini mendukung peningkatan kualitas pelayanan kesehatan melalui deteksi biomarker yang lebih andal.
3.	<i>Ḥifẓ an-Nasl</i> (Menjaga Keturunan)	Biomarker Interleukin-17 diketahui berperan dalam berbagai proses inflamasi

		yang juga berkaitan dengan beberapa gangguan pada sistem reproduksi dan komplikasi kehamilan. Oleh karena itu, pengembangan sensor yang mampu mendeteksi IL-17 secara sensitif berpotensi mendukung deteksi dini terhadap kondisi tersebut sehingga dapat membantu menjaga kesehatan reproduksi serta mendukung keberlangsungan dan kualitas generasi yang akan datang.
4.	<i>Hifz al-'Aql</i> (Menjaga Akal)	Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan ilmiah menggunakan metode <i>Finite-Difference Time-Domain</i> (FDTD) untuk menganalisis interaksi gelombang elektromagnetik dengan material plasmonik. Proses analisis, optimasi, dan interpretasi hasil merupakan bentuk pengembangan ilmu pengetahuan dan pemanfaatan akal yang sejalan dengan anjuran Islam untuk mengkaji fenomena alam sebagai tanda kebesaran Allah Swt.
5.	<i>Hifz al-Māl</i> (Menjaga Harta)	Proses optimasi sensor dilakukan melalui simulasi sehingga dapat memperoleh konfigurasi terbaik tanpa memerlukan pembuatan prototipe secara berulang. Pendekatan ini menghemat penggunaan material, waktu, dan biaya penelitian. Selain itu, pengembangan sensor yang lebih akurat berpotensi mengurangi biaya pemeriksaan akibat kesalahan diagnosis maupun pengujian yang berulang sehingga mendukung pemanfaatan sumber daya secara efisien.
6.	<i>Hifz al-Bi'ah</i> (Menjaga Lingkungan)	Penelitian dilakukan menggunakan simulasi berbasis metode FDTD sehingga tidak menghasilkan limbah bahan kimia maupun penggunaan material fisik secara berulang selama proses optimasi. Selain itu, sensor SPR berbasis fiber optik memanfaatkan cahaya sebagai media deteksi dengan kebutuhan energi yang relatif rendah serta tidak menghasilkan

		polusi selama proses pengukuran. Oleh karena itu, penelitian ini mendukung pengembangan teknologi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.
--	--	--

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Analisis dan optimasi terhadap beberapa parameter sensor telah dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sensor SPR pada penelitian ini. Parameter yang dioptimalkan meliputi material logam yang digunakan, ketebalan lapisan plasmonik, dan panjang probe sensing. Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. Indeks bias isolat Interleukin-17 (IL-17) berhasil ditentukan melalui *curve fitting* menggunakan fungsi pangkat berdasarkan data hubungan antara konsentrasi dan indeks bias yang diperoleh dari pengukuran refraktometer digital. Hasil *fitting* menghasilkan Persamaan yang kemudian digunakan untuk menghitung indeks bias pada setiap variasi konsentrasi IL-17 diperoleh nilai indeks bias sebesar 1,33395 untuk konsentrasi 50 pg/mL, 1,33397 untuk 100 pg/mL, 1,33398 untuk 150 pg/mL, dan 1,33399 untuk 200 pg/mL. Ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi IL-17 menyebabkan peningkatan indeks bias medium sensing.
2. Optimasi jenis bahan lapisan tipis logam menunjukkan bahwa emas (Au) merupakan material plasmonik optimum untuk deteksi konsentrasi Interleukin-17 dibandingkan perak (Ag) dan tembaga (Cu). Material Au menghasilkan sensitivitas tertinggi sebesar $3,811765 \text{ RIU}^{-1}$, nilai *Figure of Merit* (FoM) sebesar 0,016304, dan *Quality Factor* (QF) sebesar 0,059604. Meskipun nilai *Detection Accuracy* (DA) tertinggi diperoleh pada material Ag sebesar 0,016431, perbedaannya relatif kecil dibandingkan Au. Oleh karena itu, Au

dipilih sebagai material optimum karena memberikan respons intensitas paling besar terhadap perubahan indeks bias serta menunjukkan performa sensor terbaik secara keseluruhan.

3. Variasi ketebalan lapisan logam memengaruhi respons intensitas sensor SPR dalam mendeteksi konsentrasi IL-17. Ketebalan optimum diperoleh pada 40 nm karena menghasilkan perubahan transmitansi dan sensitivitas tertinggi, yaitu masing-masing sebesar 0,000648 dan 3,811765 RIU⁻¹. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan logam Au setebal 40 nm mampu menghasilkan interaksi yang paling efektif antara medan *evanescent* dan surface plasmon sehingga memberikan performa sensor terbaik.
4. Panjang probe sensing memberikan pengaruh terhadap sensitivitas sensor, terlihat adanya peningkatan tren seiring bertambahnya panjang daerah sensing. Panjang probe sensing optimum diperoleh pada 300 μm dengan sensitivitas sebesar 6,9 RIU⁻¹, FoM sebesar 0,109795, dan QF sebesar 0,172314. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan panjang probe sensing mampu meningkatkan interaksi medan *evanescent* dengan lapisan logam sehingga respons sensor terhadap perubahan konsentrasi IL-17 menjadi lebih sensitif.

5.2. Saran

Sebagai upaya penyempurnaan dan pengembangan penelitian mengenai sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis serat optik untuk deteksi Interleukin-17, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Variasi panjang probe sensing dapat diperluas hingga melebihi 300 μm untuk mengetahui apakah sensitivitas sensor masih mengalami peningkatan atau telah mencapai kondisi optimum.
2. Penggunaan material plasmonik lain, seperti kombinasi logam bimetal (Au–Ag atau Au–Cu), maupun material dua dimensi lainnya dapat dieksplorasi sebagai lapisan sensing untuk meningkatkan sensitivitas dan stabilitas sensor.
3. Pengembangan sensor untuk mendeteksi biomarker penyakit lainnya dengan rentang indeks bias yang berbeda perlu dilakukan guna memperluas aplikasi sensor SPR berbasis serat optik di bidang biosensing dan diagnosis medis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aftab, M., Mansha, M. S., Iqbal, T., & Farooq, M. (2024). Surface Plasmon Excitation: Theory, Configurations, and Applications. In *Plasmonics* (Vol. 19, Number 4, pp. 1701–1719). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-02095-2>
- Al-Qazwini, Y., Noor, A. S. M., Arasu, P. T., & Sadrolhosseini, A. R. (2013). Investigation of the performance of an SPR-based optical fiber sensor using finite-difference time domain. *Current Applied Physics*, 13(7), 1354–1358. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.04.011>
- Beringer, A., Noack, M., & Miossec, P. (2016). IL-17 in Chronic Inflammation: From Discovery to Targeting. *Trends in Molecular Medicine*, 22(3), 230–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molmed.2016.01.001>
- Clark, S. (2018). *Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on High-Index Dielectric Metal-Insulator-Metal Structures Recommended Citation*. <https://cedar.wwwu.edu/wwuet>
- Dika Mauludi, L., Yantidewi, M., Firdaus, R. A., Fisika, D., Matematika, F., Ilmu, D., Alam, P., Surabaya, U. N., Penelitian, A., Kunci, K., Emas, L., & Perak, D. (2024). Optimalisasi Sensor (SPR) Surface Plasmon Resonance dengan Lapisan Emas dan Perak untuk Deteksi Logam Berat Optimization of Surface Plasmon Resonance Sensor with Gold and Silver Coating for Heavy Metal Detection. *J Jurnal Kolaboratif Sains*, 7(7), 2328–2336. <https://doi.org/10.56338/jks.v7i7.5545>
- Hafida, N. H., & Rubiyanto, A. (2018). Analisis Sensor Pengukuran Konsentrasi Glukosa Prinsip Macrobending pada Serat Optik Multimode Step-Index. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 7(1), 43–47. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v7i1.28837>
- Homola, J. (2008). Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species. *Chemical Reviews*, 108(2), 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
- Hua, Y., Wang, R., & Li, D. (2022). A Fiber-based SPR Aptasensor for the In Vitro Detection of Inflammation Biomarkers. *Micromachines*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/mi13071036>
- Imas, J. J., Zamarreño, C. R., Zubiate, P., Sanchez-Martín, L., Campión, J., & Matías, I. R. (2020). Optical biosensors for the detection of rheumatoid arthritis (Ra) biomarkers: A comprehensive review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Number 21, pp. 1–51). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20216289>
- Khoirul Anam, M., Narindra, R., & Abraha, K. (2013). Deteksi Formalin Menggunakan Surface Plasmon Resonance (SPR) Berbasis Nanopartikel

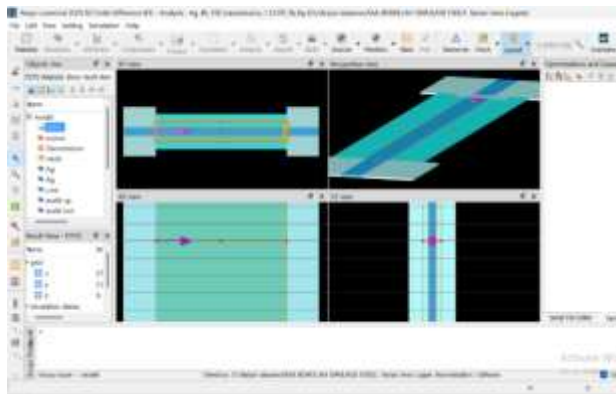
- Perak sebagai Pengembangan Awal Teknologi Food Safety. In *Indonesian Journal of Applied Physics* (Vol. 3, Number 2).
- Lee, S., Song, H., Ahn, H., Kim, S., Choi, J. ryul, & Kim, K. (2021). Fiber-optic localized surface plasmon resonance sensors based on nanomaterials. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 21, Number 3, pp. 1–22). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s21030819>
- Leng, S. X., McElhaney, J. E., Walston, J. D., Xie, D., Fedarko, N. S., & Kuchel, G. A. (2008). ELISA and Multiplex Technologies for Cytokine Measurement in Inflammation and Aging Research. *The Journals of Gerontology: Series A*, 63(8), 879–884. <https://doi.org/10.1093/gerona/63.8.879>
- Lismont, M., & Dreesen, L. (2012). Comparative study of Ag and Au nanoparticles biosensors based on surface plasmon resonance phenomenon. *Materials Science and Engineering: C*, 32(6), 1437–1442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.04.023>
- Marzano, C., Pitruzzella, R., Arcadio, F., Passeggio, F., Seggio, M., Zeni, L., Pasquardini, L., & Cennamo, N. (2025). Detecting Attomolar Concentrations of Interleukin IL-17A via Pollen-Based Nanoplasmonic Biochips. *Biosensors*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/bios15030161>
- McCoy, D. E., Shneidman, A. V., Davis, A. L., & Aizenberg, J. (2021). Finite-difference Time-domain (FDTD) Optical Simulations: A Primer for the Life Sciences and Bio-Inspired Engineering. In *Micron* (Vol. 151). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103160>
- Popović, M., Dedić Plavetić, N., Vrbanc, D., Marušić, Z., Mijatović, D., & Kulić, A. (2023). Interleukin 17 in early invasive breast cancer. *Frontiers in Oncology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1171254>
- Rahman, M. M., Abdulrazak, L. F., Ahsan, M., Based, M. A., Rana, M. M., Anower, M. S., Rikta, K. A., Haider, J., & Gurusamy, S. (2022). 2D Nanomaterial-Based Hybrid Structured (Au-WSe₂-PtSe₂-BP) Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensor With Improved Performance. *IEEE Access*, 10, 689–698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137420>
- Ruiz de Morales, J. M. G., Puig, L., Daudén, E., Cañete, J. D., Pablos, J. L., Martín, A. O., Juanatey, C. G., Adán, A., Montalbán, X., Borruel, N., Ortí, G., Holgado-Martín, E., García-Vidal, C., Vizcaya-Morales, C., Martín-Vázquez, V., & González-Gay, M. Á. (2020). Critical role of interleukin (IL)-17 in inflammatory and immune disorders: An updated review of the evidence focusing in controversies. In *Autoimmunity Reviews* (Vol. 19, Number 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autrev.2019.102429>
- Schasfoort, R. B. M., & Britain, R. S. of C. (Great. (2017). *Handbook of surface plasmon resonance* (Second edition.). Royal Society of Chemistry.

- Shabrina, N. H. (2017). Literature Review: Metode Komputasi Numerik untuk Analisis Gelombang Elektromagnetik Nabila Husna Shabrina. *83 ULTIMA Computing, IX*(2).
- Shih, C.-K., & Sanders, C. (2024). Chapter 3 - Low-loss plasmonic metals epitaxially grown on semiconductors. In S. Gwo, A. Alù, X. Li, & C.-K. Shih (Eds.), *Plasmonic Materials and Metastructures* (pp. 73–101). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85379-8.00003-4>
- Szymanska, B., Lukaszewski, Z., Oldak, L., Zelazowska-Rutkowska, B., Hermanowicz-Szamatowicz, K., & Gorodkiewicz, E. (2022). Two Biosensors for the Determination of Interleukin-6 in Blood Plasma by Array SPRi. *Biosensors, 12*(6). <https://doi.org/10.3390/bios12060412>
- Tachibana, K., Shibata, M., Gonda, K., Matsumoto, Y., Nakajima, T., Abe, N., Ohtake, T., Ohto, H., Kono, K., & Takenoshita, S. (2017). IL-17 and VEGF are increased and correlated to systemic inflammation, immune suppression, and malnutrition in patients with breast cancer. *European Journal of Inflammation, 15*(3), 219–228. <https://doi.org/10.1177/1721727X17739514>
- Taflove, A., & Hagness, S. (2005). Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd edition. In *The Electrical Engineering Handbook* (Vol. 2062). <https://doi.org/10.1016/B978-012170960-0/50046-3>
- Tan, M. I. S. M. H., Omar, A. F., Rashid, M., & Hashim, U. (2019). VIS-NIR spectral and particles distribution of Au, Ag, Cu, Al and Ni nanoparticles synthesized in distilled water using laser ablation. *Results in Physics, 14*. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102497>
- Wang, Z. L. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy, 68*, 104272. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104272>
- Zhang, X., Angkasekwinai, P., Dong, C., & Tang, H. (2011). Structure and function of interleukin-17 family cytokines. In *Protein and Cell* (Vol. 2, Number 1, pp. 26–40). Higher Education Press. <https://doi.org/10.1007/s13238-011-1006-5>
- Zhong, Z., Wang, X., Yin, X., Tian, J., & Komatsu, S. (2021). Morphophysiological and proteomic responses on plants of irradiation with electromagnetic waves. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Number 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijms222212239>
- Zhou, J., Qi, Q., Wang, C., Qian, Y., Liu, G., Wang, Y., & Fu, L. (2019). Surface plasmon resonance (SPR) biosensors for food allergen detection in food matrices. *Biosensors and Bioelectronics, 142*, 111449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111449>

LAMPIRAN

Lampiran 1

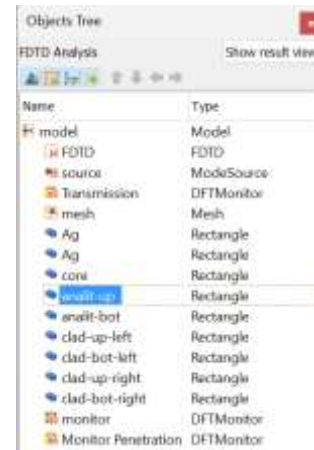
Simulasi Sensor SPR berbasis fiber optik dengan Ansys Lumerical FDTD



Desain Sensor SPR



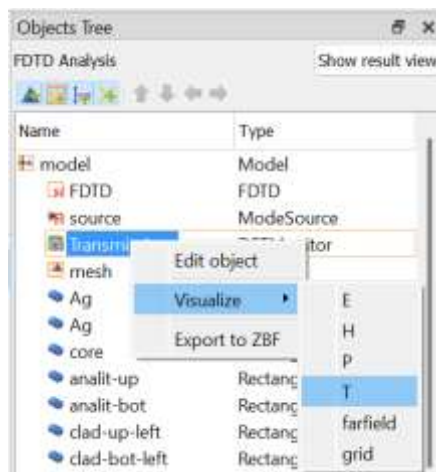
Menu untuk mengatur variasi jenis material logam



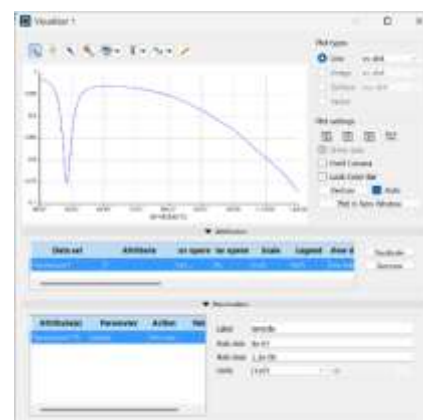
Object Tree: berisi beberapa objek untuk mengatur simulasi



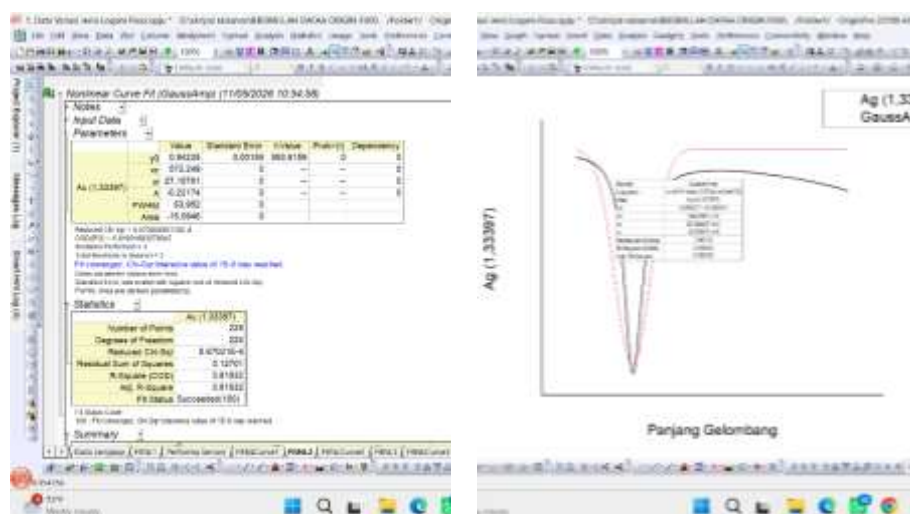
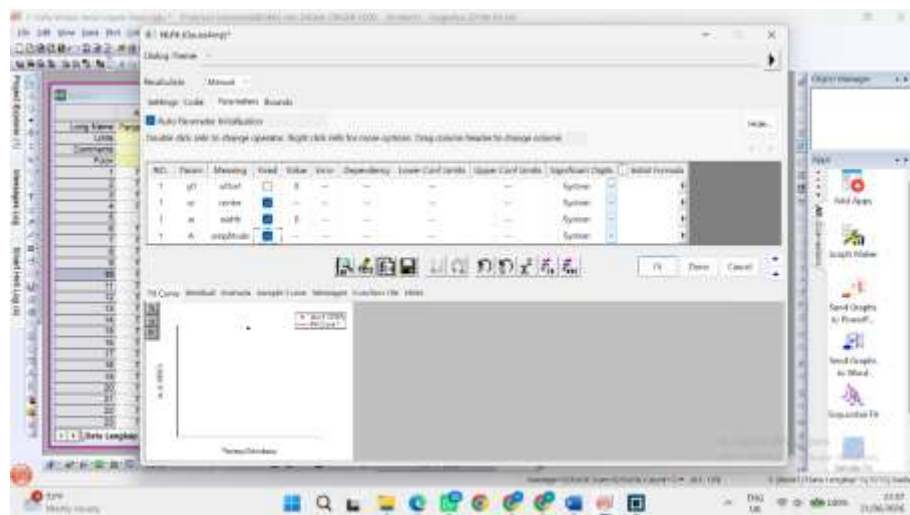
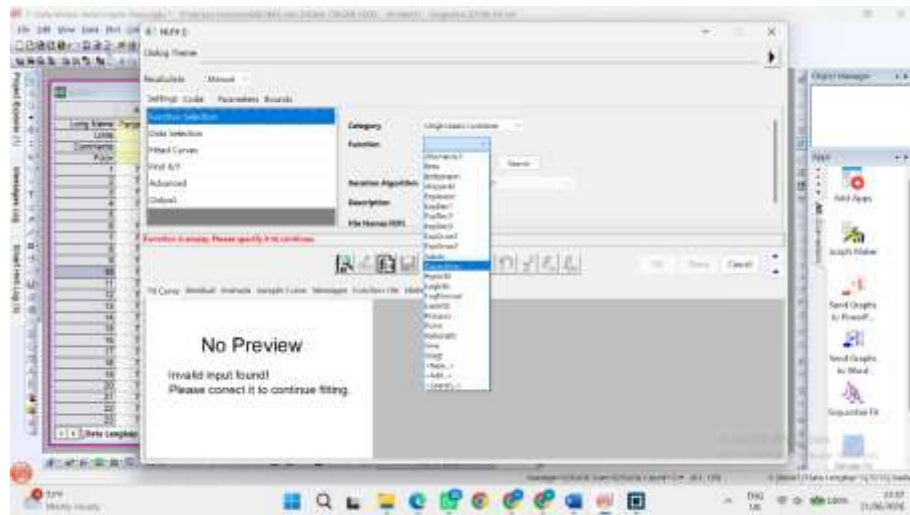
Menu untuk mengatur variasi indeks bias IL-17 yang akan disimulasikan



Hasil simulasi berupa spektrum transmitansi divisualisasikan pada monitor Transmittansi



Spektrum transmitansi yang mengandung dip kemudian data di export ke txt



Lampiran 3

Perhitungan dan pengolahan data hasil simulasi pada Ms. Excel

1. Data hasil pengujian variasi jenis material dengan ketebalan dan panjang probe sensing masing-masing 40 nm dan 100 μm .

Jenis Logam	I (1,3338)	I (1,33397)	ΔI	Δn	Sensitivitas	FWHM	FoM	DA	QF
Ag	0,748549	0,748303	0,000246	0,00017	1,447059	60,85930	0,005985	0,016431	0,023777
Au	0,727113	0,726465	0,000648	0,00017	3,811765	63,95200	0,016304	0,015637	0,059604
Cu	0,773360	0,772796	0,000564	0,00017	3,317647	86,94188	0,008670	0,011502	0,038159

2. Data hasil pengujian variasi ketebalan material Au (emas).

Ketebalan Logam Au	I (1,3338)	I (1,33397)	ΔI	Δn	Sensitivitas	FWHM	FoM	DA	QF
10	0,943608	0,943529	0,000079	0,00017	0,464706	0	0	0	0
20	0,816636	0,816088	0,000548	0,00017	3,223529	99,28857	0,005971	0,010072	0,032466
30	0,689229	0,688599	0,000630	0,00017	3,705882	51,98289	0,022200	0,019237	0,071290
40	0,727113	0,726465	0,000648	0,00017	3,811765	63,95200	0,016304	0,015637	0,059604
50	0,815108	0,814609	0,000499	0,00017	2,935294	53,95214	0,010086	0,018535	0,054406
60	0,772933	0,772446	0,000487	0,00017	2,864706	42,49451	0,015340	0,023532	0,067414
70	0,772965	0,772468	0,000497	0,00017	2,923529	42,50901	0,015648	0,023524	0,068774
80	0,773009	0,772503	0,000506	0,00017	2,976471	42,51940	0,015925	0,023519	0,070003

3. Data hasil pengujian variasi panjang probe sensing dengan material Au (emas) ketebalan 40 nm.

Panjang Probe Sensing	I (1,3338)	I (1,33397)	ΔI	Δn	Sensitivitas	FWHM	FoM	DA	QF
100	0,727113	0,726465	0,000648	0,00017	3,811765	63,95200	0,016304	0,015637	0,059604
200	0,515587	0,514517	0,001070	0,00017	6,294118	39,04262	0,078265	0,025613	0,161211
300	0,363993	0,36282	0,001173	0,00017	6,900000	40,04325	0,109795	0,024973	0,172314

4. Data hasil pengujian variasi indeks bias interleukin-17 dengan material Au (emas) ketebalan 40 nm dan 300 μm

Panjang Probe Sensing	Indeks Bias IL-17	I PBS	I SPR	ΔI	Δn	Sensitivitas	FWHM	FoM	DA	QF
300	1,33395	0,36399	0,362956	0,001037	0,00015	6,913333	40,03448	0,110008	0,024978	0,172684
300	1,33397	0,36399	0,362820	0,001173	0,00017	6,900000	40,04325	0,109795	0,024973	0,172314
300	1,33398	0,36399	0,362752	0,001241	0,00018	6,894444	40,04759	0,109706	0,024970	0,172156
300	1,33399	0,36399	0,362683	0,001310	0,00019	6,894737	40,05198	0,109711	0,024968	0,172145

Lampiran 4



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341) 551354, Fax (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 220604110056
Nama : ALIFA RAISAN NAFILA
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si
Dosen Pembimbing 2 : MUBASYIROH, S.S., M.Pd.
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : OPTIMASI DESAIN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD) UNTUK MENGUKUR KONSENTRASI INTERLEUKIN-17

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	22 Oktober 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	KONSULTASI JUDUL	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
2	05 November 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB I PENDAHULUAN	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
3	26 November 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB II TINJAUAN PUSTAKA	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
4	03 Desember 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB III METODE PENELITIAN	Ganjil 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	09 Januari 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	KONSULTASI SEMINAR PROPOSAL	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
6	11 Februari 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	PROGRESS REVISI SEMINAR PROPOSAL	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	09 April 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	REVISI SEMINAR PROPOSAL	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	04 Mei 2026	MUBASYIROH, S.S., M.Pd.	BIMBINGAN INTEGRASI AL-QUR'AN BAB I DAN II	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	12 Mei 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BIMBINGAN BAB IV	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
10	04 Juni 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
11	09 Juni 2026	MUBASYIROH, S.S., M.Pd.	INTEGRASI AL-QUR'AN BAB I, II, DAN IV	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
12	18 Juni 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	KONSULTASI BAB IV DAN V	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

MUBASYIROH, S.S., M.Pd.

Malang, 18 Juni 2026

Dosen Pembimbing 1

WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si



Kaprodi,