

JADWAL SEMINAR PROPOSAL TESIS PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO SEMESTER GASAL 2024/2025 (PERIODE II)

Pelaksanaan : *Online di Ruang Zoom*

No	Hari/Tanggal	Waktu	NIM & NAMA	JUDUL PROPOSAL TESIS	PEMBIMBING/PENGUJI	Ruangan
1.	Rabu, 08 Januari 2025	10.00 – 11.00	162012300001 / Muhammad Nugrah Kusumah	PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS <i>CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR</i> DAN <i>ELECTRIC FIELD COUPLED</i> UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT	Pembimbing : ➤ Syah Alam, S.Pd, MT, PhD / Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU Penguji ➤ Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT ➤ Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMct6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
2.	Rabu, 08 Januari 2025	11.00 – 12.00	162012300008/ Fitri Kurnia Sari	PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO <i>PORT</i> TUNGGAL DENGAN KOMBINASI RESONATOR <i>ELECTRIC FIELD COUPLED</i> (ELC) DAN <i>INTERDIGITAL CAPACITOR</i> (IDC) UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT	Pembimbing: ➤ Syah Alam, S.Pd, MT, PhD / Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU Penguji ➤ Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT ➤ Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMct6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
3.	Rabu, 08 Januari 2025	13.00 – 14.00	162012300003/ Angga Septian	ANALISA SISTEM MANAJEMEN ENERGI (SME) DENGAN METODE TEKNO EKONOMI PADA GEDUNG PEMERINTAH DAERAH KHUSUS IBUKOTA (DKI) JAKARTA	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. Chairul Gagarin Irianto, MS / Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT Penguji ➤ Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU ➤ Dr. Ir. R Deiny Mardian, ST, MT	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMct6bzhqSS9PTEJab3NDUT09

4.	Rabu, 08 Januari 2025	14.00 – 15.00	162012300007 / Harly	MANAJEMEN ENERGI PADA PENERANGAN JALAN UMUM DENGAN MENGGUNAKAN METODA PENCAHAYAAN ADAPTIF	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. Chairul Gagarin Irianto, MS / Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT Penguji ➤ Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU ➤ Dr. Ir. R Deiny Mardian, ST, MT	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCt6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
5.	Rabu, 08 Januari 2025	15.30 – 16.30	162012300006 / Agung Setiaji	EVALUASI PERFORMANSI <i>FIXED WIRELESS ACCESS</i> (FWA) DI SISI PELANGGAN DALAM KONDISI KONFIGURASI TEKNOLOGI <i>MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT</i> (MIMO) PADA <i>BASE TRANSCIEVER STATION</i> (BTS) YANG BERAGAM	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. R Deiny Mardian, ST, MT / Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT Penguji ➤ Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU ➤ Syah Alam, S.Pd, MT, PhD	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCt6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
6.	Kamis, 09 Januari 2025	10.00 – 11.00	162012300002 / Abudhiya Harits Ulhaq Hadyan	ANALISIS DAN OPTIMALISASI PENGGUNAAN ENERGI DI INDUSTRI ELEKTRONIK DALAM PENERAPAN SISTEM MANAJEMEN ENERGI BERBASIS ISO 50001:2018	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. Chairul Gagarin Irianto, MS / Syah Alam, S.Pd, MT, PhD Penguji ➤ Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU ➤ Dr. Ir. R Deiny Mardian, ST, MT	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCt6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
7.	Kamis, 09 Januari 2025	11.00 – 12.00	162012300005 / Muhammad Khaidir	ANALISIS ELEKRIKAL DCDV – <i>DATA CENTER DESIGN VALIDATION</i> TERHADAP SERTIFIKASI ANSI/TIA-942B	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. Chairul Gagarin Irianto, MS / Syah Alam, S.Pd, MT, PhD Penguji ➤ Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU ➤ Dr. Ir. R Deiny Mardian, ST, MT	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCt6bzhqSS9PTEJab3NDUT09

8.	Kamis, 09 Januari 2025	13.00 – 14.00	162012300010 / Andree Ardiansjah K	ANALISA KINERJA SDN <i>CONTROLLER</i> BERBASIS <i>SEGMENT ROUTING</i> IPV6 (SRV6) TERHADAP PERFORMA KUALITAS JARINGAN TELEKOMUNIKASI	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. R. Deiny Mardian, ST, MT / Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD Penguji ➤ Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU ➤ Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCT6bzhqSS9PTEJab3NDUT09
9.	Kamis, 09 Januari 2025	14.00 – 15.00	Uud Suseno Waji / 162012300009	KLASIFIKASI MASALAH <i>PACKET LOSS</i> PADA JARINGAN <i>TRANSPORT</i> TELEKOMUNIKASI LTE MENGGUNAKAN <i>TWO-WAY ACTIVE MASUREMENT PROTOCOL</i> (TWAMP) BERDASARKAN ANALISIS QoS DSCP 26 DAN 48	Pembimbing: ➤ Dr. Ir. R. Deiny Mardian, ST, MT / Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPU Penguji ➤ Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU ➤ Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD	https://trisakti-ac-id.zoom.us/j/97389131167?pwd=S3hGQldTMCT6bzhqSS9PTEJab3NDUT09

Syarat dan Ketentuan :

1. Proposal lengkap sesuai dengan template yang ditetapkan oleh Fakultas (<http://fti.trisakti.ac.id/uploads/fti/downloads/lampiran-tugas-akhir.pdf>)
2. *Slide Power Point* materi proposal tesis.
3. Bukti hasil pemeriksaan *similarity* (Turnitin) dari Sekertariat Program Studi Magister Teknik Elektro, ambang batas *similarity* adalah tidak lebih dari 20% (*)
4. *Softcopy* KRS semester Gasal 2024/2025
5. *Softcopy* Transkrip terakhir, minimal telah menyelesaikan 29 SKS (mata kuliah wajib dan konsentrasi keahlian)
6. Tidak memiliki nilai kurang dari B untuk seluruh mata kuliah pada Kurikulum Program Magister Teknik Elektro
7. Mahasiswa mempresentasikan proposal tesis sesuai dengan jadwal seminar dengan durasi maksimal 15 menit
8. Revisi proposal tesis dikirimkan paling lambat 1 minggu ke email thesis-mte@trisakti.ac.id



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS TRISAKTI

Jakarta, 03 Januari 2025

Program Studi Magister Teknik Elektro FTI – Usakti



 Dr. Ir. Yuli Kurnia Ningsih, MT, IPM
Ketua

PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR DAN ELECTRIC FIELD COUPLED UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

PROPOSAL TESIS
Disusun Oleh :
Muhammad Nugrah Kusumah
FTI / MTE : 162012300001



MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS TRISAKTI
JAKARTA
2024

UNIVERSITAS TRISAKTI
IS A ONE STOP LEARNING FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Henry Candra

Syah Alam

Muhammad Nugrah Kusumah

Lydia Sari

FORMULIR PENILAIAN OLEH DOSEN PENGUJI PROPOSAL TESIS

Nama Mahasiswa : Muhammad Nugrah Kusumah
 NIM : 162012300001
 Peminatan : Telekomunikasi
 Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS *CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR* DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

No	Kriteria Penilaian	Uraian Penilaian	Nilai		
			Angka	Bobot	Angka x Bobot
1	Penulisan Proposal (20%)	Kejelasan tulisan dan bahasa yang digunakan.	85	10%	8,5
		Jumlah dan relevansi referensi primer (tesis, jurnal, prosiding, dll) yang digunakan (Catatan 1)	85	5%	4,25
		Kebaruan dan mutu referensi	85	5%	4,25
2	Presentasi (10%)	Penyajian secara jelas, runut, tepat waktu	85	10%	8,5
3	Materi (50%)	Kejelasan identifikasi dan rumusan masalah	85	5%	4,25
		Kejelasan penulisan tujuan	85	5%	4,25
		Kejelasan dan kesesuaian rencana penyelesaian masalah (metodologi) dengan tujuan	85	10%	8,5
		Kebaruan materi (up to date)	85	10%	8,5
		Adanya perancangan sistem/ komponen/proses dan kompleksitas rancangan (Catatan 2)	85	20%	17
4	Penguasaan materi (20%)	Penguasaan materi	85	10%	8,5
		Penguasaan teori dasar	85	10%	8,5
Jumlah					85

Kesimpulan: layak/tidak layak*) dilanjutkan sebagai Tesis

*) coret yang tidak sesuai

Catatan:

- Jumlah dan relevansi referensi primer:
 < 5 nilai 70; $5 \leq \text{jml ref} \leq 10$ nilai 80;
 $11 \leq \text{jml ref} \leq 20$ nilai 90; ≥ 50 nilai 100.
- Bila tidak ada perancangan nilai 50.

Jakarta, 08 Januari 2025

Dosen Penguji



(Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT)

REKOMENDASI PERBAIKAN PROPOSAL TESIS

Nama : Muhammad Nugrah Kusumah
NIM : 162012300001
Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS
CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI

1. Halaman 8, penjelasan BPF salah satu saja (yang sesuai dengan gambar)
2. Persamaan 4, tambahkan penjelasan parameter frekuensi unloaded dan loaded
3. Persamaan 5 diperbaiki
4. Jelaskan alasan pemilihan target kinerja sensor

Jakarta, 08 Januari 2025
Dosen Penguji



(Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT)

Catatan :

Formulir ini diisi apabila mahasiswa dinyatakan lulus dengan catatan harus memperbaiki proposal atau tidak lulus ujian proposal Tesis dan harus dilampirkan pada proposal Tesis berikutnya.

FORMULIR PENILAIAN OLEH DOSEN PENGUJI PROPOSAL TESIS

Nama Mahasiswa : Muhammad Nugrah Kusumah
 NIM : 162012300001
 Peminatan : Telekomunikasi
 Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS *CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR* DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

No	Kriteria Penilaian	Uraian Penilaian	Nilai		
			Angka	Bobot	Angka x Bobot
1	Penulisan Proposal (20%)	Kejelasan tulisan dan bahasa yang digunakan.	82	10%	
		Jumlah dan relevansi referensi primer (tesis, jurnal, prosiding, dll) yang digunakan (Catatan 1)	82	5%	
		Kebaruan dan mutu referensi	82	5%	
2	Presentasi (10%)	Penyajian secara jelas, runut, tepat waktu	82	10%	
3	Materi (50%)	Kejelasan identifikasi dan rumusan masalah	82	5%	
		Kejelasan penulisan tujuan	82	5%	
		Kejelasan dan kesesuaian rencana penyelesaian masalah (metodologi) dengan tujuan	82	10%	
		Kebaruan materi (up to date)	82	10%	
		Adanya perancangan sistem/ komponen/proses dan kompleksitas rancangan (Catatan 2)	82	20%	
4	Penguasaan materi (20%)	Penguasaan materi	82	10%	
		Penguasaan teori dasar	82	10%	
Jumlah					82

Kesimpulan: layak/tidak layak*) dilanjutkan sebagai Tesis

*) coret yang tidak sesuai

Catatan:

- Jumlah dan relevansi referensi primer:
 < 5 nilai 70; $5 \leq \text{jml ref} \leq 10$ nilai 80;
 $11 \leq \text{jml ref} \leq 20$ nilai 90; ≥ 50 nilai 100.
- Bila tidak ada perancangan nilai 50.

Jakarta, 08 Januari 2025

Dosen Penguji



(Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD)

REKOMENDASI PERBAIKAN PROPOSAL TESIS

Nama : Muhammad Nugrah Kusumah
NIM : 162012300001
Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS
CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI

1. referensi yg dijadikan acuan spy diurutkan berdasarkan sitasi
2. Gambar diacu pada tulisan
3. gambar 1 diperbesar
4. Tabel 2 spesifikasi dimunculkan pada tujuan
5. flowchart tahapan penelitian
6. Gambar 3.1 dimensi

....

Jakarta, 08 Januari 2025
Dosen Penguji



(Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD)

Catatan :

Formulir ini diisi apabila mahasiswa dinyatakan lulus dengan catatan harus memperbaiki proposal atau tidak lulus ujian proposal Tesis dan harus dilampirkan pada proposal Tesis berikutnya.

FORMULIR PENILAIAN OLEH DOSEN PENGUJI PROPOSAL TESIS

Nama Mahasiswa : Muhammad Nugrah Kusumah
 NIM : 162012300001
 Peminatan : Telekomunikasi
 Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS *CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR* DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

No	Kriteria Penilaian	Uraian Penilaian	Nilai		
			Angka	Bobot	Angka x Bobot
1	Penulisan Proposal (20%)	Kejelasan tulisan dan bahasa yang digunakan.	90	10%	9
		Jumlah dan relevansi referensi primer (tesis, jurnal, prosiding, dll) yang digunakan (Catatan 1)	90	5%	4.5
		Kebaruan dan mutu referensi	90	5%	4.5
2	Presentasi (10%)	Penyajian secara jelas, runut, tepat waktu	90	10%	9
3	Materi (50%)	Kejelasan identifikasi dan rumusan masalah	90	5%	4.5
		Kejelasan penulisan tujuan	90	5%	4.5
		Kejelasan dan kesesuaian rencana penyelesaian masalah (metodologi) dengan tujuan	90	10%	9
		Kebaruan materi (up to date)	90	10%	9
		Adanya perancangan sistem/ komponen/proses dan kompleksitas rancangan (Catatan 2)	90	20%	18
4	Penguasaan materi (20%)	Penguasaan materi	90	10%	9
		Penguasaan teori dasar	90	10%	9
Jumlah					90

Kesimpulan: **layak**/tidak layak*) dilanjutkan sebagai Tesis

*) coret yang tidak sesuai

Catatan:

- Jumlah dan relevansi referensi primer:
 <5 nilai 70; $5 \leq \text{jml ref} \leq 10$ nilai 80;
 $11 \leq \text{jml ref} \leq 20$ nilai 90; ≥ 50 nilai 100.
- Bila tidak ada perancangan nilai 50.

Jakarta, 08 Januari 2025
 Dosen Penguji




Syah Alam, S.Pd, MT, PhD

Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU

REKOMENDASI PERBAIKAN PROPOSAL TESIS

Nama : Muhammad Nugrah Kusumah
NIM : 162012300001
Judul : PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS
CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED* UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT

HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI

1. Perbaiki sesuai dengan rekomendasi dari penguji
2. Teori perturbasi dijelaskan lebih detail
3. Perbaiki rumus Normalized Sensitivity
4. Cek kembali target untuk parameter yang ditentukan termasuk NS, Akurasi dll
5. Abstrak disesuaikan dengan latar belakang (kontribusi utama perlu dijelaskan)
6. Rumusan masalah perlu dibuat lebih detail disesuaikan dengan literatur review yang diusulkan di Tabel 2. Spesifikasi Alat
7. Urutan referensi tabel disesuaikan dengan nomor referensi.
8. Gambar 1 diperbesar
9. Rumus ditambahkan notasi dan satuan
10. Ditambahkan diagram alir penelitian yang ditampilkan hanya diagram alir perancangan
11. Perlu dijelaskan alasan pemilihan frekuensi kerja.

Jakarta, 08 Januari 2025

Dosen Penguji



Syah Alam, S.Pd, MT, PhD



Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU

Catatan :

Formulir ini diisi apabila mahasiswa dinyatakan lulus dengan catatan harus memperbaiki proposal atau tidak lulus ujian proposal Tesis dan harus dilampirkan pada proposal Tesis berikutnya.

REKOMENDASI PERBAIKAN PROPOSAL TESIS

Dosen Penguji : Syah Alam, S.Pd, MT, PhD dan Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, MT, IPU

NO	HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI	PERBAIKAN YANG SUDAH DILAKUKAN
1	Perbaiki sesuai dengan rekomendasi dari penguji.	Seluruh perbaikan sudah mengikuti rekomendasi dari penguji.
2	Teori perturbasi dijelaskan lebih detail.	Teori perturbasi sudah ditambahkan (halaman 7)
3	Perbaiki rumus Normalized Sensitivity.	Rumus sudah diperbaiki (halaman 9).
4	Cek kembali target untuk parameter yang ditentukan termasuk NS, Akurasi, dll.	Target sudah diperiksa.
5	Abstrak disesuaikan dengan latar belakang (kontribusi utama perlu dijelaskan).	Penjelasan sudah ditambahkan (halaman 1)
6	Rumusan masalah perlu dibuat lebih detail disesuaikan dengan literatur review yang diusulkan di Tabel 2. Spesifikasi Alat	Rumusan masalah sudah dilengkapi (halaman 3).
7	Urutan referensi tabel disesuaikan dengan nomor referensi.	Nomor referensi sudah diurutkan (halman 10).
8	Gambar 1 diperbesar.	Gambar sudah diperbesar (halman 9).
9	Rumus ditambahkan notasi dan satuan.	Notasi sudah ditambahkan (halaman 6-9).
10	Ditambahkan diagram alir penelitian yang ditampilkan hanya diagram alir perancangan.	Diagram alir penelitian sudah dilengkapi (halaman 12).
11	Perlu dijelaskan alasan pemilihan frekuensi kerja.	Alasan pemilihan frekuensi kerja sudah dijelaskan (halaman 13).

Dosen Penguji : **Dr. Ir. Lydia Sari, ST, MT**

NO	HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI	PERBAIKAN YANG SUDAH DILAKUKAN
1	Halaman 8, penjelasan BPF salah satu saja (yang sesuai dengan gambar).	Penjelasan BPF sudah sesuai dengan gambar (halaman 10).
2	Persamaan 4, tambahkan penjelasan parameter frekuensi unloaded dan loaded.	Frekuensi unloaded dan loaded sudah dijelaskan (halaman 8).
3	Persamaan 5 diperbaiki.	Persamaan 5 sudah diperbaiki (halaman 5).
4	Jelaskan alasan pemilihan target kinerja sensor	Alasan pemilihan target sudah dijelaskan (halaman 13).

Dosen Penguji : Ir. Henry Candra, ST, MT, PhD

NO	HAL-HAL YANG HARUS DIPERBAIKI	PERBAIKAN YANG SUDAH DILAKUKAN
1	Referensi yg dijadikan acuan spy diurutkan berdasarkan sitasi.	Sitasi sudah sesuai urutan (halaman 10).
2	Gambar diacu pada tulisan.	Gambar sudah diacu pada tulisan ditandai dengan huruf tebal .
3	Gambar 1 diperbesar.	Gambar 1 sudah diperbesar (halaman 9).
4	Tabel 2 spesifikasi dimunculkan pada tujuan.	Spesifikasi sudah ditambahkan pada tujuan (halaman 5).
5	Flowchart tahapan penelitian.	Flowchart tahapan penelitian sudah ditambahkan (halaman 12).
6	Gambar 3.1 dimensi.	Gambar 31 (berubah menjadi gambar 32 karena berubah urutan gambar) sudah diperbaiki (halaman 33)

**PERANCANGAN SENSOR GELOMBANG MIKRO BERBASIS
CIRCULAR SPLIT RING RESONATOR DAN *ELECTRIC FIELD COUPLED*
UNTUK KARAKTERISASI MATERIAL PADAT**

PROPOSAL TESIS

Disusun Oleh :

Muhammad Nugrah Kusumah

FTI / MTE : 162012300001



**MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS TRISAKTI
JAKARTA**

2024

ABSTRAK

Sensor gelombang mikro telah banyak digunakan untuk karakterisasi material karena memiliki keunggulan dalam akurasi dan sensitivitas. Penelitian ini mengembangkan sensor gelombang mikro berbasis struktur *Circular Split Ring Resonator* (SRR) dan *Electric Field Coupled* (ELC) resonator dengan *dual port* dan karakteristik *bandstop filter*. Circular SRR dirancang untuk meningkatkan konsentrasi medan listrik pada resonator yang berfungsi sebagai sensing area, sementara ELC menciptakan area kapasitif pada celah lengan induktif resonator. Sensor dirancang menggunakan perangkat lunak simulasi HFSS 15.0 untuk menganalisis performa resonator, termasuk frekuensi resonansi dan medan listrik optimal pada permitivitas 1-10. Iterasi dilakukan untuk memperoleh desain yang menghasilkan *Frequency Detection Resolution* (FDR) kurang dari 0.04, akurasi rata-rata lebih dari 95%, dan *Normalized Sensitivity* (NS) lebih dari 0.1%. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dan pengukuran menggunakan sensor hasil fabrikasi. Sensor ini memiliki potensi menghasilkan konsentrasi medan listrik tinggi pada resonator, sensitivitas optimal, dan akurasi tinggi dalam mendeteksi perubahan permitivitas material padat. Desain sensor yang *compact*, mudah difabrikasi, dan biaya produksinya rendah memungkinkan penggunaannya secara luas dalam aplikasi seperti manufaktur makanan, aplikasi medis, dan lingkungan industri. Dengan keunggulan tersebut, sensor gelombang mikro ini berkontribusi besar terhadap pengembangan teknologi karakterisasi material padat secara efektif dan efisien. Kontribusi utama dari penelitian ini untuk menghasilkan sensor gelombang mikro dengan nilai rata-rata akurasi dan sensitivitas yang tinggi serta nilai deteksi resolusi (FDR) yang paling minimum untuk karakterisasi material padat. Kontribusi utama dari penelitian ini untuk menghasilkan sensor gelombang mikro dengan nilai rata-rata akurasi dan sensitivitas yang tinggi serta nilai deteksi resolusi (FDR) yang paling minimum untuk karakterisasi material padat.

Kata Kunci: Sensor Gelombang Mikro, *Circular SRR*, ELC, *Frequency Detection Resolution*, Akurasi, *Normalized Sensitivity*, HFSS 15.0

1. Latar Belakang

Sensor adalah perangkat yang berfungsi mengubah fenomena fisik menjadi sinyal listrik yang dapat diproses lebih lanjut [1]. Teknologi sensor terus berkembang pesat dan melibatkan berbagai bidang seperti elektronik, fotonik, mekanika, kimia, dan biologi [2]. Selain itu, sensor juga dikelompokkan berdasarkan berbagai fenomena fisik, termasuk suhu, tekanan, posisi, gerak rotasi, magneto-elektrik, foto-elektrik, elektro-plastik, termo-plastik, transformasi kimia, dan lainnya [3]. Sensor dapat dibagi menjadi dua jenis utama berdasarkan cara kerjanya, yaitu sensor aktif dan sensor pasif [4]. Sensor aktif memerlukan sumber energi eksternal untuk menghasilkan sinyal yang digunakan dalam mendeteksi fenomena fisik. Sebaliknya, sensor pasif tidak memerlukan sumber energi tambahan, melainkan merespon perubahan dalam lingkungan dengan mengubah sifat fisiknya. Salah satu jenis sensor pasif yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi adalah sensor gelombang mikro yang memiliki performansi yang tinggi dalam hal akurasi dan sensitivitas.

Sensor gelombang mikro dalam perkembangannya sering digunakan untuk karakterisasi material dalam berbagai bidang, seperti manufaktur makanan, aplikasi medis, dan lingkungan industri [5]. Sensor gelombang mikro akan memberikan respon terhadap material tergantung pada permitivitasnya [6]. Material padat yang diuji (*Sample Under Test*) diletakkan pada medan listrik tertinggi di struktur resonator yang merupakan *sensing area* pada sensor gelombang mikro. Dalam perancangannya parameter yang perlu diperhatikan untuk mengetahui performansi sensor gelombang mikro adalah *Frequency Detection Resolution* (FDR), rata-rata akurasi, dan *Normalized Sensitivity* (NS). Tantangan utama dalam merancang sensor gelombang mikro adalah meningkatkan nilai akurasi dan sensitivitas [7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengusulkan sensor gelombang mikro berbasis *split ring resonator* (SRR) untuk meningkatkan akurasi dan sensitivitas [8]. Struktur SRR pada sensor gelombang mikro menyediakan platform yang fleksibel untuk membangun struktur topologi dengan *coupling distributions* yang kompleks, yang memungkinkan pengendalian gelombang elektromagnetik [9].

Sehingga, implementasi SRR pada resonator bertujuan untuk menghasilkan medan listrik yang tinggi pada sensor gelombang mikro [10].

Selain itu pemanfaatan struktur *electric field coupled* (ELC) resonator digunakan untuk menciptakan lengan induktif pada resonator sehingga terdapat area kapasitif yang berada pada celah antara strip di tengah resonator [11]. Struktur resonator dengan basis ELC memiliki keunggulan seperti tingkat simetri geometris yang tinggi, kopling magnetoelektrik yang minimal, dan kemampuan untuk berinteraksi dengan komponen medan listrik sejajar maupun tegak lurus [12]. Tujuan dari penggunaan struktur ELC pada sensor gelombang mikro ada menghasilkan *sensing area* pada celah lengan induktif di tengah resonator. Sensor gelombang mikro juga memiliki keunggulan desain yang *compact*, biaya produksi yang rendah, dan fabrikasi yang mudah [13].

Pada penelitian ini diusulkan sensor gelombang mikro dengan basis struktur resonator *circular SRR* dan ELC dengan *dual port* dengan karakteristik *bandstop filter*. Struktur *circular SRR* digunakan sebagai pengkonsentrasi medan listrik sedangkan struktur ELC digunakan untuk menghasilkan *sensing area* pada celah lengan induktif di tengah resonator. Sampel akan diletakan di atas permukaan sensor dan permitivitas material diamati dengan pergeseran frekuensi pada parameter S_{21} . Kontribusi utama dari penelitian ini untuk menghasilkan sensor gelombang mikro dengan nilai rata-rata akurasi dan sensitivitas yang tinggi serta nilai deteksi resolusi (FDR) yang paling minimum untuk karakterisasi material padat.

2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian adalah:

1. Bagaimana merancang sensor gelombang mikro yang beroperasi pada rentang frekuensi 0.5 - 2 GHz dengan spesifikasi S_{21} bernilai <-10 dB, FDR bernilai <0.04 , rata-rata akurasi bernilai $>95\%$ dan NS bernilai $>0.1\%$ untuk mengkarakterisasi permitivitas dari material padat menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0.

2. Bagaimana merealisasikan dan memvalidasi sensor gelombang mikro berbasis *Circular SRR* dan ELC untuk karakterisasi material padat dengan permitivitas 1 sampai 10.
3. Bagaimana melakukan validasi dan pengukuran performansi sensor gelombang mikro dilihat dari parameter *Frequency Detection Resolution* (FDR), rata-rata akurasi, dan *Normalized Sensitivity* (NS).

3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian adalah:

1. Sensor gelombang mikro yang dirancang berbasis struktur *circular SRR* dan ELC dengan *dual port* dengan karakteristik *bandstop filter*.
2. Karakterisasi permitivitas dari material padat diamati dengan melakukan observasi pergeseran frekuensi pada parameter S_{21} .
3. Sensor gelombang mikro dirancang menggunakan substrat FR-4 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 4.3 dan ketebalan substrat sebesar 1.6 mm.
4. Parameter penyusun sensor gelombang mikro terdiri atas $\tan \delta$ bernilai sebesar 0.0265 dan Z sebesar 50Ω
5. Perancangan sensor gelombang mikro dilakukan menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0.
6. Permitivitas yang dikarakterisasi adalah material padat dengan dengan permitivitas (ϵ_r) 1 sampai 10.
7. Parameter yang diamati adalah *Frequency Detection Resolution* (FDR), rata-rata akurasi, dan *Normalized Sensitivity* (NS).
8. Sensor gelombang mikro yang paling optimal akan difabrikasi dan diukur menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan memperhatikan parameter serupa untuk memvalidasi hasil simulasi dan pengukuran.

4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Merancang sensor gelombang mikro yang beroperasi pada rentang frekuensi 0.5 - 2 GHz dengan spesifikasi S_{21} bernilai <-10 dB, FDR bernilai <0.04 , rata-rata akurasi bernilai $>95\%$ dan NS bernilai $>0.1\%$ untuk mengkarakterisasi permitivitas dari material padat menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0.
2. Merealisasikan dan memvalidasi sensor gelombang mikro berbasis *Circular SRR* dan ELC untuk karakterisasi material padat dengan permitivitas 1 sampai 10.
3. Memvalidasi dan mengukur performansi sensor gelombang mikro dilihat dari parameter *Frequency Detection Resolution* (FDR), rata-rata akurasi, dan *Normalized Sensitivity* (NS).

5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan sensor gelombang mikro untuk karakterisasi material padat.
2. Menghasilkan teknologi tepat guna berbentuk sensor dengan performansi tinggi dan biaya terjangkau.

6. Kajian Pustaka

6.1 Karakterisasi Material

Dalam beberapa tahun terakhir, karakterisasi material telah menjadi hal yang sangat penting karena kemampuannya untuk memberikan informasi terhadap sifat suatu material. Hal ini dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti pengendalian kualitas makanan, *bio-sensing*, dan pendeteksian lapisan bawah permukaan, untuk menganalisis komposisi material serta transformasi fisik dan kimianya [14]. Untuk mencapai karakterisasi material yang akurat, metode yang digunakan sangat bergantung pada teknik resonansi yang umumnya dibagi menjadi dua yaitu resonator dan *profound disturbance* [15].

Teknik resonansi dirancang untuk merepresentasikan karakteristik material pada satu atau beberapa frekuensi tertentu dengan tingkat akurasi yang tinggi. Kemampuan teknik resonansi dalam mendeteksi material dengan sensitivitas tinggi menjadikannya sesuai untuk memenuhi kebutuhan industri dan pasar. Karakteristik dielektrik yang berbeda pada substrat, seperti koefisien transmisi dan refleksi, dapat digunakan untuk mengkarakterisasi sensor [16].

6.2 Konsep Dasar Sensor Gelombang Mikro

Sensor gelombang mikro merupakan perangkat yang memanfaatkan sifat gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi perubahan pada lingkungan sekitarnya. Performa sensor gelombang mikro sangat dipengaruhi oleh bahan dan ukuran substrat dielektrik, oleh karena itu bahan dan ketebalan substrat dielektrik perlu ditentukan dalam proses desain [17]. Pada penelitian ini material substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 4.3 dan ketebalan substrat sebesar 1.6 mm. Pemilihan material FR-4 sebagai substrat karena harganya yang terjangkau, daya tahan, dan kompatibilitasnya dengan aplikasi frekuensi tinggi [18].

Teori perturbasi merupakan metode untuk menentukan perubahan energi akibat adanya gangguan kecil, seperti medan listrik atau magnet [19]. Dalam sensor gelombang mikro, teori perturbasi digunakan untuk mengkarakterisasi permitivitas *sample under test* (SUT). Interaksi pada medan Listrik (*E-Field*) pada resonator terjadi dengan menempatkan SUT di atasnya, sehingga menyebabkan perubahan pada medan listrik resonator.

Perubahan pada f_r terhadap karakterisasi SUT saling berhubungan dijelaskan dalam persamaan (1) sebagai berikut [20]:

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int v (\Delta\epsilon E_1 \cdot E_0 + \Delta\mu H_1 \cdot H_0) dv}{\int v (\epsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dv} \quad (1)$$

Dengan :

$\frac{\Delta f_r}{f_r}$: Perubahan relatif frekuensi resonansi

$\Delta\epsilon$: Perubahan permitivitas (F/m)

$\Delta\mu$: Perubahan permeabilitas (H/m)

E_1, E_0 : Medan listrik (V/m)

H_1, H_0 : Medan magnetik (A/m)

ϵ_0 : Permittivitas vakum (F/m)

μ_0 : Permeabilitas vakum (H/m)

dv : Elemen volume (m^3)

Berdasarkan persamaan (1) menunjukkan bahwa f_r adalah frekuensi resonansi sensor gelombang mikro sebelum diletakan SUT, sedangkan Δf_r adalah pergeseran frekuensi resonansi sebelum dan sesudah karakterisasi SUT. Perubahan pada permitivitas dan permeabilitas masing-masing dinyatakan sebagai $\Delta\epsilon$ dan $\Delta\mu$ dengan volume perturbasi dilambangkan sebagai v . Distribusi medan listrik dan magnet tanpa dan dengan perturbasi dilambangkan dengan E_0, H_0 , dan E_1, H_1 . Pada penelitian ini parameter yang diperhatikan adalah interaksi antara medan Listrik dan SUT, karena SUT merupakan material dielektrik sehingga medan magnet diasumsikan bernilai 0.

Berdasarkan persamaan (1), perubahan pada nilai permitivitas atau permeabilitas SUT menyebabkan perubahan pada frekuensi resonansi. Hal tersebut memvalidasi bahwa meletakan SUT pada sensing area menyebabkan perturbasi pada medan listrik (*E-Field*) yang menyebabkan pergeseran frekuensi resonansi.

6.3 Parameter Sensor Gelombang Mikro

Parameter sensor gelombang mikro meliputi Frekuensi resonansi (f_r), *Frequency Detection Resolution* (FDR), dan *Normalized Sensitivity* (NS), yang masing-masing berperan penting dalam menentukan kinerja sensor. Frekuensi resonansi (f_r) pada sensor gelombang mikro dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut [21]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{GHZ} \quad (2)$$

Dengan:

f_r : Frekuensi resonansi (GHz)

2π : Konstanta siklus penuh (2×3.14)

L : Induktansi (H)

C : Kapasitansi (F)

Pada persamaan (2) menunjukkan hubungan antara induktansi dan kapasitansi dalam sebuah sistem resonator. Induktansi merupakan kemampuan menahan perubahan arus, sedangkan kapasitansi merupakan kapasitas menyimpan muatan.

Selanjutnya, frekuensi resonansi dari struktur SRR sangat ditentukan dan dipengaruhi oleh panjang lengan dari resonator. Panjang lengan dari struktur SRR untuk frekuensi resonansi tertentu dapat ditentukan menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$l = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} \times \frac{1}{f_r} \text{ mm} \quad (3)$$

Dengan:

l : Panjang total resonator (mm)

c : Kecepatan cahaya (3×10^8)

ϵ_{eff} : Permittivitas efektif

f_r : Frekuensi resonansi (GHz)

Hubungan antara perubahan frekuensi resonansi dan nilai permittivitas SUT disebut sebagai *Frequency Detection Resolution* (FDR), yang dapat dihitung menggunakan persamaan (4) sebagai berikut [22]:

$$FDR = \frac{\Delta f}{\Delta \epsilon_r} = \frac{(f_{unloaded} - f_{loaded})}{\epsilon_{r(height)} - \epsilon_{r(Reference)}} \text{ GHz} \quad (4)$$

Dengan:

FDR : Rentang deteksi perubahan frekuensi terkecil (GHz)

Δf : Perubahan absolut frekuensi resonansi (GHz)

$\Delta \epsilon_r$: Perubahan permittivitas relatif

$f_{unloaded}$: Frekuensi sebelum diletakan SUT (GHz)

f_{loaded} : Frekuensi setelah diletakan SUT (GHz)

$\epsilon_{r(height)}$: Permittivitas tertinggi

$\epsilon_{r(Reference)}$: Permittivitas referensi

Pada persamaan (4) Δf merupakan selisih antara antara frekuensi resonansi sensor gelombang mikro sebelum diletakan SUT ($f_{unloaded}$) dan setelah

diletakan SUT (f_{loaded}) sedangkan $\Delta\epsilon_r$ merupakan selisih antara permitivitas tertinggi ($\epsilon_{r(height)}$) dan permitivitas yang menjadi referensi $\epsilon_{r(Reference)}$. Secara umum, nilai referensi permitivitas yang digunakan adalah *vacuum* dengan $\epsilon_r = 1$ [23].

Nilai *Normalized Sensitivity* (NS) dapat dihitung menggunakan persamaan (5) sebagai berikut [24]:

$$NS = \frac{1}{\Delta\epsilon_r} \times \left(\frac{f_{unloaded} - f_{loaded}}{f_{unloaded}} \right) \% \quad (5)$$

Dengan:

NS : *Normalized Sensitivity* (%)

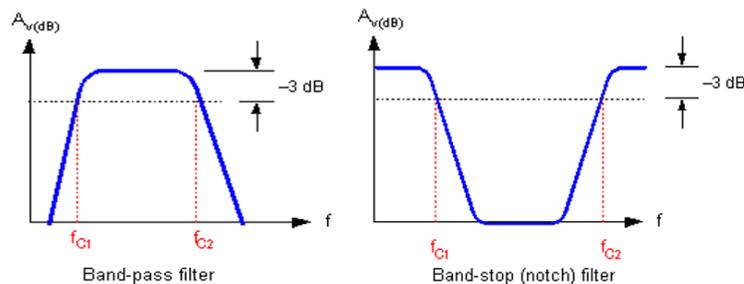
$\Delta\epsilon_r$: Perubahan permitivitas relatif

$f_{unloaded}$: Frekuensi sebelum diletakan SUT (GHz)

f_{loaded} : Frekuensi setelah diletakan SUT (GHz)

6.4 Teori Dasar Resonator

Resonator merupakan suatu struktur yang didasarkan pada rangkaian paralel elemen lumped atau *quasilumped-element equivalent circuits* yang disusun secara paralel untuk membatasi energi elektromagnetik [25]. Salah satu aplikasi resonator adalah sebagai *bandstop filter* yang digunakan pada perancangan sensor gelombang mikro pada penelitian ini. *Bandstop filter* memiliki keunggulan dengan koefisien refleksi yang lebih tinggi di wilayah *stopband*, yang memungkinkan pengukuran fase koefisien refleksi dilakukan dengan lebih akurat, menjadikannya pilihan yang lebih tepat untuk diaplikasikan pada sensor gelombang mikro [26].



Gambar 1. Perbedaan Respon BPF dan BSF

Gambar 1 menunjukkan perbedaan respons antara *Bandpass Filter* (BPF) dan (BSF). BPF dirancang untuk melewatkan sinyal dalam rentang frekuensi tertentu, yang ditunjukkan oleh daerah antara frekuensi *cutoff* f_{c1} dan f_{c2} , sementara frekuensi di luar rentang ini akan teredam. Sebaliknya, BSF berfungsi untuk meredam sinyal dalam rentang frekuensi tertentu antara f_{c1} dan f_{c2} , sedangkan sinyal di luar rentang tersebut akan dilewatkan. Grafik BPF menunjukkan peningkatan gain di daerah tengah rentang frekuensi, sedangkan grafik BSF menunjukkan penurunan *gain* (*notch*) di frekuensi target. BSF memungkinkan respons yang lebih fleksibel, termasuk mode operasi seperti *bandstop*, *bandpass*, dan *all-pass* menggunakan struktur filter tingkat ketiga tanpa memerlukan pengaturan kopling yang dapat disesuaikan [27].

6.5 Studi Literatur

Perancangan sensor gelombang mikro pada penelitian mengacu pada 5 referensi yang dimuat pada **tabel 1**.

Tabel 1. Tabel Meta Analisis

Reference	Years	Model	Port	SUT	Permittivity Range	Frequency (GHz)	Parameters		
							FDR	Accuracy (%)	NS (%)
[19]	2022	U-shaped resonator	Single Port	Solid Material	1 ~ 4.3	1.21 2.10	0.009 0.043	99.02 96.44	0.761 1.150
[21]	2023	Triple-rings CSRR	Dual Port	Semi-solid Material	1.0006 ~ 78.4	2.5	0.042	96	0.003
[28]	2022	Double Split Ring Resonator	Dual Port	Solid and Liquid	2~5.65 31.5~61	2.45	0.060 0.014	93.63 97.41	2.58 0.30
[29]	2023	Curve-feed CSRR	Dual Port	Solid	1.0006~4.4	2.5	0.095	99.77	1.072
[30]	2024	Tweaking ELC resonator	Dual Port	Solid Material	1 ~ 10	0.82	0.012	96.72	1.492

Pada referensi [19] sensor gelombang mikro yang dirancang memiliki struktur resonator berbasis *U-shaped resonator* dengan frekuensi resonansi masing-masing *sensing area* pada resonator sebesar 1.21 GHz dan 2.10 GHz untuk karakterisasi material padat dengan permitivitas 1 sampai 4.3. Material padat yang dikarakterisasi adalah udara, RO5880, RO4003C, dan FR4 dengan permitivitas masing-masing material 1, 2.2, 3.68, dan 4.3. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang

diperoleh pada *sensing area* pertama adalah 0.009, 99.02%, dan 1.072% sedangkan pada *sensing area* kedua adalah 0.043, 96.44%, dan 1.150%

Pada referensi [21] sensor gelombang mikro yang dirancang memiliki struktur *Triple-rings CSRR* dengan frekuensi resonansi sebesar 2.5 GHz untuk karakterisasi material semi padat dengan permitivitas 1.0006 sampai 78.4. Material padat yang dikarakterisasi adalah tabung kosong, *Turmeric*, *Java Turmeric*, *Black Turmeric*, *Mango Ginger* dan *DI Water* dengan permitivitas masing-masing material 1.0006, 34.52, 45.6, 46.68, 59.61, dan 78.4. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang diperoleh 0.042, 96%, dan 0.003%.

Pada referensi [28] sensor gelombang mikro yang dirancang memiliki struktur resonator berbasis *double split ring resonator* dengan frekuensi resonansi sebesar 2.45 GHz untuk karakterisasi material padat dan cair dengan masing-masing material memiliki permitivitas 2 sampai 5.65 dan 31.5 sampai 61. Material padat yang dikarakterisasi adalah teflon, resin, *epoxy glass*, *urethane*, FR4, dan *ceramic* dengan permitivitas 2.00, 3.88, 4.60, 3.24, 4.07, dan 5.65. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang diperoleh 0.060, 93.63%, dan 2.58%. Sedangkan pada saat karakterisasi material cair menggunakan etanol konsentrasi 30%, 50%, dan 70% dengan setiap konsentrasi memiliki permitivitas 61, 47, dan 31.5. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang diperoleh 0.014, 97.41%, dan 0.30%.

Pada referensi [29] sensor gelombang mikro yang dirancang memiliki struktur resonator berbasis *curved-feed CSRR* dengan frekuensi resonansi sebesar 2.5 GHz untuk karakterisasi material padat dengan permitivitas 1.0006 sampai 4.4. Material padat yang dikarakterisasi adalah udara, Roger 5880, Roger 4350, dan FR4 dengan permitivitas masing-masing material 1.0006, 2.2, 3.66, dan 4.4. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang diperoleh 0.095, 99.77%, dan 0.761%.

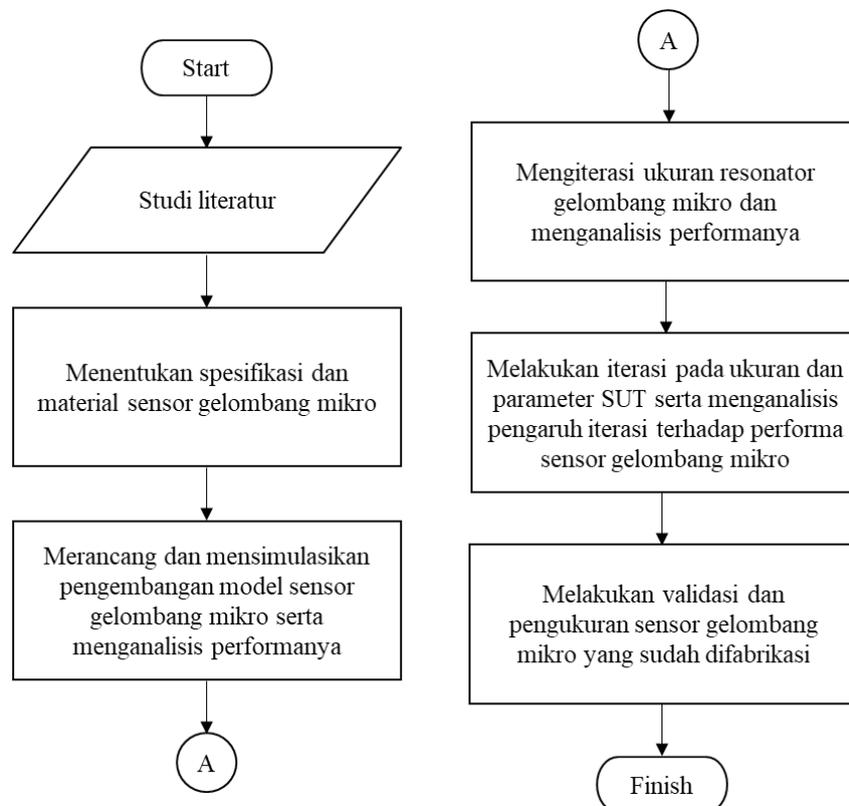
Pada referensi [30] sensor gelombang mikro yang dirancang memiliki struktur resonator berbasis *tweaking* ELC resonator dengan frekuensi resonansi sebesar 0.82 GHz untuk karakterisasi material padat *vacuum* dengan permitivitas 1 sampai 10. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai FDR, rata-rata akurasi dan NS yang diperoleh 0.012, 96.72%, dan 1.492%.

Berdasarkan pada 5 referensi yang menjadi acuan pada penelitian ini, maka akan dirancang sensor gelombang mikro dengan yang memiliki keunggulan terutama dari sisi nilai FDR yang kecil serta akurasi yang tinggi.

7. Metodologi Penelitian

7.1 Metodologi Penelitian

Untuk memperoleh tujuan pada penelitian ini, dilakukan tahapan-tahapan yang dirancang secara sistematis yang ditunjukkan pada diagram alir penelitian pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Pada **gambar 2** menunjukkan tahapan penelitian secara sistematis dengan detail sebagai berikut:

a. Studi literatur

Tahap pertama pada penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan bahan literatur sebagai sumber referensi pada penelitian ini, seperti jurnal dan buku yang dengan topik yang relevan mengenai sensor gelombang mikro.

b. Menentukan spesifikasi dan material sensor gelombang mikro

Tahapan kedua pada penelitian ini adalah menentukan spesifikasi dan material sensor gelombang mikro, spesifikasi ditentukan berdasarkan studi literatur sudah dilakukan pada referensi [30]. Sedangkan material FR-4 dipilih karena memiliki harga yang terjangkau, daya tahan, dan kompatibilitasnya pada frekuensi tinggi.

c. Merancang dan mensimulasikan pengembangan model sensor gelombang mikro serta menganalisis performanya

Tahapan ketiga pada penelitian ini adalah merancang pengembangan model sensor gelombang mikro yang dilakukan menggunakan perangkat lunak, dilakukan simulasi untuk mengetahui performa dari pengembangan model sensor gelombang mikro dengan meletakkan SUT dengan permitivitas 1-10 dengan tujuan memperoleh desain resonator sensor gelombang mikro yang paling optimal.

d. Mengiterasi ukuran resonator gelombang mikro dan menganalisis performanya

Tahapan keempat pada penelitian ini adalah mengiterasi desain resonator sensor gelombang mikro yang paling optimal pada pengembangan model untuk mengetahui pengaruh perubahan bentuk resonator pada performa sensor gelombang mikro. Tujuan iterasi ini adalah memperoleh desain yang paling optimal dibandingkan tahapan pengembangan model.

e. Melakukan iterasi pada ukuran dan parameter SUT serta menganalisis pengaruh iterasi terhadap performa sensor gelombang mikro

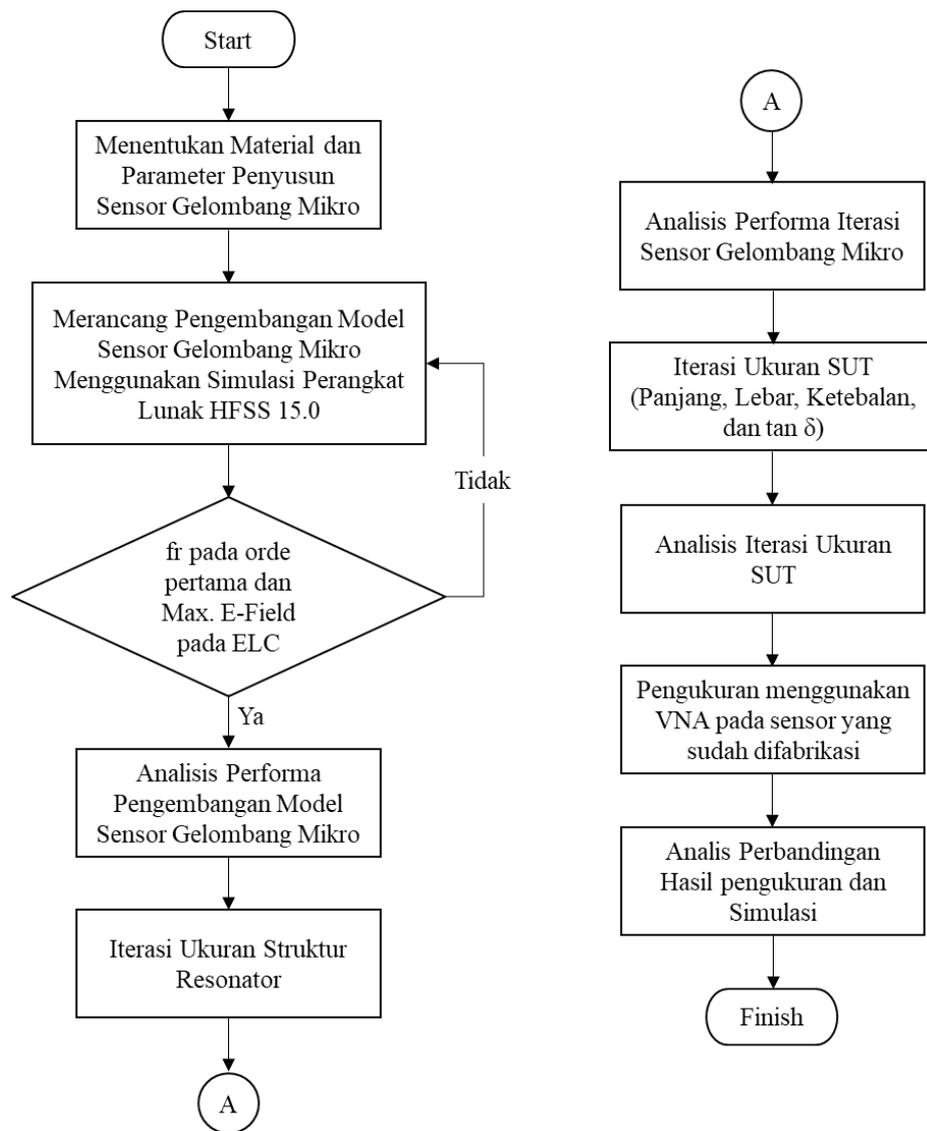
Tahapan kelima pada penelitian ini adalah mengiterasi ukuran dari SUT yang diletakan diatas diatas sensor gelombang mikro untuk mengetahui pengaruh perubahan ukuran SUT pada performa sensor gelombang mikro. Tujuan iterasi ini adalah memperoleh ukuran SUT yang paling optimal untuk dikarakterisasi pada sensor gelombang mikro.

f. Melakukan validasi dan pengukuran sensor gelombang mikro yang sudah difabrikasi

Tahapan terakhir pada penelitian ini adalah melakukan validasi terhadap sensor gelombang mikro yang sudah difabrikasi untuk mengetahui perbandingan performa sensor gelombang mikro dari hasil simulasi dan pengukuran.

Pada penelitian ini sensor gelombang mikro dirancang menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0 untuk memperoleh desain resonator yang optimal dan menganalisis respon terhadap SUT (*Sample Under Test*) dengan permitivitas 1 sampai 10. Proses iterasi dilakukan pada ukuran resonator untuk menentukan frekuensi resonansi (f_r) dan medan listrik (*E-Field*) tertinggi sebagai *sensing area*. Kemudian, dilakukan iterasi pada ukuran SUT untuk mengetahui dampaknya terhadap parameter *Frequency Detection Resolution* (FDR), akurasi rata-rata, dan *Normalized Sensitivity* (NS). Setelah desain resonator optimal diperoleh, dilakukan perbandingan hasil simulasi dengan pengukuran menggunakan sensor hasil fabrikasi.

Secara keseluruhan tahapan perancangan sensor gelombang mikro dapat dilihat diagram alir pada **gambar 3**.



Gambar 3. Diagram Alir Perancangan Sensor Gelombang Mikro

7.2 Spesifikasi Sensor Gelombang Mikro

Pada penelitian ini, sensor gelombang mikro dirancang menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0 untuk mendapatkan desain sensor dengan nilai *Frequency Detection Resolution* (FDR), rata-rata akurasi, dan *Normalized Sensitivity* (NS) yang optimal. Permittivitas dari *Sample Under Test* (SUT) adalah 1-10. Pada **tabel 2** menunjukkan target performansi yang menjadi spesifikasi sensor gelombang mikro.

Tabel 2. Spesifikasi Sensor Gelombang Mikro

Parameter	Target
F_r	0.5 – 2 GHz
S_{21}	< -10 dB
FDR	< 0.04
Rata-rata Akurasi	> 95%
NS	> 0.1%

Pada **tabel 2** menunjukkan target untuk spesifikasi sensor gelombang mikro yang akan dirancang beroperasi pada rentang frekuensi resonansi 0.5 – 2 GHz dan parameter S_{21} bernilai kurang dari -10 dB. Parameter performansi sensor gelombang mikro yaitu FDR, rata-rata akurasi, dan NS masing-masing bernilai kurang dari 0.04, lebih dari 95%, dan lebih dari 0.1%.

7.3 Alat dan Bahan

Secara umum peralatan yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Laptop

Laptop digunakan untuk melakukan proses perancangan dan simulasi pada perangkat lunak HFSS 15.0 yang sudah terinstal. Laptop yang digunakan pada penelitian adalah laptop ASUS Vivobook S14 S430.



Gambar 4. Laptop

Spesifikasi	:
<i>Operating System</i>	: Windows 11 Home Single Language 64-bit
<i>Processor</i>	: Intel® Core™ i5-8265U processor
<i>Graphics</i>	: NVIDIA® GeForce® MX150
<i>Memory</i>	: 8GB 2400MHz DDR4
<i>Storage</i>	: HDD 1TB + SSD 512G PCIe

Interfaces : 1 x Type-C™ USB 3.1 Gen 1
1 x Type-A USB 3.1 Gen 1
2 x USB 2.0
1 x HDMI
1 x *Combo audio jack*
1 x *MicroSD card read*

2. Perangkat Lunak HFSS

ANSYS *High-Frequency Structure Simulator* (HFSS) merupakan sebuah perangkat lunak yang dapat membantu dalam proses merancang sensor gelombang mikro, serta dapat membantu dalam mensimulasikan dan menganalisis gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh resonator pada sensor gelombang mikro yang dirancang. Pada penelitian ini versi dari perangkat lunak HFSS yang digunakan adalah HFSS 15.0.

3. *Vector Network Analyzer* (VNA)

VNA adalah sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur respon sensor gelombang mikro terhadap SUT yang diletakan di atas *sensing area* pada resonator. Parameter S_{21} yang dihasilkan menunjukkan pergeseran frekuensi resonansi akibat adanya SUT. Hasil pengukuran ini digunakan untuk membandingkan kinerja sensor gelombang mikro yang telah difabrikasi dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS.

7.4 Penelitian Pendahuluan

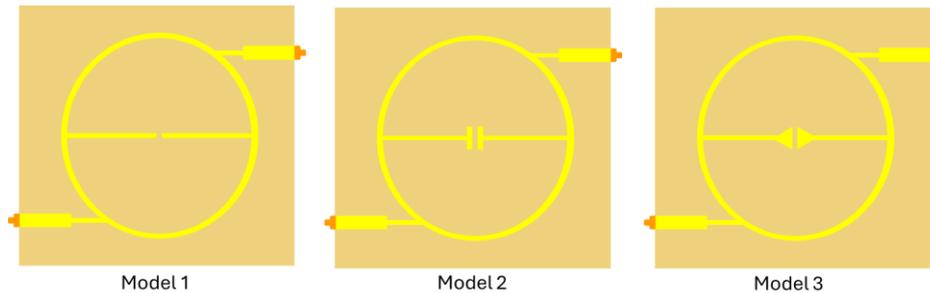
Untuk memperoleh data awal pada penelitian ini, dilakukan penelitian pendahuluan dengan merancang dan melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0. langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian pendahuluan secara berurutan sebagai berikut:

1. Menentukan Frekuensi Resonansi

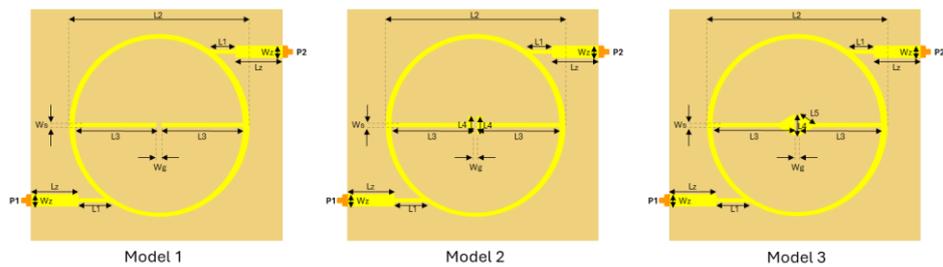
Dalam tahapan awal perancangan sensor gelombang mikro berbasis *circular SRR* dan ELC frekuensi resonansi dipengaruhi oleh panjang resonator dan dapat ditentukan menggunakan persamaan (3).

2. Merancang Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro

Pada penelitian ini sensor gelombang mikro memiliki model berbasis *circular SRR* dan ELC dengan *dual port* yang dirancang melalui 3 tahap pengembangan model.



Gambar 5. Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro



Gambar 6. Detail Dimensi Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro

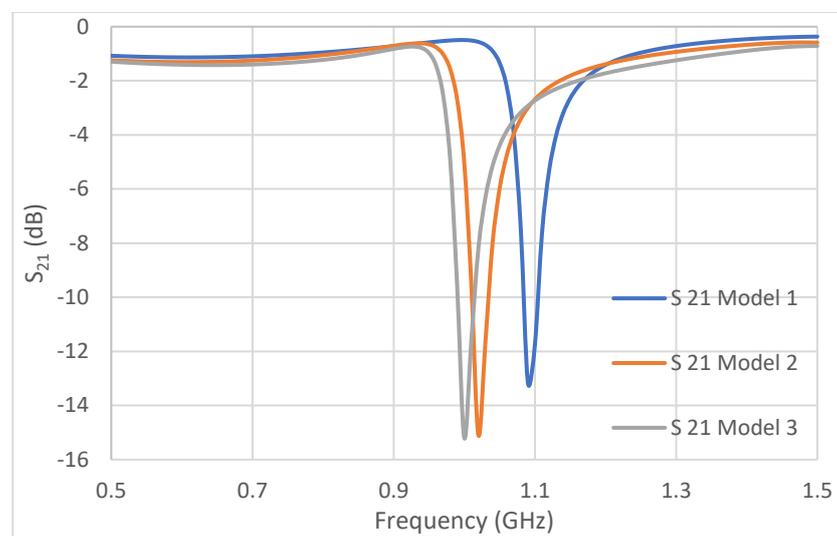
Pada **gambar 5** merupakan tahapan dari pengembangan model sensor gelombang mikro. Pada model 1 struktur resonator pada sensor gelombang mikro terdapat celah pada lengan induktif, kemudian pada model 2 pada celah tersebut ditambahkan struktur *line-shape*, dan pada model 3 pada celah ditambahkan struktur *back-arrow*. Ukuran setiap pengembangan model berdasarkan **gambar 6** dapat dilihat pada **tabel 3** sebagai berikut:

Tabel 3. Detail Dimensi Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro

Parameter	Dimension (mm)		
	Model 1	Model 2	Model 3
Wz	3	3	3
Lz	10	10	10

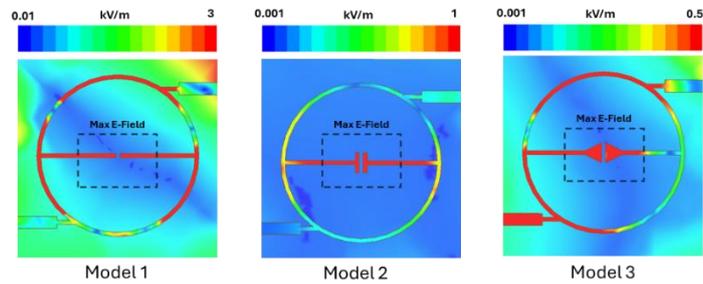
L1	4.5	4.5	4.5
L2	40	40	40
L3	14.5	14.5	14.5
L4	n/a	5	5
L5	n/a	n/a	4
Ws	1	1	1
Wg	1	1	1

Setelah dilakukan simulasi pada perangkat lunak HFSS maka diperoleh parameter frekuensi resonansi dari sensor gelombang mikro dan *E-Field* tertinggi yang akan digunakan sebagai *sensing area*.



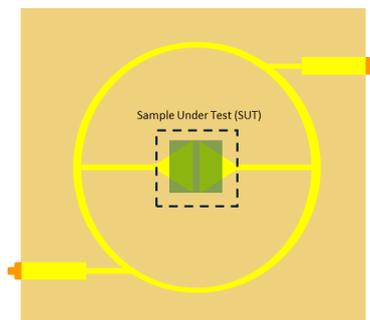
Gambar 7. Frekuensi Resonansi Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro

Pada **gambar 7** menunjukkan frekuensi resonansi pada setiap tahap pengembangan model. Pada model 1 frekuensi resonansi berada pada frekuensi 1.09 GHz, pada model 2 setelah resonator ditambahkan struktur *line-shape* frekuensi resonansi bergeser pada frekuensi 1.02 GHz, dan pada model 3 setelah resonator ditambahkan struktur *back-arrow* frekuensi resonansi bergeser pada frekuensi 1 GHz. Pergeseran frekuensi resonansi pada saat struktur resonator ditambahkan menunjukkan respon sensor akan menuju frekuensi yang lebih kecil pada saat area tersebut ditambahkan objek yang berbeda dari kondisi sebelumnya.



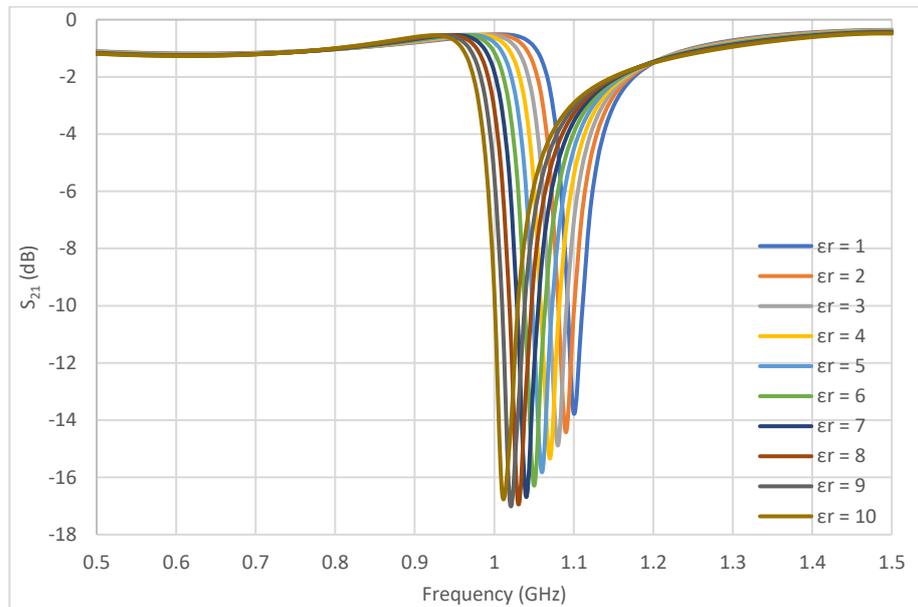
Gambar 8. *E-Field* Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro Hal tersebut divalidasi pada **gambar 8** yang menunjukkan bahwa area yang ditambah struktur merupakan bagian resonator yang memiliki *E-Field* tertinggi sehingga dapat dijadikan sebagai *sensing area*.

3. Analisis Performa Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro Untuk mengetahui performa dari masing-masing pengembangan model maka akan dilakukan simulasi dengan meletakan SUT pada *sensing area* sensor gelombang mikro seperti pada **gambar 9**.

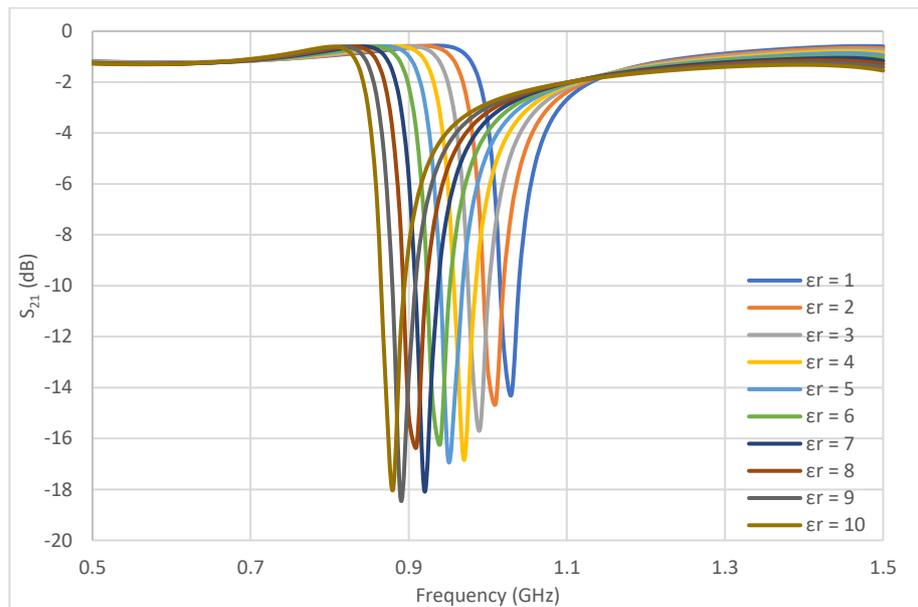


Gambar 9. SUT Diletakan pada *Sensing Area*

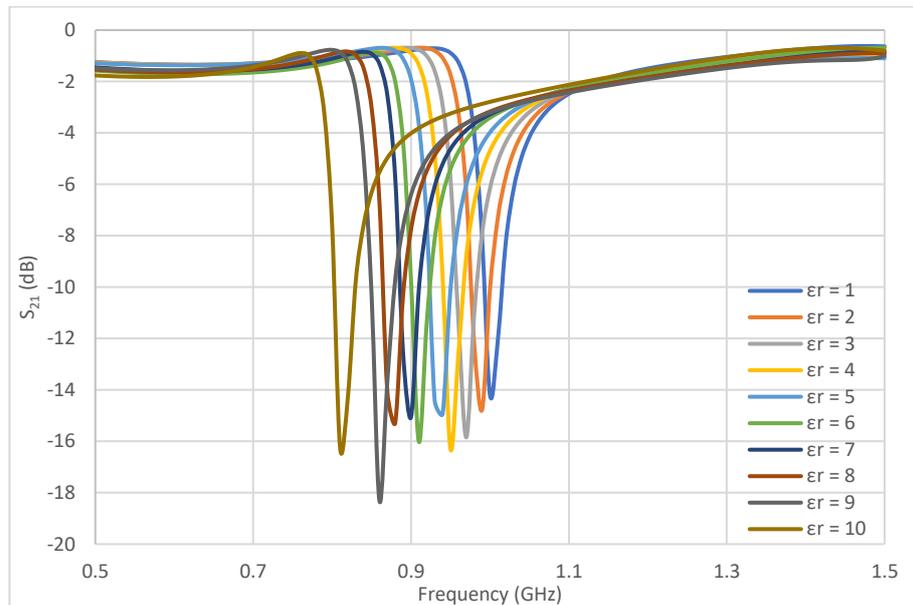
Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan SUT berukuran 10x10x1 mm dengan permitivitas (ϵ_r) 1 sampai dengan 10 untuk mengetahui parameter FDR, akurasi rata-rata, dan NS.



Gambar 10. Parameter S_{21} Model 1 pada sensor diletakan SUT

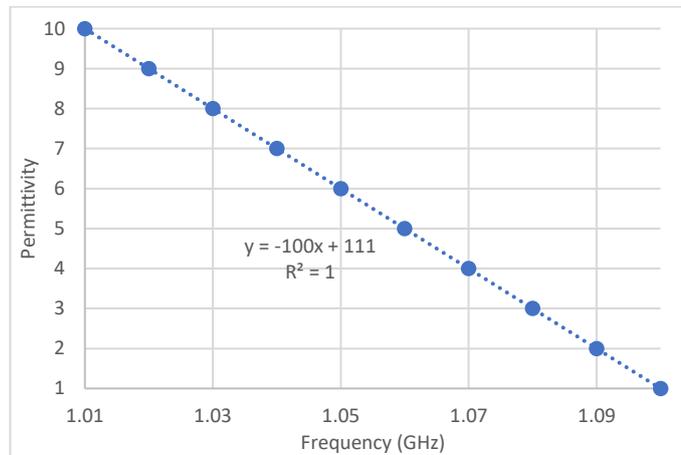


Gambar 11. Parameter S_{21} Model 2 pada sensor diletakan SUT

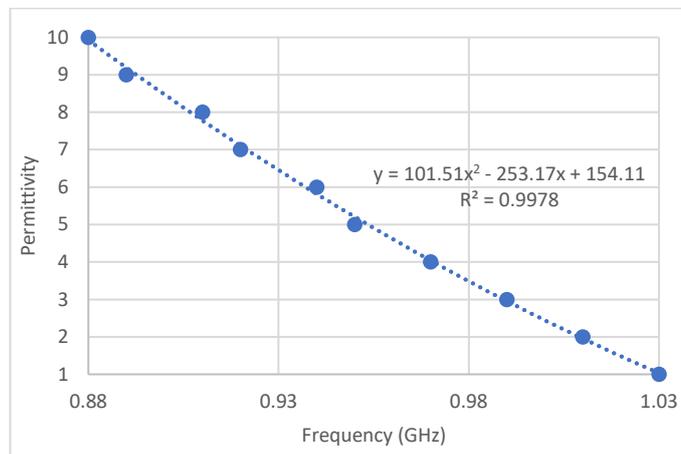


Gambar 12. Parameter S_{21} Model 1 pada sensor diletakan SUT

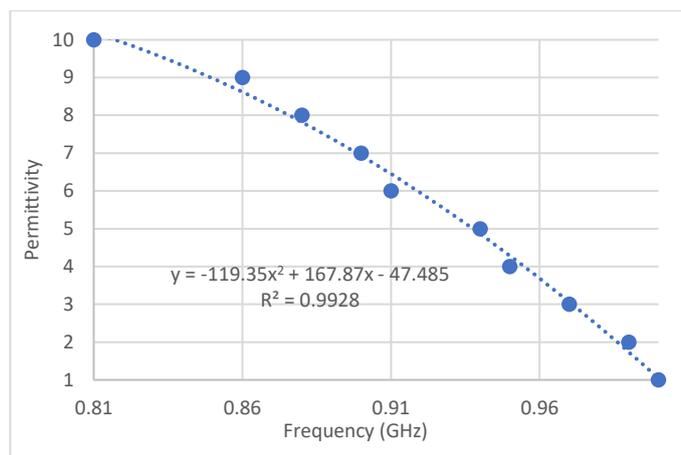
Pada **gambar 10** sampai dengan **gambar 12** merupakan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS. Grafik S_{21} menunjukkan respon sensor gelombang mikro terhadap SUT yang diletakan di atasnya. Pada model 1 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 1.1 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 1.01 GHz, Pada model 2 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 1.03 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.88 GHz, dan Pada model 3 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 1 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.81 GHz. Sehingga dari hasil simulasi diperoleh grafik korelasi antara frekuensi resonansi dan ϵ_r .



Gambar 13. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Model 1



Gambar 14. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Model 2



Gambar 15. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Model 3

Berdasarkan grafik korelasi frekuensi resonansi dan ϵ_r pada **gambar 13** sampai dengan **gambar 15** maka dapat diketahui selisih antara ϵ_r

referensi dan ϵ_r yang dikalkulasi menggunakan persamaan polinomial yang menunjukkan akurasi pada pengembangan model sensor gelombang mikro. Kemudian dengan menggunakan persamaan 4 dan 5 dapat diketahui nilai FDR dan NS. Pada **tabel 4** merupakan tabel rekapitulasi performa pengembangan model sensor gelombang mikro.

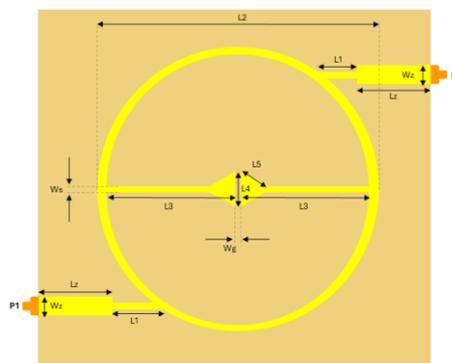
Tabel 4. Rekapitulasi Performa Pengembangan Model Sensor Gelombang Mikro

Development Models	FDR	Average Accuracy	Normalized Sensitivity
Model 1	0.010	100%	0.101%
Model 2	0.019	97.75%	0.180%
Model 3	0.016	95.46%	0.235%

Pada **tabel 4** menunjukkan bahwa terjadi peningkatan pada nilai NS yang semula pada model 1 bernilai 0.101% menjadi 0.235% pada model 3. Namun kenaikan nilai NS disertai dengan penurunan nilai rata-rata akurasi yang semula pada model 1 bernilai 100% menjadi 95.46% pada model 3. sehingga akan dilakukan iterasi pada ukuran *sensing area* resonator model 3 untuk meningkatkan rata-rata akurasi pada sensor gelombang mikro.

4. Iterasi Ukuran Struktur Resonator

Iterasi dilakukan pada pengembangan model ketiga pada ukuran struktur resonator dilakukan pada bentuk *back-arrow* yang merupakan *sensing area* pada sensor gelombang mikro.



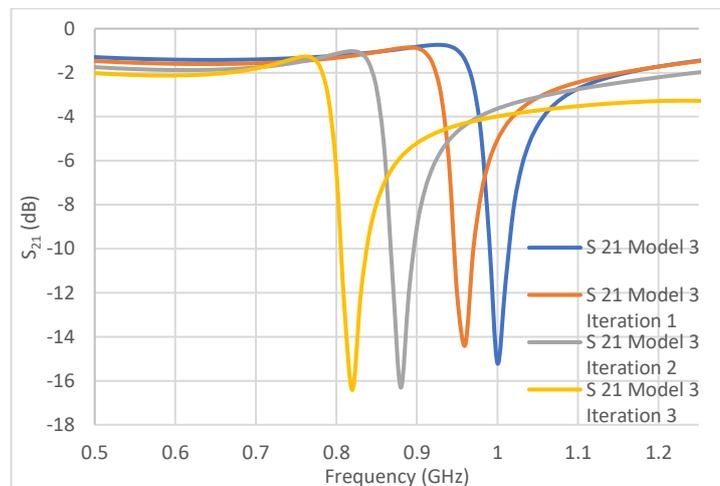
Gambar 16. Detail Dimensi Iterasi Sensor Gelombang Mikro

Ukuran setiap tahapan iterasi dimensi struktur resonator berdasarkan gambar 16 dapat dilihat pada tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5. Detail Dimensi Iterasi Sensor Gelombang Mikro

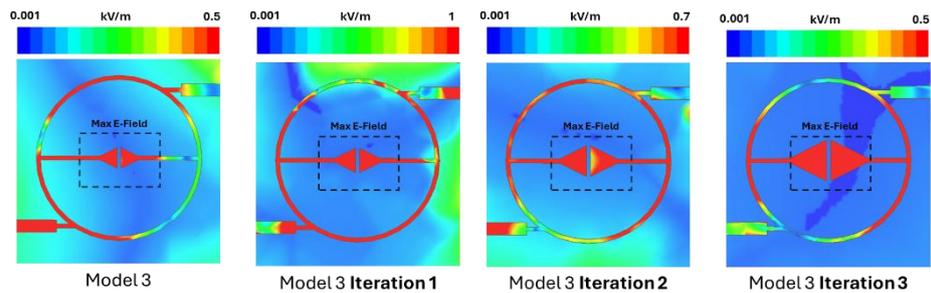
Parameter	Dimension (mm)			
	Model 3	Model 3 Iteration 1	Model 3 Iteration 2	Model 3 Iteration 3
Wz	3	3	3	3
Lz	10	10	10	10
L1	4.5	4.5	4.5	4.5
L2	40	40	40	40
L3	14.5	14.5	14.5	14.5
L4	5	6	7.5	10
L5	4	5	6.5	9
Ws	1	1	1	1
Wg	1	1	1	1

Setelah dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS terhadap ukuran resonator pada sensor gelombang mikro yang sudah diiterasi maka diperoleh parameter frekuensi resonansi dan *E-Field* tertinggi yang akan digunakan sebagai *sensing area*.



Gambar 17. Frekuensi Resonansi Iterasi Sensor Gelombang Mikro

Pada **gambar 17** menunjukkan pergeseran frekuensi resonansi pada saat dilakukan iterasi pada ukuran *sensing area* sensor gelombang mikro. Pada kondisi awal dari pengembangan model 3 frekuensi resonansi berada pada 1 GHz, pada iterasi 1 0.96 GHz, iterasi 2 0.88 GHz, dan pada iterasi 3 0.82 GHz.

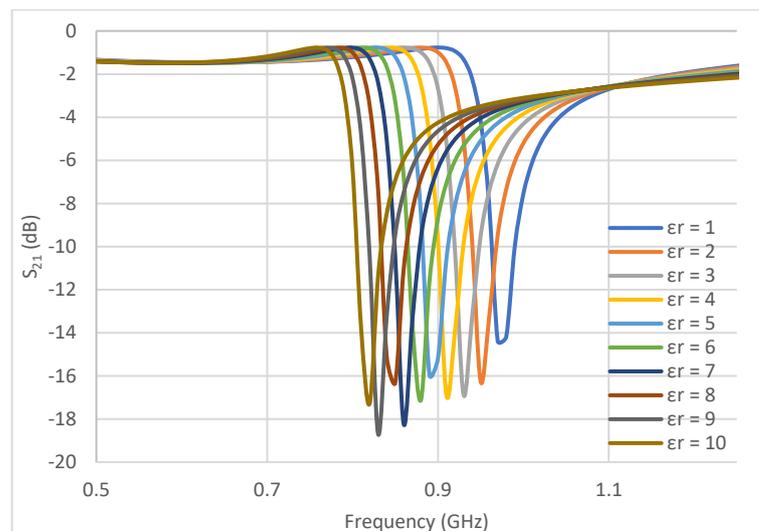


Gambar 18. *E-Field* Iterasi Sensor Gelombang Mikro

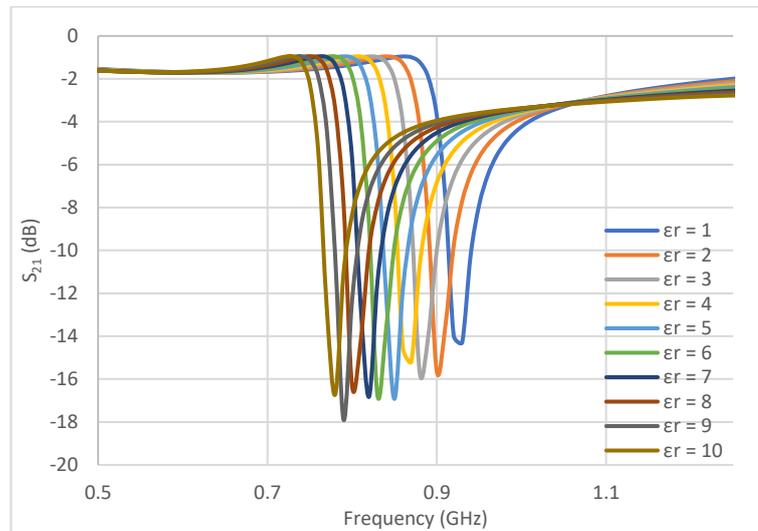
Pada **gambar 18** menunjukkan bahwa bagian resonator yang menjadi *sensing area* tidak berubah setelah dilakukan iterasi pada ukurannya.

5. Analisis Performa Iterasi Sensor Gelombang Mikro

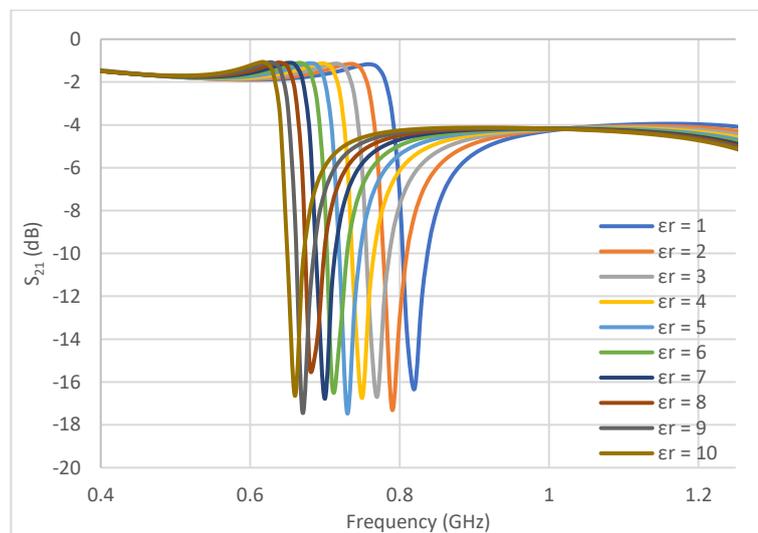
Untuk mengetahui performa dari setiap tahapan itersai model akan dilakukan simulasi dengan meletakan SUT pada *sensing area* sensor gelombang mikro untuk mengetahui parameter FDR, akurasi rata-rata, dan NS.



Gambar 19. Parameter S_{21} Iterasi 1 pada sensor diletakan SUT



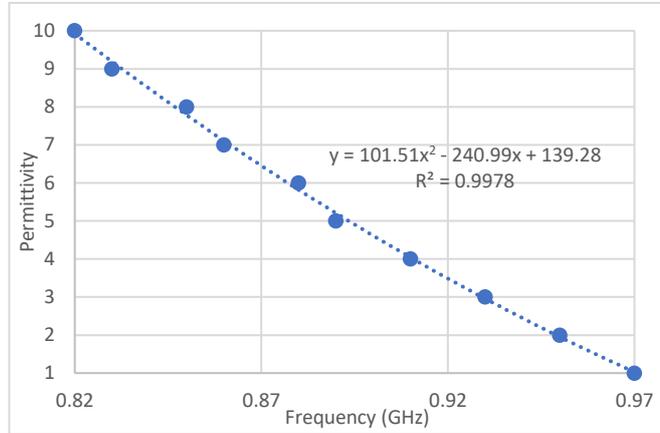
Gambar 20. Parameter S_{21} Iterasi 2 pada sensor diletakan SUT



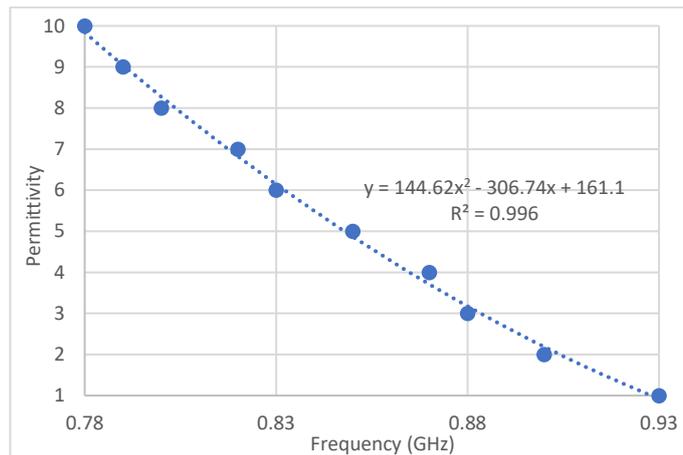
Gambar 21. Parameter S_{21} Iterasi 3 pada sensor diletakan SUT

Pada **gambar 19** sampai dengan **gambar 21** merupakan hasil Grafik S_{21} dari simulasi perangkat lunak HFSS yang menunjukkan respon sensor gelombang mikro setelah diiterasi terhadap SUT yang diletakan di atasnya. pada iterasi 1 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.97 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.82 GHz, pada iterasi 2 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.93 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.78 GHz, dan pada iterasi 3 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.82 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi

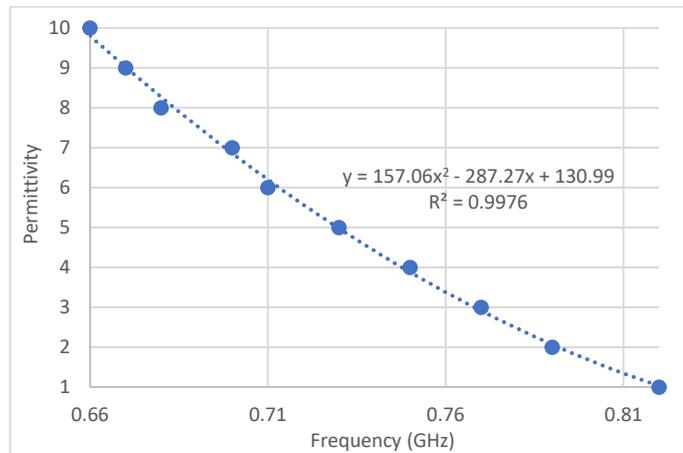
resonansi berada pada 0.66 GHz. Sehingga dari hasil simulasi diperoleh grafik korelasi antara frekuensi resonansi dan ϵ_r .



Gambar 22. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 1



Gambar 23. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 2



Gambar 24. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 3

Berdasarkan grafik korelasi frekuensi resonansi dan ϵ_r pada **gambar 22** sampai dengan **gambar 24** maka dapat diketahui selisih antara ϵ_r referensi dan ϵ_r yang dikalkulasi menggunakan persamaan polinomial yang menunjukkan akurasi pada iterasi sensor gelombang mikro. Kemudian dengan menggunakan persamaan 4 dan 5 dapat diketahui nilai FDR dan NS. Pada **tabel 6** merupakan tabel rekapitulasi performa iterasi sensor gelombang mikro

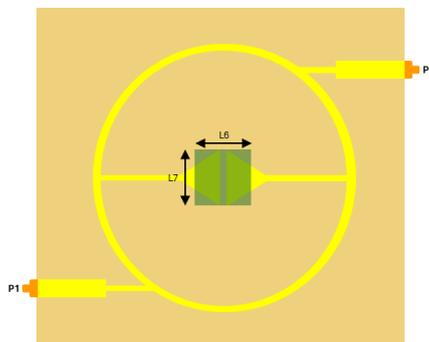
Tabel 6. Rekapitulasi Performa Iterasi Sensor Gelombang Mikro

Development Models	FDR	Average Accuracy	Normalized Sensitivity
Model 3	0.016	95.46%	0.235%
Model 3 Iteration 1	0.019	97.78%	0.191%
Model 3 Iteration 2	0.021	95.65%	0.199%
Model 3 Iteration 3	0.022	97.59%	0.241%

Pada **tabel 6** menunjukkan kenaikan pada nilai rata-rata akurasi dan NS yang semula pada pengembangan model 3 bernilai 95.46% dan 0.235% menjadi 97.59% dan 0.241% pada iterasi 3. Sehingga diperoleh desain resonator sensor gelombang mikro yang paling optimal adalah model 3 iterasi 3.

6. Iterasi Ukuran SUT

Iterasi pada ukuran SUT dilakukan untuk mengetahui dimensi SUT yang paling optimal jika diletakan di atas *sensing area* sensor gelombang mikro.



Gambar 25. Detail Dimensi Iterasi SUT

Ukuran setiap tahapan iterasi berdasarkan **gambar 25** dapat dilihat pada **tabel 7** sebagai berikut:

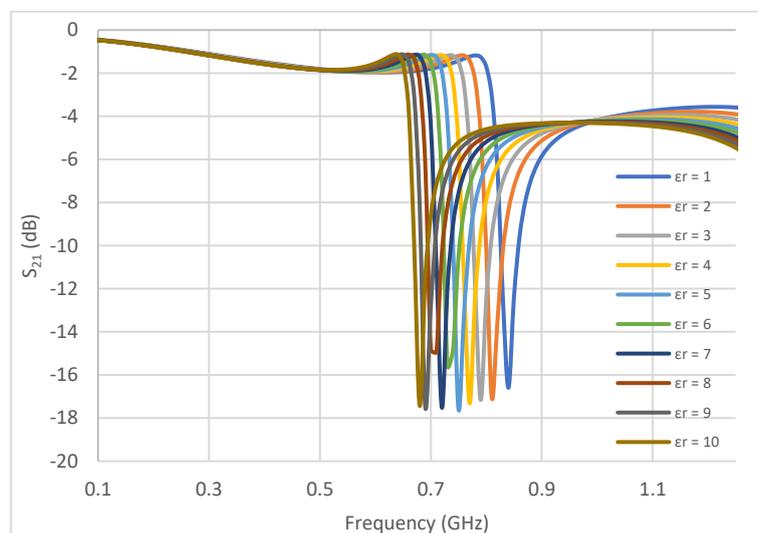
Tabel 7. Detail Dimensi Iterasi SUT

Parameter	Dimension (mm)			
	SUT	SUT Iteration 1	SUT Iteration 2	SUT Iteration 3
L6	10	15	20	25
L7	10	10	10	10

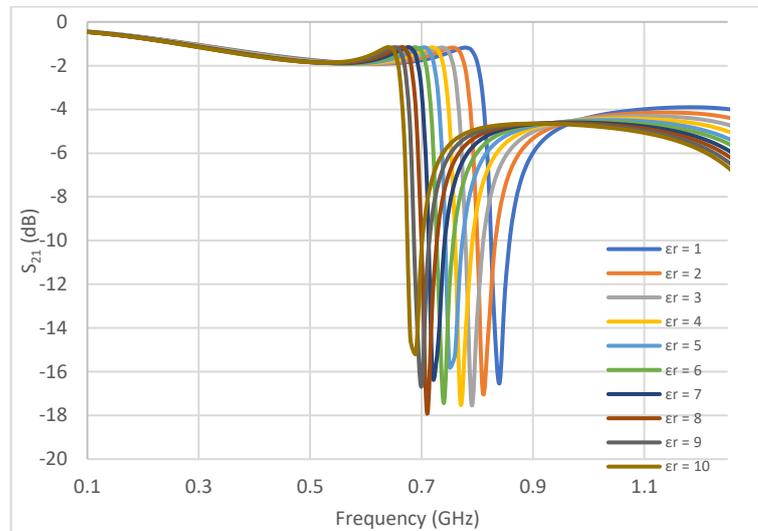
Iterasi dilakukan sebanyak 3 kali iterasi pada dimensi L6 dari kondisi awal sebesar 10 mm menjadi 15 mm pada iterasi 1, 20 mm pada iterasi 2, dan 25 mm pada iterasi 3. Dengan dimensi L7 = 10 mm disetiap tahapan iterasi.

7. Analisis Iterasi Ukuran SUT

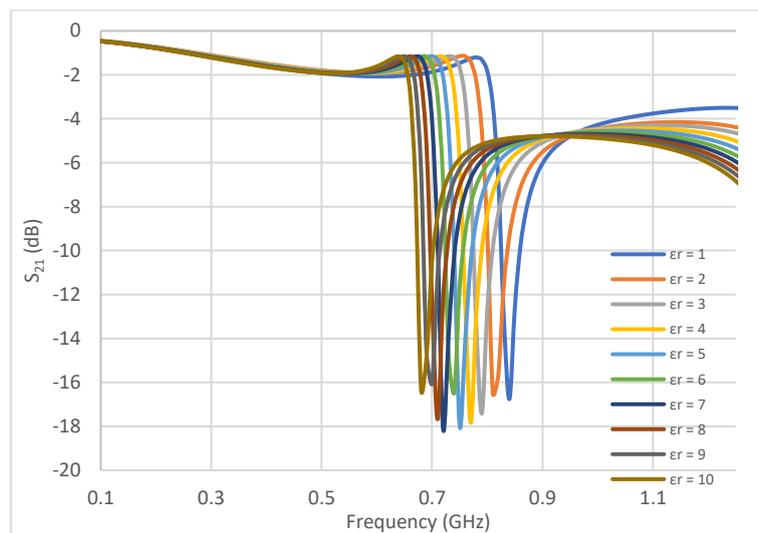
Untuk mengetahui dimensi SUT yang paling optimal maka perlu diketahui perbandingan parameter FDR, akurasi rata-rata, dan NS pada setiap proses iterasi.



Gambar 26. Parameter S_{21} SUT Iterasi 1



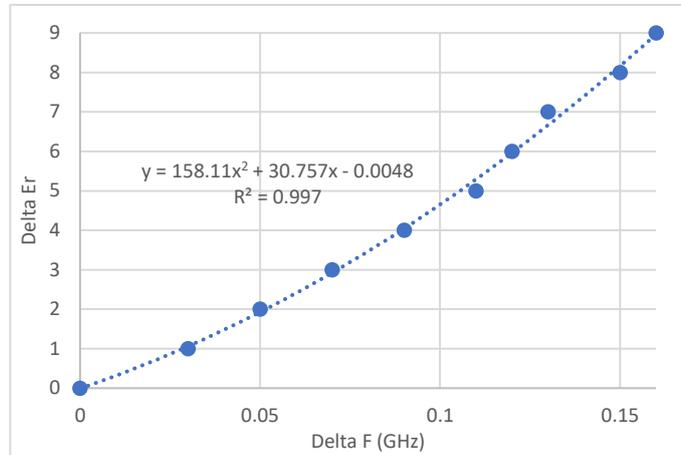
Gambar 27. Parameter S_{21} SUT Iterasi 2



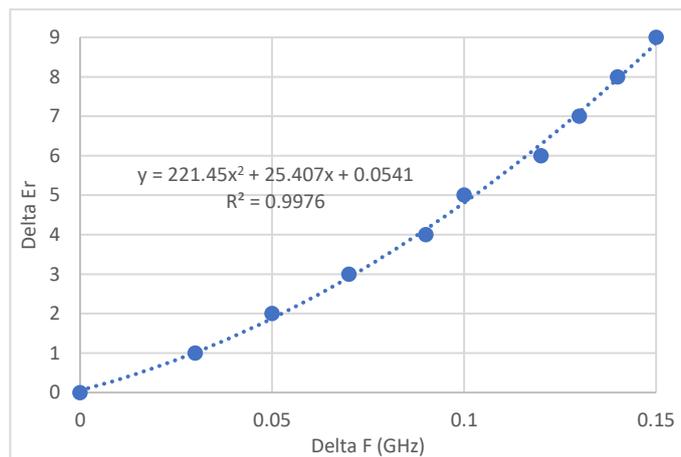
Gambar 28. Parameter S_{21} SUT Iterasi 3

Pada **gambar 26** sampai dengan **gambar 28** merupakan hasil Grafik S_{21} dari simulasi perangkat lunak HFSS yang menunjukkan respon sensor gelombang mikro setelah terhadap SUT yang diiterasi dimensinya. Pada iterasi 1 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.84 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.68 GHz, pada iterasi 2 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.84 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi resonansi berada pada 0.69 GHz, dan pada iterasi 3 pada saat $\epsilon_r = 1$ frekuensi resonansi berada pada 0.84 GHz hingga $\epsilon_r = 10$ frekuensi

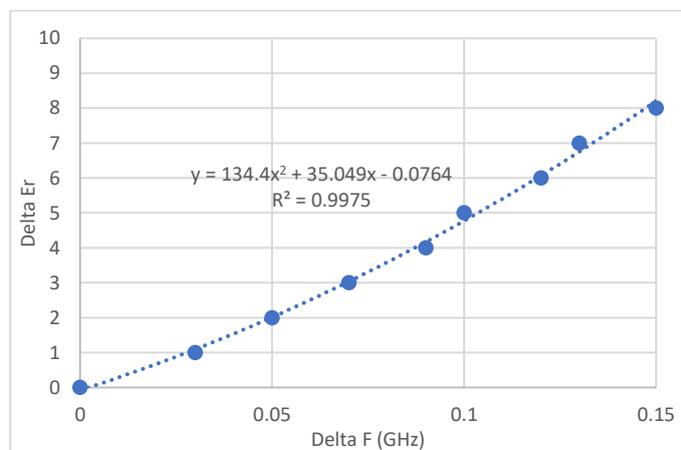
resonansi berada pada 0.68 GHz. Sehingga dari hasil simulasi diperoleh grafik korelasi antara frekuensi resonansi dan ϵ_r .



Gambar 29. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 1 SUT



Gambar 30. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 2 SUT



Gambar 31. Grafik Korelasi Fr dan ϵ_r Iterasi 3 SUT

Berdasarkan grafik korelasi frekuensi resonansi dan ϵ_r pada **gambar 29** sampai dengan **gambar 31** maka dapat diketahui selisih antara ϵ_r referensi dan ϵ_r yang dikalkulasi menggunakan persamaan polinomial yang menunjukkan akurasi sensor gelombang mikro terhadap SUT yang diiterasi. Kemudian dengan menggunakan persamaan 4 dan 5 dapat diketahui nilai FDR dan NS. Pada **tabel 8** merupakan tabel rekapitulasi performa sensor gelombang mikro terhadap iterasi SUT.

Tabel 8. Rekapitulasi Performa Sensor Gelombang Mikro Terhadap Iterasi SUT

Sample	FDR	Average Accuracy	Normalized Sensitivity
SUT	0.022	97.59%	0.241%
SUT Iteration 1	0.022	97.98%	0.235%
SUT Iteration 2	0.022	97.51%	0.220%
SUT Iteration 3	0.022	97.26%	0.235%

Pada **tabel 8** menunjukkan kenaikan pada nilai rata-rata akurasi dan NS yang semula pada model 3 iterasi 3 bernilai 97.59% dan 0.241% menjadi 97.98% dan 0.235% pada iterasi 1. Sehingga diperoleh dimensi SUT yang paling optimal adalah SUT iterasi 1 dengan dimensi 10x15 mm.

8. Iterasi Ketebalan SUT

Untuk mengetahui batas ketebalan SUT maka dilakukan iterasi terhadap ukuran ketebalan SUT dengan $\epsilon_r = 1$. Pada **gambar 32** menunjukkan posisi SUT pada saat diletakan diatas sensor gelombang mikro detail dimensi dilambangkan dengan T.



Gambar 32. Detail Dimensi Iterasi Ketebalan SUT

Ukuran setiap tahapan iterasi ketebalan SUT berdasarkan gambar 31 dapat dilihat pada **tabel 9** sebagai berikut:

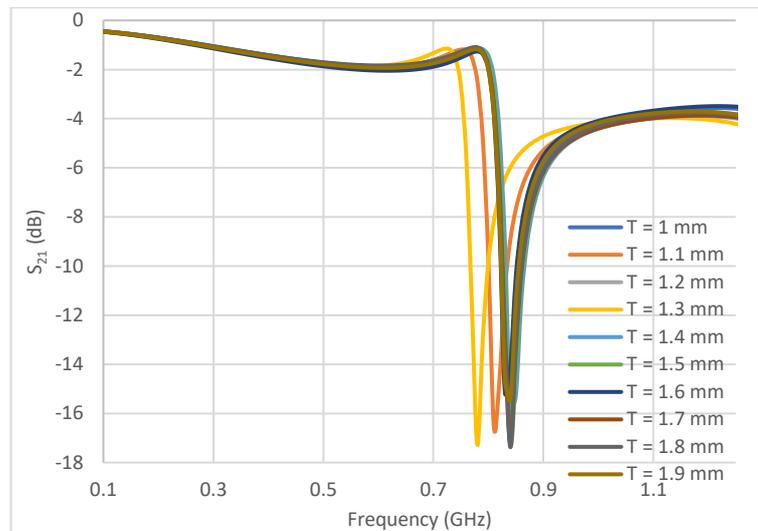
Tabel 9. Detail Dimensi Iterasi Ketebalan SUT

Parameter	Dimension (mm)									
	SUT	SUT Iteration 1	SUT Iteration 2	SUT Iteration 3	SUT Iteration 4	SUT Iteration 5	SUT Iteration 6	SUT Iteration 7	SUT Iteration 8	SUT Iteration 9
T	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9

Iterasi dilakukan sebanyak 9 kali iterasi pada ketebalan T dari kondisi awal sebesar 1 mm hingga iterasi 9 menjadi 1.9 mm.

9. Analisis Iterasi Ketebalan SUT

Melalui simulasi perangkat lunak HFSS maka di ketahui pengaruh perbedaan ketebalan SUT terhadap frekuensi resonansi.

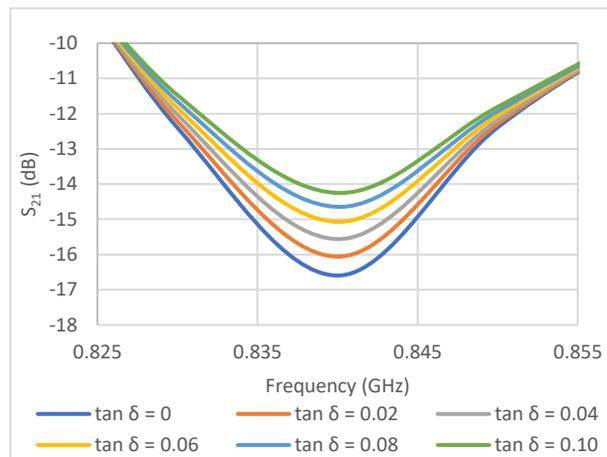


Gambar 33. Frekuensi Resonansi Iterasi Ketebalan SUT

Pada **gambar 33** menunjukkan pada kondisi awal pada saat T = 1 mm frekuensi resonansi berada pada frekuensi 0.84 GHz dan memberi respon pada saat ketebalan SUT diiterasi. Sensor gelombang mikro berhenti memberikan respon pada saat T = 1.9 mm yang menunjukkan batas ketebalan SUT yang dapat dideteksi oleh sensor gelombang mikro berukuran T = 1.8 mm.

10. Iterasi nilai *Dielectric* $\tan \delta$ pada SUT

Untuk mengetahui respon sensor gelombang mikro terhadap perbedaan *Dielectric* $\tan \delta$ pada SUT maka dilakukan iterasi dengan mengiterasi parameter $\tan \delta$.



Gambar 34. Respon Frekuensi Resonansi terhadap $\tan \delta$

Pada **gambar 34** merupakan grafik respon frekuensi resonansi terhadap $\tan \delta$, setiap kenaikan nilai $\tan \delta$ pada SUT menyebabkan koefisien transmisi bergerak ke arah yang lebih rendah. Secara detail dapat dilihat pada **tabel 10**.

Tabel 10. Respon Frekuensi Resonansi terhadap $\tan \delta$

$\tan \delta$	S ₂₁ (dB)
0	-16.597
0.02	-16.059
0.04	-15.562
0.06	-15.071
0.08	-14.646
0.1	-14.251

Dari keseluruhan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS 15.0 menunjukkan bahwa perancangan sensor gelombang sudah berhasil untuk mengarakterisasi material padat 1-10 dengan performansi FDR, rata-rata akurasi, dan NS sebesar 0.022, 97.98%, dan 0.235%. tahapan selanjutnya adalah memfabrikasi sensor gelombang mikro dan melakukan validasi di laboratorium.

8. Rencana Pelaksanaan Kegiatan

No	Kegiatan	Nov 2024	Des 2024	Jan 2025	Feb 2025	Mar 2025	Apr 2025	Mei 2025	Jun 2025
1	Penyusunan Proposal								
	a. Menyusun Proposal	■	■						
	b. Seminar Proposal			■					
	c. Perbaiki Proposal			■					
2	Pelaksanaan Tesis								
	a. Desain Percobaan				■	■	■	■	
	b. Percobaan/Hasil				■	■	■	■	
	c. Pembahasan Hasil				■	■	■	■	
	d. Penulisan Jurnal dan Publikasi				■	■	■	■	
	e. Penulisan Draft Tesis				■	■	■	■	
	f. Bimbingan Tesis				■	■	■	■	
3	Sidang Tesis								
	a. Persiapan Administrasi							■	
	b. Penyerahan Draft Tesis kepada Tim Penguji							■	
	c. Sidang Tesis								■
	d. Perbaiki, Evaluasi Akhir, dan Penyerahan Tesis								■

9. Daftar Referensi

- [1] N. Leibl, K. Haupt, C. Gonzato, and L. Duma, “Molecularly imprinted polymers for chemical sensing: A tutorial review,” 2021, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/chemosensors9060123.
- [2] H. M. Fahmy, H. I. Helmy, F. E. Ali, N. E. Motei, and M. S. Fathy, “Industrial Applications of Sensors,” in *Handbook of Nanosensors*, Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–34. doi: 10.1007/978-3-031-16338-8_55-1.
- [3] S. Sharma, A. Verma, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and S. Ogata, “Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC’s) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC’s) for multifaceted sensing applications,” Sep. 01, 2023, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300.
- [4] M. Rihan, A. Zappone, S. Buzzi, G. Fodor, and M. Debbah, “Passive Versus Active Reconfigurable Intelligent Surfaces for Integrated Sensing and Communication: Challenges and Opportunities,” *IEEE Netw*, vol. 38, no. 3, pp. 218–226, May 2024, doi: 10.1109/MNET.2023.3321542.
- [5] A. A. Al-Behadili, I. A. Mocanu, N. Codreanu, and M. Pantazica, “Modified split ring resonators sensor for accurate complex permittivity measurements of solid dielectrics,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 23, pp. 1–18, Dec. 2020, doi: 10.3390/s20236855.
- [6] J. Yeo and J. I. Lee, “High-sensitivity microwave sensor based on an interdigital-capacitor-shaped defected ground structure for permittivity characterization,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030498.
- [7] C. Wang *et al.*, “High-Accuracy Complex Permittivity Characterization of Solid Materials Using Parallel Interdigital Capacitor-Based Planar Microwave Sensor,” *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 5, pp. 6083–6093, Mar. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3041014.

- [8] M. Saadat-Safa, V. Nayyeri, M. Khanjarian, M. Soleimani, and O. M. Ramahi, "A CSRR-Based Sensor for Full Characterization of Magneto-Dielectric Materials," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 67, no. 2, pp. 806–814, Feb. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2018.2882826.
- [9] Z. Guo, Y. Wang, S. Ke, X. Su, J. Ren, and H. Chen, "1D Photonic Topological Insulators Composed of Split Ring Resonators: A Mini Review," *Advanced Physics Research*, vol. 3, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.1002/apxr.202300125.
- [10] Y. Gong, G. Liu, S. Jiang, J. Yu, and T. Qi, "A DGS-CPW Microwave Sensor Loaded With SRR for Solid Material Measurement," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 73, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3446651.
- [11] S. Alam *et al.*, "Dual Functional Liquid Displacement and Angular Detection Based on Band Stop Response Microwave Sensor," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 94861–94869, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3425159.
- [12] C. H. Joseph, D. Mencarelli, L. Pierantoni, P. Russo, and L. Zappelli, "Efficient Equivalent Circuits Model for Electric-LC Resonators in Periodic and Closed Waveguides," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 92281–92294, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3422486.
- [13] J. Muñoz-Enano, P. Vélez, M. Gil, and F. Martín, "Planar microwave resonant sensors: A review and recent developments," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/app10072615.
- [14] H. N. Morales-Lovera, J. L. Olvera-Cervantes, A. E. Perez-Ramos, A. Corona-Chavez, and C. E. Saavedra, "Microstrip sensor and methodology for the determination of complex anisotropic permittivity using perturbation techniques," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-06259-8.
- [15] R. Gao *et al.*, *Epitaxial titanium nitride microwave resonators: Structural, chemical, electrical, and microwave properties*. 2021. doi: 10.48550/arXiv.2111.04227.

- [16] D. Mondal, N. Tiwari, and M. J. Akhtar, *Microwave Assisted Non-Invasive Microfluidic Biosensor for Monitoring Glucose Concentration*. 2018. doi: 10.1109/ICSENS.2018.8589919.
- [17] X. Han *et al.*, “Microfluidic Microwave Sensor Loaded with Star-Slotted Patch for Edible Oil Quality Inspection,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, Sep. 2022, doi: 10.3390/s22176410.
- [18] M. Z. B. Chowdhury, M. T. Islam, A. Alzamil, M. S. Soliman, and M. Samsuzzaman, “A tunable star-shaped highly sensitive microwave sensor for solid and liquid sensing,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 86, pp. 644–662, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2023.12.001.
- [19] S. Alam, Z. Zakaria, I. Surjati, N. A. Shairi, M. Alaydrus, and T. Firmansyah, “Dual-Band Independent Permittivity Sensor Using Single-Port with a Pair of U-Shaped Structures for Solid Material Detection,” *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 16, pp. 16111–16119, Aug. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3191345.
- [20] R. A. Alahnomi, Z. Zakaria, E. Ruslan, S. R. Ab Rashid, and A. A. Mohd Bahar, “High-Q sensor based on symmetrical split ring resonator with spurlines for solids material detection,” *IEEE Sens J*, vol. 17, no. 9, pp. 2766–2775, May 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2682266.
- [21] A. J. A. Al-Gburi, N. A. Rahman, Z. Zakaria, and M. Palandoken, “Detection of Semi-Solid Materials Utilizing Triple-Rings CSRR Microwave Sensor,” *Sensors*, vol. 23, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/s23063058.
- [22] S. Agarwal and M. C. Garg, “Design of an Accurate, Planar, Resonant Microwave Sensor for Testing a Wide Range of Liquid Samples,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/electronics13224510.
- [23] A. Ebrahimi, J. Scott, and K. Ghorbani, “Differential sensors using microstrip lines loaded with two split-ring resonators,” *IEEE Sens J*, vol. 18, no. 14, pp. 5786–5793, Jul. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2840691.

- [24] N. A. Rahman *et al.*, “High quality factor using nested complementary split ring resonator for dielectric properties of solids sample,” *Appl Comput Electromagn Soc J*, vol. 35, no. 10, pp. 1222–1227, Oct. 2020, doi: 10.47037/2020.ACES.J.351016.
- [25] I. Royo, R. Fernández-García, and I. Gil, “Microwave Resonators for Wearable Sensors Design: A Systematic Review,” Nov. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s23229103.
- [26] Z. Shaterian and M. Mrozowski, “Multifunctional Bandpass Filter/Displacement Sensor Component,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 27012–27019, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3258545.
- [27] T. H. Lee, J. J. Laurin, and K. Wu, “Reconfigurable Filter for Bandpass-to-Absorptive Bandstop Responses,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 6484–6495, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963710.
- [28] S. Y. Jang and J. R. Yang, “Double Split-Ring Resonator for Dielectric Constant Measurement of Solids and Liquids,” *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 2, pp. 122–128, 2022, doi: 10.26866/jees.2022.2.r.68.
- [29] A. J. A. Al-Gburi, Z. Zakaria, N. Abd Rahman, S. Alam, and M. A. M. Said, “A Compact and Low-Profile Curve-Feed Complementary Split-Ring Resonator Microwave Sensor for Solid Material Detection,” Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/mi14020384.
- [30] S. Alam *et al.*, “UHF-Band Solid Sensor Based on Tweaking Electric Field Coupled Resonator for Material Characterization,” *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 126, pp. 11–18, 2024, doi: 10.2528/PIERM24020201.