

**DETEKSI GELATIN SAPI DENGAN SENSOR *SURFACE PLASMON
RESONANCE* (SPR) BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN
METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)**

SKRIPSI

Oleh:
RENITA ELOK PEBRIYANTI
NIM.210604110073



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**DETEKSI GELATIN SAPI DENGAN SENSOR *SURFACE PLASMON
RESONANCE* (SPR) BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN
METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)**

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:
RENITA ELOK PEBRIYANTI
NIM. 210604110073**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

DETEKSI GELATIN SAPI DENGAN SENSOR *SURFACE PLASMON
RESONANCE* (SPR) BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE
FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)

SKRIPSI

Oleh:

RENITA ELOK PEBRIYANTI

NIM. 210604110073

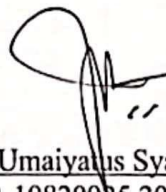
Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji
Pada Tanggal, 13 Juni 2025

Pembimbing I



Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si
NIP. 19870215 2023 212 031

Pembimbing II



Dr. Umaiyyatus Syarifah, MA
NIP. 19820925 200901 2005

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Dr. Irfan Tazi, M.Si

NIP. 19840730 200312 1 002

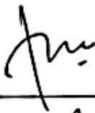
HALAMAN PENGESAHAN

DETEKSI GELATIN SAPI DENGAN SENSOR *SURFACE PLASMON RESONANCE* (SPR) BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)

SKRIPSI

Oleh:
Renita Elok Pebriyanti
NIM. 210604110073

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 20 Juni 2025

Penguji Utama :	<u>Farid Samsu Hananto, M.T</u> NIP. 19740513 200312 1 001	
Ketua Penguji :	<u>Erika Rani, M.Si.</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji :	<u>Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si</u> NIP. 19870215 2023 212 031	
Anggota Penguji :	<u>Dr. Umaiyyatus Syarifah, MA</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi




Tazi, M.Si
NIP. 19730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : RENITA ELOK PEBRIYANTI

NIM : 210604110073

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Deteksi Gelatin Sapi Dengan Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)

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, 25 Juni 2025
Yang Membuat Pernyataan



Renita Elok Pebriyanti
NIM. 210604110073

MOTTO

“Semua jatuh bangunmu hal yang biasa, angan dan pertanyaan waktu yang menjawabnya, berikan tenggat waktu bersedihlah secukupnya, rayakan perasaanmu sebagai manusia”

Baskara Putra – Hindia

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan untuk:

1. Untuk kedua orang tercinta bapak **Mohamad Sureni** dan ibu **Nanik Purwati** sebagai tanda bakti dan hormat dan rasa terimakasih yang tiada terhingga, kupersembahkan karya kecil ini kepada bapak dan ibu yang telah memberikan kasih sayang dan segala dukungan dan cinta kasih yang tidak bisa terbalaskan. Terimakasih selalu mengusahakan, memperjuangkan dan memprioritaskan pendidikan dan kebahagiaan anak-anaknya.
2. Adik laki-laki saya **Bagas Rafael Adhikari** yang selalu membuat penulis termotivasi untuk bisa terus belajar mandiri menjadi sosok kakak yang dapat memberikan pengaruh positif serta berusaha menjadi panutannya di masa yang akan datang.
3. Para guru dari taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah membimbing dan menanamkan ilmu serta nilai kehidupan.
4. Dosen-dosen di jurusan fisika yang telah memberikan ilmu, bimbingan serta arahan selama studi.
5. Untuk seseorang yang belum bisa kutulis dengan jelas. Terimakasih sudah menjadi sumber motivasi penulis dan menyelesaikan skripsi ini, sebagai salah satu bentuk penulis dalam memantaskan diri.
6. Untuk diriku sendiri, **Renita Elok Pebriyanti**. Terimakasih untuk segala kerja keras dan semangatnya serta keluasan hati dalam menerima apapun.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Ke Hadirat Allah SWT Yang Telah Melimpahkan Rahmat Dan Hidayah-Nya Kepada Penulis Atas terselesaikannya Skripsi Penelitian Ini Dengan Judul “Deteksi Gelatin Sapi Dengan Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)”.

Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita, Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing kita ke jalan yang benar, yaitu jalan yang diridhai Allah SWT. Penulisan skripsi ini tidak luput dari dukungan dan bantuan semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulisan mengucapkan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Ibu Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si selaku dosen pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian untuk membimbing hingga terselesaikannya skripsi ini.
5. Ibu Dr. Umaiatus Syarifah, MA selaku dosen pembimbing integrasi yang telah memberikan arahan, dukungan serta motivasi yang sangat berharga.

6. Bapak Farid Samsu Hananto, M.T selaku dosen penguji utama dan ibu Erika Rani, M.Si selaku dosen ketua penguji. Terimakasih atas segala saran yang diberikan, sehingga skripsi ini dapat disusun dengan baik.
7. Ibu Utiya Hikmah, M.Si selaku dosen pembimbing akademik. Terimakasih atas bimbingan dan perhatian yang telah diberikan selama masa studi.
8. Bapak Dr. Eng. Wildan Panji Tresna, M.T Terimakasih atas ilmu, saran dan masukan yang diberikan dalam penelitian sehingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
9. Segenap dosen, laboran dan admin Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
10. Kedua orang tua penulis, Bapak Mohamad Sureni dan Ibu Nanik Purwati, serta adik tercinta Bagus Rafael Adhikari dan yang selalu memberikan dukungan selama ini.
11. Rekan penelitian penulis, Aprilina Eka Sari, Zara Azaria Suyuti, Khairut Tamimi, Dedi Riana, dan Firyal Hanun Nisrina yang telah meluangkan waktu untuk bertukar pikiran selama menjalani penelitian hingga tersusunnya naskah skripsi.
12. Sahabat seperjuangan penulis dibangku perkuliahan: Almaida Enggar Ashari, Annisa Rizka Fatihah, Amelya Tanjung Risgunawati, Devita Amelia Kusnia Wanti, Intan Aulia Agustin, Megah Dewi Laras Anggraeni, Rahma Wuri Aprilliya yang senantiasa menemani penulis dalam keadaan susah dan senang, memberikan dukungan, serta motivasi setiap langkah yang dilalui sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. *I wish we're always together forever.*

13. Teman-teman kos Rahmani terutama Novia Mar'atur Rosyid, Arini Nurillah Salsabila yang telah menjadi teman yang baik.
14. Teman-teman seperjuangan di laboratorium Geofisika, yang menjadi tempat menumpahkan keluh kesah, tawa, hingga revisi skripsi tiada henti.
15. Seluruh teman-teman Fisika 2021 yang telah berperan memberikan banyak pengalaman dan pembelajaran selama di bangku kuliah.
16. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah andil dalam masa studi.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan ilmu dan pengetahuan penulis. Oleh karenanya atas kesalahan dan kekurangan dalam penulisan skripsi ini, penulis memohon maaf dan bersedia menerima kritikan yang membangun. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat dan wawasan tambahan bagi pembaca.

Malang, 26 Juni 2025
Penulis,

Renita Elok Pebriyanti

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
مستخلص البحث	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Gelatin Sapi	8
2.1.1 Karakteristik dan Sifat Kimia Gelatin Sapi	10
2.1.2 Karakteristik dan Sifat Fisik Gelatin Sapi	13
2.2 <i>Surface Plasmon Resonance</i> (SPR) Berbasis Fiber Optik	15
2.2.1 Persamaan Maxwell.....	16
2.2.2 Gelombang Elektromagnetik.....	18
2.2.3 Fenomena Eksitasi Surface Plasmon (SPs)	20
2.2.4 Karakteristik Logam Cu, Ag dan Au	22
2.2.5 Sensor SPR berbasis <i>Fiber Optic</i>	23
2.2.6 Karakteristik Sensor SPR	27
2.3 <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD).....	29
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Jenis Penelitian	31
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	31
3.3 Alat dan Bahan	31
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	32
3.5 Prosedur Penelitian.....	34
3.6 Pengambilan Data	37
3.7 Analisis Data	39

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Data Hasil Pengukuran Refraktif Indeks Gelatin Sapi	41
4.2 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik untuk Deteksi Gelatin Sapi	42
4.2.1 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam	43
4.2.2 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Jenis Material Logam.....	47
4.2.3 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Panjang Zona Sensing (Probe Sensing)	51
4.3 Pembahasan.....	54
4.3.1 Pengujian Refraktif Indeks Gelatin Sapi	54
4.3.2 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam.....	56
4.3.3 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber optik berdasarkan Variasi Jenis Material Logam	59
4.3.4 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Panjang Zona sensing (Probe Sensing)	63
4.3.5 Kajian Keislaman	65
 BAB V PENUTUP.....	 68
5.1 Kesimpulan.....	68
5.2 Saran.....	69
 DAFTAR PUSTAKA.....	 70
LAMPIRAN.....	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Struktur kimia gelatin (Fatimah et al., 2023).....	10
Gambar 2. 2	Tiga rantai polipeptida yang membentuk triple helix gelatin (Mikhailov, 2023)	11
Gambar 2. 3	Spektrum gelombang elektromagnetik dan aplikasinya (Li & Ling, 2019).....	18
Gambar 2. 4	Spektrum Panjang gelombang elektromagnetik yang nampak (Aftab et al., 2024).....	18
Gambar 2. 5	Ilustrasi Skema Eksitasi Polariton Plasmon Permukaan (Clark, 2018).	21
Gambar 2. 6	Struktur penyusun serat optik(Hafida & Rubiyanto, 2018).....	24
Gambar 2. 7	Konstruksi fiber optik (Curran & Shirk, 2015).....	24
Gambar 2. 8	Jenis kabel singlemode (Hanif & Arnaldy, 2017).....	25
Gambar 2. 9	Perambatan cahaya singlemode (Curran & Shirk, 2015)	25
Gambar 2. 10	Desain umum sensor SPR berbasis fiber optik(Riana, 2023)...	26
Gambar 2. 11	Skema mekanisme set up eksperimen sensor SPR berbasis fiber optik (Huang et al., 2022).....	27
Gambar 3. 1	Diagram Alir Umum Penelitian	33
Gambar 3. 2	Diagram Alir Mengukur Refraktif Indeks Gelatin Sapi.....	33
Gambar 3. 3	Diagram Alir Pelaksanaan Simulasi dengan Software Ansys Lumerical FDTD.....	34
Gambar 3. 4	Desain SPR pada Software Ansys Lumerical FDTD	36
Gambar 4. 1	Grafik hubungan antara konsentrasi (%) dengan nilai refraktif indeks gelatin sapi (RIU)	42
Gambar 4. 2	Spektrum Transmittansi SPR untuk pengukuran $na = 1.3339$ dengan jenis material lapisan (a) Ag (perak), (b) Au (emas), dan (c) Cu (Tembaga)	44
Gambar 4. 3	Grafik perbandingan antara ketebalan dan (a) Panjang Gelombang Resonansi (b) FWHM.....	45
Gambar 4. 4	Grafik perbandingan sensitivitas dengan variasi ketebalan disemua jenis material pada konsentrasi 0.80% dengan $na = 1.3339$	46
Gambar 4. 5	Spektrum transmittansi SPR, pada material ketebalan 80nm disemua konsentrasi dan pada material (a) Ag (perak), (b) Au (emas), dan (c) Cu (tembaga)	48
Gambar 4. 6	Grafik Perbandingan antara (a) Panjang Gelombang Resonansi, (b) FWHM dengan Refractive Indeks Gelatin Sapi	49
Gambar 4. 7	Grafik perbandingan (a) sensitivitas, (b) Figure of Merit dengan variasi refraktif indeks gelatin sapi pada masing-masing jenis material logam (Ag,Au,Cu) dengan ketebalan 80nm	50
Gambar 4. 8	Grafik hubungan antara Refraktif Indeks dan Sensitivitas pada jenis material Ag (perak), Au (Emas), Cu (Tembaga) dengan ketebalan 80nm.....	51
Gambar 4. 9	Spektrum Tranmitasni SPR dengan panjang zona sensing (a) 100 μ m, (b) 200 μ m dan (c) 300 μ m dengan ketebalan 80nm dan jenis lapisan perak (Ag)	52

Gambar 4. 10	Grafik hubungan antara Refraktif Indeks dengan (a) Panjang gelombang Resonansi dan (b) FWHM.....	53
Gambar 4. 11	Grafik hubungan antara nilai Refraktif Indeks dengan (a) Sensitivitas dan (b) Figure of Merit.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Tabel komposisi asam amino gelatin sapi(Aykin-Dinçer et al., 2017) .11
Tabel 3. 1	Tabel data refraktif indeks gelatin sapi 38
Tabel 4. 1	Data hasil pengukuran refraktif indeks gelatin sapi setiap konsentrasi41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian	79
Lampiran 2 Pengolahan dan Perhitungan Data	83

ABSTRAK

Pebriyanti, Renita Elok. 2025. **Deteksi Gelatin Sapi Dengan Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)**. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si (II) Dr. Umayyatus Syarifah, M.A

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

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan desain sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik dalam mendeteksi refraktif indeks gelatin sapi. Parameter yang divariasikan meliputi ketebalan lapisan logam, jenis material plasmonik (Ag, Au, Cu), serta panjang zona sensing (probe sensing). Simulasi dilakukan secara numerik menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Evaluasi performa sensor mencakup sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), faktor kualitas (QF), dan figure of merit (FoM). Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa konfigurasi yang optimal diperoleh pada ketebalan lapisan logam sebesar 80 nm dengan jenis material perak (Ag), yang menghasilkan sensitivitas tertinggi sebesar 4327.78 nm/RIU. Material Ag secara konsisten memberikan performa paling sensitif dibandingkan Au dan Cu, baik dalam sensitivitas maupun nilai FoM untuk mendeteksi gelatin sapi. Panjang zona sensing (probe sensing), hanya sepanjang 100 μm yang menunjukkan kurva resonansi yang tajam dan terjadi pergeseran secara konsisten terhadap peningkatan refraktif indeks gelatin sapi. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa kombinasi ketebalan 80 nm, material logam Ag, dan panjang zona sensing 100 μm merupakan konfigurasi sensor yang paling optimal dalam mendeteksi gelatin sapi secara sensitif dan akurat melalui sensor SPR berbasis fiber optik.

ABSTRACT

Pebriyanti, Renita Elok. 2025. **Detection of Bovine Gelatin Using a Fiber Optic-Based Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensor with the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method.** Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si (II) Dr. Umaiatus Syarifah, M.A

Kata Kunci: Surface Plasmon Resonance (SPR), Optical Fiber, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Gelatin

This research aims to analyze and optimize the design of a fiber optic-based Surface Plasmon Resonance (SPR) sensor for detecting the refractive index of bovine gelatin. The parameters varied include the thickness of metal layer, the type of plasmonic material (Ag, Au, Cu), and the length of the sensing zone (probe sensing). The simulation was carried out numerically using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. The sensor performance evaluation includes sensitivity (S), detection accuracy (DA), quality factor (QF), and figure of merit (FoM). The simulation and analysis results show that the optimal configuration was obtained at a metal layer thickness of 80 nm using silver (Ag) as the plasmonic material, which produced the highest sensitivity of 4327.78 nm/RIU. Silver (Ag) consistently provided the most sensitive performance compared to Au and Cu, both in terms of sensitivity and FoM for detecting bovine gelatin. The zone length (probe sensing) of only 100 μm showed a sharp resonance curve and a consistent shift in response to increasing gelatin refractive index. Based on these results, it can be concluded that the combination of 80 nm thickness, Ag metal material, and 100 μm sensing zone length is the most optimal sensor configuration for sensitively and accurately detecting bovine gelatin using a fiber optic-based SPR sensor.

مستخلص البحث

فيبرياني، رينيتا إيلوك. 2025. الكشف عن الجيلاتين البقري باستخدام مستشعر الرنين السطحي البلازموني (SPR) القائم على الألياف البصرية باستخدام طريقة الفارق الزمني المحدود (FDTD). بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف: (I) ويويس سسميتانينجهيدايا، الماجستير (II) الدكتورة. أمية الشريفة، الماجستير.

الكلمة الرئيسية: الرنين السطحي لبلمون (SPR)، الألياف البصرية، طريقة الفرق المحدودة الزمنية (FDTD)، الجيلاتين

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتحسين تصميم مستشعر الرنين السطحي البلازموني (SPR) القائم على الألياف البصرية في الكشف عن معامل الانكسار لجلاتين الأبقار. تشمل المعلومات التي تم تغييرها سمك طبقة المعدن، نوع المادة البلازمونية (Cu، Au، Ag)، وطول منطقة الاستشعار (استشعار البروبي). تم إجراء المحاكاة بطريقة عددية باستخدام طريقة الفروق المحدودة الزمنية (FDTD). تشمل تقييم أداء المستشعر الحساسية (S)، دقة الكشف (DA)، عامل الجودة (QF)، ورقم المزايا (FoM). تُظهر نتائج المحاكاة والتحليل أن التكوين الأمثل تم الحصول عليه عند سمك طبقة المعدن 80 نانومتر مع نوع مادة الفضة (Ag)، مما يؤدي إلى أعلى حساسية تبلغ 4327,78 نانومتر/RIU. توفر مادة Ag أداءً أكثر حساسية باستمرار مقارنةً بـ Cu و Au، سواء من حيث الحساسية أو قيمة FoM للكشف عن الجيلاتين البقري. طول منطقة الاستشعار (استشعار المحس) هو 100 ميكرومتر فقط، مما يُظهر منحنى رنان حاد ويحدث انزياحًا باستمرار مع زيادة مؤشر الانكسار للجلاتين البقري. استنادًا إلى هذه النتائج، يمكن الاستنتاج أن مجموعة سمك 80 نانومتر، ومادة الفضة Ag، وطول منطقة الاستشعار 100 ميكرومتر هي التركيب الأكثر ملاءمة للكشف عن الجيلاتين البقري بشكل حساس ودقيق من خلال مستشعر SPR القائم على الألياف الضوئية.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa industri seperti farmasi, makanan dan kosmetik gelatin sering digunakan dalam proses produksi (Aris et al., 2020). Gelatin dimanfaatkan dalam berbagai industri karena sifatnya penyetabil, kemampuannya dalam membentuk gel dan viskositas (Said, 2020). Sekitar 59% gelatin yang diproduksi di seluruh dunia digunakan dalam industri makanan, 31% dalam industri farmasi, 2% dalam industri fotografi dan sekitar 8% dalam industri lainnya. Kebutuhan gelatin di Indonesia bersumber dari berbagai negara termasuk Perancis, Jepang, India, Brazil, Jerman, Cina, Argentina dan Australia (Sasmitaloka et al., 2017). Menurut (Kuan et al., 2016), 98.5% produksi gelatin di seluruh dunia bersumber pada kulit sapi, tulang sapi dan kulit babi. Sumber gelatin menjadi hal yang penting untuk diketahui. Dalam aspek keagamaan, babi merupakan hewan yang haram dikonsumsi oleh umat muslim dan yahudi sedangkan sapi dilarang dikonsumsi oleh umat hindu. Dalam aspek kesehatan, beberapa individu dapat mengalami reaksi alergi terhadap produk yang mengandung bahan babi atau sapi (Abedinia et al., 2020).

Gelatin adalah polipeptida yang terdiri dari ikatan kovalen dan ikatan peptida antar asam amino penyusunnya. Gelatin diproduksi melalui proses hidrolisis menggunakan larutan asam dan basa (Siburian et al., 2020). Gelatin sapi merupakan protein yang berasal dari hidrolisis parsial kolagen yang ditemukan pada kulit, jaringan ikat, dan tulang sapi, yang dimanfaatkan dalam industri makanan dan farmasi (Nur Hanani et al., 2014)(Garcia Londoño et al., 2022). Dengan meningkatnya penggunaan gelatin dalam berbagai aplikasi, sehingga diperlukan

metode yang cepat dan akurat untuk mendeteksi konsentrasi sumber gelatin, sehingga dapat memastikan bahwa produk tersebut halal, aman dan standart etika yang lainnya. Dalam memecahkan permasalahan ini, terdapat petunjuk yang tertulis dalam Q.S al-Baqarah (2): 168

يَا أَيُّهَا النَّاسُ كُلُوا مِمَّا فِي الْأَرْضِ حَلَالًا طَيِّبًا وَلَا تَتَّبِعُوا خُطُوَاتِ الشَّيْطَانِ إِنَّهُ لَكُمْ عَدُوٌّ مُبِينٌ

Artinya:

Wahai manusia, makanlah dari (makanan) yang halal dan baik yang terdapat di bumi, dan janganlah kamu mengikuti langkah-langkah setan. Sesungguhnya setan itu musuh yang nyata bagimu. – (Q.S al-Baqarah (2):168)

Q.S al-Baqarah (2): 168 menjelaskan perintah Allah untuk selektif dalam memilih makanan yang dikonsumsi, baik dari segi kesehatan maupun kualitasnya. Kehalalan makanan menjadi aspek utama yang wajib diperhatikan oleh umat muslim dalam menentukan pilihan makanan. Selain itu, makanan juga harus bersifat baik (*thayyib*) yang berarti baik, bersih, sehat, bergizi, aman dikonsumsi dan tidak membahayakan tubuh (Syarifah et al., 2024). Ayat ini menjadi inspirasi dalam pengembangan sensor untuk mendeteksi gelatin sapi dengan memanfaatkan fenomena Surface Plasmon Resonance (SPR).

Metode yang telah dikembangkan untuk mendeteksi gelatin yaitu, principal component analysis (PCA), polymerase chain reaction (PCR), spektrometri massa, dan fourier transform infrared (FTIR) (Wardani et al., 2015). Salah satu penelitian yang membahas metode deteksi gelatin adalah penelitian oleh (Cebi et al., 2016), yang menggunakan FTIR dengan teknik Attenuated Total Reflection (ATR) untuk membedakan gelatin sapi, babi dan ikan. Metode FTIR ini didasarkan pada analisis spektrum inframerah yang dihasilkan oleh interaksi radiasi inframerah dengan molekul dalam sampel gelatin. Kekurangan dari metode ini rentan terhadap faktor

lingkungan seperti pH, suhu dan kelembapan. karena spektrum FTIR dapat berubah jika kondisi lingkungan tidak dikontrol dengan baik.

Penelitian sebelumnya yang membahas tentang SPR untuk deteksi gelatin, telah dilakukan oleh Wardani (2015) menunjukkan bahwa sensor SPR dapat membedakan gelatin sapi dan gelatin babi dengan mengukur pergeseran sudut SPR, dengan gelatin sapi menunjukkan pergeseran paling besar pada konsentrasi yang sama. Namun, pada penelitian tersebut masih terdapat ketidakakuratan. Penelitian kembali dilakukan oleh Wardani (2019) dengan memperbaiki metode deteksi sebelumnya, sehingga menghasilkan sensitivitas sensor yang lebih tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan antara gelatin sapi dan babi dapat dibedakan, meskipun memiliki karakteristik yang berbeda (Wardani et al., 2015)(Devy et al., 2019). Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa sensor SPR mampu mendeteksi keberadaan gelatin sapi.

Biosensing Surface Plasmon Resonance (SPR) telah dikembangkan untuk penentuan konsentrasi protein karena sensitivitasnya yang tinggi terhadap protein (Zhou et al., 2019). SPR merupakan teknologi sensor optik yang memanfaatkan interaksi cahaya dengan elektron bebas pada sebuah lapisan. Surface Plasmon Resonance (SPR) mampu memantau secara real-time perubahan kecil dalam refraktif indeks. efektif di antarmuka logam-dielektrik. Teknologi SPR untuk biosensing mengalami perkembangan. Surface Plasmon Resonance (SPR) berbasis fiber optik merupakan biosensor serat optik yang dapat beroperasi dalam mode multimode dan single mode. Fenomena SPR ini terjadi akibat refleksi total di antarmuka antara inti dan cladding, bukan pada permukaan prisma (Zhou et al., 2019) (Michel et al., 2017). Untuk itu SPR berbasis fiber optik menjadi alternatif

untuk mendeteksi keberadaan gelatin sapi karena sensitivitasnya tinggi terhadap perubahan refraktif indeks.

Melihat perkembangan teknologi SPR berbasis fiber optik, peneliti sebelumnya telah mencoba menerapkan metode ini untuk mendeteksi berbagai jenis biomolekul. Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Riana (2023) yang membahas optimasi desain sensor SPR berbasis fiber optik sebagai pengukur konsentrasi glukosa dalam urine dengan simulasi finite-difference time-domain (FDTD). Beberapa parameter sensor, seperti jenis material dan ketebalan lapisan plasmonik, panjang probe sensing, refraktif indeks dioptimasi untuk meningkatkan performa sensor.

Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan metode yang akurat dan efisien dalam mendeteksi gelatin sapi, yang penting dalam industri makanan dan farmasi, termasuk untuk sertifikasi halal. Dengan memanfaatkan sensor surface plasmon resonance (SPR) berbasis fiber optik dengan metode simulasi finite-difference time domain (FDTD), penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dan akurasi dalam mendeteksi gelatin sapi. Pemilihan sensor SPR didasarkan pada kemampuannya dalam mendeteksi perubahan refraktif indeks pada permukaan logam, yang sangat sensitif terhadap biomolekul dan memiliki ukuran nano. Sensor SPR dapat mendeteksi perubahan konsentrasi analit dengan sensitivitas yang tinggi dibandingkan dengan metode lainnya, seperti spektroskopi FTIR yang rentan terhadap faktor lingkungan, karena spektrum FTIR akan berubah jika tidak dikontrol dengan baik. Selain untuk meningkatkan sensitivitas, penelitian ini juga bertujuan sebagai pembanding antara gelatin sapi dan gelatin babi. Untuk meningkatkan validitas dan akurasi serta memastikan kemampuan sensor dalam

membedakan kedua jenis gelatin. Parameter kinerja sensor dievaluasi mencakup sensitivitas (S), akursi deteksi(DA), faktor kualitas(QF), dan figure of merit (FOM).

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan perbedaan ketebalan lapisan nanopartikel untuk mendeteksi gelatin sapi?
2. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan lapisan, perak (Ag), emas (Au) dan tembaga (Cu) untuk mendeteksi gelatin sapi?
3. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan perbedaan probe sensing?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan perbedaan ketebalan lapisan nanopartikel dalam mendeteksi gelatin sapi, serta menentukan ketebalan paling optimal.
2. Untuk mengetahui karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan lapisan perak (Ag), emas (Au) dan tembaga (Cu) dalam mendeteksi gelatin sapi, serta menentukan lapisan yang memberikan sensitivitas terbaik.
3. Untuk mengetahui bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan perbedaan probe sensing serta menentukan konfigurasi probe sensing yang memberikan respons terbaik.

1.4 Batasan Penelitian

1. Simulasi FDTD dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak Ansys Lumerical FDTD. Dimana simulasi dilakukan pada model 2D dengan

material perak (*Ag*), emas (*Au*) dan tembaga (*Cu*) dengan ketebalan dari 20nm – 100nm dengan interval 20nm.

2. Fiber optik yang dimodelkan adalah single mode dan sumber cahaya yang diinjeksikan memiliki panjang gelombang boardband dengan rentang 400 – 1200 nm.
3. Parameter yang digunakan dalam analisis sensor SPR untuk mendeteksi gelatin sapi adalah sensitivitas (*S*), akurasi deteksi (*DA*), faktor kualitas (*QF*) dan figure of merit (*FOM*).
4. Refraktif indeks gelatin sapi hanya pada konsentrasi 0.4%, - 2.0% dengan interval 0.2%.
5. Observasi sinyal sensor hanya terbatas pada respons optik.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik. Melalui metode FDTD, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan model teoritis yang membantu merancang sensor yang lebih sensitif dan efisien untuk mendeteksi gelatin sapi. penelitian ini juga dapat digunakan sebagai pembanding antara jenis sumber gelatin yang lain seperti babi, ikan.

2. Manfaat Praktis

Melalui penelitian ini, peneliti akan memperoleh pemahaman mendalam tentang prinsip dan aplikasi mengenai *Surface Plasmon Resonance* (SPR).

Terutama pada manfaat praktis untuk memastikan kehalalan produk makanan, kosmetik, dan farmasi melalui deteksi gelatin sapi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelatin Sapi

Gelatin merupakan produk alami dari protein yang dihasilkan dari hidrolisis jaringan kolagen yang banyak terdapat pada kulit dan tulang hewan. Hidrolisis jaringan kolagen dapat dilakukan dengan alkali atau asam. Pada proses ini dapat menyebabkan ikatan silang antar ikatan rantai polipeptida kolagen pecah dan menghasilkan gelatin (Sugita et al., 2021). Istilah gelatin mulai dikenal tahun 1700-an. Gelatin berasal dari kata “*gelatus*” yang berarti kuat, kokoh. Secara fisik bentuk gelatin adalah padat, kering, tidak berasa dan transparan (Maghfursyah, 2019).

Sumber utama gelatin adalah kolagen sapi, babi atau ikan. Menurut (Aris et al., 2020) (Abedinia et al., 2020) sumber gelatin yang paling banyak terdapat pada kulit babi (46%), kulit sapi (29,4%), campuran tulang babi dan sapi (23,1%) dan sumber gelatin lainnya (1,5%). Sifat utama gelatin adalah biodegradable, biokompatibel, dan tidak beracun karena bahan alami yang mengandung asam amino tinggi. Kandungan asam amino pada gelatin yang paling dominan adalah prolin dan hidroksiprolin yang dapat menentukan kualitas gelatin. Komponen utama gelatin adalah protein yang dihubungkan pada ikatan peptide sehingga membentuk rantai polimer (Fatimah et al., 2023).

Pemilihan sumber gelatin menjadi hal yang penting karena berkaitan dengan prinsip halal dan thayyib. Berdasarkan QS. Al-Ma'idah (5): 88

وَكُلُوا مِمَّا رَزَقَكُمُ اللَّهُ حَلَالًا طَيِّبًا ۚ وَاتَّقُوا اللَّهَ الَّذِي أَنْتُمْ بِهِ مُؤْمِنُونَ

Artinya:

“Dan makanlah dari apa yang telah diberikan Allah kepadamu sebagai rezeki yang halal dan baik, dan bertakwalah kepada Allah yang kamu beriman kepada-Nya. Al Maidah (5):88”

Makanan harus memenuhi dua syarat yaitu halal dan *thayyib* seperti yang dijelaskan dalam Q.S Al-Maidah (5): 8. *Thayyib* yang dimaksud dalam hal memilih makanan yang tepat untuk dikonsumsi, sesuai dengan yang dibutuhkan oleh tubuh dan aman tidak menimbulkan masalah bagi tubuh. Makanan baik aman dari sisi normatif agama (halal) maupun operasional (*thayyib*). makanan yang *thayyib* mencakup tiga hal: pertama, makanannya sehat. Makanan sehat mengandung gizi yang cukup dan seimbang untuk perkembangan dan pertumbuhan tubuh manusia. Kedua proposional, makanan yang dimakan sesuai dengan kebutuhan dalam yang berarti tidak kelebihan maupun kurang. Ketiga, makanan yang suci dan terhidar dari segala sesuatu yang haram. Makanan yang kotor dan najis menyebabkan penyakit jasmani dan rohani (Syarifah et al., 2024).

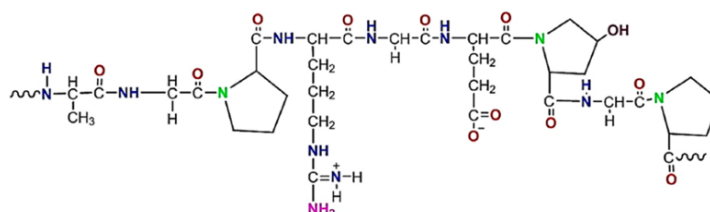
Berdasarkan kondisi pemrosesannya gelatin dikategorikan menjadi tipe A dan tipe B. Gelatin tipe A umumnya ditemukan pada babi dan ikan. Hal ini disebabkan strukturnya tidak terlalu kompleks sehingga dalam pemrosesannya hanya membutuhkan asam ringan. Sedangkan gelatin tipe B umumnya terdapat pada sapi dan tulang. Tipe ini memiliki bahan baku yang sangat terikat dan kompleks sehingga dalam pemrosesannya diolah dengan basa atau alkali. Karena terdapat perbedaan komposisi asam amino, gelatin tipe A memiliki pH sekitar 8-9, sedangkan tipe B memiliki pH sekitar 4,8-5,5 (Noor et al., 2021).

Gelatin sapi merupakan gelatin yang diekstraksi dari tulang, kulit, tendon maupun otot sapi (jannat et al., 2020). Gelatin sapi menjadi bahan alternatif dari gelatin babi karena ketersediaannya yang melimpah. Kulit sapi dapat digunakan untuk produksi gelatin karena mengandung 89% kolagen dari total berat badan.

Gelatin sapi merupakan gelatin tipe B yang dihasilkan dari hidrolisis kolagen basa (Jannat et al., 2020).

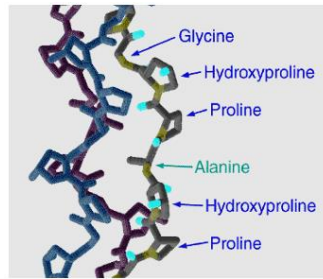
2.1.1 Karakteristik dan Sifat Kimia Gelatin Sapi

Sifat kimia gelatin sapi dapat dikarakterisasi melalui komposisi proksimat, komposisi asam amino, distribusi berat molekul atau kandungan logam berat dan pH. Komposisi proksimat dapat ditentukan berdasarkan kadar air, kadar abu, kandungan lemak dan kandungan protein (Samatra et al., 2022) (Siburian et al., 2020). Menurut (Rather et al., 2022) gelatin mengandung protein sekitar (88%) dengan kelembaban (10%) garam (1-2%) dan dalam keadaan kering kandungan proteinnya adalah (98-99%). Komposisi gelatin dari 50.5% karbon, 6.8% hydrogen, 17% nitrogen dan 25.2% oksigen (Nur Hanani et al., 2014) (Alipal et al., 2019). Secara kimia struktur gelatin ditunjukkan pada gambar (2.1):



Gambar 2. 1 Struktur kimia gelatin (Fatimah et al., 2023)

Secara kimiawi, gelatin terdiri dari 18 varietas asam amino kompleks, yaitu sekitar 57% glisin, prolin dan hidroksiprolin merupakan senyawa utama, sedangkan 43% adalah asam amino yang lain seperti asam glutamate, alanin, argini dan asam aspartate (Alipal et al., 2019). Berdasarkan komposisi kimia struktur gelatin terdiri dari 3 rantai asam amino berulang yang terdiri dari *Glycine-Proline-Hydroxyproline* (Said, 2020). Dengan *Glycine* sebanyak (27–35%), *Proline* dan *Hydroxyproline* sebanyak (20-40%) (Rather et al., 2022). Struktur gelatin 3 rantai tersebut direpresentasikan dalam skema yang ditunjukkan gambar (2.2):



Gambar 2. 2 Tiga rantai polipeptida yang membentuk *triple helix gelatin* (Mikhailov, 2023)

Asam amino menjadi faktor yang penting dalam kekuatan gel dan viskositas gelatin. Komposisi asam amino menghasilkan gelatin yang dapat digunakan dalam berbagai industri. varietas asam amino pada gelatin secara lengkap disajikan pada tabel (2.1):

Tabel 2. 1 Tabel komposisi asam amino gelatin sapi(Aykin-Dinçer et al., 2017)

Asam Amino	Gelatin Sapi (%)
Asparatic acid (Asx)	4.87
Glutamic acid (Glx)	8.93
Serine (Ser)	3.11
Histidine (His)	0.72
Glycine (Gly)	20.60
Threonine (Thr)	1.84
Arginine (Arg)	7.46
Alanine (Ala)	8.18
Tyrosine (Tyr)	0.60
Valine (Val)	1.90
Methionine (Met)	0.47
Phenylalanine (Phe)	1.96
Isoleucine (Ile)	1.38
Leucine (Leu)	2.89
Lysine (Lys)	2.76
Hydroxyproline (Hyp)	9.80
Proline (Pro)	21.23

Sifat kimia gelatin dapat dikarakterisasi dengan menganalisis komposisi kadar abu. Analisis kadar abu dilakukan untuk menentukan jumlah mineral yang terkandung dalam gelatin. Tingkat kadar abu dalam gelatin, dari yang tertinggi hingga terendah, dipengaruhi oleh kandungan mineral yang terikat pada kolagen (Siburian et al., 2020). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Fatimah et al., 2023)

kadar abu pada tulang sapi yang dihasilkan relative tinggi. Kadar abu tertinggi yang dihasilkan adalah 1.31% perendaman tulang sapi dengan NaHCO_2 8% dalam waktu ekstraksi 6 jam. Pada saat yang sama, kadar abu terendah adalah 1,031% dengan perendaman tulang sapi dengan NaOH 4% ekstraksi selama 4 jam. Kadar abu yang tinggi dipengaruhi oleh konsentrasi pelarut, dimana semakin tinggi konsentrasi kadar abu maka gelatin akan meningkat.

Kadar air adalah air yang terkandung dalam gelatin yang dinyatakan berdasarkan berat basah dan kering. Kandungan air gelatin mempengaruhi masa penyimpanan gelatin karena aktivitas mikroba (Siburian et al., 2020). Penelitian yang dilakukan oleh (Fatimah et al., 2023) perlakuan perendaman dengan waktu ekstraksi dan pelarut yang berbeda menghasilkan nilai kadar air yang berbeda. Waktu ekstraksi mempengaruhi kadar air gelatin. Ketika tulang sapi diekstraksi selama 4 jam menghasilkan kadar air lebih tinggi dibandingkan dengan ekstraksi 6 jam. Kulit sapi memiliki kadar air yang lebih rendah karena telah melalui proses pengeringan, yang dapat mengurangi kandungan airnya (Sasmitaloka et al., 2017).

Kandungan lemak dapat mempengaruhi perubahan kualitas selama penyimpanan. Lemak yang rusak dapat mengurangi nilai gizi dan menyebabkan kerusakan pada rasa dan bau (Siburian et al., 2020). Kulit sapi kering memiliki kandungan lemak yang lebih rendah, sehingga tidak memerlukan proses penghilangan lemak sebelum perendaman. Dengan kondisi ini penggunaan kulit sapi kering dapat mempercepat dalam proses produksi gelatin (Sasmitaloka et al., 2017).

pH merupakan salah satu sifat kimia dalam gelatin (Sasmitaloka et al., 2017). Gelatin dengan pH netral diaplikasikan pada produk daging, obat-obatan,

kromatografi dan cat. Sementara itu, gelatin dengan pH yang rendah diaplikasikan pada industri makanan, sedangkan gelatin pH tinggi digunakan untuk industri farmasi (Fatimah et al., 2023). Nilai pH yang dihasilkan tergantung pada pelarut yang digunakan dalam proses perendaman. Larutan asam akan menghasilkan pH yang rendah, larutan basa menghasilkan pH yang tinggi (Sasmitaloka et al., 2017).

2.1.2 Karakteristik dan Sifat Fisik Gelatin Sapi

Karakteristik fisik dan kimia pada gelatin sapi dipengaruhi oleh bahan baku, usia hewan, jenis kolagen, metode pembuatan, jenis jaringan, spesies dan karakteristik kolagen. Semakin tua usia hewan dapat meningkatkan hasil, kadar abu dan lemak gelatin yang diperoleh. Sedangkan penggunaan suhu tinggi dan lama ekstraksi menyebabkan penurunan nilai viskositas, kemampuan pembentukan gel dan karakter fisik gelatin. Umumnya karakter fisik gelatin adalah padat, kering, tidak berasa, tidak berbau, transparan, warna kuning muda hingga kuning (Siburian et al., 2020). Kekuatan dan viskositas gel merupakan sifat fisik yang paling penting dari gelatin (Nur Hanani et al., 2014).

Kekuatan gelatin merupakan besarnya energi yang oleh probe untuk menekan gel sampai gel pecah. Satuan untuk kekuatan gelatin yang dihasilkan dari suatu konsentrasi disebut derajat Bloom. Kekuatan gelatin diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu gelatin dengan Bloom tinggi (250-300 gr Bloom), gelatin dengan Bloom sedang (150-250 gr Bloom) dan gelatin Bloom rendah (50-150 gr Bloom) (Siburian et al., 2020). Kekuatan gelatin yang rendah dimungkinkan gelatin memiliki molekul yang besar dan mempunyai rantai yang berhubungan dengan ikatan kovalen antar rantai dan mengurangi jumlah ikatan hidrogen (Sasmitaloka et al., 2017).

Viskositas merupakan salah satu dari karakteristik fisik gelatin. Viskositas gel yang tinggi menghasilkan laju lebih tinggi daripada gelatin dengan viskositas yang rendah (Siburian et al., 2020). Pengaruh konsentrasi pada viskositas tulang sapi cenderung menurun. NaHCO_2 kurang efektif dalam menghidrolisis peptide kolagen tulang sapi, sehingga berat molekul gelatin tidak terlalu tinggi dan viskositasnya rendah. Pada kolagen tulang sapi nilai viskositas tinggi yang dilakukan perendaman dengan asam (Fatimah et al., 2023). Kulit sapi dapat menghasilkan viskositas tinggi karena rendahnya kadar abu (Sasmitaloka et al., 2017). Gelatin dengan viskositas rendah menghasilkan gelatin yang rapuh, sedangkan gelatin yang lebih tinggi menghasilkan gelatin yang keras. Untuk dapat memproduksi gelatin dengan viskositas yang baik maka pH, suhu dan waktu hidrolis pada tingkat yang optimal (Samatra et al., 2022)

Secara fisik gelatin berbentuk bubuk, pasta, lembaran. Sifatnya tidak berasa, tidak berbau, warnanya kekuningan sampai tidak berwarna (Maghfursyah, 2019). Sifat fisik gelatin sapi yang paling nampak adalah warnanya. Warna gelatin yang berkualitas biasanya tidak berwarna (bening/transparan). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Rauf et al., 2017) ekstraksi dan pembuatan gelatin dari kulit dan tulang rawan sapi, pengamatan dilakukan gelatin kulit sapi memiliki warna kuning bening, bau khas dan bentuk semi padat. Sedangkan gelatin tulang rawan sapi memiliki warna coklat keruh, bau khas dan bentuk semi padat. Sehingga, tingkatan warna gelatin dipengaruhi oleh bahan baku, metode pembuatan dan ekstraksi (Siburian et al., 2020).

2.2 *Surface Plasmon Resonance (SPR) Berbasis Fiber Optik*

Pada tahun 1902 dilakukan pengamatan awal oleh Robert W. Wood tentang plasmon permukaan yang mempelajari difraksi cahaya pada kisi difraksi logam. Kemudian Fano membuktikan pengamatan sebelumnya terkait dengan terjadinya eksitasi gelombang elektromagnetik pada permukaan kisi difraksi. Pada tahun 1980 merupakan demonstrasi pertama resonansi plasmon permukaan (SPR) sebagai sensor optik untuk mempelajari proses permukaan pada permukaan logam untuk penginderaan gas. Pemasaran perangkat SPR terjadi pada tahun 1990 oleh BIAcore untuk mendeteksi interaksi antara protein (Miyazaki et al., 2017).

Surface Plasmon Resonance (SPR) dapat diterapkan dalam berbagai bidang misalnya dalam elektrokimia, fase gas, makanan, lingkungan, dan kedokteran. Dalam bidang medis, teknik ini digunakan untuk pengembangan biosensor yang sangat sensitif dengan waktu respons yang cepat (Miyazaki et al., 2017). SPR didasarkan pada eksitasi *Surface Plasmon (SP)* yang mewakili osilasi kolektif resonansi elektron bebas pada logam dan antarmuka dielektrik dengan medan yang meluruh secara eksponensial. *Surface Plasmon (SP)* dapat dieksitasi secara optik oleh gelombang elektromagnetik (Urbancova et al., 2020). Sensor SPR ini responsif terhadap perubahan refraktif indeks (RI) di lingkungan pada skala nanometer, sehingga cocok untuk mendeteksi SPR berbasis serat optik (Mauludi et al., 2024). Sensor *Surface Plasmon Resonance (SPR)* berbasis *Fiber Optic* didasarkan pada konfigurasi Kretschman. Sensor serat optik ini memiliki ukuran kecil dengan biaya yang rendah (Y. Liu & Peng, 2021).

2.2.1 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell pertama dikenalkan pada tahun 1861 dengan memprediksi teoritis tentang keberadaan gelombang elektromagnetik (EM). Pengamatan eksperimental pertama gelombang elektromagnetik tahun 1886 oleh Hertz, persamaan Maxwell ini merupakan dasar komunikasi nirkabel modern, fotonik dan komunikasi Cahaya. Pada tahun 1861 merupakan pengenalan arus perpindahan $\partial \mathbf{D} / \partial t$ dalam hukum Ampere, untuk memenuhi hukum kekekalan muatan yang menghasilkan listrik dan magnet, dimana $\mathbf{D}$ disebut vektor perpindahan listrik. Persamaan Maxwell secara umum merupakan teori untuk gelombang dan Cahaya elektromagnetik sehingga terkenal dalam ilmu komunikasi dan optik (Wang, 2020).

Dalam teori klasik, hukum-hukum kelistrikan dan kemagnetan secara umum direpresentasikan oleh persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell merupakan sintesis dari teori dan hasil observasi. Sehingga persamaan Maxwell kumpulan dari hubungan sejumlah besaran medan listrik dan medan magnet pergeseran listrik $\vec{D}$, induksi medan magnet $\vec{B}$, kuat medan listrik $\vec{E}$, kuat medan magnet $\vec{H}$, kerapatan muatan listrik ρ dan kerapatan arus listrik $\vec{j}$. Maxwell memanfaatkan dasar empiric dan teori yang dikembangkan oleh Gauss, Ampere, Faraday dan ilmuwan lainnya (Siregar, 2016) (Yudistira et al., 2017).

Bagian ini banyak merujuk pada (Siregar, 2016). Kuat medan listrik $\vec{E}$ di dalam bahan dielektrik akan menimbulkan pergeseran listrik $\vec{D}$, dengan hubungan

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.1)$$

Dimana ϵ adalah permitivitas bahan dielektrik yang sama ke semua arah di dalam material. Tetapan dielektrik material didefinisikan seperti $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ dengan $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ farad/meter merupakan permitivitas dalam ruang hampa.

Kuat medan magnet $\vec{H}$ dalam material dielektrik akan menimbulkan induksi medan magnet $\vec{B}$, dengan hubungan

$$\vec{H} = \mu \vec{B} \quad (2.2)$$

Dimana μ adalah permeabilitas material. Untuk ruang hampa $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry/meter. Pada persamaan (2.1) dan (2.2) disebut sebagai hubungan konstitutif material dielektrik isotropik.

Dalam teori listrik magnet ada tiga hukum penting. Pertama, hukum faraday yang mengungkapkan induksi gaya gerak listrik pada suatu kumparan sebagai akibat dari perubahan fluks magnet yang melalui kumparan. Kedua, hukum ampere yang mengungkapkan bahwa integral medan magnet sepanjang garis tertutup yang melingkupi suatu arus listrik sebanding dengan besarnya arus. Ketiga, hukum Gauss untuk medan listrik dan medan magnet. Medan listrik dikemukakan bahwa fluks listrik melalui permukaan tertutup sebanding dengan muatan listrik yang terkandung didalamnya.

Persamaan Maxwell dalam satuan Standart Inetrnasional (SI) adalah sebagai berikut:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \int_A \left(\vec{j} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \hat{n} dA \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (2.4)$$

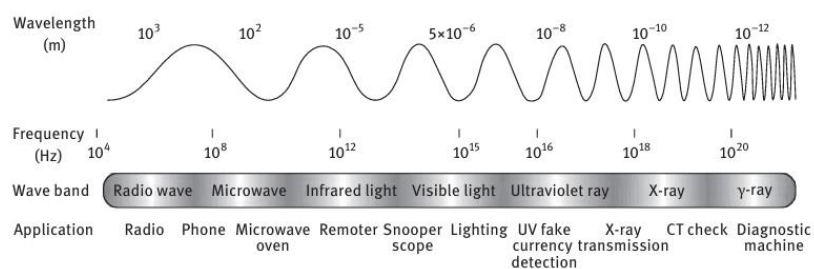
$$\epsilon \int_A \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \int_V \rho dV \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.5)$$

$$\int_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA = 0 \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

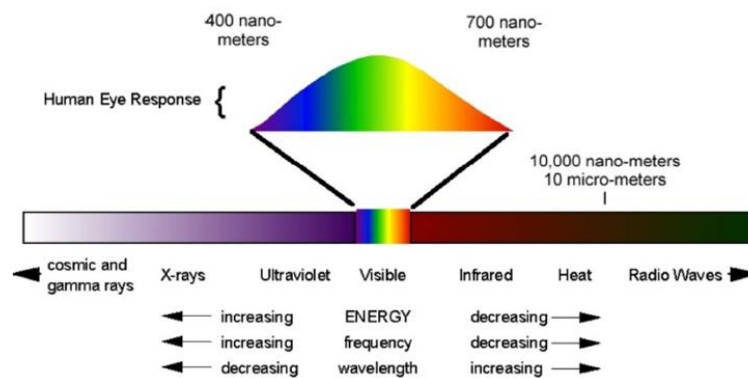
2.2.2 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat walaupun tidak ada medium perantara. Gelombang elektromagnetik terdiri atas medan listrik (E) dan medan magnet (H) yang merambat (propagasi). Beberapa sifat gelombang elektromagnetik adalah dapat merambat dalam ruang hampa, merupakan gelombang transversal, dapat mengalami polarisasi, dapat mengalami pemantulan (refleksi), dapat mengalami pembiasan (refraksi), dapat mengalami interferensi, dapat mengalami lenturan atau hamburan (difraksi), merambat dalam arah lurus (Seniar & Bagus Widhi Dharma, 2020).

Gelombang elektromagnetik memiliki frekuensi berkisar $10^3 - 10^{22}$ Hz (Yin et al., 2022). Rentang frekuensi dan Panjang gelombang tersebut dikelompokkan menjadi beberapa spektrum dengan pengaplikasian yang berbeda-beda (Li & Ling, 2019).



Gambar 2. 3 Spektrum gelombang elektromagnetik dan aplikasinya (Li & Ling, 2019)



Gambar 2. 4 Spektrum Panjang gelombang elektromagnetik yang nampak (Aftab et al., 2024)

Gelombang elektromagnetik dijabarkan dalam persamaan maxwell baik dalam bentuk diferensial maupun integral. Untuk menemukan solusi dari persamaan Maxwell cukup rumit untuk dilakukan. Sehingga dibutuhkan pendekatan yang dikenal sebagai komputasi elektromagnetik merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis gelombang elektromagnetik dengan komputasi. Jenis – jenis metode komputasi numerik dalam satunya adalah *Finite Difference Time Domain* (FDTD) (Shabrina, 2017).

Pada bagian ini banyak merujuk pada (Siregar, 2016). Persamaan gelombang elektromagnetik diturunkan dari persamaan Maxwell. Ketika suatu material isotropic dimana $\rho = 0, j = 0$, sedangkan ϵ dan μ berupa skalar, maka persamaan (2.3) menjadi:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{E} \quad (2.7)$$

Dan persamaan (2.4) menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Karena sifat vektor maka persamaan (2.5) menjadi persamaan umum gelombang untuk kuat medan listrik:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + (\nabla \ln \mu) \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla (\vec{E} \cdot \nabla \ln \epsilon) = 0 \quad (2.9)$$

Sedangkan persamaan gelombang untuk medan magnet adalah sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + (\nabla \ln \epsilon) \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla (\vec{H} \cdot \nabla \ln \mu) = 0 \quad (2.10)$$

Secara sederhana persamaan (2.9) dan (2.10) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

Interaksi radiasi elektromagnetik dengan material menghasilkan transfer sebagian atau seluruh energinya ke dalam material. Jenis interaksi tersebut

tergantung pada sifat material (Aftab et al., 2024). Hubungan konstitutif (*constitutive relations*) memainkan peran penting dalam menggambarkan sifat elektromagnetik dari material pada medium seperti logam. *Constitutive relations* antara kerapatan fluks listrik $\mathbf{D}$ dan medan listrik $\mathbf{E}$ pada ruang bebas atau ruang vakum adalah

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (2.12)$$

Dimana $\mathbf{D}$ memiliki satuan coulomb per $m^2 (C/m^2)$, $\mathbf{E}$ memiliki satuan volt per meter (V/m), dan ε memiliki satuan farad per meter (F/m). medan listrik $\mathbf{E}$ dapat dianggap sebagai medan yang diaplikasikan sehingga menyebabkan munculnya densitas fluks $\mathbf{D}$ atau aliran fluks (Chew, 2022).

$\partial \mathbf{D} / \partial t$ merupakan arus perpindahan memiliki arti fisik bahwa arus yang mengalir melalui kapasitor. Ketika media dielektrik berada diantara dua pelat sejajar kapasitor, arus perpindahan ditingkatkan. Sehingga kontribusi terhadap $\mathbf{D}$ dan medan magnet $\mathbf{H}$ oleh kerapatan polarisasi $\mathbf{P}$ dan kerapatan magnetisasi $\mathbf{M}$ dalam media yang merupakan kerapatan dipol. Maka:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (2.14)$$

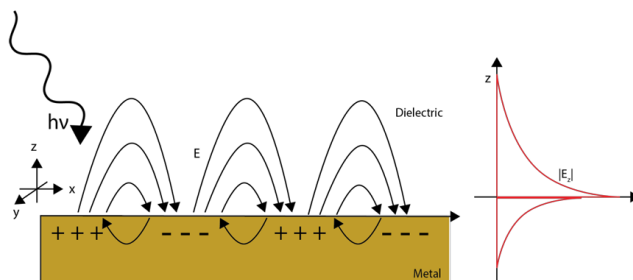
Dimana ε_0 dan μ_0 merupakan permitivitas listrik dan permeabilitas magnetik dalam vakum (Settnes et al., 2016).

2.2.3 Fenomena Eksitasi Surface Plasmon (SPs)

Surface Plasmon (SPs) adalah gelombang elektromagnetik yang bergerak di sepanjang antarmuka yang menghubungkan logam ke bahan dielektrik. Gelombang elektromagnetik ini pada dasarnya terdiri dari gelombang cahaya yang terbatas sebagai akibat dari interaksinya dengan elektron bebas dalam konduktor.

Pada fenomena Surface Plasmon (SPs) ini elektron bebas beresonansi dengan gelombang cahaya yang datang dan berosilasi pada logam dielektrik (Aftab et al., 2024). Resonansi dapat terjadi ketika cahaya mengenai permukaan logam berbentuk melengkung, seperti nanopartikel emas atau perak. Pada Panjang gelombang Cahaya tampak, resonansi ini menghasilkan warna karena peningkatan penyerapan dan hamburan cahaya. Untuk menciptakan efek SPs dalam rentang optik, permukaan logam harus memiliki struktur dengan ukuran kurang dari 400 nm (Sarkar et al., 2017).

Hubungan antara plasmon permukaan dan gelombang elektromagnetik menghasilkan eksitasi *Surface Plasmon Polaritons* (SPPs). *Surface Plasmon Resonance* (SPR) adalah fenomena dimana SPPs tereksitasi pada antarmuka logam dielektrik, untuk dapat memahami secara visual maka diilustrasikan pada gambar (2.5):



Gambar 2. 5 Ilustrasi Skema Eksitasi Polariton Plasmon Permukaan (Clark, 2018).

Ilustrasi tersebut menjelaskan bagaimana proses eksitasi Surface Plasmon Polaritons (SPPs) pada antarmuka logam dan medium dielektrik. Ketika gelombang elektromagnetik (cahaya) dengan energi foton ($h\nu$) datang ke permukaan logam, maka gelombang akan berinteraksi dengan elektron bebas di permukaan logam. Interaksi tersebut menyebabkan osilasi kolektif elektron pada antarmuka logam-dielektrik. Osilasi muatan positif (+) dan negatif (-) pada permukaan logam

menghasilkan medan listrik terlokalisasi. Sehingga fenomena ini sangat sensitif terhadap perubahan sifat medium dielektrik didekat permukaan logam, seperti refraktif indeks, sehingga digunakan dalam teknologi *Surface Plasmon Resonance* (SPR) untuk aplikasi sensor (Clark, 2018).

Berdasarkan (Riana, 2023) secara teori klasik, eksitasi SPs bergantung pada model permitivitas dielektrik material plasmonik. Kemudian, model tersebut dapat diplikasikan pada persamaan Maxwell, kemudian memberikan solusi dispersi relasi SPs. Munculnya fenomena plasmonik membawa kemajuan dan inovasi pada berbagai bidang.

2.2.4 Karakteristik Logam Cu, Ag dan Au

Surface plasmons (SPs) merupakan fenomena yang terjadi ketika elektron bebas di permukaan material logam berosilasi secara bersamaan akibat interaksi dengan energi yang terkuantisasi, seperti energi yang berasal dari partikel cahaya (foton), partikel bermuatan (elektron) atau getaran dalam kisi kristal material (fonon). Ketika nanomaterial plasmonik disinari dengan gelombang elektromagnetik (EM) dengan Panjang gelombang lebih panjang dari ukuran nanomaterial, osilasi elektron terjadi di permukaan nanostruktur plasmonik (Divya et al., 2022).

Sensor SPR membutuhkan komponen logam yang membawa elektron bebas dalam jumlah besar. Elektron bebas ini menyediakan bagian nyata dari permitivitas negatif, yang penting untuk bahan plasmonik. Namun, logam aktif secara kimiawi rentan terhadap oksidasi. Secara umum, emas (*AU*) dan perak (*AG*) banyak digunakan sebagai bahan plasmonik untuk sensor SPR (Rifat et al., 2016). Logam seperti emas (*AU*), perak (*AG*), tembaga (*CU*) mampu menghasilkan *Surface*

Plasmon (SPs) ketika ada cahaya pada permukaan. Logam-logam ini memiliki konsentrasi bebas yang memungkinkan dapat menyerap cahaya, terutama pada rentang panjang gelombang dalam spektrum cahaya tampak (Divya et al., 2022).

Secara mekanika kuantum, logam CU memiliki konfigurasi elektron $[Ar]4s^13d^{10}$, sedangkan Ag dan Au adalah $[Kr]5s^14d^{10}$ dan $[Xe]6s^14f^{14}5d^{10}$. Konfigurasi elektron ketiga logam tersebut termasuk ke dalam pengecualian aturan Madulung, di mana secara prediktif ketiga logam tersebut memiliki konfigurasi elektron Cu: $[Ar]4s^23d^9$, Ag: $[Kr]5s^24d^9$, dan Au: $[Xe]6s^24f^{14}5d^9$. Ketiga logam tersebut memiliki satu elektron di 4s dimana elektron valensi yang menyebabkan menjadi konduktif. Sifat elektronik, Cu memiliki densitas elektron $8.47 \times 10^{22}/cm^3$, sedangkan untuk Ag dan Au yaitu $5.86 \times 10^{22}/cm^3$ dan $5.90 \times 10^{22}/cm^3$, dengan konduktivitas yang tinggi untuk Cu, Ag, dan Au masing-masing yaitu $\sigma_{Cu} = 64.1 \times 10^6 S/m$, $\sigma_{Ag} = 66.7 \times 10^6 S/m$ dan $\sigma_{Au} = 49 \times 10^6 S/m$. Secara eksperimental, refraktif indeks dan permitivitas material Cu, Ag dan Au di daerah panjang gelombang 400 – 1200 nm (Riana, 2023).

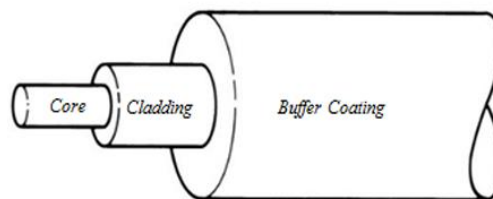
Dari beberapa literatur tersebut dapat disimpulkan bahwa logam seperti emas (Au), perak (Ag) dan tembaga (Cu) menjadi pilihan dalam aplikasi SPR karena memiliki konsentrasi elektron bebas yang tinggi dan mampu menyerap cahaya dalam rentang panjang gelombang tampak. Namun logam-logam tersebut memiliki kelemahan seperti oksidasi, sehingga perlu dipertimbangkan untuk digunakan sebagai sensor SPR berbasis fiber optik.

2.2.5 Sensor SPR berbasis *Fiber Optic*

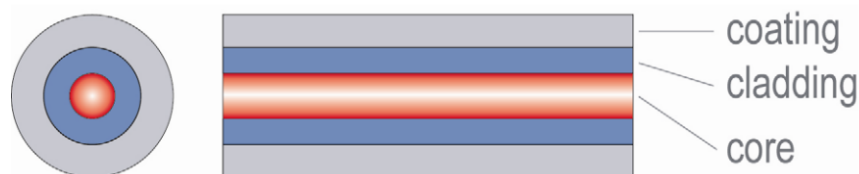
Penggunaan serat optik untuk implementasi SPR dimulai pada tahun 1990 (Gupta et al., 2016). Serat optik terdiri dari *core* dan *cladding* yang terbuat dari

bahan silika. Serat optik merupakan padu gelombang melingkar yang memandu cahaya berdasarkan fenomena refleksi internal total pada antarmuka ini serat optik dan *cladding* yang mengelilingi serat inti (*core*)(Liang et al., 2015).

Secara umum, serat optik terdiri dari tiga komponen utama yaitu inti (*Core*), kulit (*cladding*), dan jaket (*Coating*). Inti serat optik berfungsi sebagai saluran utama dalam pemanduan gelombang cahaya yang mempunyai indeks bias tertinggi. Bagian inti ini berbentuk batang silinder yang terbuat dari bahan silika. *Cladding* mempunyai indeks bias lebih rendah dibandingkan indeks bias inti, yang berperan untuk melindungi inti serat optik. Sementara itu, *Coating* merupakan lapisan terluar yang berfungsi sebagai pelindung *core* dan *cladding* (Hafida & Rubiyanto, 2018). Dalam SPR berbasis fiber optik, *core* dan *cladding* berfungsi sebagai pemandu cahaya yang diinjeksikan. Ketika cahaya dari *core* menabrak *cladding* dengan sudut yang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya akan dipantulkan dan kemudian pantulan berulang terus menerus hingga cahaya dapat dipandu dari suatu titik ke titik lain yang sesuai jalur fiber optik. Sementara *coating* berfungsi untuk melindungi *core* dan *cladding* dari gangguan lingkungan. (Tazi, 2023). Struktur penyusun dan konstruksi serat optik ditunjukkan pada gambar (2.6) dan (2.7).

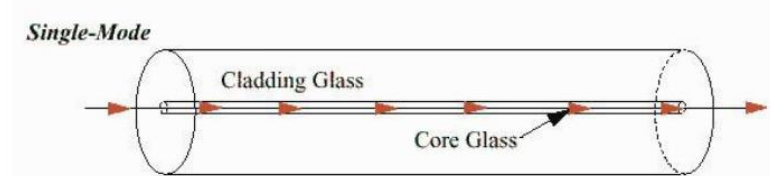


Gambar 2. 6 Struktur penyusun serat optik(Hafida & Rubiyanto, 2018)

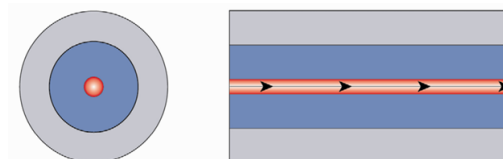


Gambar 2. 7 Konstruksi fiber optik (Curran & Shirk, 2015)

Sistem transmisi dalam serat optik berfungsi sebagai mengirimkan sinyal-sinyal dalam bentuk energi cahaya. Berdasarkan mode transmisi cahaya serat optik dibedakan menjadi singlemode dan multimode (Amanu, 2016). Serat optik singlemode digunakan untuk mentransmisikan cahaya melalui mode propagasi tunggal, yang memungkinkan transmisi dilakukan lebih stabil dibandingkan dengan serat optik multimode (Parapat et al., 2024). Serat optik singlemode memiliki core dan cladding yang terbuat dari silica glass. Ukuran core lebih kecil dibandingkan cladding, serat cahaya merambat dalam satu jalur sejajar dengan sumbu serat optik (Hariyadi, 2018). Perambatan cahaya serat optik singlemode diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 2. 8 Jenis kabel singlemode (Hanif & Arnaldy, 2017)

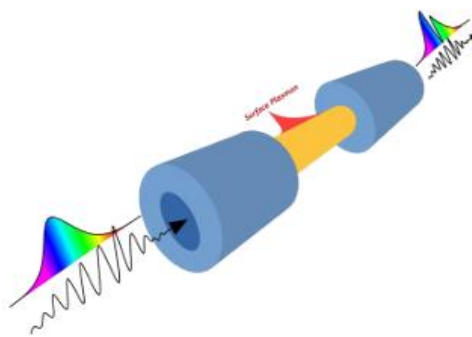


Gambar 2. 9 Perambatan cahaya singlemode (Curran & Shirk, 2015)

Gelombang SPs secara efektif dapat terksitasi ketika terjadi resonansi antara gelombang cahaya datang dan gelombang SPs terjadi di mana ini dikenal sebagai *Surface Plasmon Resonance* (SPR). Menurut metode eksitasi, jenis coupling sensor SPR meliputi coupling berbasis prisma, kisi, pandu gelombang dan fiber optic. Pendekatan paling umum untuk membangkitkan gelombang plasmon permukaan pada film logam adalah metode geometri Kretschmann dan *Attenuated Total Refelction* (ATR) atau refleksi total yang dilemahkan. Perambatan sinar dalam serat

optik didasarkan pada refleksi internal total, maka sensor SPR berbasis fiber optik didasarkan pada konfigurasi Kretschman (Y. Liu & Peng, 2021).

Pada dasarnya, mekanisme sensor SPR berbasis fiber optik serupa dengan berbasis prisma, yang membedakan adalah sumber cahaya yang berinteraksi dengan antarmuka dielektrik-logam berasal dari cahaya yang terpandu dalam serat fiber optik. Struktur sensor SPR berbasis fiber optik direpresentasikan oleh gambar 2.7 Dimana gelombang evanescent dari efek TIR pada fiber optik dapat mengeksitasi SPs karena keberadaan film material plasmonik yang melapisi core fiber optik.



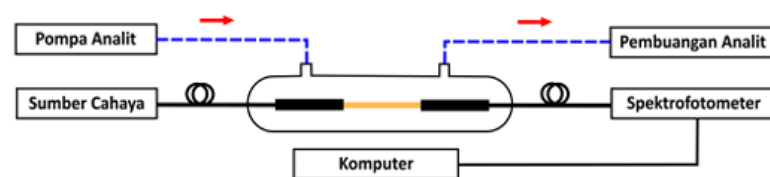
Gambar 2. 10 Desain umum sensor SPR berbasis fiber optik(Riana, 2023)

Sensor SPR berbasis fiber optik dapat mendeteksi perubahan analit karena fenomena TIR yang menghasilkan vektor gelombang evanescent yang memiliki nilai sama dengan konstanta propagasi SPs. Sehingga SPs dapat tereksitasi dan karakteristik SPs bergantung pada refraktif indeks analit.

Secara singkat, cahaya dengan panjang gelombang broadband diinjeksikan ke dalam fiber optik, kemudian cahaya menuju daerah sensing di mana antarmuka logam-analit berada, sedemikian sehingga gelombang SPs tereksitasi karena resonansi ditunjukkan dengan adanya reflektansi minimum di panjang gelombang tertentu dalam spektrum transmisi pada spektrofotometer. Perubahan refraktif

indeks analit akan merubah konstanta propagasi SPs yang tereksitasi tersebut kemudian menyebabkan berubahnya kondisi resonansi. Sehingga, perubahan analit dapat dideteksi dengan melihat pergeseran kurva spektrum transmitansinya.

Komponen penting sensor ini terdiri dari sumber cahaya, fiber optik dengan probe sensingnya, chamber analit, pompa analit, tempat pembuangan analit, spektrofotometer, dan komputer dimana setiap komponen memiliki fungsinya masing-masing.



Gambar 2. 11 Skema mekanisme set up eksperimen sensor SPR berbasis fiber optik (Huang et al., 2022)

Sumber cahaya diinjeksikan ke dalam fiber optik. Kemudian, pompa micro-injection berfungsi untuk mendorong atau menginjeksikan analit ke chamber analit dimana probe sensing, fungsi probe sensing adalah untuk mengindera analit yang sedang diuji. Kemudian spektrum cahaya yang melewati probe sensing akan mengalami perubahan (yang berada di chamber sebelumnya adalah background yang berubah menjadi analit) saat dibaca oleh spectrometer akan ada pergeseran kondisi resonansi. Kemudian data dapat dianalisis menggunakan komputer.

2.2.6 Karakteristik Sensor SPR

Performa sensor SPR berbasis fiber optik bergantung pada beberapa parameter di antaranya yaitu sensitivitas (*sensitivity*), selektivitas (*selectivity*), deteksi limit (*limit of detection*), akurasi deteksi (*detection accuracy*), resolusi (*resolution*), repeabilitas (*repeability*), reproduksibilitas (*reproducibility*), derau (*noise*), daerah kerja (*range*), waktu respons (*respons time*), linieritas (*linierity*),

drift, *quality factor*, dan *figure of merit*. Namun, dalam simulasi tidak semua parameter dapat diukur, sehingga bagian ini hanya membahas beberapa parameter yang dapat diukur, seperti sensitivitas, akurasi deteksi, faktor kualitas dan figure of merit (Yesudasu et al., 2021).

Sensitivitas didefinisikan sebagai perubahan yang terukur pada sinyal keluaran bergantung pada perubahan satuan dalam besaran analit yang diukur. Pada sensor SPR berbasis fiber optik dengan interrogasi panjang gelombang sensitivitas (S) dikalkulasi pada persamaan (2.15). Akurasi deteksi (DA) memiliki makna seberapa akurat sensor dapat mendeteksi analit atau konsentrasi analit. Formula DA diwakilkan oleh persamaan (2.16), di mana mendefinisikan rasio antara perubahan panjang gelombang resonansi dan full width half maximum (FWHM), dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar perubahan panjang gelombang resonansi dan semakin sempit FWHM maka dapat dikatakan akurasinya semakin baik. Faktor kualitas (QF) yang mendefinisikan bahwa jika sensitivitas sensor tinggi dan FWHM sensor sempit maka kualitas keluaran sensor tersebut tinggi, formula QF diwakilkan oleh persamaan (2.17). Sedangkan untuk *figure of merit* (FOM), parameter yang ada pada formula FOM adalah S , FWHM, dan transmitansi minimum (persamaan 2.18). Dapat dilihat bahwa semakin tinggi S , semakin sempit FWHM, dan semakin dalam tranmitansi minimum T_{min} (pada λ_{spr}), maka FOM sensor dapat dinilai tinggi(Tazi, 2023).

$$S = \frac{\Delta\lambda_{spr}}{\Delta n} \quad (2.15)$$

$$DA = \frac{\Delta\lambda_{spr}}{FWHM} \quad (2.16)$$

$$QF = \frac{S}{FWHM} \quad (2.17)$$

$$FOM = S \times \left(\frac{1-T_{min}}{FWHM} \right) \quad (2.18)$$

2.3 Finite Difference Time Domain (FDTD)

Metode FDTD dikembangkan oleh Kane Yee pada tahun 1966 sebagai teknik numerik untuk simulasi perambatan gelombang elektromagnetik (Sekido & Umeda, 2024). FDTD dapat diterapkan untuk menghitung reflektansi, transmisi, difraksi, interferensi, dan penyerapan bahan terstruktur atau tidak terstruktur yang berbeda, mempelajari respon terhadap polarisasi dan panjang gelombang cahaya yang berbeda, merekam film untuk memvisualisasikan bagaimana cahaya bergerak melalui material secara real time (Mccoy et al., 2021)

Pada metode FDTD, digunakan persamaan curl Maxwell dan dikonversi ke persamaan differensial terbatas dengan metode central difference approximation, diikuti dengan diskritisasi domain ruang dan waktu. Komputasi dilakukan dalam sel yang disebut sel YEE dan ruangnya dibagi lagi untuk mencapai diskritisasi special. Dalam kode FDTD, objek pertama-tama dimasukkan ke dalam grid dan ukuran grid harus cukup kecil sehingga bidang dapat diambil sampelnya secara tepat. Kemudian langkah waktu ditentukan sesuai dengan kondisi courant-stability untuk menghindari ketidakstabilan numerik. Sel Yee mengikuti susunan medan magnet dan medan listrik tertentu demikian rupa pada setiap simpul magnet dan listrik dikelilingi oleh empat simpul listrik dan magnet yang berbeda. Oleh karena itu, untuk menduga semua turunan spatiotemporal yang ada pada persamaan Maxwell digunakan pendekatan turunan terpusat (Sofi et al., 2021).

Simulasi menggunakan FDTD cocok digunakan dalam simulasi broadband (di mana sumber cahaya mengandung rentang panjang gelombang yang besar) dan menyelidiki perilaku cahaya dari waktu ke waktu, dari cahaya dipancarkan melalui

interaksinya dengan objek dan seterusnya (Mccoy et al., 2021). Metode ini juga efektif dalam pemecahan masalah skala kecil, dengan mengabaikan memori dan intensitas waktu penggunaan CPU yang diperlukan. FDTD merupakan metode menggunakan pendekatan differensial dalam domain waktu, sehingga lebih mudah untuk dipahami dan dikerjakan (Sofi et al., 2021).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Dalam penelitian ini, jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi. Metode simulasi digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi desain serta kinerja sensor Surface Plasmon Resonance (SPR) berbasis fiber optik untuk deteksi gelatin sapi. parameter yang digunakan dalam analisis sensor SPR untuk mendeteksi gelatin sapi adalah (S , DA , QF dan FOM) Pendekatan simulasi menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) melalui *Software* Ansys Lumerical FDTD. Penelitian tidak melibatkan eksperimen fisik melainkan pada simulasi numerik untuk mendapatkan data.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian yang berjudul “Deteksi Gelatin Sapi Dengan Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)” Ini dimulai pada tanggal 1 Desember 2024 sampai 31 Maret 2025 di Laboratorium Instrumentasi Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki peran penting dalam mendukung dua proses utama, yaitu pengambilan data refraktif indeks gelatin sapi dan pelaksanaan simulasi pada *software* Ansys lumerical FDTD. Berikut ini adalah alat dan bahan yang digunakan dibagi berdasarkan prosesnya yaitu:

a. Mengukur Refraktif Indeks Gelatin Sapi

Alat dan bahan yang digunakan untuk mengukur refraktif indeks gelatin sapi adalah sebagai berikut:

1. Serbuk gelatin sapi
2. Aquades
3. Refraktometer Abbe
4. Neraca digital/Timbangan
5. *Hot plate*
6. Pipet ukur
7. Pengaduk
8. Botol
9. Sarung tangan

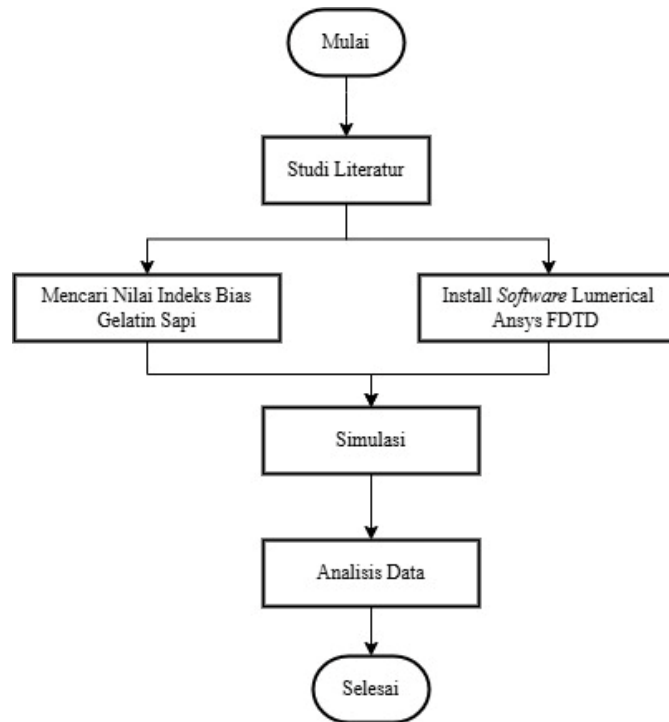
b. Simulasi Software Ansys

Alat dan bahan yang digunakan untuk proses simulasi adalah sebagai berikut:

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

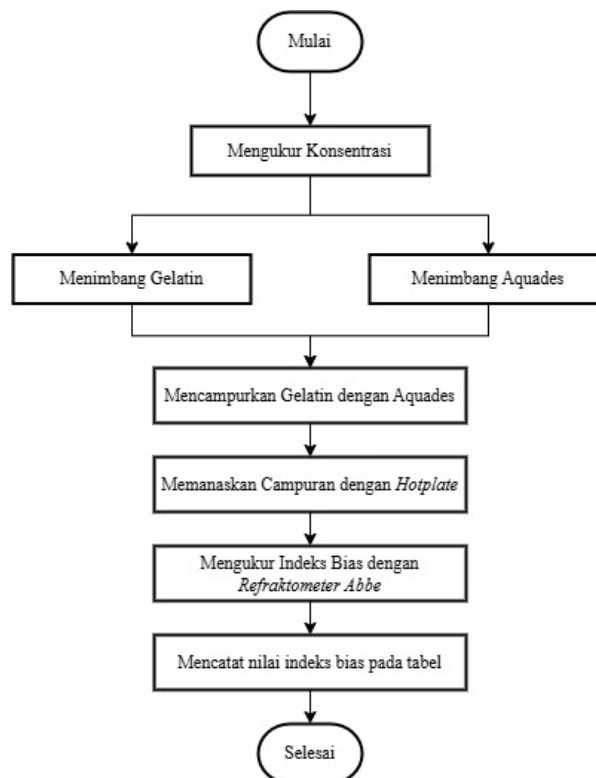
3.4 Diagram Alir Penelitian

Prosedur penelitian pada “Deteksi Gelatin Sapi Dengan Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time Domain* (FDTD)” akan dilaksanakan dalam beberapa tahap pelaksanaan. Adapun tahapan tersebut diperlihatkan sebagaimana pada diagram alir berikut.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Umum Penelitian

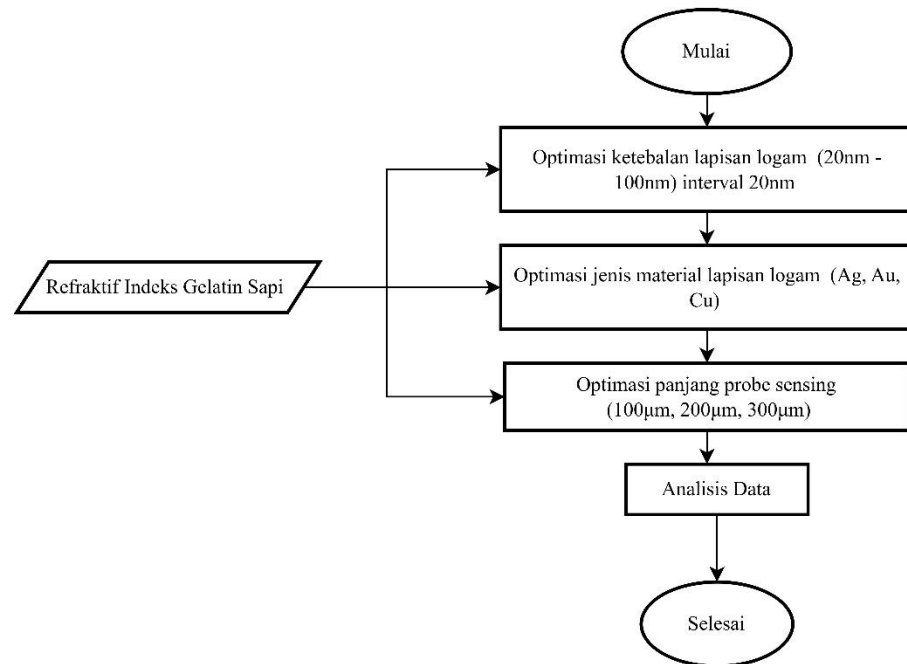
a. Diagram Alir untuk Mengukur Refraktif Indeks Gelatin Sapi



Gambar 3. 2 Diagram Alir Mengukur Refraktif Indeks Gelatin Sapi

b. Diagram Alir Pelaksanaan Simulasi dengan Software Ansys

Lumerical FDTD



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pelaksanaan Simulasi dengan Software Ansys Lumerical FDTD

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dirancang secara sistematis untuk memastikan bahwa setiap tahapan dilaksanakan dengan tepat dan terukur. Metode komputasi dengan pendekatan *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) untuk memodelkan fenomena SPR pada lapisan yang berinteraksi dengan gelatin sapi. Setiap langkah dan prosedur penelitian ini dirancang untuk mencapai tujuan penelitian secara efektif dan efisien. Adapun beberapa proses yang dilakukan pada penelitian ini, diantaranya:

3.5.1 Pengumpulan Data

Data input yang diperlukan pada penelitian ini adalah pengambilan data refraktif indeks gelatin sapi dengan berbagai konsentrasi menggunakan alat

Refraktometer Abbe, pencarian material logam, ketebalan lapisan serta panjang probe sensing yang paling sensitif untuk sensor SPR berbasis FDTD ini dievaluasi berdasarkan nilai panjang gelombang transmitansi yang dihasilkan kemudian dianalisis berdasarkan perhitungan performa sensor.

3.5.2 Pengukuran Refraktif Indeks Gelatin Sapi

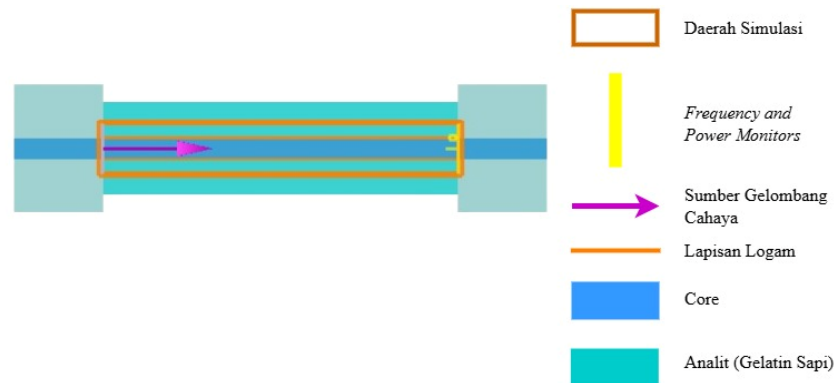
1. Menimbang gelatin dan aquades menggunakan neraca digital dengan konsentrasi 0.40% hingga 2.00%
2. Mencampur gelatin sapi dengan aquades pada *glass beaker*.
3. Memanaskan larutan gelatin sapi dengan aquades menggunakan *hot plate*.
4. Larutan gelatin sapi kemudian diambil menggunakan pipet dan diletakkan pada prisma Refraktometer.
5. prisma kemudian ditutup dan dilihat nilai refraktif indeks yang tertera pada skala melalui lensa refraktometer.
6. Nilai indeks yang muncul di catat dan dilakukan pengulangan selama 3 kali pada setiap konsentrasi larutan gelatin yang berbeda-beda.

3.5.3 Simulasi dengan *Software Ansys Lumerical FDTD*

Simulasi dilakukan menggunakan *Finite-Difference Time Domain (FDTD)* pada *Software Ansys Lumerical*. Adapun beberapa langkah simulasi sebagai berikut:

1. Desain Sensor:

Memasukkan desain sesor SPR berbasis fiber optik yang telah dirancang ke dalam *Software Ansys Lumerical FDTD*



Gambar 3. 4 Desain SPR pada Software Ansys Lumerical FDTD

2. Pengaturan Parameter Simulasi:

Mengatur parameter simulasi menggunakan *object simulation*, termasuk daerah simulasi, mesh, boundary condition dan parameter lainnya).

3. Pengaturan Sumber Gelombang Cahaya:

Menentukan parameter sumber gelombang cahaya yang diinjeksikan menggunakan *object Source*, meliputi panjang gelombang, geometri, mode gelombang).

4. Penentuan Sensitivitas Ketebalan Lapisan

Mengatur variasi ketebalan lapisan dari 20nm hingga 100nm

5. Penentuan Sensitivitas Jenis Material:

Mengatur jenis material (Ag/ Au/ Cu) menggunakan *object Mesh*.

6. Penentuan Sensitivitas Panjang Probe Sensing:

Mengatur panjang probe sensing (100, 200, 300 μm) menggunakan ketebalan dan jenis material yang paling sensitif

7. Deteksi Gelatin Sapi:

Deteksi gelatin sapi menggunakan berbagai konsentrasi mulai dari 0.40% sampai 2.00% dengan interval 0.20 % dengan menggunakan konfigurasi

ketebalan lapisan, jenis material dan panjang probe sensing paling sensitif yang telah diperoleh sebelumnya

8. Memasukkan nilai refraktif indeks gelatin sapi pada object *Analit-up* dan *Analit-bot*.
9. Menjalankan program simulasi untuk menentukan panjang gelombang menggunakan object *Run*.
10. Memvisualisasikan hasil dalam bentuk txt, grafik dan gambar pada menu *Transmission*

3.6 Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan pengukuran refraktif indeks gelatin sapi serta pengukuran nilai performa dari sensor.

1. Pengukuran Refraktif Indeks Gelatin Sapi

Langkah pertama yang dilakukan dalam pengukuran refraktif indeks gelatin sapi adalah preparasi sampel dilakukan dengan mencampurkan serbuk gelatin sapi dan aquades dengan massa total larutan 10gram pada setiap konsentrasi. Konsentrasi digunakan dalam penelitian ini berada pada rentang 0.40% hingga 2.00% dengan interval 0.20%. Jumlah massa gelatin dan aquades dihitung berdasarkan presentasi konsentrasi menggunakan rumus berikut:

$$\text{konsentrasi gelatin (\%)} = \left(\frac{\text{massa zat terlarut}}{\text{massa total larutan}} \right) \times 100\%$$

Dengan perhitungan:

$$m_{\text{gelatin}} = \left(\frac{\text{konsentrasi (\%)} \times \text{massa total larutan}}{100} \right)$$

$$m_{\text{aquades}} = (\text{massa total larutan} - \text{massa gelatin})$$

Dimana:

Massa zat terlarut = massa gelatin (gram)

Massa total larutan = total massa larutan (10gram)

Setiap data yang dihasilkan dicatat dalam tabel **3.1**.

Refraktif indeks gelatin sapi diukur menggunakan alat Refraktometer Abbe dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali. Setiap data yang diperoleh dari pengukuran dicatat dalam tabel data

Tabel 3. 1 Tabel data refraktif indeks gelatin sapi

Konsentrasi (%)	Refraktif Indeks Gelatin Sapi			
	1	2	3	Rata-rata
0.00				
0.40				
0.60				
0.80				
1.00				
1.20				
1.40				
1.60				
1.80				
2.00				

2. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi ketebalan material pelapis logam

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan ketebalan lapisan logam (Ag, Au, Cu) pada ketebalan 20 nm hingga 100 nm dengan interval 20nm. Tujuan dari simulasi ini untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap posisi panjang gelombang resonansi λ_{spr} dan sensitivitas sensor.

3. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi jenis material logam

Pengujian dilakukan terhadap tiga jenis logam: perak (Ag), Emas (Au) dan tembaga (Cu), dengan ketebalan lapisan tetap yang didapatkan dari simulasi sebelumnya. Simulasi dilakukan untuk melihat respons spektrum terhadap perubahan refraktif indeks gelatin sapi dalam rentang 1.3335 hingga 1.3364.

4. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi panjang daerah simulasi (probe sensing)

Panjang zona sensing (probe sensing) divariasikan sebesar 100 μm , 200 μm , dan 300 μm . Parameter seperti ketebalan lapisan dan jenis material ditetapkan dari simulasi sebelumnya. Tujuannya untuk mengetahui pengaruh panjang probe sensing terhadap resonansi dan performa sensor, termasuk sensitivitas.

3.7 Analisis Data

Analisis data berdasarkan hasil simulasi dilakukan. Data utama yang diperoleh berupa spektrum transmitansi sebagai fungsi panjang gelombang untuk setiap variasi parameter sensor, seperti jenis material logam, ketebalan lapisan dan panjang probe sensing. Beberapa analisis dilakukan sebagai berikut:

1. Identifikasi panjang gelombang resonansi (λ_{spr})

titik minimum pada kurva transmitansi diidentifikasi sebagai (λ_{spr}), yang menunjukkan terjadinya resonansi plasmon permukaan. pergeseran posisi (λ_{spr}) diamati terhadap perubahan refraktif indeks larutan gelatin sapi. Yang divisualisasikan dengan grafik hubungan.

2. Perhitungan *Full Width Half Maximum* (FWHM)

FWHM dihitung dengan menggunakan software Origin sebagai pembantu analisis yang akurat.

3. Perhitungan Parameter Performa Sensor

parameter kinerja sensor seperti sensitivitas (S), Deteksi Akurasi (DA), Faktor Kualitas (QF) dan *Figure of Merit* (FOM) dianalisis untuk mengkonfirmasi hasil simulasi dan menilai kinerja sensor secara keseluruhan. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah konfigurasi ketebalan

lapisan, jenis material, dan panjang probe sensing yang dipilih memberikan kinerja optimal dalam deteksi gelatin sapi. Perhitungan tersebut berdasarkan pada persamaan (2.15) sampai (2.18).

Seluruh data ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel, serta dibandingkan dengan literatur untuk memvalidasi hasil simulasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran Refraktif Indeks Gelatin Sapi

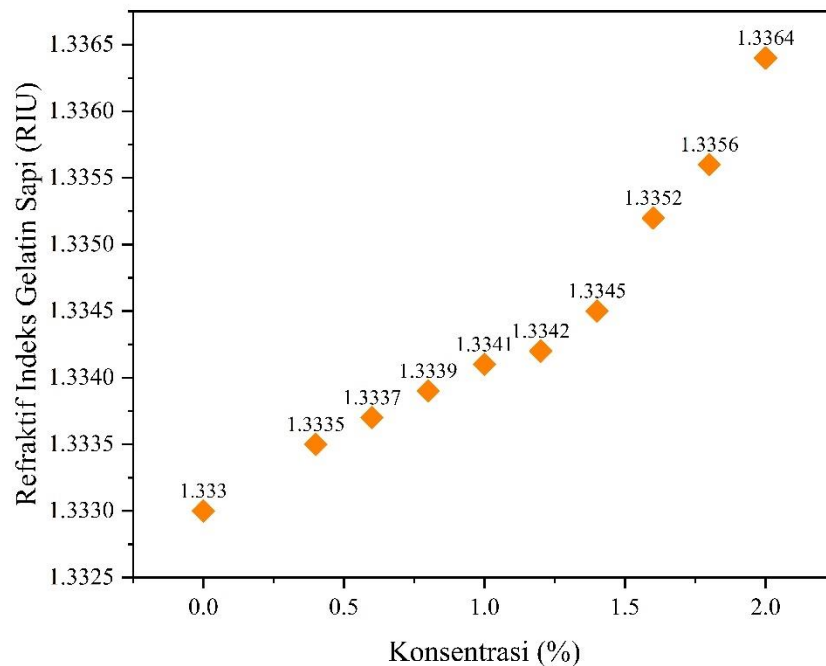
Pengukuran nilai refraktif indeks gelatin sapi bertujuan untuk mengetahui perubahan indeks bias terhadap variasi konsentrasi. Pengukuran dilakukan menggunakan Refraktometer Abbe yang telah dikalibrasi menggunakan aquades dengan nilai indeks bias sebesar 1.333 sesuai penelitian Zainuddin et al., (2019).

Gelatin yang telah dilarutkan dengan aquades dengan ketentuan komposisi konsentrasi gelatin ditetaskan pada permukaan prisma. Prisma ditutup agar cairan menyebar secara merata tanpa gelembung udara. Garis batas gelap-terang diamati melalui lensa. Setiap kali pengukuran, prisma dibersihkan menggunakan tisu bebas serat untuk menghindari kontaminasi antar sampel. Tabel 4.1 menyajikan hasil pengukuran refraktif indeks larutan gelatin sapi pada berbagai konsentrasi mulai dari 0 % hingga 2%.

Tabel 4. 1 Data hasil pengukuran refraktif indeks gelatin sapi setiap konsentrasi

Konsentrasi (%)	Refraktif Indeks Gelatin Sapi			
	1	2	3	Rata-rata
0.00	1.3331	1.3330	1.3332	1.3330
0.40	1.3336	1.3335	1.3336	1.3335
0.60	1.3337	1.3338	1.3337	1.3337
0.80	1.3339	1.3340	1.3338	1.3339
1.00	1.3340	1.3342	1.3341	1.3341
1.20	1.3341	1.3343	1.3342	1.3342
1.40	1.3345	1.3346	1.3344	1.3345
1.60	1.3353	1.3352	1.3351	1.3352
1.80	1.3356	1.3355	1.3357	1.3356
2.00	1.3364	1.3365	1.3363	1.3364

Hubungan antara konsentrasi gelatin sapi dan nilai Refraktif Indeksnya divisualisasikan dalam grafik berikut



Gambar 4. 1 Grafik hubungan antara konsentrasi (%) dengan nilai refraktif indeks gelatin sapi (RIU)

4.2 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik untuk Deteksi Gelatin Sapi

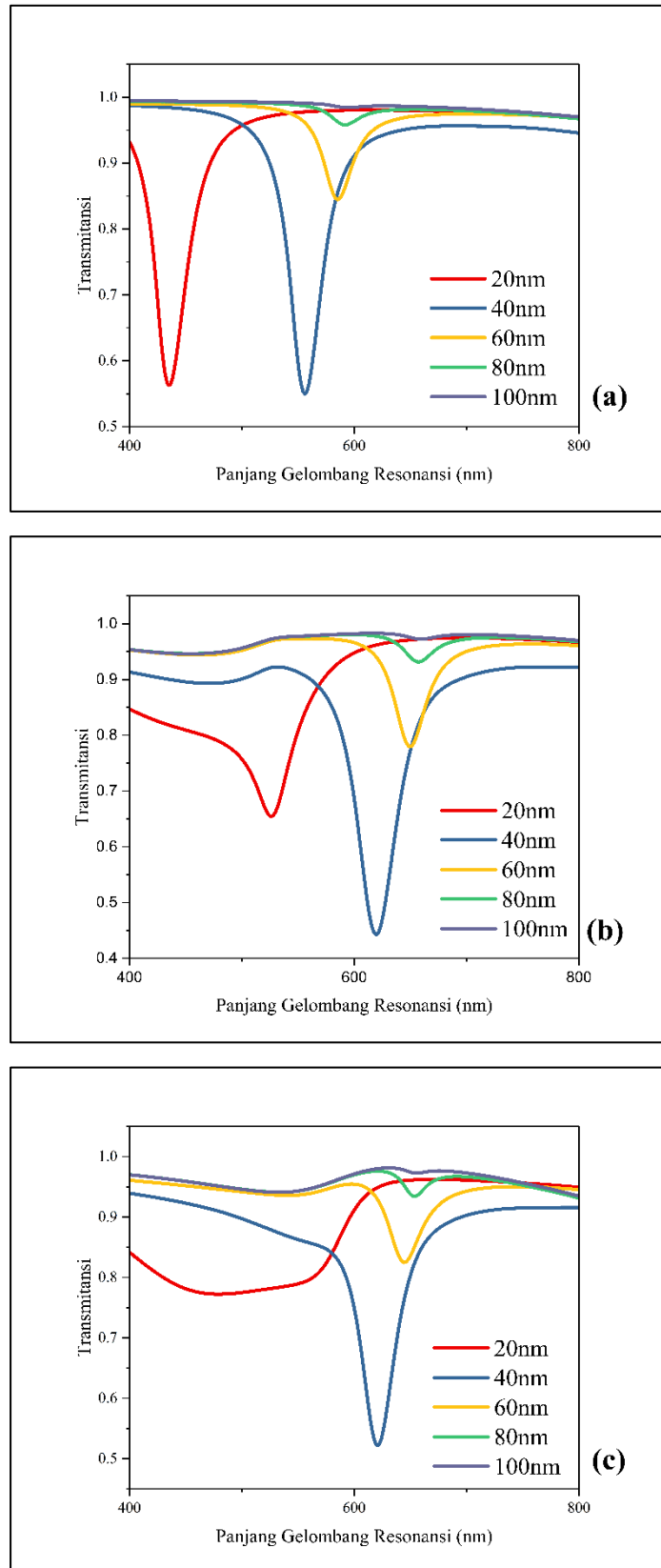
Pengujian karakteristik sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor dalam mendeteksi gelatin sapi. Beberapa parameter yang dianalisis dalam simulasi meliputi ketebalan lapisan, jenis material dan panjang probe sensing. Pengujian dilakukan secara bertahap untuk memperoleh konfigurasi sensor dengan sensitivitas dan memberikan performa terbaik.

Simulasi dilakukan menggunakan *Software* Ansys Lumerical FDTD. Jenis material yang digunakan yaitu Ag (perak), Au (emas), dan Cu (Tembaga) dengan ketebalan 20 hingga 100 nm dengan interval 20 nm. Sumber cahaya yang

diinjeksikan dalam rentang 400 – 1200 nm. Konsentrasi gelatin sapi memiliki nilai Refraktif indeks sebagai analit sebesar 1.3335 hingga 1.3364.

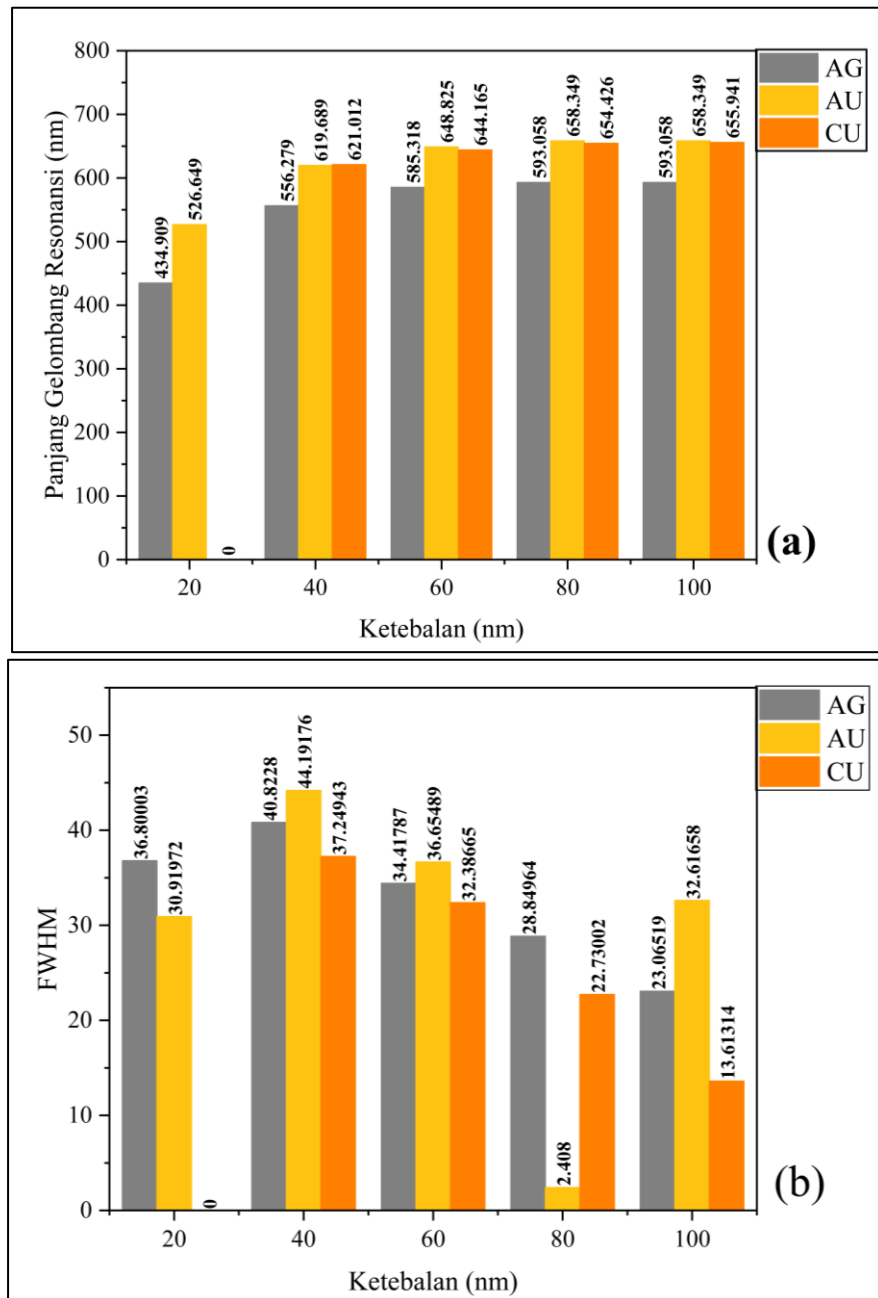
4.2.1 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam

Dilakukan pengujian variasi ketebalan lapisan logam untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap performa sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik dalam mendeteksi gelatin sapi. lapisan logam berperan dalam fenomena plasmon permukaan, di mana perubahan refraktif indeks gelatin dapat mempengaruhi posisi puncak resonansi. Ketebalan lapisan logam divariasikan dalam rentang 20 hingga 100 nm dengan interval 20 nm. Jenis material logam yang digunakan yaitu Ag (Perak), Au (Emas) dan Cu (Tembaga). Larutan gelatin sapi dengan konsentrasi tetap sebesar 0.80% dengan nilai Refraktif Indeks ($n_a = 1.3339$). Spektrum transmitansi yang dihasilkan diperlihatkan dalam gambar berikut



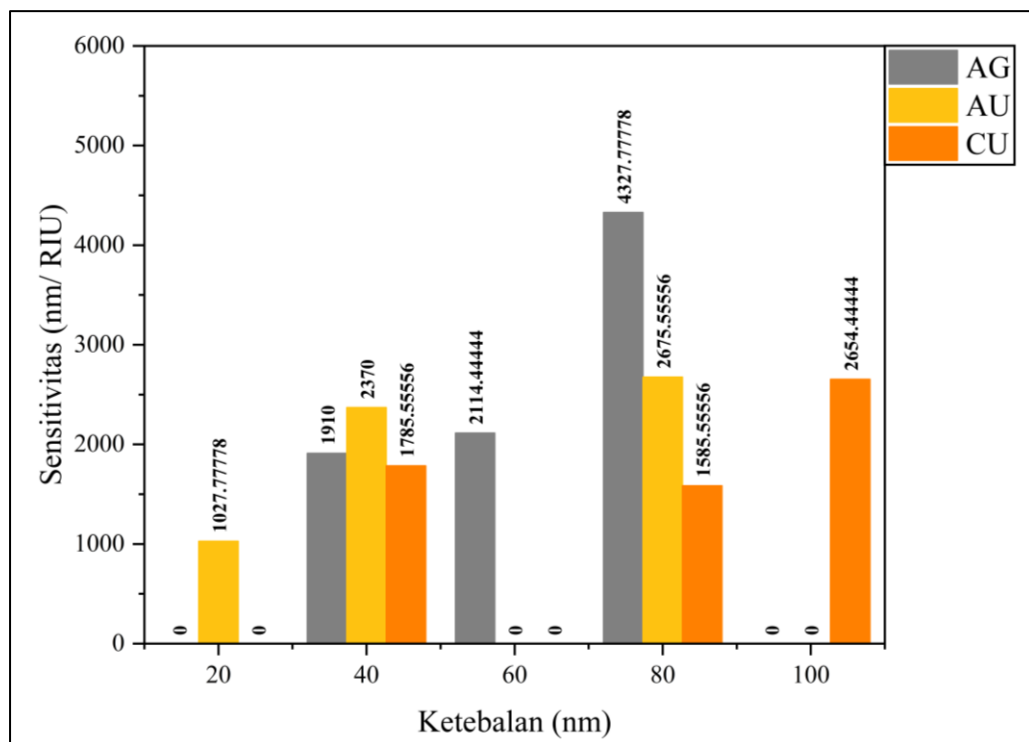
Gambar 4. 2 Spektrum Transmittansi SPR untuk pengukuran $n_a = 1.3339$ dengan jenis material lapisan **(a)** Ag (perak), **(b)** Au (emas), dan **(c)** Cu (Tembaga)

Spektrum transmitansi di analisis lebih lanjut untuk mengevaluasi performa sensor. Data spektrum transmitansi digunakan untuk menentukan panjang gelombang resonansi λ_{spr} dan mengetahui nilai FWHM. Pengaruh ketebalan terhadap panjang gelombang resonansi dan FWHM disajikan dakan grafik berikut



Gambar 4. 3 Grafik perbandingan antara ketebalan dan **(a)** Panjang Gelombang Resonansi **(b)** FWHM

Nilai sensitivitas diperoleh dari pergeseran panjang gelombang resonansi pada setiap variasi ketebalan, sebagai dasar untuk mendukung optimasi ketebalan lapisan logam. Grafik berikut menunjukkan ketebalan yang menghasilkan sensitivitas maksimum, sehingga dapat digunakan untuk menentukan konfigurasi sensor yang paling efektif.

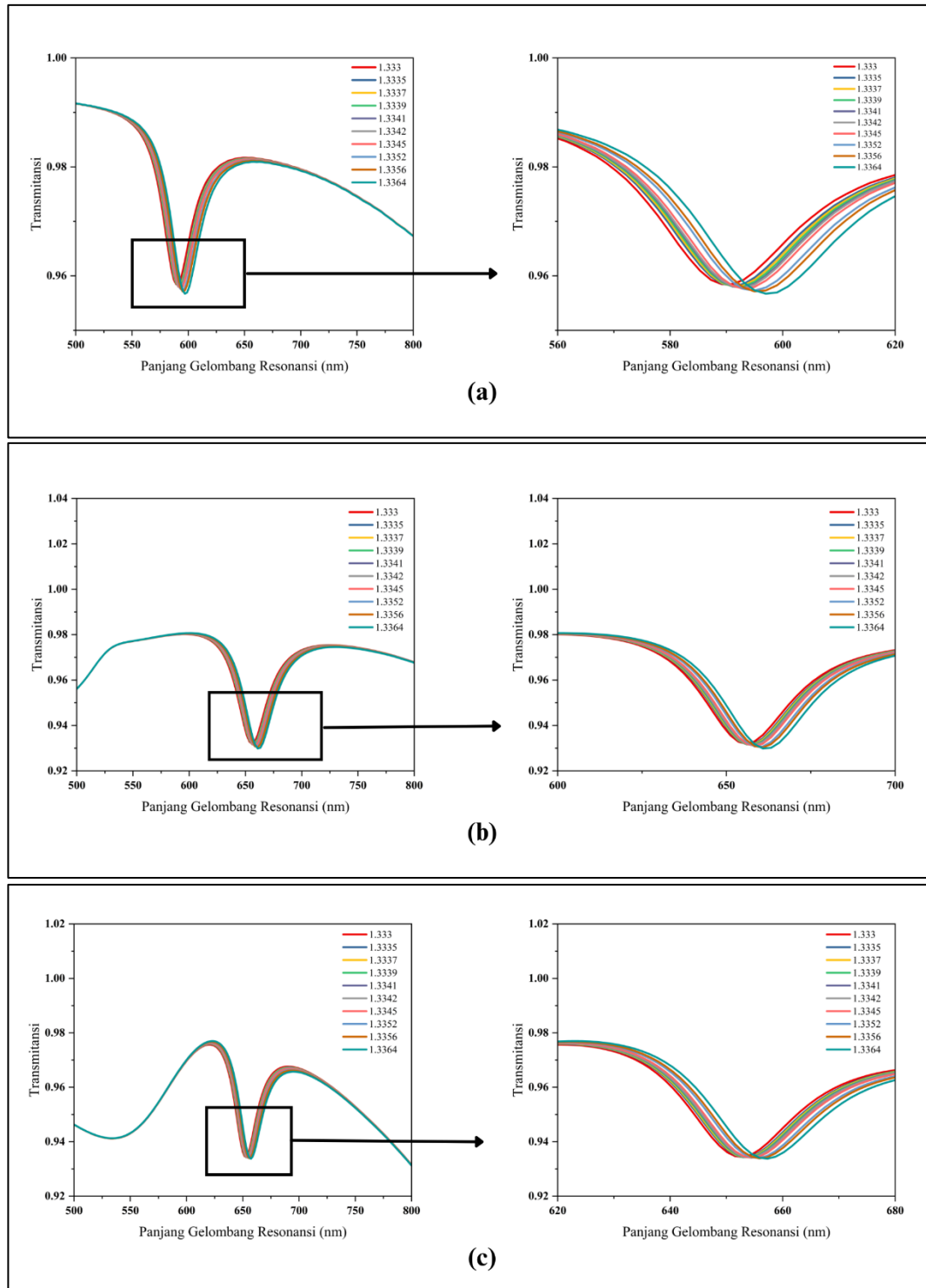


Gambar 4. 4 Grafik perbandingan sensitivitas dengan variasi ketebalan disemua jenis material pada konsentrasi 0.80% dengan $n_a = 1.3339$

Berdasarkan data hasil pengujian, konfigurasi sensor dengan ketebalan 80nm menunjukkan performa yang paling optimal dengan nilai sensitivitas tertinggi mencapai 4327.77 nm/RIU. Sensitivitas secara matematis mempresentasikan respons langsung sensor terhadap perubahan indeks bias gelatin sapi. Hasil pengujian ketebalan 80nm dipilih sebagai konfigurasi yang optimal dan digunakan untuk pengujian selanjutnya.

4.2.2 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Jenis Material Logam

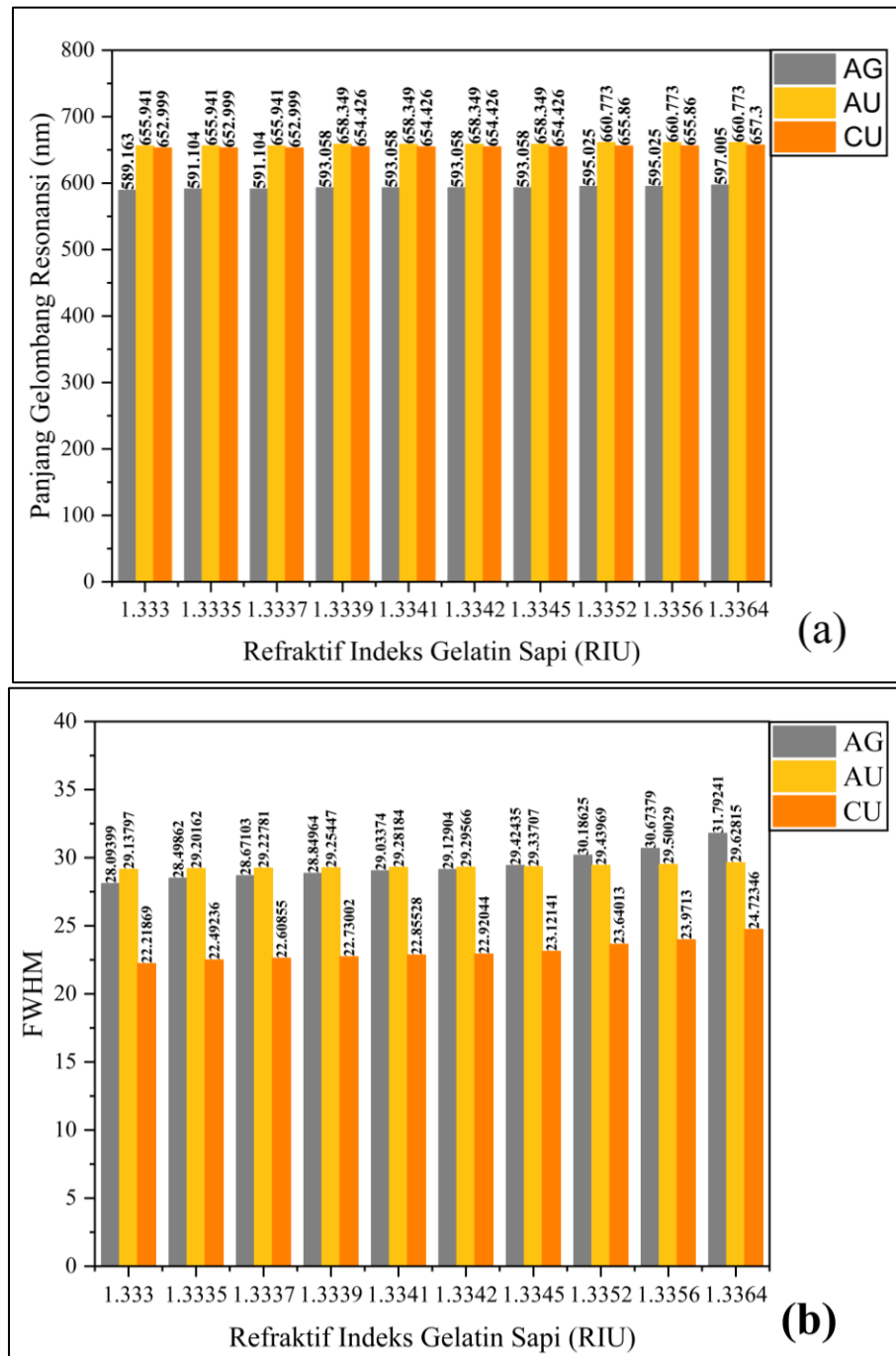
Pengujian difokuskan pada tiga jenis logam, yaitu Ag (perak), Au (Emas), Cu (Tembaga), dengan ketebalan lapisan yang telah ditentukan sebelumnya sebesar 80nm. Ketebalan tersebut diperoleh dari nilai sensitivitas paling tinggi. Untuk memperoleh karakteristik awal masing-masing logam, dilakukan pemodelan dan simulasi untuk melihat spektrum transmitansi sensor dengan masing-masing material. Konsentrasi yang digunakan mulai dari 0 % sampai 2 %. Berikut ini adalah spektrum transmitansi SPR berdasarkan simulasi



Gambar 4. 5 Spektrum transmitansi SPR, pada material ketebalan 80nm disemua konsentrasi dan pada material **(a)** Ag (perak), **(b)** Au (emas), dan **(c)** Cu (tembaga)

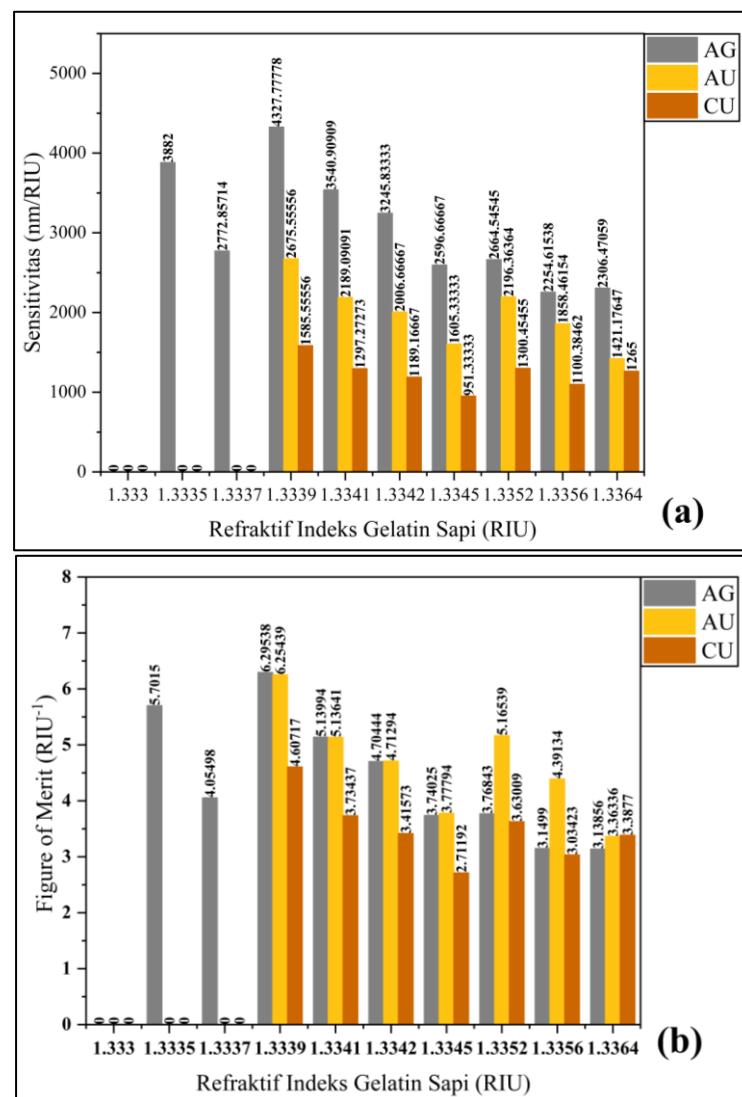
Berdasarkan spektrum transmitansi, panjang gelombang resonansi ditentukan dari posisi minimum nilai transmitansi. Spektrum transmitansi juga

digunakan dalam penentuan FWHM. Hubungan antara refraktif indeks gelatin sapi dengan panjang gelombang resonansi dan FWHM di sajikan pada diagram berikut



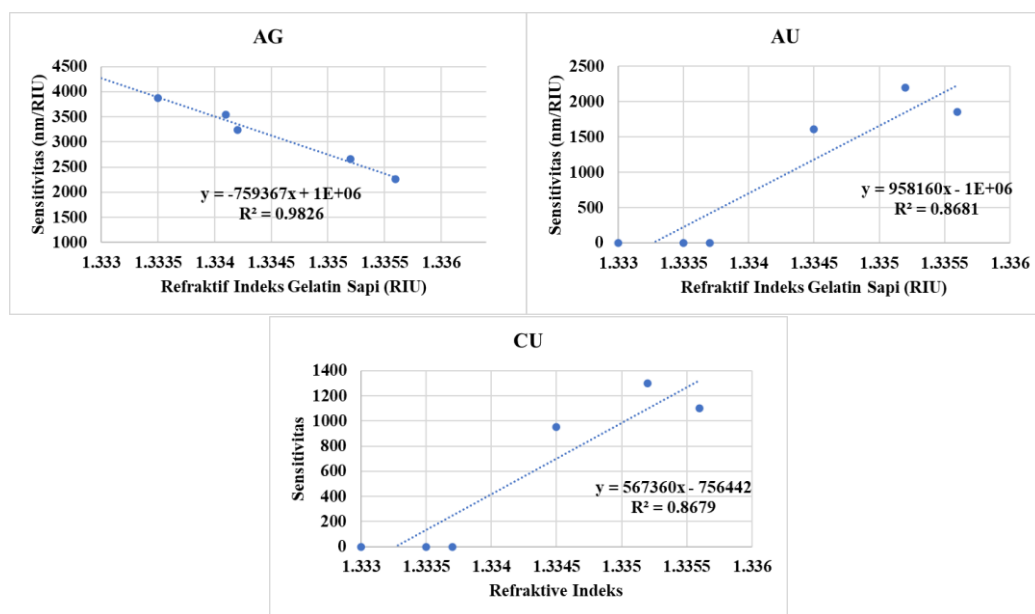
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan antara (a) Panjang Gelombang Resonansi, (b) FWHM dengan Refractive Indeks Gelatin Sapi

Dari Gambar 4.6 diketahui nilai puncak resonansi dan FWHM nya. Data tersebut menjadi dasar untuk menganalisis parameter performa sensor. Berdasarkan hasil perhitungan dari spektrum transmitansi, diperoleh nilai parameter kinerja sensor untuk masing-masing jenis material pada ketebalan 80nm. Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan antara refraktif indeks gelatin sapi terhadap sensitivitas dan FoM.



Gambar 4. 7 Grafik perbandingan (a) sensitivitas, (b) Figure of Merit dengan variasi refraktif indeks gelatin sapi pada masing-masing jenis material logam (Ag,Au,Cu) dengan ketebalan 80nm

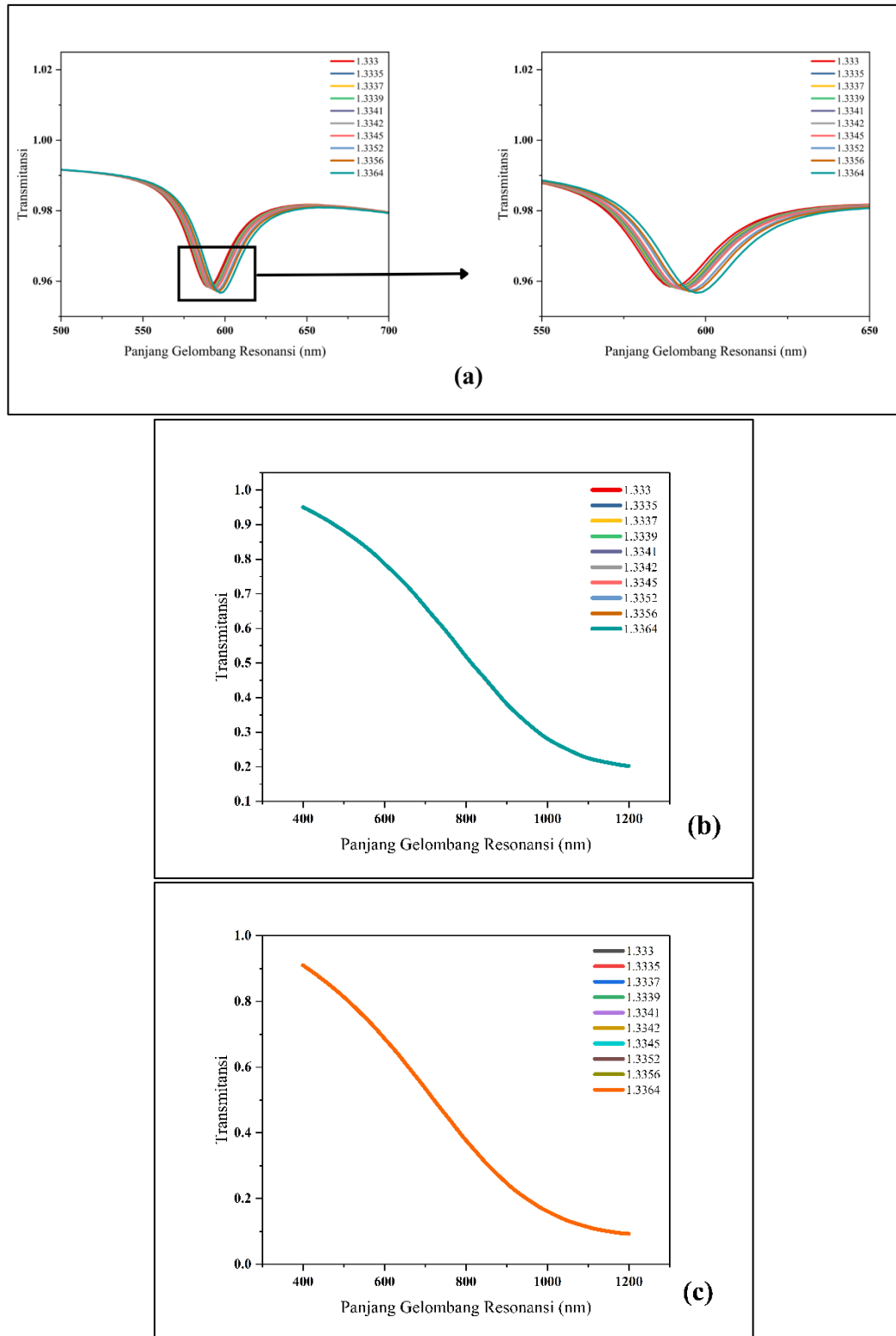
Untuk memperkuat analisis hubungan antara perubahan refraktif indeks gelatin sapi terhadap sensitivitas sensor SPR, dilakukan plot regresi linear pada masing-masing jenis material logam (Ag, Au, Cu). Hasil regresi ditampilkan sebagai berikut.



Gambar 4. 8 Grafik hubungan antara Refraktif Indeks dan Sensitivitas pada jenis material Ag (perak), Au (Emas), Cu (Tembaga) dengan ketebalan 80nm

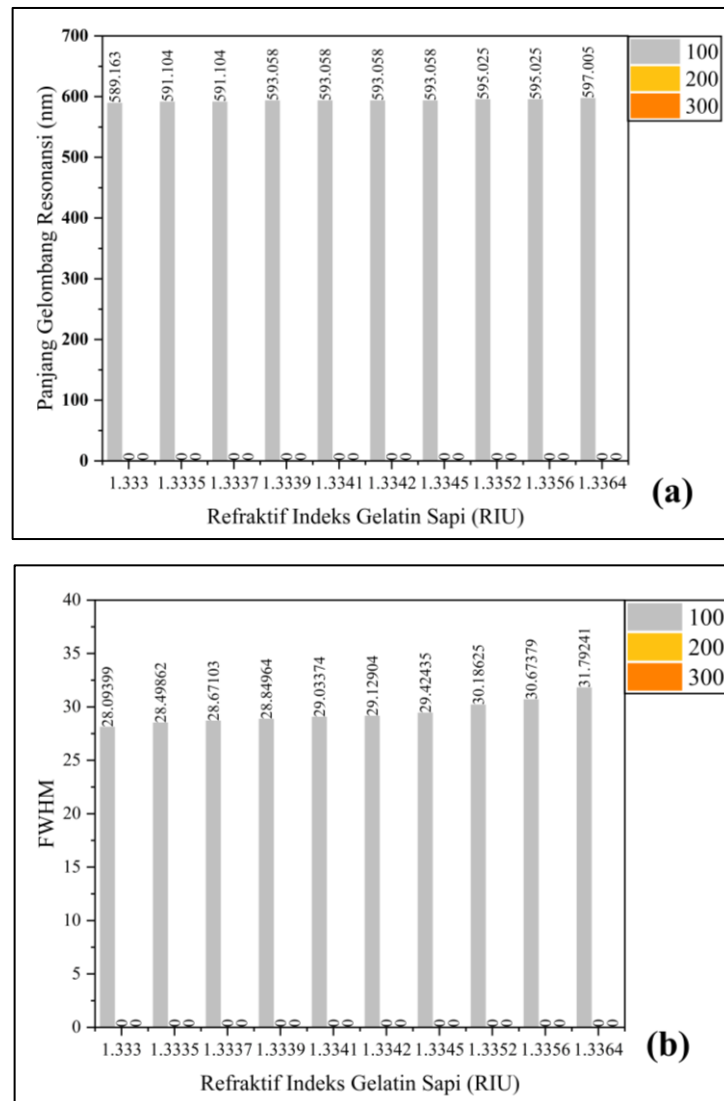
4.2.3 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Panjang Zona Sensing (Probe Sensing)

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi panjang zona sensing terhadap kinerja sensor SPR berbasis fiber optik dalam mendeteksi gelatin sapi. panjang zona sensing yang digunakan dalam simulasi divariasikan yakni 100 μ m, 200 μ m, dan 300 μ m. Pengujian dilakukan dengan kondisi ketebalan lapisan tetap yaitu 80nm dengan jenis material yang digunakan adalah Ag (perak). Berikut merupakan spektrum transmitansi yang dihasilkan.



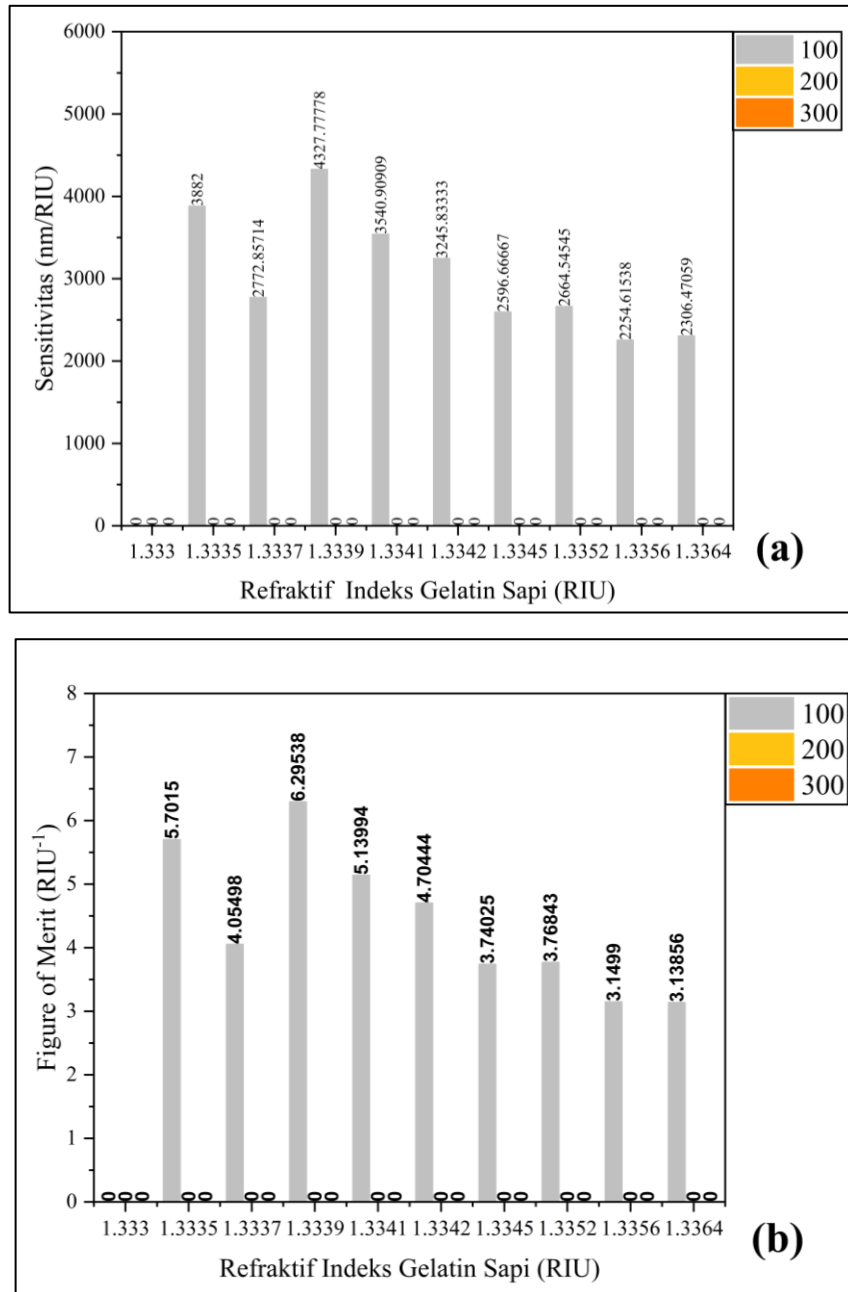
Gambar 4. 9 Spektrum Tranmitansi SPR dengan panjang zona sensing (a) 100μm, (b) 200μm dan (c) 300μm dengan ketebalan 80nm dan jenis lapisan perak (Ag)

Spektrum transmitansi dari berbagai variasi panjang zona sensing, selanjutnya dilakukan analisis hubungan antara nilai refraktif indeks dengan panjang gelombang resonansi. Hubungan ini ditampilkan pada grafik berikut



Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara Refraktif Indeks dengan **(a)** Panjang gelombang Resonansi dan **(b)** FWHM

Dilakukan analisis hubungan anatara nilai refraktif indeks gelatin sapi dengan sensitivitas yang divisualisasikan pada grafik



Gambar 4. 11 Grafik hubungan antara nilai Refraktif Indeks dengan (a) Sensitivitas dan (b) Figure of Merit

4.3 Pembahasan

4.3.1 Pengujian Refraktif Indeks Gelatin Sapi

Pengukuran Refraktif Indeks larutan gelatin sapi dilakukan untuk menentukan bagaimana perubahan Refraktif Indeks dipengaruhi oleh konsentrasi larutan. Nilai refraktif indeks gelatin sapi diukur menggunakan alat

Refraktometer Abbe. Refraktometer Abbe merupakan alat yang dirancang untuk mengukur nilai Refraktif Indeks berupa cairan dengan tingkat akurasi tinggi. Prinsip kerja dari Refraktometer Abbe didasarkan pada pembiasan cahaya ketika cahaya melewati suatu medium dengan indeks bias tertentu. Ketika cahaya memasuki prisma dan mengenai larutan gelatin sapi, sebagian cahaya akan mengenai larutan dan sebagian lagi akan dibiaskan atau dipantulkan. Hasil dari fenomena ini membentuk batas terang dan gelap yang dapat diamati melalui lensa okuler. Posisi garis batas mencerminkan sudut kritis yang kemudian dikonversi menjadi nilai Refraktif Indeks yang dapat dibaca melalui skala.

Nilai-nilai refraktif indeks gelatin pada berbagai konsentrasi diperoleh dengan metode tetes langsung ke permukaan prisma, lalu dilakukan pembacaan secara berulang sebanyak tiga kali untuk melihat rentang setiap pengulangan dan meningkatkan akurasi. Hasil pengukuran menunjukkan nilai refraktif indeks gelatin sapi meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi. Pada konsentrasi 0% gelatin merupakan aquades (air murni) yang berfungsi sebagai acuan awal pada pengukuran. Aquades tidak mengandung gelatin sehingga nilai refraktif indeksnya mencerminkan kondisi pelarut, dengan nilai refraktif indeks sebesar 1.333, nilai ini sesuai dengan penelitian (Sari et al., 2023) .

Nilai Refraktif Indeks larutan gelatin sapi terbukti meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi, yaitu dari 1.3335 pada konsentrasi 0.40 % hingga mencapai 1.3364 pada konsentrasi 2.00%. Peningkatan ini dapat dijelaskan berdasarkan prinsip dasar sifat optik larutan. Secara teori, refraktif indeks merupakan perbandingan antara kecepatan cahaya di ruang hampa dengan kecepatan cahaya saat merambat dalam suatu medium (Fitri et al., 2023).

Senada dengan hal tersebut (Didik et al., 2021) menyatakan refraktif indeks berbanding terbalik dengan kecepatan cahaya dalam suatu medium. Dengan demikian, Semakin tinggi konsentrasi gelatin, semakin banyak jumlah partikel yang tersebar dalam medium, yang menyebabkan larutan menjadi semakin pekat. Kondisi ini mengakibatkan cahaya yang merambat di dalam larutan mengalami hambatan yang lebih besar. Karena semakin padatnya susunan molekul gelatin. Hambatan ini menurunkan kecepatan rambat cahaya dalam medium tersebut, maka penurunan kecepatan cahaya akan meningkatkan nilai refraktif indeks larutan.

4.3.2 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan sensor SPR menggunakan *software* ANSYS Lumerical FDTD. Desain dasar sensor menggunakan core berbahan silika dengan panjang zona sensing 100 μm . Gambar 4.2 menunjukkan spektrum transmitansi SPR untuk ketiga jenis material logam yang digunakan sebagai lapisan, yaitu perak (Ag), emas (Au) dan tembaga (Cu), masing-masing dengan variasi ketebalan 20 nm hingga 100 nm. Analisis dilakukan pada refraktif indeks sebesar $n_a = 1.3339$ di konsentrasi 0.80%. Penurunan tajam pada kurva transmitansi, yang tampak seperti jurang disebut (dip), menunjukkan terjadinya Resonansi Plasmon Permukaan (SPR). Ini terjadi ketika konstanta propagasi gelombang cahaya yang datang sama dengan konstanta propagasi plasmon permukaan. Hasil spektrum menunjukkan semakin tebal lapisan Ag, Au, Cu menunjukkan dip semakin dangkal. Pendangkalan di mulai dari ketebalan 60 nm – 100 nm. Pada material Cu ketebalan 20 nm tidak menimbulkan dip, sehingga

pada material dan jenis ketebalan ini tidak terjadi resonansi dan tidak memiliki nilai FWHM, sedangkan material Ag dan Au 20 nm menimbulkan dip lebih dangkal dibandingkan Ag dan Au ketebalan 40nm.

Peningkatan ketebalan lapisan plasmonik menyebabkan pergeseran panjang gelombang resonansi (λ_{spr}). Fenomena ini dilaporkan dalam penelitian sebelumnya oleh (Moznuzzaman et al., 2021) (Zhang et al., 2020). Pergeseran λ_{spr} ini terjadi karena perubahan ketebalan lapisan logam mempengaruhi efektif indeks dari surface plasmon (SPs), yang dapat mengubah konstanta propagasi gelombang plasmon permukaan. Hal ini menyebabkan posisi resonansi SPR bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang ke arah kanan “*red-shift*” (Riana, 2023). Penjelasan ini sejalan dengan prinsip dasar SPR, di mana resonansi terjadi akibat propagasi antara gelombang cahaya datang dan elektron di permukaan logam. Seperti dijelaskan dalam literatur (Jassam et al., 2020), energi dari cahaya yang datang akan dialihkan ke elektron logam pada panjang gelombang tertentu, menghasilkan penurunan tajam intensitas cahaya yang dipantulkan. Lokasi dari penurunan ini atau posisi λ_{spr} , bergantung pada parameter optik seperti indeks bias dan karakteristik lapisan logam. Meskipun dalam penelitian ini digunakan satu nilai indeks bias tetap sebagai analisis, data pada grafik 4.3 menunjukkan bahwa ketebalan lapisan cukup mempengaruhi posisi λ_{spr} , karena perubahan geometri lapisan mengubah kondisi resonansi.

Grafik 4.4 menunjukkan sensitivitas sensor SPR dipengaruhi oleh variasi ketebalan lapisan logam. Grafik memperlihatkan respons sensor terhadap perubahan refraktif indeks gelatin sapi pada konsentrasi 0.80% dengan $n_a =$

1.3339 untuk tiga jenis material logam (Ag, Au, Cu) dalam rentang ketebalan 20 nm hingga 100 nm. Pada ketebalan 80 nm, sensor dengan material Ag menunjukkan performa paling optimal dengan nilai sensitivitas tertinggi mencapai 4327.78 nm/RIU. Pada ketebalan yang sama, sensitivitas Au dan Cu cukup jauh masing masing nilai sensitivitasnya sebesar 2675.56 nm/RIU dan 1586.56 nm/RIU. Nilai ini menunjukkan bahwa ketebalan lapisan mempengaruhi kemampuan sensor dalam merespons perubahan refraktif indeks gelatin sapi.

Pada grafik 4.4 juga menunjukkan konfigurasi dengan nilai sensitivitas nol. Hal ini terjadi karena panjang gelombang resonansi pada konsentrasi pembanding (0%) dengan sampel uji berada pada posisi yang sama, sehingga tidak terjadi perubahan panjang gelombang resonansi ($\Delta\lambda_{spr} = 0$). Karena sensitivitas dihitung berdasarkan perubahan panjang gelombang resonansi dibagi dengan perubahan refraktif indeks. Akibatnya, meskipun terdapat perubahan refraktif indeks, nilai sensitivitas tetap nol. Nilai sensitivitas dengan ketebalan 80 nm memberikan respon paling baik terhadap perubahan refraktif indeks gelatin sapi. Penelitian yang dilakukan oleh Shah & Sharma (2022), menyatakan bahwa ketebalan lapisan logam dalam rentang 40-120 nm berpotensi meningkatkan sensitivitas, sehingga ketebalan 80 nm masih berada dalam batas yang relevan dan logis secara teori. Dalam hal ini ketebalan 80 nm dipilih menjadi konfigurasi yang paling optimal dalam pengujian ini. Konfigurasi ini kemudian digunakan untuk pengujian selanjutnya.

4.3.3 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber optik berdasarkan Variasi Jenis Material Logam

Untuk menganalisis jenis material logam plasmonik dalam sensor SPR berbasis fiber optik, dilakukan simulasi pada masing-masing material yaitu perak (Ag), emas (Au) dan tembaga (Cu). Ketebalan material disimulasikan dengan ketebalan tetap sebesar 80 nm yang telah ditentukan sebagai konfigurasi optimal berdasarkan pengujian sebelumnya. Konsentrasi gelatin sapi digunakan mulai dari 0.40% hingga 2.00%, dengan konsentrasi 0.00% sebagai pembanding. Hal ini digunakan untuk melihat bagaimana respon sensor terhadap perubahan indeks bias gelatin, apakah ada perubahan pola dari konsentrasi terendah hingga tertinggi.

Gambar 4.5 merupakan representasi spektrum transmitansi sensor SPR berbasis fiber optik dengan material Ag, Au, dan Cu dan ketebalan lapisan logam 80 nm, terhadap variasi refraktif indeks gelatin. Simulasi ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan refraktif indeks kecil terhadap panjang gelombang resonansi (λ_{spr}). Pada spektrum terlihat bahwa semua kurva menunjukkan pola minimum tranmitansi yang jelas, mengindikasikan terjadinya resonansi plasmon permukaan. Puncak minimum (dip) mengalami pergeseran ke arah kanan (red-shift) seiring dengan peningkatan indeks bias yang menyebabkan kenaikan konstanta propagasi gelombang plasmon, sehingga resonansi terjadi pada panjang gelombang lebih besar. Hal ini sama dengan teori berdasarkan penjelasan ketebalan lapisan yang dijelaskan dalam literatur (Jassam et al., 2020) yang menyatakan posisi λ_{spr} tergantung pada parameter optik seperti karakteristik lapis logam dan indeks bias.

Teori tersebut terbukti pada Grafik 4.6 terlihat bahwa panjang gelombang resonansi meningkat seiring dengan bertambahnya refraktif indeks gelatin sapi, terjadi secara konsisten untuk ketiga logam. Peningkatan panjang gelombang ini merupakan fenomena “*red shift*”. Dalam grafik (a) terlihat bahwa logam Cu (tembaga) memiliki nilai panjang gelombang resonansi paling tinggi, diikuti oleh Au (Emas) dan Ag (Perak). Ini menunjukkan bahwa material logam yang digunakan mempengaruhi puncak resonansi. Grafik (b) menunjukkan hubungan antara refraktif indeks gelatin sapi dengan *Full-Widht Half-Maximum* (FWHM). Nilai FWHM menggambarkan lebar spektrum resonansi. Berdasarkan data grafik, Ag (Perak) memiliki FWHM terbesar yang menunjukkan resonansinya kurang tajam, Cu (Tembaga) memiliki FWHM paling kecil menunjukkan resonansinya lebih sempit dan selektif, Au (emas) berada diantara keduanya. Semakin sempit nilai FWHM, maka semakin tajam resonansi yang dihasilkan. Oleh karena itu, dari segi ketajaman resonansi, CU menunjukkan performa terbaik diantara ketiga logam.

Sensitivitas sensor tidak hanya sebatas panjang gelombang resonansi dan FWHM. Namun dilihat dari parameter perfoma sensor seperti Sensitivitas dan Figure of Merit (FoM). Sensitivitas mengukur seberapa sensitif sensor, dengan membandingkan antara $\Delta\lambda_{spr}$ dan Δn . Ini menunjukkan bahwa ketika pergeseran gelombang semakin besar ($\Delta\lambda_{spr}$ semakin tinggi) dengan Δn , maka sensitivitas sensor akan semakin baik ditunjukkan dengan nilai sensitivitas (S) tertinggi (Tazi, 2023). Pada grafik 4.7 merupakan grafik perbandingan antara sensitivitas dan Figure of Merit dengan refraktif indeks gelatin sapi. Grafik menunjukkan bahwa logam Ag (perak) secara konsisten memiliki nilai sensitivitas tertinggi.

Pada material Ag (perak) sensitivitas paling tinggi yaitu pada konsentrasi 0.80% dengan $n_a = 1.3339$ dimana nilai sensitivitas sebesar 4327.78 nm/RIU. Material Au dan Cu masing-masing memiliki sensitivitas sebesar 2675.56 nm/RIU dan 1585.56 nm/RIU pada konsentrasi 0.80% dan 2.00% dimana nilai refraktif indeksnya $n_a = 1.3339$ dan $n_a = 1.3364$. Namun, pada beberapa titik tertentu nilai sensitivitasnya adalah nol, hal ini sama dengan perhitungan sensitivitas dalam variasi ketebalan lapisan logam. Disebabkan pergeseran panjang gelombang resonansi yang dihasilkan pada konsentrasi pembanding (0%) dan sampel uji berada pada posisi yang sama, sehingga tidak terjadi pergeseran panjang gelombang resonansi ($\Delta\lambda_{spr} = 0$). Dari perbandingan sensitivitas dari ketiga material Ag memiliki performa yang paling baik diikuti Au kemudian Cu.

Figure of Merit (FoM) juga dianalisis, parameter penting dalam evaluasi performa sensor SPR, karena menggambarkan perbandingan antara Sensitivitas dan lebar puncak resonansi (FWHM). Dalam grafik logam Ag menjadi logam yang paling unggul dibandingkan dengan Au dan Cu. Ag dan Au memiliki nilai FoM dengan perbedaan yang sangat tipis masing-masing bernilai 6.29 RIU^{-1} dan 6.25 RIU^{-1} , sementara Cu memiliki nilai terendah sebesar 4.6 RIU^{-1} . Berdasarkan pada literatur oleh (Basak et al., 2020) (Pandey & Raghuwanshi, 2022), sensitivitas dianggap sebagai parameter krusial dalam menilai performa sensor, karena secara langsung menunjukkan seberapa besar pergeseran panjang gelombang resonansi SPR terhadap perubahan indeks bias. Sementara, FoM, akurasi deteksi dan faktor kualitas bersifat sebagai pendukung. FoM akan digunakan setelah sensitivitas mencapai tingkat yang diinginkan. Begitu juga

dengan faktor kualitas dan akurasi deteksi, yang membantu menilai seberapa tajam dan jelas kurva resonansi (Meng et al., 2017). Dengan mempertimbangkan nilai sensitivitas dan FoM secara menyeluruh, sensor dengan lapisan logam Ag dipilih menjadi jenis material yang optimal.

Analisis terkait hubungan pergeseran panjang gelombang SPR dengan refraktif indeks gelatin sapi dilakukan menggunakan regresi linear. Berdasarkan hasil grafik **4.8**, logam Ag menunjukkan tren penurunan sensitivitas seiring peningkatan refraktif indeks, yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linear $y = -759367x + 1 \times 10^6$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.9826$. Nilai R^2 yang tinggi menandakan model regresi linear mampu menjelaskan sebesar 98.26% variasi data, sehingga hubungan antara refraktif indeks dan sensitivitas pada logam Ag linear. Secara numerik, Sensitivitas Ag menurun dari sekitar 4000 nm/RIU ke sekitar 2200 nm/RIU saat refraktif indeks meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa Ag sangat responsif pada konsentrasi rendah. Dalam studi kasus yang dilakukan oleh (Feng et al., 2021), sensor SPR berbasis fiber optik dengan lapisan Ag-Cu menunjukkan Ag memiliki sensitivitas tinggi sebesar 3957 nm/RIU dalam rentang indeks bias 1.3328-1.3853, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.993. Hal ini mengindikasikan hubungan linear antara indeks bias dan sensitivitas. Logam Au memperlihatkan tren sensitivitas meningkat terhadap refraktif indeks dengan persamaan regresi $y = 958160x - 1 \times 10^6$ dan nilai $R^2 = 0.8681$. Peningkatan sensitivitas terlihat pada grafik terutama pada refraktif indeks nilai 1.3345 hingga pada refraktif indeks 1.3352. Logam Cu, tren yang muncul menunjukkan peningkatan sensitivitas, dengan persamaan regresi linear $y = 56730x - 756442$ dan nilai $R^2 = 0.8679$.

logam Cu menunjukkan nilai tren positif seperti Au, nilai sensitivitas Cu tetap berada di bawah Ag dan Au secara keseluruhan. Performa Cu secara umum dianggap masih kurang optimal jika dibandingkan dengan Ag dan Au. Penelitian terdahulu melaporkan bahwa Ag merupakan material yang paling sensitif (Chen & Lin, 2019);(Feng et al., 2021); (Tazi et al., 2024); (Riana, 2023). Ag (perak) memiliki nilai ohmic loss dan permitivitas imajiner yang rendah, sehingga menghasilkan redaman (damping) yang kecil pada gelombang plasmon permukaan (Riana, 2023). Hal ini menghasilkan puncak resonansi yang lebih tajam dan nilai FWHM lebih kecil, sehingga meningkatkan sensitivitas dalam mendeteksi setiap perubahan kecil indeks bias.

4.3.4 Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Panjang Zona sensing (Probe Sensing)

Pengujian panjang probe sensing dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa sensor SPR berbasis fiber optik. Variasi panjang zona sensing menentukan seberapa besar interaksi cahaya dan lapisan plasmonik dapat mempengaruhi posisi panjang gelombang resonansi serta sensitivitas sensor terhadap perubahan refraktif indeks. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan panjang gelombang sensing sebesar 100 μm , 200 μm , 300 μm dengan parameter tetap berupa lapisan logam Ag dengan ketebalan 80 nm dan nilai refraktif indeks gelatin sapi dalam rentang 1.333 hingga 1.3364.

Gambar 4.9 merupakan spektrum transmitansi panjang zona sensing. Gambar (a) merupakan spektrum transmitansi pada zona sensing 100 μm . kurva memperlihatkan transmitansi minimum (dip) yang jelas di sekitar panjang gelombang 589.163 sampai 597.005 nm, dan terjadi pergeseran ke kanan seiring

dengan meningkatnya indeks bias. Sementara pada gambar (b) dan (c) menunjukkan spektrum untuk zona sensing 200 μm dan 300 μm . terlihat bahwa dengan bertambahnya panjang zona sensing, kurva tranmitansi menjadi lebih landai dan perbedaan refraktif indeks sulit dibedakan secara visual.

Spektrum transmitansi kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh refraktif indeks dengan panjang gelombang resonansi dan FWHM. Grafik 4. 10 terlihat bahwa hanya pada panjang gelombang 100 μm terdapat nilai panjang gelombang resonansi (λ_{spr}) yang terdeteksi sehingga mengalami pergeseran secara konsisten terhadap peningkatan refraktif indeks gelatin sapi. panjang zona sensing 200 μm dan 300 μm tidak menimbulkan dip. Sehingga nilai panjang gelombang resonansi dan FWHM tidak terdeteksi (ditunjukkan dengan nilai nol pada grafik). Resonansi plasmon permukaan tidak dapat dibangkitkan secara optimal pada zona sensing terlalu panjang.

Sensitivitas tertinggi tercapai pada refraktif indeks 1.3339 dengan nilai sebesar 4327.78 nm/RIU pada konsentrasi 0.80%. sensitivitas pada panjang gelombang resonansi 200 μm dan 300 μm tidak dapat dideteksi karena tidak terbentuk puncak resonansi (dip). Kondisi ini mempengaruhi sensitivitas dan FoM sehingga bernilai nol yang ditunjukkan pada Grafik 4.11. Nilai FoM terdeteksi pada zona sensing 100 μm yang memperlihatkan tren yang sama dengan sensitivitas dimana nilai FoM paling tinggi muncul pada indeks 1.3339 dengan nilai mendekati $6.29RIU^{-1}$.

Panjang zona sensing 200 μm dan 300 μm tidak terjadi eksitasi resonansi yang cukup tajam sehingga performa parameter tidak terbaca. Hal ini sesuai

dengan teori (A. Liu et al., 2014) yang menyatakan panjang zona sensing terlalu panjang dapat menyebabkan pelemahan sinyal evanescent wave, sehingga eksitasi plasmon permukaan menjadi kurang efisien. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kehilangan energi (losses) sepanjang propagasi mengakibatkan penurunan intensitas sinyal. Dapat disimpulkan bahwa panjang zona sensing (probe sensing) dengan panjang sebesar 100 μm menunjukkan performa paling optimal yang didukung penelitian sebelumnya oleh (Riana, 2023).

4.3.5 Kajian Keislaman

Penelitian ini tidak hanya dikaji dari sisi fisika dan pengembangan teknologi sensor saja, tetapi juga didekatkan dengan nilai-nilai Islam. Setiap Muslim diperintahkan untuk mengonsumsi produk yang *halla* dan *thayyib*. Dasar yang digunakan untuk menunjukkan keharusan mengonsumsi makanan dan minuman, tumbuh-tumbuhan dan hewan yang *halla* dan *thayyib* tercantum dalam Q.S: al-Baqarah (2): (168&172), an-Nahl (16): 114, al-Maidah (5): (87&88), al-Anfal (8): 8 (Syarifah et al., 2024).

كُلُوا مِمَّا رَزَقَكُمُ اللَّهُ حَلَالًا طَيِّبًا ۚ وَاشْكُرُوا نِعْمَتَ اللَّهِ إِن كُنتُمْ إِيَّاهُ تَعْبُدُونَ

*“maka maknalah dari rezeki yang telah diberikan Allah kepada kalian yang *halla* lagi baik, dan bersyukurlah atas nikmat Allah, jika benar hanya kepada -Nya kamu menyembah”*

QS. An-Nahl (16): 114 memerintahkan hamba-Nya untuk mengonsumsi rezeki yang *halla* dan *thayyib*, serta disertai rasa Syukur dan nikmat. Dalam jurnal yang dilaporkan oleh (Mulyati et al., 2023) dijelaskan bahwa *halla* merujuk pada aspek hukum islam sementara *thayyib* menekankan pada aspek kualitas, kebersihan dan kemanfaatan bagi tubuh. Makanan *thayyib* berarti bersih dari Najis, tidak berbahaya, tidak membahayakan kesehatan dan

mengandung manfaat gizi yang baik. Hal ini juga sejalan dengan jurnal yang dilaporkan oleh (Syarifah et al., 2024) makanan yang halal dan *thayyib* berpengaruh pada perilaku dan kesehatan manusia. Sehingga pengembangan sensor SPR untuk deteksi gelatin sapi berperan penting dalam mendukung upaya menjaga prinsip hallalan dan *thayyiban*.

Ketebalan lapisan logam seperti emas, perak dan tembaga berpengaruh signifikan terhadap pergeseran panjang gelombang resonansi pada SPR. Semakin tepat pemilihan ketebalan, semakin tinggi sensitivitas yang dihasilkan oleh sensor. Hal ini menunjukkan bahwa keakuratan dalam perancangan struktur optik sangat penting untuk memperoleh hasil deteksi yang optimal. Fenomena ini sejalan dengan firman Allah SWT dalam QS. al-Mulk (67):3-4:

الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمُوتٍ طِبَاقًا مَّا تَرَىٰ فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِن تَفْوُتٍ ۚ فَارْجِعِ الْبَصَرَ هَلْ تَرَىٰ مِن فُطُورٍ ۚ ثُمَّ ارْجِعِ الْبَصَرَ كَرَّتَيْنِ يَنقَلِبْ إِلَيْكَ الْبَصَرُ خَاسِئًا وَهُوَ حَسِيرٌ

“Yang telah menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Kamu sekali-kali tidak melihat pada ciptaan Tuhan Yang Maha Pemurah sesuatu yang tidak seimbang. Maka lihatlah sekali lagi, adakah kamu lihat sesuatu yang tidak seimbang? Kemudian pandanglah sekali lagi, niscaya pandanganmu akan Kembali kepadamu dengan tidak memuaskan sesuatu cacat dan pandanganmu itu pun dalam keadaan payah”

QS. al-Mulk (67):3-4 ini mengisyaratkan adanya ketelitian dan keteraturan dalam sistem ciptaan Allah (Amrona et al., 2023). Seperti halnya langit yang berlapis-lapis tanpa cacat, begitu pula dalam bidang optik dan rekayasa material, ketebalan setiap lapisan harus diperhitungkan secara tepat. Melalui penelitian ini, manusia belajar dari keteraturan alam untuk menciptakan alat bantu deteksi yang presisi dan bermanfaat.

Pemanfaatan logam berperan penting dalam mendukung perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi modern. Dalam fisika, logam seperti perak (Ag), Emas (Au), dan tembaga (Cu) memiliki struktur kristal dan sifat konduktivitas optik serta listrik yang tinggi, sehingga dijadikan material utama dalam teknologi sensor optik seperti Surface Plasmon Resonance (SPR). Pemanfaatan logam dalam sensor SPR ini sejalan dengan firman Allah pada Q.S al-Hadid (57): 25 (Hastuti & Syarifah, 2024).

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ ۚ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنْفَعٌ لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ اللَّهُ مَنْ يَنْصُرُهُ وَرُسُلَهُ بِالْغَيْبِ ۚ إِنَّ اللَّهَ قَوِيٌّ عَزِيزٌ

“Sungguh, kami benar-benar telah mengutus rasul-rasul Kami dengan bukti-bukti yang nyata dan Kami menurunkan Bersama mereka kitabdan neraca (keadilan) agar manusia dapat berperilaku adil. Kami menurunkan besi yang mempunyai kekuatan hebat dan berbagai manfaat bagi manusia agar Allah mengetahui siapa yang menolong (agama)-Nya dan rasul-rasul-Nya walaupun (Allah) tidak dilihatnya. Sesungguhnya Allah Maha kaut lagi Maha Perkasa”.

Q.S al-Hadid (57): 25, Quraish Shihab menjelaskan bahwa besi mempunyai kekuatan yang dapat membahayakan dan dapat pula menguntungkan manusia. Dengan demikian, penggunaan logam dalam teknologi seperti SPR tidak hanya menunjukkan kemajuan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, juga merupakan wujud nyata ajaran Al-Qur'an yang mengajarkan agar manusia menggunakan ciptaan Allah dengan bijak dan memberikan manfaat bagi kehidupan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah, sebagai berikut:

1. Pengujian variasi ketebalan lapisan logam menunjukkan bahwa ketebalan lapisan logam secara signifikan mempengaruhi karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik. Hasil penelitian didapatkan resonansi paling tajam dan sensitivitas tertinggi diperoleh ketebalan 80 nm, khususnya pada material perak (Ag) dengan sensitivitas mencapai 4327.78 nm/RIU. Ketebalan tersebut menghasilkan respons optik yang paling optimal terhadap perubahan refraktif indeks gelatin sapi pada nilai $n_a = 1.3339$ konsentrasi 0.80%. Ketebalan 80 nm dipilih sebagai konfigurasi yang paling sensitif dan ideal untuk deteksi gelatin sapi pada penelitian ini
2. Pengujian terhadap variasi jenis material logam menunjukkan bahwa perak (Ag) memberikan performa terbaik dibandingkan emas (Au) dan tembaga (Cu) dalam konfigurasi sensor SPR berbasis fiber optik dengan ketebalan 80 nm. Hal ini ditunjukkan dari nilai sensitivitas tertinggi sebesar 4327.78 nm/RIU dan Figure of Merit (FoM) sebesar 6.29 RIU^{-1} yang diperoleh pada refraktif indeks $n_a = 1.3339$. Ag menunjukkan tren sensitivitas menurun pada konsentrasi tinggi, namun tetap menghasilkan respon paling sensitif dibandingkan Au dan Cu. Berdasarkan grafik regresi linear, logam Ag memiliki koefisien determinasi $R^2 = 0.9826$. Logam Ag dipilih sebagai jenis material yang paling optimal untuk mendeteksi gelatin sapi

3. Pengujian zona sensing (probe sensing) menunjukkan bahwa zona sensing 100 μm merupakan konfigurasi paling optimal untuk sensor SPR berbasis fiber optik. Pada panjang zona sensing ini, resonansi plasmon terbentuk secara jelas, yang ditunjukkan kemunculan puncak minimum (dip) dan terjadi pergeseran (λ_{spr}). Zona sensing 100 μm menghasilkan sensitivitas tertinggi sebesar 4327.78 nm/RIU dan FoM sebesar 6.29 RIU^{-1} pada refraktif indeks 1.3339. Pada zona 200 μm dan 300 μm tidak menunjukkan dip karena panjang zona sensing terlalu panjang dapat menyebabkan pelemahan sinyal evanescent wave, sehingga eksitasi plasmon permukaan menjadi kurang efisien

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar melakukan pengujian dengan variasi refraktif indeks yang lebih luas, serta penggunaan material plasmonik baru seperti graphene atau stuktur multilayer untuk meningkatkan sensitivitas dan stabilitas sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedinia, A., Mohammadi Nafchi, A., Sharifi, M., Ghalambor, P., Oladzadabbasabadi, N., Ariffin, F., & Huda, N. (2020). Poultry gelatin: Characteristics, developments, challenges, and future outlooks as a sustainable alternative for mammalian gelatin. *Trends in Food Science and Technology*, 104(July), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.001>
- Aftab, M., Mansha, M. S., Iqbal, T., & Farooq, M. (2024). Surface Plasmon Excitation : Theory , Configurations , and Applications. *Plasmonics*, 1701–1719. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-02095-2>
- Alipal, J., Mohd Pu'ad, N. A. S., Lee, T. C., Nayan, N. H. M., Sahari, N., Basri, H., Idris, M. I., & Abdullah, H. Z. (2019). A review of gelatin: Properties, sources, process, applications, and commercialisation. *Materials Today: Proceedings*, 42, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.922>
- Amanu, A. A. (2016). Macro Bending Losses in Single Mode Step Index Fiber. *International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering (IJSTRE) Wwww.Ijstre.Com*, 1(December), 45432600. www.ijstre.com
- Amrona, Y. L., Nurhuda, A., Sinta, D., Putri, A., & Assajad, A. (2023). Kajian Tentang Kosmologi dan Implikasi Dasar Terhadap Pendidikan Islam (Studi Q.S Al-Mulk [67]: 3-4 dan Q.S Al-Furqon [25]: 2). *Jurnal Aktualisasi Pendidikan Islam*, 19(2), 92–101. <http://journal.stitalhilalsigli.ac.id/index.php/azkia%0AKAJIAN>
- Aris, S. E., Jumiono, A., & Akil, S. (2020). Identifikasi Titik Kritis Kehalalan Gelatin. *Jurnal Pangan Halal*, 2(1), 17–22.
- Aykin-Dinçer, E., Koç, A., & Erbas, M. (2017). Extraction and physicochemical characterization of broiler (*Gallus gallus domesticus*) skin gelatin compared to commercial bovine gelatin. *Poultry Science*, 96(11), 4124–4131. <https://doi.org/10.3382/ps/pex237>
- Basak, C., Hosain, M. K., & Sazzad, A. A. (2020). Design and Simulation of a High Sensitive Surface Plasmon Resonance Biosensor for Detection of Biomolecules. *Sensing and Imaging*, 21(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11220-019-0267-6>
- Cebi, N., Durak, M. Z., Toker, O. S., Sagdic, O., & Arici, M. (2016). An evaluation of Fourier transforms infrared spectroscopy method for the classification and discrimination of bovine , porcine and fish gelatins. *FOOD CHEMISTRY*, 190, 1109–1115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.065>
- Chen, S., & Lin, C. (2019). *Sensitivity comparison of graphene based surface plasmon resonance biosensor with Au, Ag and Cu in the visible region*. 0–6. <https://doi.org/Chengyou>

- Chew, W. C. (2022). Lectures on electromagnetic field theory. *Electromagnetic Field Theory*, 497.
- Clark, S. (2018). *Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on High-Index Dielectric Metal-Insulator-Metal Structures Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on High-Index*. <https://cedar.wvu.edu/wwuet/804/>
- Curran, M., & Shirk, B. (2015). Basics of Fiber Optics. *Amphenol Fiber Systems International*, 1, 1–13.
- Devy, P. W., Muhammad, A., & Kamsul, A. (2019). The revised method of quantitative detection of animal-origin bovine and porcine gelatin difference using surface plasmon resonance based biosensor. *Materials Science Forum*, 948 MSF, 146–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.948.146>
- Didik, L. A., Safarwadi, I., & Muslimah, M. (2021). Pengukuran Indeks Bias Larutan untuk Mengetahui Kadar Gula dalam Tebu dengan Menggunakan Metode Difraksi Fraunhofer Celah Tunggal. *Konstan - Jurnal Fisika Dan Pendidikan Fisika*, 6(1), 35–42. <https://doi.org/10.20414/konstan.v6i1.68>
- Divya, J., Selvendran, S., Raja, A. S., & Sivasubramanian, A. (2022). Surface plasmon based plasmonic sensors: A review on their past, present and future. *Biosensors and Bioelectronics*: X, 11(May), 100175. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100175>
- Fatimah, S., Sarto, S., Fahrurrozi, M., & Budhijanto, B. (2023). Characterization and Development of Gelatin from Cow Bones: Investigation of the Effect of Solvents Used for Soaking Beef Bones. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031550>
- Feng, Y., Li, H., Li, S., Liu, Y., & Meng, X. (2021). *A High-Sensitivity SPR Refractive Index Sensor Based on*.
- Fitri, U. R., Nisa, S. K., Zetra, M. F., Ziveria, M., & Muhara, I. (2023). Measuring the refractive index of sugar solution through the stage of science process skills. *Journal of Physics: Conference Series*, 2596(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2596/1/012075>
- Garcia Londoño, V. A., Marín González, N., Roa-Acosta, D. F., Agudelo Laverde, L. M., Botero, L., & Lellesch, L. M. (2022). Characterization of By-Products With High Fat Content Derived From the Production of Bovine Gelatin. *F1000Research*, 11, 1575. <https://doi.org/10.12688/f1000research.128622.1>
- Gupta, B. D., Shrivastav, A. M., & Usha, S. P. (2016). *Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic*. <https://doi.org/10.3390/s16091381>
- Hafida, N. H., & Rubiyanto, A. (2018). Analisis Sensor Pengukuran Konsentrasi Glukosa Prinsip Macro bending pada Serat Optik Multimode Step-Index.

- Hanif, I., & Arnaldy, D. (2017). Analisis Penyambungan Kabel Fiber Optik Akses dengan Kabel Fiber Optik Backbone pada Indosat Area Jabodetabek. *Multinetics*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.32722/vol3.no2.2017.pp12-17>
- Hariyadi. (2018). Sistem Komunikasi Fiber Optik Dan Pemanfaatannya Pada PT.Semen Padang. *Vol. I No.1 Januari 2018*, I(1), 43–51.
- Hastuti, E., & Syarifah, U. (2024). *Pendahuluan Fisika Zat Padat Kajian Integrasi Islam dan Sains*.
- Huang, Y., Wang, Y., Xu, G., Rao, X., Zhang, J., Wu, X., Liao, C., & Wang, Y. (2022). Compact Surface Plasmon Resonance IgG Sensor Based on H-Shaped Optical Fiber. 1–11.
- jannat, B., Ghorbani, K., Kouchaki, S., Sadeghi, N., Eslamifarsani, E., Rabbani, F., & Beyramysoltan, S. (2020). Distinguishing tissue origin of bovine gelatin in processed products using LC/MS technique in combination with chemometrics tools. *Food Chemistry*, 319(January). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126302>
- Jassam, G. M., Al-Bassam, S. S., & Sultan, M. F. (2020). Fabrication of a chemical sensor based on surface plasmon resonance via plastic optical fiber. *Iraqi Journal of Science*, 61(4), 765–771. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2020.61.4.8>
- Kuan, Y. H., Nafchi, A. M., Huda, N., Ariffin, F., & Karim, A. A. (2016). Effects of sugars on the gelation kinetics and texture of duck feet gelatin. *Food Hydrocolloids*, 58, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.025>
- Li, Y. F., & Ling, J. (2019). 2 *Electromagnetic wave and light scattering theory*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/9783110573138-002>
- Liang, G., Luo, Z., Liu, K., Wang, Y., & Dai, J. (2015). Fiber-optic surface plasmon resonance based biosensor technique: Fabrication , advancement and application. 8347(February 2016). <https://doi.org/10.1080/10408347.2015.1045119>
- Liu, A., Peng, J., & Li, G. (2014). Characterizing penetration depths of multi-wavelength surface plasmon resonance sensor using silica beads. *Applied Physics Letters*, 104(21). <https://doi.org/10.1063/1.4879830>
- Liu, Y., & Peng, W. (2021). Fiber-Optic Surface Plasmon Resonance Sensors and Biochemical Applications: A Review. *Journal of Lightwave Technology*, 39(12), 3781–3791. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3045068>
- Maghfursyah, D. (2019). *The Effect Of Gelatin And Gum Arabic Addition On*

Physical, Chemical and Sensory Characteristics Of Wuluh Star Fruit (Averrhoa bilimbi L.) Sheet-jam.

- Mauludi, L. D., Yantidewi, M., & Firdaus, R. A. (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*. 7(7), 2328–2336. <https://doi.org/10.56338/jks.v7i7.5545>
- 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. *Micron*, 151, 103160. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103160>
- Meng, Q. Q., Zhao, X., Lin, C. Y., Chen, S. J., Ding, Y. C., & Chen, Z. Y. (2017). Figure of merit enhancement of a surface plasmon resonance sensor using a low-refractive-index porous silica film. *Sensors (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/s17081846>
- Michel, D., Xiao, F., & Alameh, K. (2017). A compact, flexible fiber-optic Surface Plasmon Resonance sensor with changeable sensor chips. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 246, 258–261. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.02.064>
- Mikhailov, O. V. (2023). Gelatin as It Is: History and Modernity. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4). <https://doi.org/10.3390/ijms24043583>
- Miyazaki, C. M., Shimizu, F. M., & Ferreira, M. (2017). Surface Plasmon Resonance (SPR) for Sensors and Biosensors. In *Nanocharacterization Techniques*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00006-0>
- Moznuzzaman, M., Islam, M. R., & Khan, I. (2021). Effect of layer thickness variation on sensitivity: An SPR based sensor for formalin detection. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 32(April), 100419. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100419>
- Mulyati, S., Abubakar, A., & Hadade, H. (2023). *Makanan Halal dan Tayyib dalam Perspektif Al-Quran*. 1(1), 23–33.
- Noor, N. Q. I. M., Razali, R. S., Ismail, N. K., Ramli, R. A., Razali, U. H. M., Bahauddin, A.R. Zaharudin, N., Rozzamri, A., Bakar, J., Shaarani, & S.M. (2021). *Application of Green Technology in Gelatin Extraction* : <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr9122227>
- Nur Hanani, Z. A., Roos, Y. H., & Kerry, J. P. (2014). Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 71, 94–102.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.04.027>

- Pandey, P. S., & Raghuwanshi, S. K. (2022). Sensitivity Enhancement of Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensor Assisted by BlueP/MoS₂ Based Composite Heterostructure. *IEEE Access*, 10, 116152–116159. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3219439>
- Parapat, A. B. H., Aryza, S., & Tarigan, A. D. (2024). *An Effect Of Pressure Bending In Single Mode Optic Fiber On Light Intensity Attenuation*. 13(04), 1660–1668. <https://www.fibersystems.com/pdf/whitepapers/Basics-of-Fiber-Optics.pdf>
- Rather, J. A., Akhter, N., Showkat, Q., Mir, S. A., Makroo, A., Majid, D., Barba, F. J., Mousavi, A., Dar, N., & Val, D. (2022). A comprehensive review on gelatin: Understanding impact of the sources, extraction methods, and modifications on potential packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 34(September), 100945. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100945>
- Rauf, A., Hamzah, N., & Uliyanti. (2017). Ekstraksi dan Pembuatan Gelatin dari Kulit dan Tulang Rawan Sapi dalam Penggunaannya sebagai Bahan Dasar Pembuat Gel (Gelling Agent). *Jurnal Farmasi UIN Alauddin Makassar*, 8(2), 29–38.
- Riana, D. (2023). *Optimasi Desain Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode Beda Hingga Domain Waktu (FDTD) Untuk Mengukur Konsentrasi Glukosa Dalam Urine*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Rifat, A. A., Mahdiraji, G. A., Ahmed, R., Chow, D. M., Sua, Y. M., Shee, Y. G., & Adikan, F. R. M. (2016). Copper-graphene-based photonic crystal fiber plasmonic biosensor. *IEEE Photonics Journal*, 8(1). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2510632>
- Said, M. I. (2020). Role and function of gelatin in the development of the food and non-food industry: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 492(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012086>
- Samatra, M. Y., Noor, N. Q. I. M., Razali, U. H. M., Bakar, J., & Shaarani, S. (2022). Comp Rev Food Sci Food Safe - 2022 - Samatra - Bovidae-based gelatin Extractions method physicochemical and functional. *COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY*. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12967>
- Sari, A. M., Dewi, U. M., & Setiawan, T. (2023). Measurement Of Refractive Index Of Water In Coastal Area Using He-Ne Laser And Hollow Prism. *Jurnal Inovasi Pendidikan Dan Sains*, 4(2), 108–112. <https://doi.org/10.51673/jips.v4i2.1618>

- Sarkar, T. K., N.Abdallah, M., Salazar-Palma, M., & M.Dyab, W. (2017). *Surface Plasmons-Polaritons, Surface Waves, and Zenneck Waves: Clarification of the terms and a description of the concepts and their evolution*. June, 77–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/MAP.2017.2686079>
- Sasmitaloka, K. S., Miskiyah, M., & Juniawati, J. (2017). Kajian Potensi Kulit Sapi sebagai Bahan Dasar Produksi Gelatin Halal. *Buletin Peternakan*, 41(3), 328. <https://doi.org/10.21059/buletinpeternak.v41i3.17872>
- Sekido, H., & Umeda, T. (2024). A novel high accuracy finite - difference time - domain method. *Earth, Planets and Space*, 0. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01934-0>
- Seniar, N. M., & Bagus Widhi Dharma, S. (2020). *Penyuluhan Bahaya Radiasi Gelombang Elektromagnetik Pada Organ Tubuh Mahluk Hidup Di Kelurahan Pagutan Barat Mataram*. 2, 2–3.
- Settnes, M., Power, S. R., & Lin, J. (2016). Graphene Optics: Electromagnetic Solution of Canonical Problems. *Graphene Optics*. <https://doi.org/10.1088/978-1-6817-4309-7ch1>
- Shabrina, N. H. (2017). *Literature Review : Metode Komputasi Numerik untuk Analisis Gelombang Elektromagnetik*. IX(2), 1–5.
- Shah, K., & Sharma, N. K. (2022). Theoretical study on fiber optic SPR sensor using indium nitride. *Indian Journal of Physics*, 96(1), 275–279. <https://doi.org/10.1007/s12648-020-01960-8>
- Siburian, W. Z., Rochima, E., Andriani, Y., & Praseptiangga, D. (2020). Fish gelatin (definition, manufacture, analysis of quality characteristics, and application): A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8(4), 90–95.
- Siregar, R. E. (2016). *Rambatan Gelombang Optik dalam Medium Berlapis*. UNPADPRESS.
- Sofi, A. A., Amit, S., & Sujatha, B. K. (2021). 3D-FDTD Analysis of Fractal Antenna using PML Boundary Conditions. *Global Transitions Proceedings*, 0–11. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.029>
- Sugita, P., Rifai, M., Ambarsari, L., Rahayu, D. U. C., & Dianhar, H. (2021). Gelatin Extraction and Characterization from Femur Bones of Bovine and Porcine with Acid Process. *Jurnal Jamu Indonesia*, 6(1), 32–41. <https://doi.org/10.29244/jji.v6i1.188>
- Syarifah, U., Holil, K., Resmisari, R. S., Rahmah, A., & Griana, T. P. (2024). *The Concept of Thayyib in A Review of the Quran and Science: Consumer Selection Over Quality Food*. 8(2), 88–95.

<https://doi.org/10.29240/alquds.v8i1.7841>

- Tazi, I. (2023). *Sensor Modern Dan Aplikasinya*. Literasi Nusantara Abadi.
- Tazi, I., Riana, D., Syahadi, M., Muthmainnah, Sasmitaninghidayah, W., Aprilia, L., & Tresna, W. P. (2024). Performance evaluation of single-mode fiber optic-based surface plasmon resonance sensor on material and geometrical parameters. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 14(5), 5072–5082. <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i5.pp5072-5082>
- Urbancova, P., Goraus, M., Pudis, D., Hlubina, P., Kuzma, A., Jandura, D., Durisova, J., & Micek, P. (2020). 2D polymer/metal structures for surface plasmon resonance. *Applied Surface Science*, 530(February), 147279. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147279>
- Wang, Z. L. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, 68, 104272. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104272>
- Wardani, D. P., Arifin, M., Suharyadi, E., & Abraha, K. (2015). Quantitative detection of bovine and porcine gelatin difference using surface plasmon resonance based biosensor. *Optical Sensors 2015*, 9506(2012), 95060W. <https://doi.org/10.1117/12.2086259>
- Yesudasu, V., Shekhar, H., & Jasvanthbhai, R. (2021). Heliyon Recent progress in surface plasmon resonance based sensors : A comprehensive review. *HLY*, 7(3), e06321. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06321>
- Yin, J., Ma, W., Gao, Z., Lei, X., & Jia, C. (2022). A Review of Electromagnetic Shielding Fabric, Wave-Absorbing Fabric and Wave-Transparent Fabric. *Polymers*, 14(377). <https://doi.org/10.3390/polym14030377>
- Yudistira, H. T., Dipojono, H. K., & Suksmono, A. B. (2017). (FDTD) Dalam Simulasi Phased Array Antenna. *Journal of Science and Applicative Technology*, 19–24.
- Zainuddin, N. A. M., Ariannejad, M. M., Arasu, P. T., Harun, S. W., & Zakaria, R. (2019). Investigation of cladding thicknesses on silver SPR based side-polished optical fiber refractive-index sensor. *Results in Physics*, 13(February), 102255. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102255>
- Zhang, M., Zhu, G., Li, T., Lou, X., & Zhu, L. (2020). A dual-channel optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for heavy metal ions detection in contaminated water. *Optics Communications*, 462. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124750>
- 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(April), 111449.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111449>

LAMPIRAN

Lampiran 1

DOKUMENTASI PENELITIAN

1. Menimbang Gelatin dan Aquades

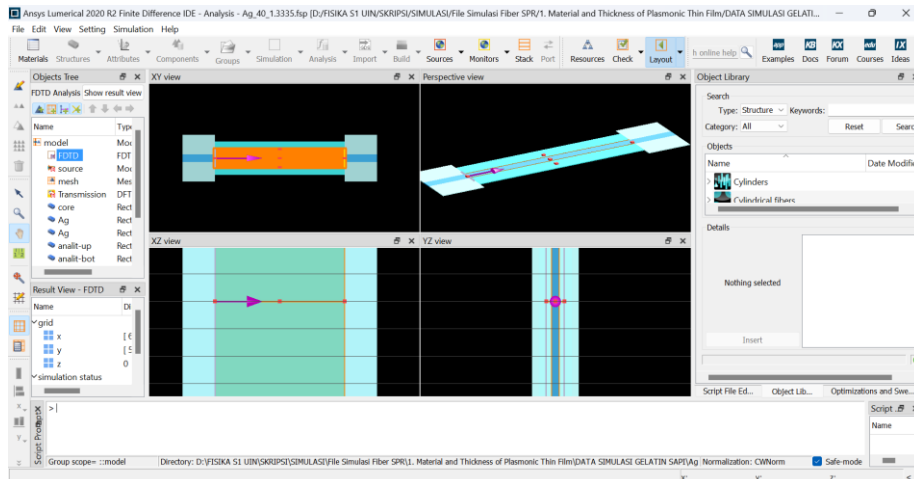


2. Mengukur Refraktif Indeks Gelatin Sapi

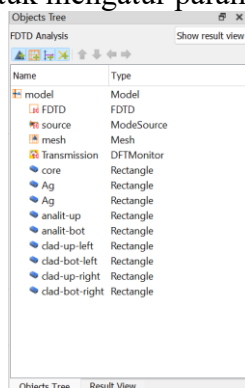


3. Simulasi Menggunakan Ansys Lumerical FDTD

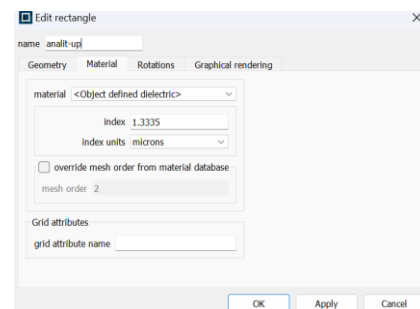
- Desain Sensor



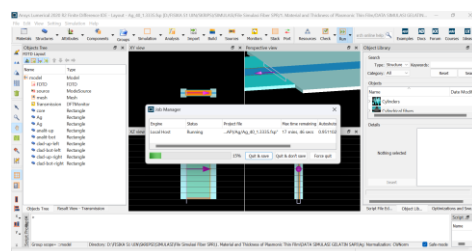
- Menu untuk mengatur parameter simulasi



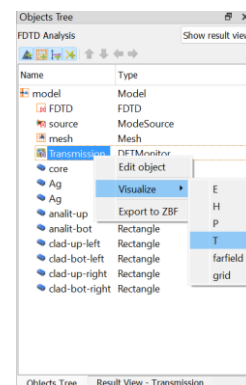
Object Tree : beberapa menu untuk mengatur simulasi misalnya jenis material, nilai analit, dan geometrinya termasuk panjang zona sensing



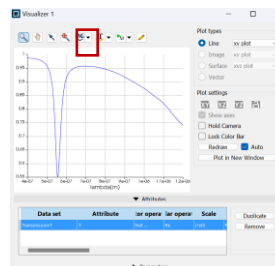
Refraktif Indeks gelatin disimulasikan, diinputkan pada menu analit-up dan analit bot



Proses Run

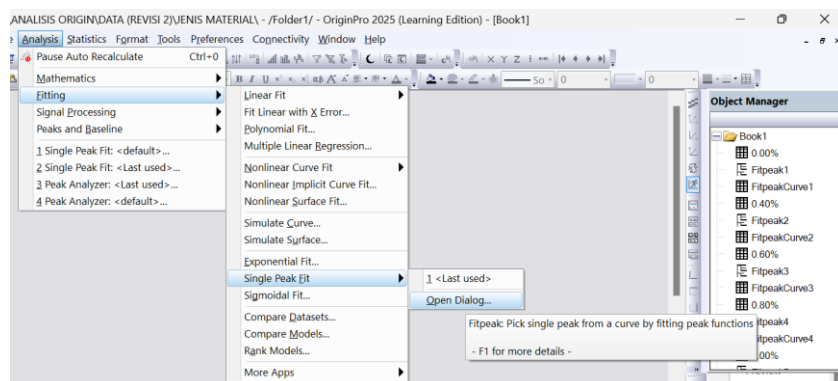
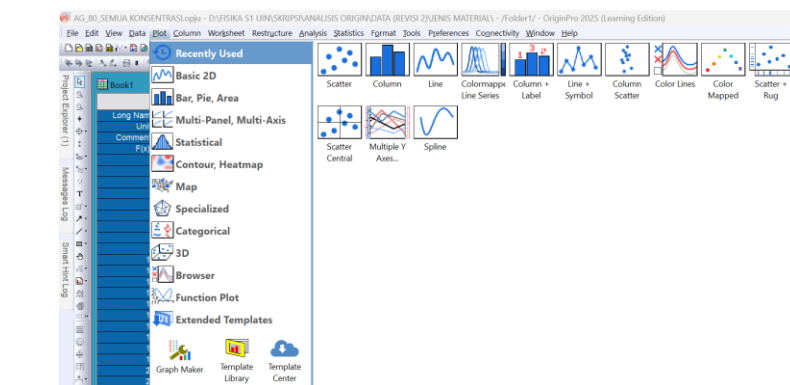
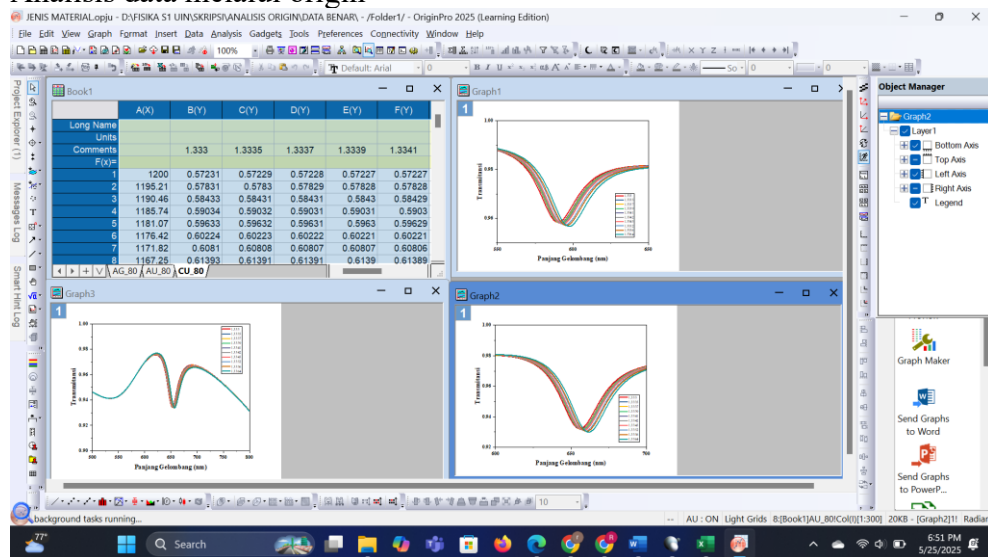


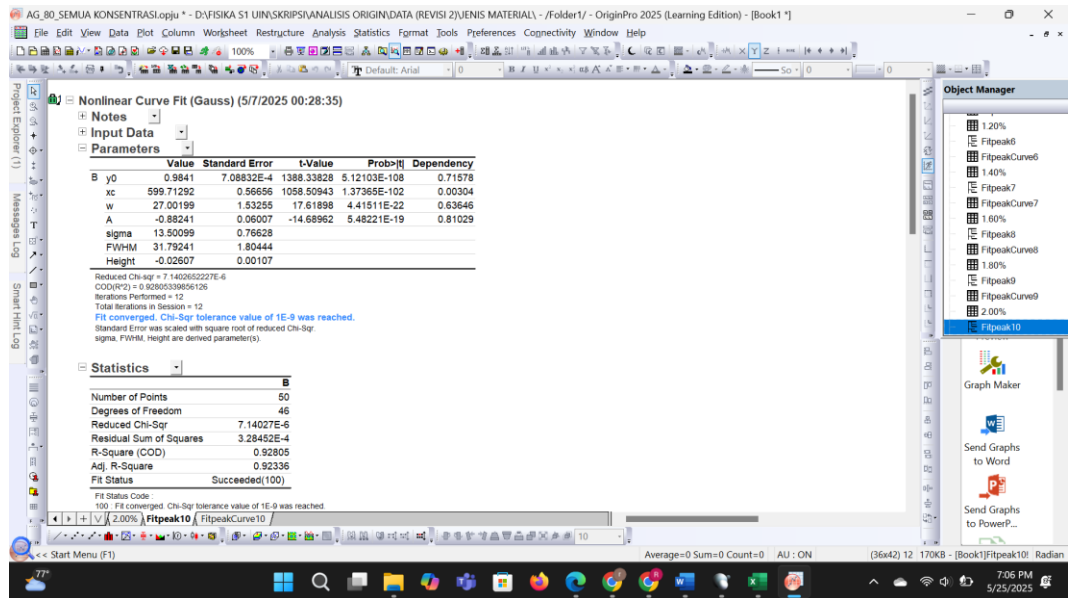
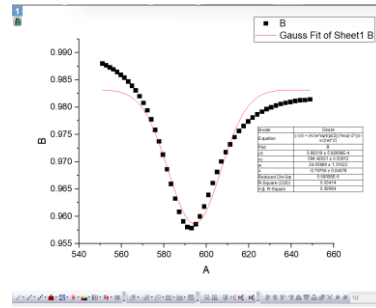
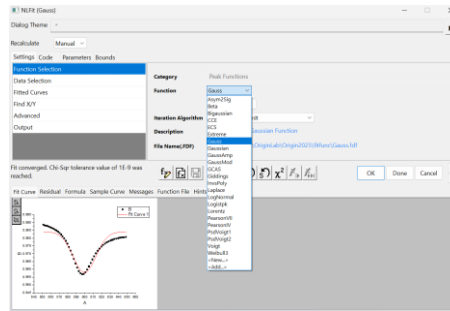
Hasil Simulasi divisualisasikan pada monitor Transmittansi



Spektrum transmitansi yang mengandung dip, data di ekspor dalam bentuk txt

4. Analisis data melalui origin





Lampiran 2

PENGOLAHAN DAN PERHITUNGAN DATA

1. Data nilai puncak gelombang resonansi, transmitansi minimum dan FWHM konsentrasi 0.80%

Jenis Material	Ketebalan (nm)	λ_{SPR}	T_{min}	FWHM
Ag (Perak)	20	434.909	0.562996	36.80003
	40	556.279	0.549664	40.8228
	60	585.318	0.844702	34.41787
	80	593.058	0.958034	28.84964
	100	593.058	0.984176	23.06519
Au (emas)	20	526.649	0.654591	30.91972
	40	619.689	0.441837	44.19176
	60	648.825	0.779717	36.65489
	80	658.349	0.931522	2.408
	100	658.349	0.972326	32.61658
Cu (tembaga)	20	0	0	0
	40	621.012	0.521668	37.24943
	60	644.165	0.824929	32.38665
	80	654.426	0.934322	22.73002
	100	655.941	0.972594	13.61314

2. Nilai sensitivitas, deteksi akurasi, faktor kualitas, dan figure of merit gelatin sapi konsentrasi 0.80%

Jenis Material	Ketebalan (nm)	Sensitivitas (nm/RIU)	Deteksi Akurasi	Faktor Kualitas	Figure of Merit
Ag (perak)	20	0	0	0	0
	40	1910	0.042108822	46.78757949	21.0701314
	60	2114.444444	0.055291045	61.43449448	9.540654123
	80	4327.777778	0.13501035	150.0115002	6.295382619
	100	0	0	0	0
Au (Emas)	20	1027.777778	0.029916183	33.24020327	11.46561654
	40	2370	0.048266917	53.62990748	29.87352503
	60	0	0	0	0
	80	2675.555556	0.082312207	91.45800815	6.254385198
	100	0	0	0	0
Cu (Tembaga)	20	0	0	0	0
	40	1785.555556	0.0431416	47.93511083	22.87918305
	60	0	0	0	0
	80	1585.555556	0.062780411	69.75601234	4.60717236
	100	2654.444444	0.175492208	194.9913425	5.407502681

3. Data nilai puncak gelombang resonansi, transmitansi minimum dan FWHM gelatin sapi ketebalan 80nm semua konsentrasi

Jenis Material	Refraktif Indeks	λ_{SPR}	T_{min}	FWHM
Ag (Perak)	1.333	589.163	0.958476	28.09399
	1.3335	591.104	0.958144	28.49862
	1.3337	591.104	0.958072	28.67103
	1.3339	593.058	0.958034	28.84964

	1.3341	593.058	0.957855	29.03374
	1.3342	593.058	0.957781	29.12904
	1.3345	593.058	0.957617	29.42435
	1.3352	595.025	0.957308	30.18625
	1.3356	595.025	0.957146	30.67379
	1.3364	597.005	0.956738	31.79241
Au (Emas)	1.333	655.941	0.931917	29.13797
	1.3335	655.941	0.931694	29.20162
	1.3337	655.941	0.931677	29.22781
	1.3339	658.349	0.931522	29.25447
	1.3341	658.349	0.931294	29.28184
	1.3342	658.349	0.931195	29.29566
	1.3345	658.349	0.930959	29.33707
	1.3352	660.773	0.930764	29.43969
	1.3356	660.773	0.930294	29.50029
	1.3364	660.773	0.929882	29.62815
Cu (Tembaga)	1.333	652.999	0.934417	22.21869
	1.3335	652.999	0.934292	22.49236
	1.3337	652.999	0.934306	22.60855
	1.3339	654.426	0.934322	22.73002
	1.3341	654.426	0.934208	22.85528
	1.3342	654.426	0.934164	22.92044
	1.3345	654.426	0.934089	23.12141
	1.3352	655.86	0.934011	23.64013

1.3356	655.86	0.933901	23.9713
1.3364	657.3	0.93379	24.72346

4. Data nilai sensitivitas, deteksi akurasi, faktor kualitas, dan figure of merit gelatin sapi ketebalan 80nm semua konsentrasi

Jenis Material	Sensitivitas	Akurasi Deteksi	Faktor Kualitas	Figure Of Merit
Ag (perak)	3882	0.068108561	136.2171221	5.701503862
	2772.857143	0.067698998	96.71285415	4.054976549
	4327.777778	0.13501035	150.0115002	6.295382619
	3540.909091	0.134154263	121.9584212	5.13993766
	3245.833333	0.133715358	111.4294647	4.704440569
	2596.666667	0.132373357	88.24890496	3.740253339
	2664.545455	0.194194377	88.27017117	3.768430148
	2254.615385	0.191107783	73.50299342	3.14989728
	2306.470588	0.246662647	72.54783731	3.138564538
Au (Emas)	0	0	0	0
	0	0	0	0
	2675.555556	0.082312207	91.45800815	6.254385198
	2189.090909	0.082235269	74.75933579	5.136414925
	2006.666667	0.082196476	68.49706293	4.712940415
	1605.333333	0.082080453	54.72030211	3.777944378
	2196.363636	0.164132163	74.60552867	5.165388383
	1858.461538	0.163795	62.99807692	4.39134395

	1421.176471	0.163088144	47.96710124	3.363357205
	0	0	0	0
	0	0	0	0
	1585.555556	0.062780411	69.75601234	4.60717236
	1297.272727	0.062436339	56.76030778	3.73437417
Cu (tembaga)	1189.166667	0.06225884	51.88236642	3.415727476
	951.3333333	0.061717689	41.14512624	2.711916416
	1300.454545	0.121023023	55.01046506	3.630085579
	1100.384615	0.119351057	45.90425281	3.034225206
	1265	0.173964324	51.16597758	3.387699375

5. Data nilai puncak gelombang resonansi, transmitansi minimum dan FWHM gelatin sapi panjang zona sensing 100 μm , 200 μm , 300 μm

Panjang Zona Sensing (μm)	Refraktif Indeks	λ_{spr}	Tmin	FWHM
100	1.333	589.163	0.958476	28.09399
	1.3335	591.104	0.958144	28.49862
	1.3337	591.104	0.958072	28.67103
	1.3339	593.058	0.958034	28.84964
	1.3341	593.058	0.957855	29.03374
	1.3342	593.058	0.957781	29.12904
	1.3345	593.058	0.957617	29.42435
	1.3352	595.025	0.957308	30.18625
	1.3356	595.025	0.957146	30.67379

	1.3364	597.005	0.956738	31.79241
200	1.333	0	0	0
	1.3335	0	0	0
	1.3337	0	0	0
	1.3339	0	0	0
	1.3341	0	0	0
	1.3342	0	0	0
	1.3345	0	0	0
	1.3352	0	0	0
	1.3356	0	0	0
	1.3364	0	0	0
300	1.333	0	0	0
	1.3335	0	0	0
	1.3337	0	0	0
	1.3339	0	0	0
	1.3341	0	0	0
	1.3342	0	0	0
	1.3345	0	0	0
	1.3352	0	0	0
	1.3356	0	0	0
	1.3364	0	0	0

6. Data nilai sensitivitas, deteksi akurasi, faktor kualitas, dan figure of merit gelatin sapi panjang zona sensing 100 μ m, 200 μ m, 300 μ m

Panjang Zona Sensing (μ m)	Refraktif Indeks	Sensitivitas	Deteksi Akurasi	Faktor Kualitas	Figure of Merit
100	1.333				
	1.3335	3882	0.068108561	136.2171221	5.701503862
	1.3337	2772.857143	0.067698998	96.71285415	4.054976549
	1.3339	4327.777778	0.13501035	150.0115002	6.295382619
	1.3341	3540.909091	0.134154263	121.9584212	5.13993766
	1.3342	3245.833333	0.133715358	111.4294647	4.704440569
	1.3345	2596.666667	0.132373357	88.24890496	3.740253339
	1.3352	2664.545455	0.194194377	88.27017117	3.768430148
	1.3356	2254.615385	0.191107783	73.50299342	3.14989728
	1.3364	2306.470588	0.246662647	72.54783731	3.138564538
200	1.333				
	1.3335	0	0	0	0
	1.3337	0	0	0	0
	1.3339	0	0	0	0
	1.3341	0	0	0	0
	1.3342	0	0	0	0
	1.3345	0	0	0	0
	1.3352	0	0	0	0
	1.3356	0	0	0	0
	1.3364	0	0	0	0

300	1.333				
	1.3335	0	0	0	0
	1.3337	0	0	0	0
	1.3339	0	0	0	0
	1.3341	0	0	0	0
	1.3342	0	0	0	0
	1.3345	0	0	0	0
	1.3352	0	0	0	0
	1.3356	0	0	0	0
	1.3364	0	0	0	0



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 : 210604110073
Nama : RENITA ELOK PEBRIYANTI
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si
Dosen Pembimbing 2 : Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : DETEKSI GELATIN SAPI DENGAN SENSOR SURFACE PLASMON RESONANCE (SPR) BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN (FDTD)

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	05 September 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Konsultasi Judul	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
2	19 September 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB 1 Pendahuluan	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
3	18 Oktober 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB 2 tinjauan pustaka	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
4	28 November 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	BAB 3 METODE PENELITIAN	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
5	12 Desember 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	REVISI BAB 3 METODE PENELITIAN	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
6	16 Januari 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	KONSULTASI SEMINAR PROPOSAL	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
7	06 Maret 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	KONSULTASI REVISI BAB 123 SETELAH SEMINAR PROPOSAL	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
8	14 Maret 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Bimbingan integrasi Al-Qur'an bab 1 dan bab 2	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9	05 Mei 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	PROGRES BAB 4	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
10	19 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Bimbingan integrasi Al-Qur'an bab 4	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
11	20 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	BIMBINGAN REVISI INTEGRASI BAB 1,2,4	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
12	26 Mei 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	PROGRES BAB 4 DAN BAB 5	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
13	26 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Bimbingan bab 1 2 4	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA

Malang, 24 Juni 2025
Dosen Pembimbing 1

WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si

