

**DESAIN METAMATERIAL ANTI – RADAR BERBASIS
*FREQUENCY SELECTIVE SURFACE (FSS)***

SKRIPSI



Oleh:
Jujun Junaedi

2203025025

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
JAKARTA
2026**

**DESAIN METAMATERIAL ANTI – RADAR BERBASIS
*FREQUENCY SELECTIVE SURFACE (FSS)***

SKRIPSI

Disusun untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik Elektro



Oleh:
Jujun Junaedi

2203025025

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
JAKARTA
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

DESAIN METAMATERIAL ANTI – RADAR BERBASIS *FREQUENCY SELECTIVE SURFACE (FSS)*

SKRIPSI

Dibuat untuk Memenuhi Persyaratan Kelulusan Sarjana Teknik

Oleh:

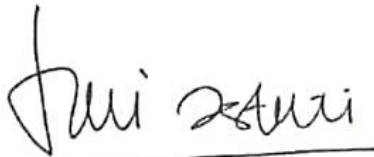
Jujun Junaedi

2203025025

Telah diperiksa dan disetujui untuk diajukan ke Sidang Ujian Skripsi Program
Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri dan Informatika UHAMKA

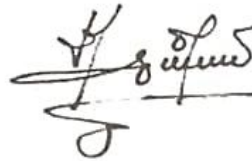
Tanggal, 17 Juli 2026

Pembimbing-1



Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T.
NIDN. 0323027401

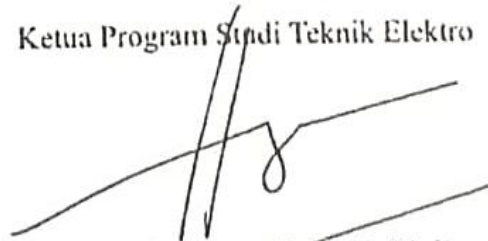
Pembimbing-2



Mohammad Khoirul Anam, S.Si., Ph.D.
NIP. 199006112014011001

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0303097006

HALAMAN PENGESAHAN

DESAIN METAMATERIAL ANTI – RADAR BERBASIS *FREQUENCY SELECTIVE SURFACE (FSS)*

SKRIPSI

Oleh:

Jujun Junaedi

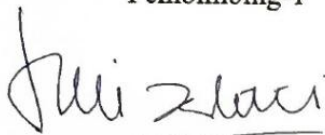
2203025025

Telah diuji dan dinyatakan lulus dalam Sidang Ujian Skripsi Program Studi

Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri dan Informatika UHAMKA

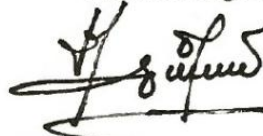
Tanggal, 11 Agustus 2026

Pembimbing-1



Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T.
NIDN. 0323027401

Pembimbing-2



Mohammad Khoirul Anam, S.Si., Ph.D.
NIP. 199006112014011001

Penguji-1



Ir. Kun Fayakun, S.T., MT
NIDN. 0305125701

Penguji-2



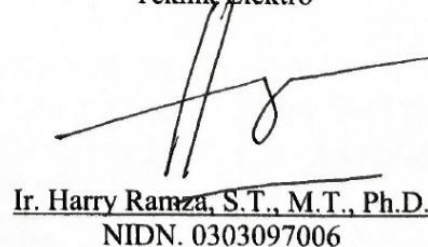
Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0303097006

Mengesahkan,
Dekan
Fakultas Teknologi Industri dan
Informatika UHAMKA



Dr. Ir. Dan Mugisidi, S.T., M.Si., IPP.
NIDN. 0301126901

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D.
NIDN. 0303097006

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya, yang membuat pernyataan

Nama : Jujun Junaedi
NIM : 2203025025
Judul Skripsi : Desain Metamaterial Anti – Radar Berbasis *Frequency Selective Surface* (Fss)

Menyatakan bahwa, skripsi ini merupakan karya saya sendiri (ASLI) dan isi dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademis di suatu institusi pendidikan tinggi mana pun, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan/atau diterbitkan oleh orang lain, KECUALI yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Segala sesuatu yang terkait dengan naskah dan karya yang telah dibuat adalah menjadi tanggung jawab saya pribadi.

Jakarta, 11 Agustus 2026



METERAI
TEMPEL
2F98AOX136953611

Jujun Junaedi

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Desain Metamaterial Anti Radar Berbasis *Frequency Selective Surface (FSS)***" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, sudah sepatutnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Prof. Dr. H. Gunawan Suryoputro, M.Hum. selaku rektor Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka.
2. Dr. Dan Mugisidi, ST., M.Si. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri dan Informatika Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka.
3. Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka.
4. Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 1 yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan arahan, bimbingan, serta masukan selama proses penyusunan skripsi.
5. Mohammad Khoirul Anam, S.Si., Ph.D. selaku pembimbing 2 yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam memberikan arahan, bimbingan, serta masukan selama proses penyusunan skripsi.
6. Ir. Kun Fayakun, ST., MT selaku penguji 1 yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan saran terkait skripsi ini.
7. Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D. selaku penguji 2 yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan saran terkait skripsi ini.
8. Rosalina, S.T., M.T selaku dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan motivasi dan dukungan.

9. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka yang telah memberikan ilmu dan pelayanan selama masa perkuliahan.
10. Kedua orang tua tercinta, yang selalu menjadi sumber kekuatan terbesar bagi penulis. Segala doa yang tidak pernah putus, kasih sayang yang tidak pernah berkurang, serta pengorbanan yang begitu besar selama penulis menempuh pendidikan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari perjalanan ini. Kepercayaan yang diberikan, bahkan ketika penulis sendiri sempat meragukan kemampuan diri, menjadi alasan untuk terus bertahan dan menyelesaikan apa yang telah dimulai. Tidak ada kata yang cukup untuk menggambarkan besarnya perjuangan dan pengorbanan yang telah diberikan. Skripsi ini bukan hanya hasil dari kerja keras penulis, tetapi juga merupakan bagian dari doa, harapan, dan perjuangan kedua orang tua. Semoga pencapaian ini dapat menjadi salah satu bentuk kebanggaan dan kebahagiaan bagi mereka, sekaligus menjadi awal bagi penulis untuk membalas segala kebaikan yang telah diberikan.
11. Teman-teman terdekat, yaitu Silmi Nurlaili Sugara, Sukria, Suci Nopianty, dan Rifki Meilinda, yang selalu hadir dalam berbagai keadaan, baik ketika penulis berada dalam kondisi bahagia maupun ketika menghadapi berbagai kesulitan selama proses penyusunan skripsi. Kebersamaan yang terjalin melalui setiap cerita, tawa, diskusi, bantuan, nasihat, hingga berbagai keluh kesah menjadi bagian yang membuat perjalanan panjang ini terasa lebih ringan. Kehadiran kalian bukan sekadar menjadi bagian dari masa perkuliahan, tetapi juga menjadi bagian dari cerita dan kenangan yang akan selalu penulis simpan.
12. Rino, seseorang yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan hidup penulis. Menjadi salah satu orang yang mengetahui perjalanan, perjuangan, cerita, dan berbagai proses yang penulis lalui setelah kedua orang tua. Kehadiran yang tidak hanya ada ketika keadaan baik, tetapi juga pada saat penulis berada di titik-titik yang tidak mudah untuk dilalui, menjadi sesuatu yang sangat berarti. Nasihat, perhatian, dukungan, serta kesediaan untuk

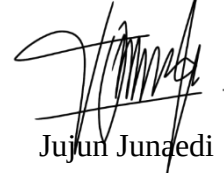
mendengarkan setiap cerita dan keluh kesah telah menjadi bagian dari perjalanan tersebut. Tidak semua hal dalam hidup dapat diceritakan kepada banyak orang, tetapi sebagian besar perjalanan itu telah diketahui dan dipahami. Kehadiran Rino menjadi bagian dari cerita yang mungkin tidak tertulis dalam lembaran skripsi ini, tetapi akan selalu menjadi bagian dari perjalanan penulis menuju titik ini.

13. Seseorang yang berinisial MWZ, yang telah hadir sebagai salah satu bagian penting dalam perjalanan penulis menyelesaikan skripsi ini. Perhatian, kesabaran, pengertian, dan dukungan yang diberikan menjadi penguat di tengah berbagai kesibukan, tekanan, dan rasa lelah selama proses penyusunan skripsi. Kehadiran sebagai tempat berbagi cerita, menyampaikan keluh kesah, dan menemukan kembali alasan untuk tersenyum ketika keadaan terasa berat memiliki arti tersendiri bagi penulis. Mungkin tidak semua hal mampu diungkapkan melalui kata-kata, tetapi keberadaan MWZ menjadi salah satu bagian dari perjalanan ini yang akan selalu penulis ingat. Dukungan dan kepercayaan yang diberikan turut mengantarkan penulis hingga mampu menyelesaikan perjalanan ini sampai akhir.
14. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro, yang telah menjadi bagian dari perjalanan panjang selama masa perkuliahan. Kebersamaan, diskusi, bantuan, canda tawa, serta berbagai perjuangan yang dilalui bersama menjadi bagian dari cerita yang tidak akan mudah dilupakan. Kita pernah berada di titik yang sama, sama-sama lelah, bingung, menghadapi tugas, praktikum, penelitian, revisi, hingga akhirnya sampai pada tahap penyelesaian skripsi. Berbagai suka dan duka yang telah dilalui bersama menjadi kenangan yang akan selalu memiliki tempat tersendiri dalam perjalanan masing-masing. Semoga segala perjuangan yang pernah kita lalui menjadi bekal untuk melangkah menuju masa depan, mengejar impian, dan menemukan keberhasilan dengan jalan kita masing-masing.
15. Diri penulis sendiri, yang telah memilih untuk tetap bertahan di tengah rasa lelah, keraguan, kegagalan, tekanan, dan berbagai tantangan yang datang

selama perjalanan ini. Ada banyak waktu ketika proses terasa begitu panjang, ada saat-saat ketika rasa ingin menyerah lebih besar daripada keinginan untuk melanjutkan, namun pada akhirnya langkah ini tetap diteruskan hingga sampai pada titik ini. Tidak semua perjuangan terlihat oleh orang lain, tidak semua air mata dan rasa lelah tertulis dalam lembaran skripsi ini. Namun, setiap langkah kecil, setiap usaha, setiap kegagalan, dan setiap kali kembali mencoba telah menjadi bagian dari perjalanan yang membentuk penulis. Skripsi ini menjadi bukti bahwa penulis pernah berada di titik yang sulit, tetapi memilih untuk tetap berjalan sampai akhirnya mampu menyelesaikan apa yang telah dimulai.

Terakhir penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang ikut terlibat dan tidak dapat disebutkan satu persatu. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki berbagai kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang.

Jakarta, 11 Agustus 2026



Jujun Junaidi

PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA (UHAMKA), saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama	: Jujun Junaedi
NIM	: 2203025025
Program Studi	: Teknik Elektro

Menyetujui, memberikan Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*non-exclusive royalty free right*) kepada Universitas Muhammadiyah Prof. DR.HAMKA (UHAMKA) atas karya ilmiah saya beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) yang berjudul:

Desain Metamaterial Anti – Radar Berbasis

Frequency Selective Surface (Fss)

Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Muhammadiyah Prof. DR HAMKA berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Segala sesuatu yang terkait dengan naskah dan karya yang telah dibuat adalah menjadi tanggung jawab saya pribadi.

Jakarta, 11 Agustus 2026



Jujun Junaedi

ABSTRAK

Pengembangan material penyerap gelombang radar memiliki peran penting dalam upaya menurunkan *Radar Cross Section* (RCS) pada aplikasi *stealth*, terutama di rentang frekuensi 5 – 7 GHz. Struktur metamaterial berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan karena dapat direkayasa untuk mencapai resonansi selektif dan *impedance matching* pada frekuensi target. Penelitian ini bertujuan merancang serta mengoptimasi *unit cell* FSS untuk mencapai performa penyerapan optimum pada 6 GHz, mengkaji pengaruh variasi geometris terhadap karakteristik elektromagnetik, serta memvalidasi desain melalui proses fabrikasi dan pengujian laboratorium. Rangkaian kegiatan penelitian meliputi perancangan *unit cell* berbahan *patch* tembaga dan substrat FR4, simulasi numerik menggunakan *periodic boundary condition* dan waveport excitation, optimasi dimensi resonator, fabrikasi PCB, serta pengujian menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan tiga konfigurasi pengukuran. Hasil simulasi menunjukkan resonansi pada 6,14 GHz dengan nilai S_{11} –14,68 dB, tingkat penyerapan 0,97, dan impedansi permukaan 533 Ω . Pengujian eksperimental memperlihatkan resonansi pada 5,82 GHz dengan S_{11} –33,10 dB, absorpsi 0,99, serta impedansi 377 Ω yang sesuai dengan impedansi ruang bebas. Perbedaan antara hasil komputasi dan pengukuran dipengaruhi oleh toleransi fabrikasi serta karakteristik material FR4. Secara keseluruhan, desain FSS yang dikembangkan menunjukkan efektivitas tinggi dalam menyerap gelombang radar pada pita 5 – 7 GHz dan memiliki potensi untuk diterapkan pada sistem *stealth* modern.

Kata kunci: Metamaterial, Frequency Selective Surface (FSS), Radar Absorbing Material (RAM), Radar Cross Section (RCS), Stealth.

ABSTRACT

The development of radar-absorbing materials plays an essential role in reducing the Radar Cross Section (RCS) for stealth applications, particularly within the 5 – 7 GHz frequency range. Metamaterial structures based on Frequency Selective Surfaces (FSS) offer a promising approach, as they can be engineered to achieve selective resonance and impedance matching at the target frequency. This study aims to design and optimize an FSS-based unit cell to obtain optimal absorption performance at 6 GHz, examine the influence of geometrical variations on electromagnetic characteristics, and validate the design through fabrication and laboratory measurements. The research activities include the design of a unit cell composed of a copper patch and FR4 substrate, numerical simulation using periodic boundary conditions and waveport excitation, dimensional optimization of the resonator, PCB fabrication, and measurement using a Vector Network Analyzer (VNA) under three test configurations. Simulation results show a resonance at 6.14 GHz with an S_{11} value of -14.68 dB, an absorption level of 0.97, and a surface impedance of $533\ \Omega$. Experimental measurements indicate a resonance at 5.82 GHz with S_{11} of -33.10 dB, an absorption of 0.99, and an impedance of $377\ \Omega$, which matches the free-space impedance. The discrepancies between computational and experimental results are influenced by fabrication tolerances and the characteristics of the FR4 substrate. Overall, the developed FSS structure demonstrates high effectiveness in absorbing radar waves within the 5–7 GHz band and shows strong potential for implementation in modern stealth systems.

Keywords: Metamaterial, Frequency Selective Surface (FSS), Radar Absorbing Material (RAM), Radar Cross Section (RCS), Stealth.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	ix
ABSTRAK	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	5
1.5 Manfaat.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2. DASAR TEORI.....	8
2.1 Sistem Radar dan Prinsip Kerjanya.....	8
2.2 <i>Radar Cross Section (RCS)</i>	9
2.3 <i>Radar Absorbing Material (RAM)</i>	9
2.4 Metamaterial Elektromagnetik	11

2.5 <i>Metasurface</i>	12
2.6 <i>Frequency Selective Surface (FSS)</i>	17
2.7 Impedansi Permukaan (<i>Surface Impedance</i>)	18
2.8 Kondisi Batas dan Metode Eksitasi	18
2.8.1 <i>Radiation Box</i>	19
2.8.2 PEC dan PMC	20
2.8.3 Wave Port	21
2.9 Parameter Hamburan (S – Parameter) dan Hubungan Penyerapan	21
2.9.1 <i>Absorption rate</i>	23
2.9.2 <i>Surface Impedance</i>	23
2.10 Penelitian Terdahulu	24
BAB 3. METODOLOGI	27
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian	27
3.2 Alur Penelitian	28
3.3 Perangkat yang Digunakan	29
3.3.1 Perangkat Lunak (software)	30
3.3.2 Perangkat Keras (software)	30
3.4 Spesifikasi dan Material Penelitian	33
3.5 Perancangan <i>Unit cell</i>	34
3.6 Dimensi <i>Unit cell</i>	35
3.6 Metode Simulasi Elektromagnetik	36
3.6.1 Pengaturan <i>Boundary</i> dan Lingkungan Simulasi	36
3.6.2 Metode Eksitasi	36
3.6 Parameter yang Dianalisis	37
3.7 Fabrikasi <i>Metasurface</i>	38

3.8 Metode Pengukuran Eksperimental.....	39
3.8.1 Konfigurasi Pengukuran S11	41
3.8.2 Konfigurasi Pengukuran S21	41
3.8.3 <i>Beamwidth</i> , Jarak, dan Ukuran <i>Metasurface</i>	42
3.8.4 Penggunaan Reflektor	43
3.9 Metode Analisis Data	43
3.10 Validasi dan Kriteria Keberhasilan	44
3.11 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	45
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Perancangan Awal Simulasi <i>Unit cell</i> dan Penyesuaian Dimensi.....	46
4.2 Fiksasi desain, material dan dimensi stuktur <i>unit cell</i>	49
4.2.1 Struktur dan Dimensi Geometrik.....	49
4.2.2 Pengaturan Radiation Box	51
4.2.3 <i>Boundary Conditions</i>	52
4.2.4 Eksitasi Gelombang Elektromagnetik	54
4.3 Hasil Simulasi yang Diperoleh.....	54
4.3.1 Parameter S11 (Koefisien Refleksi)	55
4.3.2 Parameter S21 (Koefisien Transmisi).....	56
4.3.4 <i>Absorption rate</i>	57
4.3.5 Surface Impedance (Impedansi Permukaan)	58
4.3.6 <i>E – field</i> (Medan Listrik)	59
4.3.7 <i>H – field</i> (Medan Magnet)	60
4.4 Pembentukan Single <i>Unit cell</i> ke Array	62
4.5 Hasil Pengukuran	63
4.5.1 Set – up Pengukuran	65

4.5.2 Pengukuran menggunakan horn antenna dan pengukuran menggunakan horn antenna + reflector	65
4.5.3 Pengukuran Horn antenna + <i>Metasurface</i> + Reflector	67
4.5.5 Hasil Analisa Utama	70
4.5.6 Perbandingan hasil parameter S11 simulasi dengan hasil pengukuran	71
4.5.7 Perbandingan hasil parameter S21 simulasi dengan hasil pengukuran	72
4.5.8 Perbandingan <i>absorption rate</i> hasil simulasi dan pengukuran	73
4.5.9 Perbandingan <i>surface impedance</i> hasil simulasi dengan pengukuran ..	74
4.5.10 Keterbatasan Pengukuran	75
BAB 5. KESIMPULAN	77
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran	78
DAFTAR PUSTAKA.....	79
LAMPIRAN - LAMPIRAN	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Radar	8
Gambar 2. 2 Circular Patch Metasurface (Coelho et al., 2023)	13
Gambar 2. 3 Split Ring Resonator Metasurface (Abdulkarim et al., 2022).....	14
Gambar 2. 4 Jerusalem Cross Metasurface (Hakim et al., 2022).....	14
Gambar 2. 5 Fractal Metasurface (Ozpinar & Aksimsek, 2022)	15
Gambar 2. 6 Square Metasurface (Kanjanasit et al., 2024)	15
Gambar 2. 7 PEC dan PMC	20
Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian.....	29
Gambar 3. 2 Vector Network Analyzer (VNA)	31
Gambar 3. 3 Antena Horn	31
Gambar 4. 1 Grafik Hasil Simulasi Patch 15.2 mm	47
Gambar 4. 2 Struktur Unit Cell	49
Gambar 4. 3 Ground Plane.....	50
Gambar 4. 4 Substrat.....	50
Gambar 4. 5 Patch	51
Gambar 4. 6 Radiation Box.....	52
Gambar 4. 7 PEC Boundary	53
Gambar 4. 8 PMC Boundary.....	53
Gambar 4. 9 Wave Port.....	54
Gambar 4. 10 Grafik S11 Hasil Simulasi.....	55
Gambar 4. 11 Grafik S21 Hasil Simulasi.....	56
Gambar 4. 12 Grafik Absorption Rate Hasil Simulasi.....	57
Gambar 4. 13 Grafik Surface Impedance Hasil Simulasi	58
Gambar 4. 14 Distribusi Medan Listrik	59
Gambar 4. 15 Distribusi Medan Magnet.....	60
Gambar 4. 16 Array Unit Cell.....	62
Gambar 4. 17 Set - Up Pengukuran	65
Gambar 4.18 Pengukuran Menggunakan Horn Antena dan Pengukuran Menggunakan Horn Antena + Reflektor.....	66

Gambar 4.19 Grafik Perbandingan S11 Hasil Pengukuran Antena dan Antena + Reflektor.....	66
Gambar 4. 20 Pengukuran Horn Antena + Metasurface + Reflektor.....	67
Gambar 4. 21 Grafik S11 Hasil Pengukuran Horn antena + metasurface + reflektor	68
Gambar 4. 22 Grafik S11 Hasil Analisa Pengukuran	70
Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan S11 Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	71
Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan S21 Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	72
Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Absorption Rate Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	73
Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Surface Impedance Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Variasi Dimensi Patch	48
Tabel 3. 1 Spesifikasi antena horn.....	32

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Sheet Antena Horn	86
Lampiran 2 Perhitungan.....	90
Lampiran 3 Dokumentasi Pengukuran.....	94
Lampiran 4 Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Pembimbing 1	96
Lampiran 5 Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Pembimbing 2	97
Lampiran 6 Lembar Bimbingan Mahasiswa	98
Lampiran 7 Lembar Revisi Penguji 1	100
Lampiran 8 Lembar Revisi Penguji 2	101
Lampiran 9 Cek Hasil Turnitin	102

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Radar (*Radio Detection and Ranging*) adalah suatu sistem yang memanfaatkan gelombang elektro magnetik untuk mengukur jarak, menemukan objek, dan memetakan objek melalui pantulan sinyal radio (Leadtrees & Needs, 2025). Kemampuan sebuah sistem radar sangat dipengaruhi oleh energi gelombang yang Kembali diterima setelah dipantulkan oleh objek ini dikenal sebagai *Radar Cross Section* (RCS). Dalam aplikasi militer dan keamanan kebutuhan pengurangan RCS sangat penting yang berguna untuk meningkatkan kemampuan *stealth*, sehingga berbagai pendekatan teknologi dikembangkan untuk mengurangi pantulan gelombang radar dari permukaan target, salah satunya yaitu pendekatan penggunaan *Radar Absorbing Material* (RAM) (Mohammed et al., 2024).

Radar Absorbing Material (RAM) merupakan jenis material buatan yang memiliki struktur mikro atau nano berulang, dirancang untuk memanipulasi gelombang elektromagnetik melalui pengendalian parameter efektivitas seperti permittivitas permeabilitas dengan cara menyerap, membelokkan, maupun menghilangkan pantulan gelombang. Karakteristik ini menjadikan metamaterial sangat potensial untuk aplikasi *stealth* atau penyamaran elektromagnetik, dengan kemampuan menurunkan nilai *Radar Cross Section* (RCS) secara signifikan (Zheng et al., 2022).

Selain metamaterial, *Frequency Selective Surface* (FSS) telah menjadi salah satu pendekatan yang berperan dalam kemajuan struktur penyerapan gelombang kontemporer. FSS adalah suatu susunan periodik dua dimensi yang teratur, dirancang untuk mengatur transmisi, refleksi, atau penyerapan gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu (Xian et al., 2024). Keunggulan yang paling utama pada FSS terletak pada fleksibilitas desainnya yang memungkinkan rekayasa struktur secara presisi untuk mencapai pola serapan yang lebar maupun sangat selektif, melalui penerapan konfigurasi multilayer atau penggunaan hybrid resonator, FSS mampu menghasilkan respon broadband dengan efisien tinggi

(Jasim & Sayidmarie, 2023)

Dalam beberapa penelitian, penerapan FSS kedalam struktur absorber termasuk raserber (FSR) telah terbukti memperkuat kemampuan penyerapan sekaligus menjaga kinerja transmisi untuk frekuensi tertentu, ini menjadikan sangat relevan dalam aplikasi *stealth* serta pengurangan *Radar Cross Section* (RCS) (Yuan et al., n.d.) dengan berbagai kemajuan terkini, FSS menjadi salah satu komponen dalam pengembangan sistem penyerapan gelombang dan teknologi siluman masa kini (Kong et al., n.d.)

Penelitian terkini menunjukkan kemajuan berarti dalam pengembangan desain unit sel metamaterial untuk aplikasi pada rentang frekuensi sub 6 GHz. Dalam studi (Hasan et al., 2022), diperkenalkan struktur *unit cell* CRECGR (*Circular Ring Enclosed Circular Geometric Resonator*) yang mampu menghasilkan dua titik resonansi pada 3,37 GHz dan 5,8 GHz dengan tingkat absorpsi yang hampir mencapai 100%. Selain itu, struktur tersebut juga memiliki karakteristik yang tidak peka terhadap polarisasi maupun variasi sudut datang gelombang. Desain ini sangat relevan karena menunjukkan bagaimana *unit cell* dapat dioptimalkan untuk menyerap gelombang pada pita sub 6 GHz mendekati frekuensi kerja yang menjadi fokus penelitian ini.

Di sisi lain, sejumlah peneliti juga berfokus pada pengembangan absorber dengan banyak puncak resonansi dalam satu struktur unit sel. Salah satunya adalah penelitian oleh (Kurt et al., 2025) yang memperkenalkan *metasurface* absorber ultra-tipis dengan tujuh pita kerja, termasuk sekitar 6,32 GHz, dan menunjukkan tingkat penyerapan yang melebihi 90% pada setiap puncaknya. Konfigurasi tersebut memanfaatkan empat jenis resonator dalam satu unit sel, di mana masing-masing resonator saling berinteraksi melalui efek kapasitif dan induktif sehingga menghasilkan resonansi yang berlapis. Selain itu, mereka turut mengkaji impedansi, pola medan dan arus, serta menyusun model rangkaian ekuivalen untuk menjelaskan mekanisme penyerapannya.

Walaupun sejumlah studi sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai konfigurasi absorber pada wilayah frekuensi sub-6 GHz, masih terdapat celah penelitian, khususnya terkait rancangan metamaterial yang dipadukan dengan FSS

untuk bekerja optimal pada rentang 5 GHz – 7 GHz dengan titik fokus di sekitar 6 GHz. Beberapa persoalan yang kerap dijumpai meliputi sempitnya rentang frekuensi serap, tingginya sensitivitas terhadap perubahan sudut datang gelombang, ketergantungan kinerja pada karakteristik substrat, serta keterbatasan struktur satu lapis dalam mencapai tingkat penyerapan yang tinggi pada frekuensi tertentu. Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengembangkan desain metamaterial berbasis FSS yang ditujukan sebagai penyerap gelombang radar pada 6 GHz dan tetap menunjukkan kestabilan performa pada rentang 5 GHz – 7 GHz. Dengan mengandalkan pendekatan resonansi selektif, desain ini diharapkan dapat memberikan sumbangan baru dalam pengembangan sistem penyamaran radar yang lebih efisien, ringan, dan mudah diproduksi. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan serta analisis struktur metamaterial–FSS absorber yang mampu menyerap gelombang secara signifikan pada frekuensi 6 GHz, sekaligus menilai perilakunya di dalam wilayah C-band yang banyak digunakan pada aplikasi radar modern.

1.2 Rumusan Masalah

Perkembangan material yang digunakan, teknologi *stealth* menuntut adanya material penyerap gelombang yang mampu bekerja secara efektif pada frekuensi tertentu, memiliki impedansi yang sesuai terhadap udara serta stabil terhadap kondisi lingkungan. Dengan pendekatan berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) dan dipadukan dengan bahan FR4 menawarkan potensi yang besar, namun masih diperlukan beberapa kajian sistematis yang mendalam untuk memahami bagaimana struktur, dimensi, dan karakteristik mempengaruhi performa penyerapan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini dikembangkan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang struktur *metasurface* berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) yang mampu mencapai nilai koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) masing-masing lebih kecil dari -10 dB, tingkat

penyerapan lebih dari 80%, serta impedansi permukaan mendekati 377Ω pada rentang frekuensi 5–7 GHz dengan frekuensi kerja utama 6 GHz?

2. Bagaimana pengaruh variasi parameter geometris *unit cell* FSS terhadap karakteristik elektromagnetik yang meliputi S_{11} , S_{21} , tingkat penyerapan, dan impedansi permukaan, serta sejauh mana hasil simulasi numerik sesuai dengan hasil pengujian eksperimental pada prototipe yang direalisasikan?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus, terarah dan sesuai dengan ruang lingkup dan dapat dianalisa secara mendalam, maka Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut

1. Penelitian hanya berfokus pada perancangan pembuatan dan simulasi *unit cell* berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) dengan menggunakan material FR4.
2. Rentang frekuensi yang dikaji dibatasi pada 5 GHz hingga 7 GHz, sesuai dengan kebutuhan aplikasi pada penyerap gelombang radar, frekuensi kerja utama yang dijadikan target optimasi adalah 6 GHz.
3. Evaluasi performa penyerapan dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan software HFSS berbasis *Finite Element Metode* sebagai acuan awal desain dan pembandingan terhadap hasil pengujian laboratorium
4. Penelitian mencakup proses fabrikasi struktur FSS hasil desain yang dilakukan dengan metode manufaktur PCB atau fabrikasi lain yang sesuai dengan karakteristik material FR4.
5. Pengujian performa absorber dilakukan di laboratorium menggunakan perangkat pengukur elektromagnetik yang relevan untuk memperoleh nilai S – parameter dan *reflection loss* pada rentang frekuensi 5 GHz – 7 GHz.
6. Parameter yang dievaluasi mencakup koefisien refleksi (S_{11}), koefisien transmisi (S_{21}), *absorption rate*, surface impedance, E – Field, H – Field dalam rentang frekuensi 5 GHz – 7 GHz, dengan fokus performa optimal pada frekuensi 6 GHz.

7. Nilai konstanta dielektrik dan loss tangent FR4 yang digunakan dalam simulasi mengikuti nilai referensial, tanpa mempertimangkan perubahan akibat kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, atau penuaan material.
8. Penelitian ini hanya membahas aspek elektromagnetik dan proses fabrikasi sederhana, sehingga Analisa biaya produksi, durabilitas jangka panjang, maupun aspek mekanik tidak menjadi cakupan utama.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman komprehensif terkait desain dan karakteristik material anti – radar berbasis FSS melalui pendekatan analitis dan simulative, secara khusus tujuan penelitian yang dikembangkan adalah:

1. Menghasilkan desain *metasurface* berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) yang mampu menyerap gelombang elektromagnetik secara optimal pada rentang frekuensi 5–7 GHz dengan frekuensi kerja utama 6 GHz, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) lebih kecil dari -10 dB, tingkat penyerapan lebih dari 80%, serta impedansi permukaan yang mendekati 377Ω .
2. Memperoleh dimensi geometris *unit cell* FSS yang paling efektif melalui analisis pengaruh variasi parameter desain terhadap karakteristik elektromagnetik serta melakukan validasi hasil simulasi melalui pengujian eksperimental untuk menilai kesesuaian dan deviasi kinerja antara model dan prototipe.

1.5 Manfaat

Sebagai salah satu langkah untuk menghadirkan solusi ilmiah yang sesuai dengan perkembangan teknologi penyerap gelombang elektromagnetik, penelitian ini tidak hanya terfokus pada perancangan pembuatan dan analisis *unit cell* FSS berbasis FR4, namun juga bertujuan untuk memberikan kontribusi aplikatif dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan kebutuhan nyata dalam bidang elektromagnetik terapan, melalui serangkaian proses simulasi, fabrikasi dan

pengujian laboratorium, penelitian ini diharapkan menghasilkan temuan yang bermanfaat dari sisi teoritis maupun implementatif. Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi penyerap gelombang elektromagnetik, khususnya melalui perancangan FSS berbasis FR4 yang bekerja pada rentang frekuensi 5 GHz – 7 GHz, dengan frekuensi target 6 GHz.
2. Menyediakan data komprehensif mengenai pengaruh variasi parameter geometris terhadap performa absorpsi.
3. Menghasilkan perbandingan empiris antara hasil simulasi dan pengujian laboratorium, sehingga memberikan gambaran yang jelas mengenai tingkat akurasi model numerik terhadap kondisi nyata serta memperkuat proses validasi desain
4. Menyumbangkan referensi ilmiah baru dalam bidang elektromagnetik terapan, sehingga dapat digunakan oleh mahasiswa, peneliti, dan institusi terkait yang mengembangkan riset mengenai teknologi absorpsi gelombang, metamaterial, maupun desain FSS.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini disusun secara terstruktur dan sistematis untuk memudahkan pemahaman terhadap alur pemikiran, landasan teori, serta metode yang digunakan dalam penelitian. Penyajian tiap bab dirancang saling berkaitan sehingga mampu menggambarkan proses penelitian secara logis, mulai dari pengantar permasalahan, kajian teori yang mendukung, hingga metode yang digunakan dalam perancangan dan analisis *metasurface* sebagai penyerap gelombang elektromagnetik.

a. Bab I

Bab I berisi pengantar yang menempatkan penelitian dalam konteks perkembangan teknologi radar dan kebutuhan material penyerap gelombang elektromagnetik yang tipis, ringan, dan efektif. Pada bagian ini dijelaskan urgensi penggunaan *metasurface* berbasis *Frequency Selective Surface*

sebagai solusi atas keterbatasan absorber konvensional, sekaligus menegaskan permasalahan ilmiah yang dikaji. Bab ini juga memaparkan tujuan penelitian, ruang lingkup pembahasan, serta kontribusi yang diharapkan dari hasil penelitian terhadap pengembangan teknologi anti-radar berbasis *metasurface*.

b. Bab II

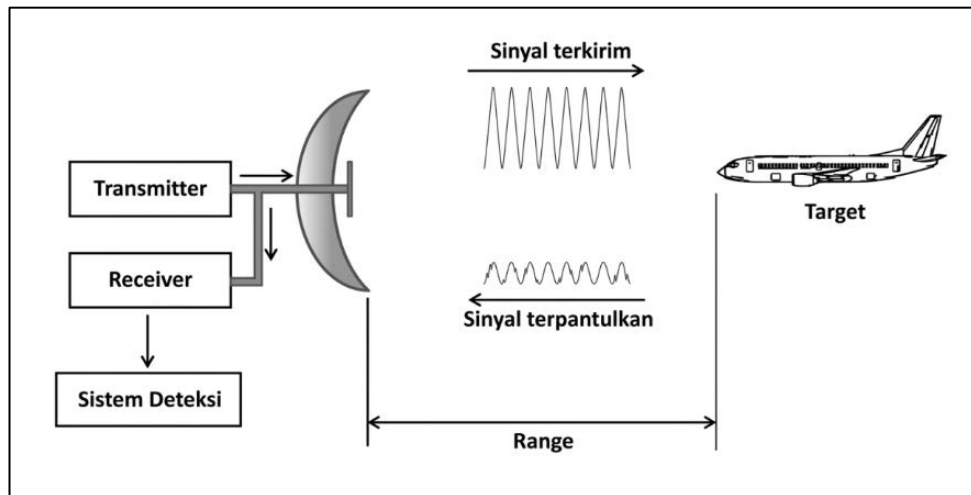
Bab II menyajikan landasan teori yang menjadi dasar ilmiah penelitian. Pembahasan difokuskan pada konsep gelombang elektromagnetik dan interaksinya dengan material, prinsip kerja radar, serta mekanisme penyerapan gelombang. Teori metamaterial dan *metasurface* dijelaskan untuk menunjukkan bagaimana struktur periodik berskala sub-panjang gelombang mampu menghasilkan respons elektromagnetik tertentu yang tidak dijumpai pada material alami. Selain itu, konsep *Frequency Selective Surface*, parameter hamburan (S_{11} dan S_{21}), perhitungan tingkat absorpsi, serta prinsip pencocokan impedansi dibahas secara sistematis. Bab ini juga memuat tinjauan penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar pemilihan metode dan penentuan celah penelitian.

c. Bab III

Bab II menyajikan landasan teori yang menjadi dasar ilmiah penelitian. Pembahasan difokuskan pada konsep gelombang elektromagnetik dan interaksinya dengan material, prinsip kerja radar, serta mekanisme penyerapan gelombang. Teori metamaterial dan *metasurface* dijelaskan untuk menunjukkan bagaimana struktur periodik berskala sub-panjang gelombang mampu menghasilkan respons elektromagnetik tertentu yang tidak dijumpai pada material alami. Selain itu, konsep *Frequency Selective Surface*, parameter hamburan (S_{11} dan S_{21}), perhitungan tingkat absorpsi, serta prinsip pencocokan impedansi dibahas secara sistematis. Bab ini juga memuat tinjauan penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar pemilihan metode dan penentuan celah penelitian.

BAB 2. DASAR TEORI

2.1 Sistem Radar dan Prinsip Kerjanya



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Radar

Ilustrasi pada Gambar 2.1 menunjukkan alur kerja sistem radar yang diawali dari proses pemancaran sinyal oleh pemancar melalui antenna menuju target, kemudian diikuti oleh penerimaan kembali sinyal pantulan oleh penerima untuk selanjutnya diproses pada sistem deteksi guna mengekstrak informasi jarak, arah, dan karakteristik target.

Radar (*Radio Detection and Ranging*) yaitu sistem elektromagnetik yang digunakan untuk mendeteksi, mengukur jarak, arah, serta kecepatan objek dengan cara memancarkan gelombang radio dan menerima pantulan sinyal dari objek yang terkena gelombang tersebut (Singh et al., 2025). Prinsip kerja dasar radar melibatkan pemancaran gelombang elektromagnetik oleh antenna pemancar ke arah target dan pengambilan kembali gelombang pantul yang dipantulkan oleh target tersebut untuk memperoleh informasi jarak dan parameter lainnya. Selisih waktu antara sinyal yang dipancarkan dan pantulannya digunakan untuk menentukan jarak target, sedangkan pergeseran frekuensi akibat efek Doppler dimanfaatkan dalam perhitungan kecepatan target bergerak. prinsip kerja radar menyatakan bahwa radar mentransmisikan gelombang elektromagnetik dan menerima echo untuk

mendeteksi target serta mengekstrak parameter karakteristiknya (Rasiman et al., 2025).

2.2 Radar Cross Section (RCS)

Radar Cross Section (RCS) adalah ukuran fisik yang dipakai untuk menilai seberapa baik suatu objek dapat memantulkan energi gelombang elektromagnetik radar kembali ke antenna penerima. Ukuran ini umumnya dinyatakan sebagai kuantitas daya yang dipantulkan target saat terpapar gelombang radar. Nilai RCS dipengaruhi oleh ciri-ciri geometris dan material dari target, termasuk posisi relatif terhadap radar, bentuk dan dimensi objek, serta sifat elektromagnetiknya. Aspek-aspek ini menjadikan RCS sebagai parameter krusial dalam menggambarkan seberapa terlihat objek ketika terdeteksi oleh radar. Dalam konteks teknologi *stealth*, usaha untuk mengurangi RCS bertujuan mereduksi sinyal refleksi radar dari suatu platform, sehingga objek tersebut menjadi lebih sulit untuk terdeteksi oleh radar lawan. Metode yang digunakan untuk menurunkan RCS meliputi penerapan bahan penyerap gelombang radar (*Radar Absorbing Materials*/RAM) yang mampu menyerap sebagian besar energi gelombang serta perubahan bentuk permukaan untuk mengarahkan pantulan gelombang radar jauh dari arah antenna penerima (Güngördü, 2024).

2.3 Radar Absorbing Material (RAM)

Material Penyerapan Radar (RAM) merupakan bahan yang dirancang khusus untuk menyerap energi dari gelombang radar, sehingga meminimalkan jumlah refleksi gelombang menuju antenna pemancar. RAM berperan yang sangat penting dalam teknologi *stealth* di sektor pertahanan, karena dapat mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) objek, sehingga membuat deteksi oleh sistem radar menjadi lebih kompleks dan akurasi target berkurang. RAM bekerja dengan cara menangkap dan mengubah energi gelombang elektromagnetik yang diterima menjadi bentuk energi lain, umumnya panas, sehingga sebagian besar energi tidak dipantulkan kembali ke radar (Wulandari Fira Putri, Aisyah Audrey Nur, 2024).

RAM konvensional sering kali dibentuk sebagai komposit material dielektrik dan magnetik yang disatukan dalam matriks tertentu. Material dielektrik seperti polimer atau karbon aktif menyediakan rugi dielektrik, sedangkan material magnetik seperti ferit (misalnya barium hexaferrite) memberikan kontribusi rugi magnetik, sehingga keduanya secara sinergis meningkatkan kemampuan penyerapan gelombang radar. Pendekatan komposit ini memungkinkan material menyerap energi radar di bawah impedansi tertentu sehingga lebih sedikit energi dipantulkan kembali (Dewi et al., 2025). Selain itu, penelitian tentang RAM juga meliputi analisis parameter desain seperti ketebalan lapisan, komposisi bahan, dan struktur permukaan yang berpengaruh terhadap karakteristik penyerapan gelombang radar, khususnya dalam rentang frekuensi radar seperti X-band (8–12 GHz), yang menjadi tempat banyak aplikasi militer modern. Pengoptimalan pada level material ini dipadukan dengan teknik pemrosesan yang canggih, sehingga RAM tidak hanya berfungsi secara efektif dalam menyerap gelombang radar, tetapi juga memenuhi standar teknis seperti ringan, ramping, serta mudah diterapkan pada permukaan struktur platform militer (Wulandari Fira Putri, Aisyah Audrey Nur, 2024).

Karakteristik utama yang menentukan kemampuan suatu *Radar Absorbing Material* (RAM) dalam menyerap gelombang radar adalah kesesuaian impedansi (*impedance matching*), rugi dielektrik (*dielectric loss*), rugi magnetik (*magnetic loss*), serta besarnya nilai penyerapan (*absorptivity*) dan *reflection loss* (RL). Kesesuaian impedansi antara material dan ruang bebas menjadi faktor penting karena memungkinkan gelombang elektromagnetik masuk ke dalam material dengan pantulan yang minimum. Sebaliknya, apabila terjadi ketidakcocokan impedansi, sebagian besar energi gelombang akan dipantulkan kembali sehingga kemampuan penyerapan material menjadi rendah (Jin et al., 2024).

Performa RAM umumnya dievaluasi menggunakan parameter *Reflection loss* (RL). Parameter ini menyatakan besarnya energi gelombang elektromagnetik yang dipantulkan kembali oleh material setelah terjadi interaksi dengan permukaannya (Li et al., 2023). Semakin negatif nilai RL, semakin kecil daya yang dipantulkan dan semakin besar energi gelombang elektromagnetik yang diserap oleh material.

Secara umum, material penyerap dianggap memiliki kemampuan penyerapan yang efektif apabila nilai $RL \leq -10$ dB, yang menunjukkan penyerapan sekitar 90% energi gelombang mikro. Dengan demikian, rentang frekuensi yang memiliki nilai $RL \leq -10$ dB sering digunakan sebagai *Effective Absorption Bandwidth* (EAB) untuk mengevaluasi kinerja penyerapan material (Sahoo et al., 2022)

Hubungan antara S_{11} dalam satuan dB dengan koefisien refleksi

$$S_{11}(dB) = 20\log_{10} |\Gamma| \quad (1)$$

Sehingga

$$|\Gamma| = 10^{\frac{RL}{20}} \quad (2)$$

Energi yang dipantulkan merupakan kuadrat dari koefisien refleksi, sehingga

$$R = |\Gamma|^2 \quad (3)$$

Karena pada struktur absorber dengan ground plane penuh nilai transmisi dapat dianggap nol ($S_{21} = 0$), maka absorptivitas dihitung menggunakan

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (4)$$

Pada struktur *Radar Absorbing Material* (RAM) berbasis *metasurface* absorber yang menggunakan *ground plane* logam penuh, transmisi gelombang elektromagnetik dapat ditekan hingga mendekati nol. Oleh karena itu, absorptivitas struktur terutama ditentukan oleh besarnya energi gelombang elektromagnetik yang dipantulkan pada permukaan absorber. Semakin kecil refleksi yang dihasilkan pada frekuensi resonansi, semakin besar energi gelombang elektromagnetik yang dapat diserap oleh struktur. Dengan demikian, desain *metasurface* absorber umumnya diarahkan untuk menghasilkan refleksi yang rendah dan absorptivitas yang tinggi (Saadeldin et al., 2023).

2.4 Metamaterial Elektromagnetik

Metamaterial merupakan jenis bahan buatan dengan struktur berulang yang memiliki dimensi lebih kecil dari panjang gelombang yang digunakan, menciptakan sifat elektromagnetik yang tidak dijumpai pada material alami. Contohnya termasuk permitivitas dan permeabilitas negatif pada frekuensi tertentu. Karakteristik elektromagnetiknya lebih dipengaruhi oleh desain geometri *unit cell* daripada sifat asli bahan itu sendiri, yang didefinisikan oleh teori medium efektif

yang menghubungkan struktur mikro dengan parameter elektromagnetik yang lebih besar. Metamaterial terdiri dari *unit cell* yang terulang, yang bertindak sebagai resonator elektromagnetik. Perubahan bentuk, ukuran, dan tata letak geometri memungkinkan penyesuaian nilai permitivitas dan permeabilitas efektif, termasuk keadaan double negative yang menciptakan efek seperti indeks bias negatif dan resonansi penyerapan yang tinggi. Dalam penggunaan gelombang mikro, metamaterial banyak diterapkan pada absorber yang ramping, antenna kecil, dan pengontrol gelombang elektromagnetik. *Unit cell* dirancang agar dapat beresonansi pada frekuensi tertentu, sehingga mampu menyerap energi gelombang mikro secara optimal dalam pita S-, C-, dan X-band (Amir et al., 2025).

Selain itu, desain penyerap metamaterial umumnya menggunakan prinsip pencocokan impedansi dengan ruang kosong untuk mengurangi pantulan gelombang yang datang, sehingga hampir seluruh energi elektromagnetik yang masuk mampu diserap oleh struktur tersebut. Apabila unit sel dioptimalkan baik dari segi bentuk maupun bahan, metamaterial dapat mencapai tingkat penyerapan yang sangat tinggi (contohnya lebih dari 90 % pada beberapa frekuensi). Sebagai ilustrasi, penelitian akses terbuka mengenai penyerap metamaterial yang dibuat untuk pita Ku, X, dan C menunjukkan bahwa struktur periodik pada substrat FR4 dapat menghasilkan penyerapan hingga 99,9 %, 85 %, dan 95 % pada setiap pita frekuensi yang dituju, menunjukkan bahwa desain metamaterial sangat efisien untuk aplikasi penyerap gelombang mikro (Sudarsan et al., 2024).

2.5 Metasurface

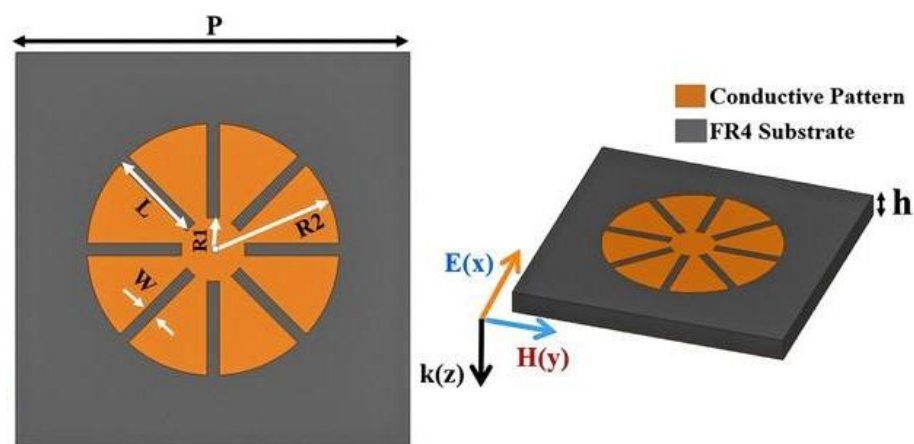
Metasurface merupakan struktur dua dimensi yang terdiri dari susunan periodik elemen-elemen sub-panjang gelombang yang dikenal sebagai meta – atom. Struktur ini memiliki kemampuan untuk mengatur sifat-sifat gelombang elektromagnetik dengan cara memanipulasi fase, amplitudo, dan polarisasi sinyal yang masuk secara lokal, tanpa membutuhkan sejumlah besar material seperti pada metamaterial tiga dimensi (Lee et al., 2023). Karena memiliki ketebalan yang jauh lebih tipis dan berat yang lebih ringan dibanding dengan struktur metamaterial tiga dimensi, *metasurface* sering kali dibuat dengan menggunakan teknologi printed circuit board

(PCB) yang lebih mudah diproduksi melalui metode pola/lithografi planar (Smirnova, 2023).

Struktur *metasurface* mencapai kontrol elektromagnetik yang akurat karena reaksi terhadap gelombang ditentukan terutama oleh bentuk dan konfigurasi *unit cell*, bukan karena karakteristik material yang membangunnya, sehingga fase dan intensitas gelombang yang dipantulkan atau diteruskan dapat diubah sesuai dengan rancangan *unit cell* tersebut. Dalam aplikasi penyerap gelombang mikro atau anti-radar, *metasurface* sering dirancang sebagai penyerap dua dimensi yang beroperasi berdasarkan prinsip resonansi elektromagnetik dan pencocokan impedansi. Di mana resonator pada *unit cell* menghasilkan resonansi pada frekuensi yang ditargetkan, sehingga gelombang yang datang diserap dengan optimal dan refleksi diminimalkan. (He et al., 2025).

Ada beberapa jenis *metasurface* yang sering digunakan diantaranya

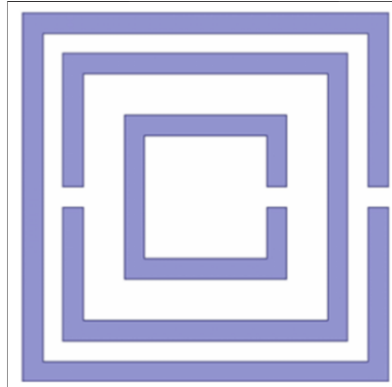
a. *Circular Patch Metasurface*



Gambar 2. 2 Circular Patch Metasurface (Coelho et al., 2023)

Circular Patch Metasurface menggunakan bentuk lingkaran atau cincin. Bentuk ini menghasilkan distribusi arus yang lebih simetris sehingga cukup baik dalam mempertahankan karakteristik terhadap perubahan polarisasi gelombang datang. Diameter lingkaran menjadi parameter utama yang menentukan frekuensi resonansi. Penambahan slot melingkar atau ring biasanya dilakukan untuk memperoleh resonansi ganda maupun memperlebar bandwidth absorber (Coelho et al., 2023).

b. *Split Ring Resonator Metasurface*

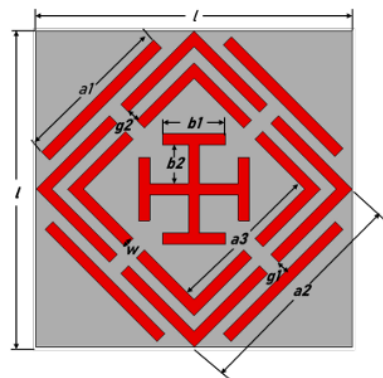


Split Ring Resonator (SRR) merupakan geometri *metasurface* yang terdiri atas

Gambar 2. 3 Split Ring Resonator Metasurface (Abdulkarim et al., 2022)

cincin logam dengan celah (*split*). Struktur ini mampu menghasilkan resonansi magnetik yang kuat sehingga sering digunakan pada absorber, sensor, filter, serta metamaterial dengan permeabilitas negatif (Abdulkarim et al., 2022)

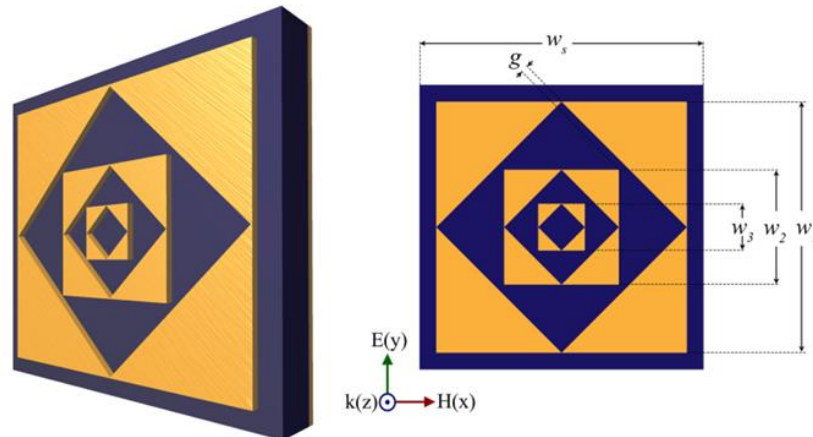
c. *Jerusalem Cross Metasurface*



Gambar 2. 4 Jerusalem Cross Metasurface (Hakim et al., 2022)

Jerusalem Cross merupakan pengembangan dari struktur *patch* silang dengan penambahan ujung menyerupai huruf T. Geometri ini banyak digunakan pada *Frequency Selective Surface* (FSS) dan absorber karena mampu menghasilkan resonansi yang lebih kompleks dibandingkan *patch* biasa (Hakim et al., 2022).

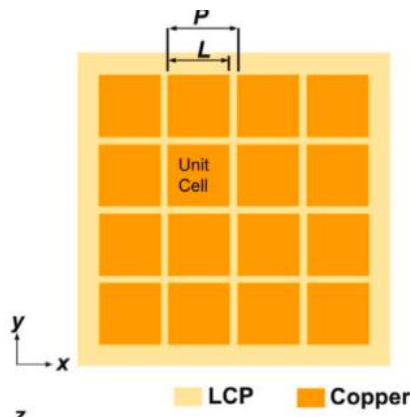
d. *Fractal Metasurface*



Gambar 2. 5 Fractal Metasurface (Ozpinar & Aksimsek, 2022)

Fractal metasurface memanfaatkan pola geometri berulang seperti Hilbert, Minkowski, atau Sierpinski. Struktur ini menghasilkan lintasan arus yang lebih panjang tanpa memperbesar ukuran fisik sehingga sangat efektif untuk memperoleh beberapa frekuensi resonansi sekaligus (Ozpinar & Aksimsek, 2022)

e. *Square Metasurface*



Gambar 2. 6 Square Metasurface (Kanjanasit et al., 2024)

Square patch Metasurface merupakan salah satu konfigurasi unit sel yang paling sederhana dan paling umum digunakan dalam penelitian absorber metamaterial. Struktur ini terdiri atas sebuah *patch* logam berbentuk persegi yang dicetak pada permukaan substrat dielektrik, dengan *ground plane* logam yang ditempatkan pada bagian Bawah. Geometri persegi dipilih karena

sederhana, mudah difabrikasi, serta kemampuannya menghasilkan distribusi arus permukaan yang relatif seragam, sehingga mendukung terjadinya resonansi elektromagnetik yang stabil. Resonansi ini memungkinkan terjadinya pencocokan impedansi dengan ruang bebas (*free space*), sehingga energi gelombang elektromagnetik yang datang dapat diserap secara efisien (Kanjanasit et al., 2024).

Frekuensi resonansi *patch* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

Deangan :

L = panjang *patch* (m)

$c = 3 \times 10^8$ m/s (kecepatan cahaya diruang hampa)

f = frekuensi kerja

ϵ_{eff} = permitivitas efektif substrat

Frekuensi resonansi suatu *square patch metasurface* dipengaruhi oleh dimensi *patch* dan karakteristik substrat yang digunakan. Salah satu parameter penting dalam perancangan adalah permitivitas efektif (ϵ_{eff}). Nilai ini digunakan karena medan elektromagnetik tidak hanya merambat di dalam substrat, tetapi juga sebagian menyebar ke udara (*fringing field*). Oleh karena itu, permitivitas efektif berada di antara permitivitas udara ($\epsilon_r = 1$) dan permitivitas relatif substrat (ϵ_r). Nilai ϵ_{eff} digunakan sebagai pendekatan untuk memperoleh dimensi awal *patch* agar frekuensi resonansi sesuai dengan frekuensi target.

Permitivitas efektif dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (6)$$

Deangan:

ϵ_{eff} = permitivitas efektif

ϵ_r = permitivitas relative substrat

h = ketebalan substrat (mm)

w = lebar *patch* (mm)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai permitivitas efektif dipengaruhi oleh permitivitas relatif substrat, ketebalan substrat, dan lebar *patch*. Nilai ϵ_{eff} kemudian digunakan dalam perhitungan dimensi *patch* untuk menentukan frekuensi resonansi awal sebelum dilakukan proses optimasi melalui simulasi elektromagnetik. Pada penelitian ini digunakan substrat FR-4 dengan permitivitas relatif $\epsilon_r = 4,4$, sehingga nilai permitivitas efektif dihitung sebagai dasar dalam menentukan dimensi awal square *patch metasurface*.

2.6 Frequency Selective Surface (FSS)

Frequency Selective Surface (FSS) didefinisikan sebagai sebuah struktur dua dimensi yang bersifat periodik, terdiri dari elemen-elemen konduktif atau celah-celah yang diatur secara berulang pada substrat dielektrik, di mana ukuran elemen dan periodisitasnya lebih kecil dari panjang gelombang pada saat beroperasi. Struktur ini dirancang dengan tujuan untuk memberikan respons yang spesifik terhadap frekuensi gelombang elektromagnetik, sehingga FSS dapat bertindak sebagai permukaan yang secara selektif dapat menyalurkan atau memantulkan gelombang dalam frekuensi tertentu sesuai dengan sifat resonansinya (Montejogara et al., 2024).

Secara fungsional, FSS bisa dianggap sebagai filter elektromagnetik dua dimensi yang beroperasi berdasarkan prinsip resonansi bentuk dari *unit cell*. Karakteristik selektif ini memungkinkan FSS diklasifikasikan menjadi band-pass, band-stop, low-pass, atau high-pass filter, tergantung pada desain elemen, ukuran geometriknya, serta pengaturan periodikanya. Oleh karena itu, FSS sering kali disebut sebagai filter elektromagnetik spasial karena kemampuan selektivitas frekuensinya diperoleh melalui pengaturan spasial dari struktur periodik di permukaan (Olga Rac-Rumijowska Fss, 2024)

Dalam aplikasi gelombang mikro dan radar, FSS sering kali diterapkan pada sistem radome, pelindung elektromagnetik, serta struktur penyerap gelombang radar, berkat kemampuannya dalam mengatur transmisi dan refleksi gelombang dengan cara selektif tanpa menyebabkan peningkatan ketebalan struktur yang signifikan. Desain FSS terkini juga memperlihatkan tingkat fleksibilitas yang tinggi

untuk diintegrasikan dengan *metasurface* atau bahan penyerap gelombang untuk meningkatkan kinerja absorpsi serta mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) pada rentang frekuensi tertentu (Gunaydin OmerFaruk, 2024)

2.7 Impedansi Permukaan (*Surface Impedance*)

Impedansi permukaan adalah parameter dasar elektromagnetik yang menunjukkan keterkaitan antara medan listrik dan medan magnet di permukaan struktur penyerap (Pan et al., 2024). pencapaian impedansi efektif permukaan yang mendekati impedansi ruang bebas 377Ω merupakan syarat penting untuk mengoptimalkan absorpsi gelombang masuk (Hayat et al., 2024). sehingga gelombang elektromagnetik yang datang dapat menembus permukaan dengan sedikit pantulan kembali ke ruang bebas (Pan et al., 2024).

Kondisi di mana impedansi permukaan hampir sama dengan impedansi ruang bebas disebut sebagai *impedance matching*, dan ini merupakan faktor krusial dalam mendesain absorber yang menggunakan *metasurface* untuk mengurangi pantulan serta meningkatkan tingkat penyerapan. Saat impedansi permukaan dari suatu struktur sejalan dengan impedansi ruang bebas, koefisien refleksi biasanya akan mendekati angka nol, sehingga lebih banyak energi elektromagnetik dapat diserap dan dilepaskan oleh struktur itu (Narayanaswamy et al., 2024). Sebaliknya, apabila terjadi ketidakcocokan impedansi (*impedance mismatch*) antara permukaan struktur dan ruang bebas, sebagian besar energi gelombang akan mengalami refleksi kembali ke medium asal, sehingga efektivitas absorpsi menurun secara signifikan (Alzamil et al., 2026). Oleh karena itu, desain *Frequency Selective Surface* (FSS) absorber atau *metasurface* absorber harus dioptimalkan sedemikian rupa untuk memastikan impedansi permukaan mendekati impedansi ruang bebas pada frekuensi operasi yang ditargetkan, baik melalui rekayasa geometri *unit cell* maupun pemilihan material substrat dan lapisan resistifnya.

2.8 Kondisi Batas dan Metode Eksitasi

Dalam simulasi elektromagnetik struktur *unit cell metasurface* atau metamaterial, penentuan kondisi batas (*boundary conditions*) dan metode eksitasi gelombang merupakan aspek fundamental yang sangat menentukan akurasi hasil simulasi. Dua jenis kondisi batas yang paling umum digunakan adalah *Perfect Electric Conductor* (PEC) dan *Perfect Magnetic Conductor* (PMC), sedangkan eksitasi struktur biasanya direalisasikan menggunakan wave port atau port gelombang.

2.8.1 Radiation Box

Radiation box adalah domain udara buatan yang digunakan dalam simulasi elektromagnetik untuk merepresentasikan kondisi ruang bebas di sekitar struktur *metasurface*. Karena simulasi numerik hanya dilakukan pada wilayah terbatas, diperlukan batas komputasi yang bisa meniru ruang tak hingga supaya gelombang elektromagnetik yang keluar dari struktur tidak dipantulkan kembali ke domain simulasi. Untuk itu, *Radiation box* biasanya dipasangkan dengan *Open Boundary* atau *Perfectly Matched Layer* (PML) sebagai *boundary* penyerap (Hang et al., 2023). Pada simulasi *metasurface* absorber, *Radiation box* ditempatkan sepanjang arah propagasi gelombang (sumbu z), sementara arah periodik (sumbu x dan y) biasanya memakai *boundary* seperti PEC, PMC, atau *Unit cell*. *Radiation box* penting untuk mencegah refleksi numerik dari batas simulasi, yang bisa mengganggu perhitungan S-parameter, impedansi permukaan, dan nilai absorptivitas (Mou et al., 2022).

Persamaan yang digunakan untuk menentukan ukuran minimum *Radiation box* menggunakan:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7)$$

Dimana :

λ = panjang gelombang

$c = 3 \times 10^8$ m/s (kecepatan cahaya diruang hampa)

f = Frekuensi target

Pada simulasi antenna dan *metasurface* jarak antara struktur dan *boundary* umumnya dipilih minimal seperempat panjang gelombang

Perfect Magnetic Conductor (PMC) didefinisikan sebagai kondisi batas ideal dalam simulasi elektromagnetik di mana komponen medan magnet tangensial pada permukaan bernilai nol, sehingga permukaan tersebut memantulkan gelombang elektromagnetik tanpa pembalikan fase medan listrik. Definisi ini digunakan secara luas dalam simulasi sebagai model ideal untuk *Artificial Magnetic Conductor* (AMC) atau permukaan berimpedansi tinggi, khususnya pada analisis struktur periodik dan *metasurface* (Umair et al., 2025)

2.8.3 Wave Port

Wave port adalah *boundary condition* yang digunakan dalam simulasi elektromagnetik untuk mengeksitasi dan menerima gelombang elektromagnetik dalam bentuk mode yang terpropagasi ke / dari domain simulasi. Dalam pendekatan ini, port memaksa medan pada permukaan port memenuhi mode modal yang dianalisis, sehingga gelombang datang dan gelombang pantul diidentifikasi sebagai mode gelombang yang fisik. Wave port juga memungkinkan perhitungan parameter hamburan (S-parameter) seperti refleksi (S11) dan transmisi (S21), karena medan yang dikenakan pada port adalah medan propagating mode yang benar terhadap struktur waveguide atau garis transmisi yang disimulasikan (Roth & Braun, 2023).

2.9 Parameter Hamburan (S – Parameter) dan Hubungan Penyerapan

Respons elektromagnetik struktur *Frequency Selective Surface* (FSS) dianalisis menggunakan parameter hamburan (S-parameter), yang merepresentasikan perilaku refleksi dan transmisi gelombang elektromagnetik pada struktur dua-port. Dalam aplikasi FSS sebagai penyerap gelombang radar, parameter utama yang digunakan adalah S11 dan S21. Parameter S11 menunjukkan koefisien refleksi akibat ketidakcocokan impedansi antara ruang bebas dan struktur FSS, sedangkan S21 merepresentasikan koefisien transmisi, yaitu energi gelombang yang berhasil melewati struktur. Kedua parameter dinyatakan dalam bentuk magnitudo terhadap gelombang datang dan digunakan untuk mengevaluasi respons resonansi serta kinerja penyerapan elektromagnetik FSS (W. Zhang et al., 2024).

Analisis S11 dan S21 dilakukan dengan cara memodelkan reaksi struktur dalam simulasi medan penuh atau melalui pengukuran eksperimental menggunakan *vector network analyzer* (VNA), yang memberikan gambaran tentang ketergantungan frekuensi dari besaran hamburan tersebut. Dalam tahap ini, nilai parameter umumnya diubah ke dalam skala dB untuk menunjukkan seberapa kuat gelombang yang dipantulkan atau diteruskan dalam kisaran frekuensi tertentu. Desain FSS yang efektif untuk menyerap gelombang radar menunjukkan nilai S11 dan S21 yang rendah pada frekuensi yang diinginkan, yang berarti bahwa energi yang dipantulkan atau diteruskan sangat sedikit, sementara sebagian besar energi yang masuk telah diserap oleh struktur tersebut (Wang et al., 2023).

Tingkat penyerapan energi pada suatu struktur absorber diekspresikan melalui hubungan matematis antara parameter hamburan S11 dan S21. Secara umum, koefisien penyerapan $A(f)$ pada frekuensi tertentu didefinisikan sebagai selisih antara energi total gelombang yang datang dengan energi yang berhasil dipantulkan dan diteruskan, dinyatakan dalam bentuk:

$$A(f) = 1 - |S_{11}(f)|^2 - |S_{21}(f)|^2 \quad (9)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa semua energi yang tidak dipantulkan maupun ditransmisikan oleh struktur diasumsikan telah diserap di dalamnya. Formula tersebut menghitung rasio energi yang efektif diserap oleh material terhadap energi total gelombang yang datang, menjadikannya ukuran kinerja utama dalam desain absorber elektromagnetik (W. Zhang et al., 2024).

Dalam desain absorber elektromagnetik yang dilengkapi dengan *ground plane* konduktif di bagian belakang, transmisi gelombang menjadi sangat kecil sehingga parameter S21 dapat diabaikan dalam perhitungan energi elektromagnetik yang terbuang; model penyerapan kemudian bergantung pada refleksi yang diwakili oleh S11 (Viji & Anujan, 2023). Karena transmisi ditekan oleh keberadaan *ground plane*, koefisien transmisi S21 menjadi sangat kecil atau mendekati nol, sehingga rumus absorpsi A dapat disederhanakan menjadi $A \approx 1 - |S_{11}|^2$ dan semua energi yang tidak dipantulkan diasumsikan terserap dalam struktur (Ali et al., 2021).

Dalam struktur absorber yang efektif, ketika nilai refleksi S_{11} rendah, hampir keseluruhan energi elektromagnetik yang datang tidak dipantulkan atau ditransmisikan, tetapi diubah menjadi bentuk lain seperti panas di dalam struktur itu sendiri (Mahmud et al., 2024).

2.9.1 Absorption rate

Absorption rate atau tingkat penyerapan merupakan parameter utama dalam evaluasi kinerja material penyerap gelombang elektromagnetik, khususnya pada absorber berbasis metamaterial, *metasurface*, dan *Frequency Selective Surface* (FSS). *Absorption rate* menyatakan fraksi energi gelombang elektromagnetik datang yang berhasil diserap oleh struktur, setelah dikurangi energi yang dipantulkan dan diteruskan. Secara umum, mekanisme ini dinyatakan secara matematis melalui parameter hamburan:

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2 \quad (10)$$

Dimana $|S_{11}(\omega)|^2$ mewakili energi yang dipantulkan dan $|S_{21}(\omega)|^2$ mewakili energi yang ditransmisikan. Pada absorber dengan *ground plane*, transmisi energi cenderung sangat kecil sehingga persamaan dapat disederhanakan menjadi

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 \quad (11)$$

Dalam studi metamaterial absorber, nilai *absorption rate* yang tinggi (>96 %) menandakan pencocokan impedansi dan resonansi struktur yang efektif dalam meminimalkan refleksi dan menyerap energi gelombang (Mohammad et al., 2024).

2.9.2 Surface Impedance

Surface impedance atau impedansi permukaan adalah besaran yang menggambarkan respon permukaan suatu material terhadap gelombang elektromagnetik yang datang, khususnya hubungan antara medan listrik dan medan

magnet di permukaan tersebut. Dalam konteks absorber metamaterial dan *metasurface*, *surface impedance* digunakan untuk menganalisis bagaimana impedansi struktur absorber cocok (*matched*) dengan impedansi ruang bebas (*free space*) untuk meminimalkan pantulan dan memaksimalkan penyerapan energi gelombang elektromagnetik. Salah satu rumus yang dipakai untuk menghitung *effective surface impedance* $Z(\omega)$ berdasarkan parameter S adalah:

$$Z(\omega) = Z_0 \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (12)$$

Dimana

Z_0 = Impedansi ruang bebas (377Ω)

S_{11} = Koefisien refleksi

S_{21} = Koefisien transmisi

Namun, dalam banyak absorber metamaterial dengan *ground plane*, transmisi sangat kecil $S_{21} = 0$. Dalam kondisi ini, rumus di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$Z(\omega) = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (13)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa nilai impedansi permukaan dapat diasosiasikan secara langsung dengan parameter refleksi S_{11} . Ketika impedansi efektif $Z(\omega)$ mendekati 377Ω (nilai impedansi *free space*), maka pantulan menjadi sangat kecil dan penyerapan (absorption) mendekati maksimum (Song et al., 2023).

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian dalam beberapa tahun terakhir telah menunjukkan bahwa desain absorber berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) dan *metasurface* mampu mencapai efisiensi penyerapan gelombang elektromagnetik yang sangat tinggi pada pita

frekuensi C-band (4 – 8 GHz) dan X-band (8 – 12 GHz). Hal ini umumnya diperoleh melalui optimasi geometri *unit cell*, pemilihan material substrat yang tepat, serta kombinasi antara simulasi numerik dan pengukuran eksperimental untuk memvalidasi performa desain.

Salah satu contoh riset terkini memperlihatkan desain absorber multilayer FSS yang menggunakan substrat foam dan lapisan dielektrik kuarsa, yang dapat mencapai tingkat penyerapan lebih dari 90 % dalam kisaran frekuensi 3.1–18 GHz, mencakup pita C, X, serta Ku. Penelitian ini melibatkan kombinasi optimasi geometri dengan simulasi dan validasi melalui eksperimen untuk memastikan bahwa struktur yang diusulkan mampu menunjukkan performa yang tinggi dan stabilitas pada berbagai sudut insiden. Performa yang tinggi ini didukung oleh pencapaian kecocokan impedansi yang baik antara absorber dan ruang bebas melalui pemilihan material serta konfigurasi *unit cell* yang tepat, sehingga impedansi input hampir mendekati impedansi karakteristik ruang bebas pada frekuensi yang ditargetkan (D. Zhang et al., 2025).

Penelitian lain yang relevan berfokus pada desain absorber tiga pita *ultrathin* yang dicetak di atas substrat FR-4 dan didukung oleh *ground plane*, yang menunjukkan performa absorpsi efektif pada pita C, X, dan Ku dengan nilai absorpsi tinggi. Penelitian ini menekankan pentingnya optimasi geometri dan parameter struktural dalam mencapai respon resonansi yang kuat dan koefisien penyerapan tinggi di pita frekuensi yang diinginkan serta menunjukkan bahwa struktur yang tipis dapat tetap menghasilkan performa yang unggul jika impedansi dan resonansi dikendalikan dengan baik melalui desain *unit cell* (Sudarsan et al., 2024).

Selain itu, hasil studi desain *metasurface* absorber FR-4 *fleksibel* dan *transparan* dengan film ITO resistif menunjukkan bahwa struktur tersebut mampu menyerap lebih dari 90 % energi gelombang elektromagnetik dalam rentang 9.85–41.76 GHz, yang juga mencakup pita X. Penelitian ini menyoroti pemilihan material yang inovatif seperti film ITO dan kombinasi parameter geometris yang menstabilkan respons absorpsi pada berbagai keadaan polarisasi dan sudut datang gelombang (Hayat et al., 2024).

Secara keseluruhan, kajian literatur memperlihatkan bahwa desain absorber berbasis FSS/*metasurface* yang berhasil mencapai $> 90\%$ penyerapan pada pita C-band dan X-band disebabkan oleh optimasi geometri *unit cell*, pemilihan substrat yang tepat, dan validasi kombinasi simulasi–eksperimen. Optimasi tersebut meliputi penyesuaian parameter dimensional *unit cell*, pemilihan material substrat yang memberikan rugi elektromagnetik yang sesuai, dan verifikasi performa melalui pengukuran praktis. Relevansi pendekatan ini menunjang tujuan desain material anti-radar yang efisien dan realistis.

BAB 3. METODOLOGI

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian rekayasa (*engineering research*) yang menitikberatkan pada proses perancangan, analisis, serta pengujian suatu sistem fungsional berbasis prinsip – prinsip elektromagnetik. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif dengan metode eksperimental dan numerik yang saling melengkapi. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai kinerja struktur *Frequency Selective Surface* (FSS) sebagai material penyerap gelombang radar, baik secara teoretis maupun empiris.

Pendekatan numerik dilakukan melalui simulasi elektromagnetik berbasis metode komputasi untuk memodelkan respons interaksi gelombang elektromagnetik terhadap struktur FSS yang dirancang. Simulasi ini bertujuan untuk memprediksi karakteristik penyerapan gelombang radar pada rentang frekuensi tertentu dengan menganalisis parameter hamburan (*scattering parameters*), khususnya koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}). Melalui simulasi numerik, pengaruh variasi geometri unit sel, dimensi struktur, serta sifat material terhadap performa penyerapan dapat dievaluasi secara sistematis sebelum tahap realisasi fisik dilakukan. Pendekatan ini juga berfungsi untuk mengoptimalkan desain agar diperoleh struktur dengan tingkat penyerapan maksimum dan bandwidth operasi yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi anti-radar.

Selanjutnya, pendekatan eksperimental dilakukan sebagai tahap validasi terhadap hasil simulasi numerik. Pada tahap ini, desain FSS yang telah dioptimalkan difabrikasi menjadi prototipe fisik menggunakan teknik dan material yang sesuai dengan spesifikasi perancangan. Prototipe yang dihasilkan kemudian diuji melalui pengukuran karakteristik elektromagnetik menggunakan peralatan pengukuran frekuensi mikro, seperti *vector network analyzer* (VNA), untuk memperoleh nilai parameter S secara langsung. Hasil pengukuran eksperimental tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi guna mengevaluasi tingkat kesesuaian

model numerik dengan kondisi nyata, sekaligus mengidentifikasi faktor-faktor penyebab perbedaan yang mungkin terjadi, seperti toleransi fabrikasi dan ketidaksempurnaan material.

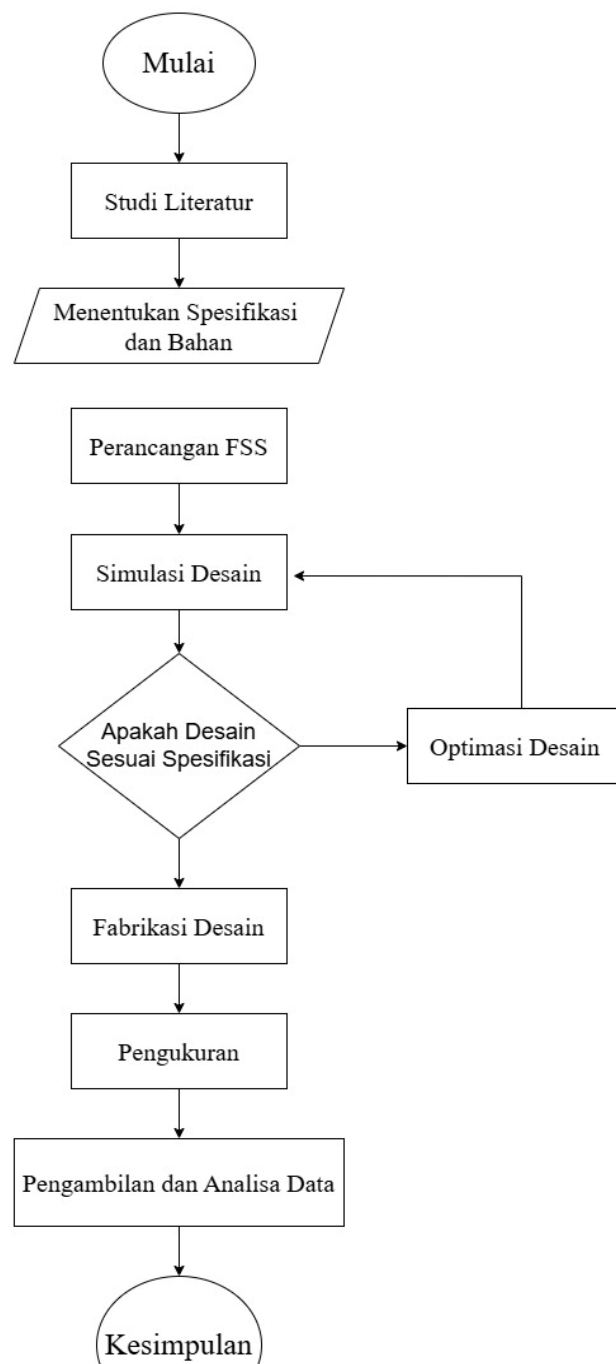
Secara keseluruhan, penelitian ini bersifat aplikatif karena tidak hanya berfokus pada kajian teoretis, tetapi juga diarahkan pada pengembangan desain material anti-radar yang berpotensi untuk diimplementasikan pada sistem pertahanan atau aplikasi teknologi lainnya. Integrasi antara simulasi numerik dan pengujian eksperimental diharapkan dapat menghasilkan desain FSS dengan kinerja penyerapan yang optimal, valid secara ilmiah, serta relevan untuk pengembangan teknologi material fungsional di bidang elektromagnetik.

3.2 Alur Penelitian

Berdasarkan gambar 3.1 dibawah tahapan penelitian dilakukan secara sistematis dan berurutan. Penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori, metode, serta referensi terkait *metasurface* dan *Frequency Selective Surface* (FSS). Berdasarkan hasil studi literatur, ditentukan spesifikasi penelitian dan pemilihan bahan yang sesuai dengan frekuensi target serta tujuan penelitian.

Tahap berikutnya adalah perancangan struktur FSS, yang mencakup penentuan geometri *unit cell* dan konfigurasi *metasurface*. Desain yang telah dirancang kemudian dianalisis melalui simulasi numerik untuk mengevaluasi karakteristik elektromagnetik dan kesesuaiannya terhadap spesifikasi yang telah ditetapkan. Apabila hasil simulasi belum memenuhi spesifikasi, dilakukan optimasi desain secara iteratif hingga diperoleh performa yang diinginkan.

Setelah desain dinyatakan sesuai, tahapan dilanjutkan dengan fabrikasi struktur *metasurface* berdasarkan desain hasil optimasi. Sampel yang telah difabrikasi kemudian diuji melalui proses pengukuran untuk memperoleh data karakteristik elektromagnetik secara eksperimental. Data hasil pengukuran selanjutnya diolah dan dianalisis untuk dibandingkan dengan hasil simulasi. Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan berdasarkan keseluruhan hasil analisis yang diperoleh.



Gambar 3. 1 Diagram Alur Penelitian

3.3 Perangkat yang Digunakan

Perangkat yang digunakan dalam penelitian ini mencakup perangkat lunak (software) dan perangkat keras (hardware).

3.3.1 Perangkat Lunak (software)

Perangkat lunak utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah ANSYS HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). Perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) dalam menganalisis karakteristik elektromagnetik struktur *Frequency Selective Surface* (FSS). ANSYS HFSS dipilih karena memiliki kemampuan yang akurat dalam memodelkan interaksi gelombang elektromagnetik dengan struktur *metasurface*, khususnya dalam perhitungan parameter hamburan (S-parameter), impedansi permukaan, serta visualisasi distribusi medan listrik dan medan magnet pada frekuensi gelombang mikro.

Tahapan simulasi yang dilakukan menggunakan ANSYS HFSS meliputi:

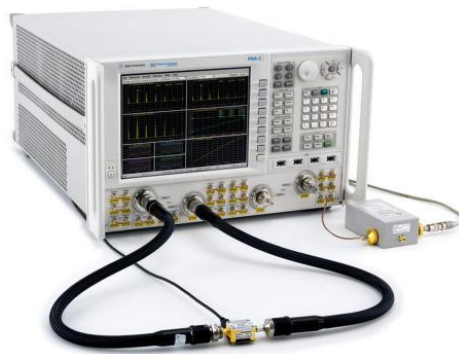
1. Pemodelan geometri *unit cell* FSS
2. Pendefinisian material konduktor dan substrat dielektrik
3. Penentuan *boundary condition* berupa *Perfect Electric Conductor* (PEC), *Perfect Magnetic Conductor* (PMC), dan *radiation boundary*
4. Pemberian eksitasi menggunakan wave port
5. Ekstraksi parameter S11 dan S21
6. Analisis medan listrik (E-field) dan medan magnet (H-field).

3.3.2 Perangkat Keras (software)

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. *Vector Network Analyzer* (VNA)

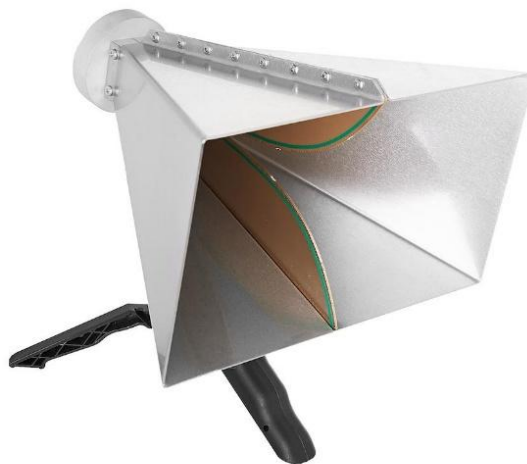
Digunakan untuk mengukur parameter hamburan (S-parameter), khususnya S11 dan S21, yang merepresentasikan karakteristik refleksi dan transmisi gelombang elektromagnetik pada prototipe *metasurface* berbasis FSS dengan menggunakan power 0 dBm atau 1 mW



Gambar 3. 2 Vector Network Analyzer (VNA)

b. Antena horn

Berfungsi sebagai pemancar dan penerima gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi pengujian, dengan pola radiasi terarah dan gain tinggi sehingga sesuai untuk pengukuran karakteristik penyerapan material.



Gambar 3. 3 Antena Horn

Spesifikasi antenna horn yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 3. 1 Spesifikasi antenna horn

<i>Type</i>	<i>Broadband antenna horn BHA 9118</i>
<i>Frequency range</i>	<i>1 to 18 GHz</i>
<i>Typical gain</i>	<i>4 to 15 dBi (4 to 32 numeric)</i>
<i>Impedance (nominal)</i>	<i>50 Ω</i>
<i>Maximum continuous power</i>	<i>200 W</i>
<i>Type polarisation</i>	<i>linear</i>
<i>Cross polarsation</i>	<i>20 dB minimum</i>
<i>Connector</i>	<i>precision N type female BHA 9118, dim</i>
<i>VSWR</i>	<i>2.5:1 max, 2:1 max (2 to 18 GHz)</i>
<i>Field strength capability</i>	<i>250 V/m at 1 m, 50 Ω source, free space conditions</i>
<i>Size antenna (LxHxW in mm)</i>	<i>approx. 240 X 147 X 247 (see drawings below)</i>
<i>Size transport box (LxHxW in mm)</i>	<i>approx. 510 X 310 X 215</i>
<i>Weight</i>	<i>approx. 1.9 kg, approx. 4.5 kg (transport box with antenna)</i>

c. Reflektor logam

Digunakan sebagai bidang pantul referensi atau backing untuk mensimulasikan kondisi batas tertentu, serta memastikan gelombang elektromagnetik yang tidak terserap dipantulkan kembali ke arah antena penerima.

d. Prototipe *metasurface* berbasis FSS

Merupakan objek utama penelitian yang dirancang dengan pola periodik tertentu untuk menghasilkan karakteristik penyerapan gelombang radar pada frekuensi target.

e. Peralatan fabrikasi PCB

Digunakan untuk merealisasikan desain FSS pada substrat dielektrik, meliputi proses pencetakan, etsa, dan pemotongan papan rangkaian sesuai dengan dimensi hasil perancangan.

3.4 Spesifikasi dan Material Penelitian

Objek penelitian dalam skripsi ini adalah *metasurface* berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) yang dirancang menggunakan *unit cell* berbentuk *patch* persegi. Pemilihan bentuk *patch* persegi didasarkan pada kemudahan dalam proses perancangan, kestabilan karakteristik resonansi, serta kemampuannya dalam menghasilkan respons elektromagnetik yang terkontrol pada frekuensi tertentu. Setiap *unit cell* disusun secara periodik sehingga membentuk struktur *metasurface* yang homogen secara efektif terhadap gelombang elektromagnetik yang datang

Secara struktural, *metasurface* FSS yang dikaji terdiri atas tiga lapisan utama, yaitu lapisan *patch* konduktif, lapisan substrat dielektrik, dan lapisan *ground plane*. Lapisan *patch* konduktif berfungsi sebagai elemen resonator yang berinteraksi langsung dengan gelombang elektromagnetik datang, sehingga sangat menentukan karakteristik refleksi dan transmisi struktur.

Lapisan substrat dielektrik ditempatkan di antara *patch* konduktif dan *ground plane*, dengan fungsi utama sebagai medium penyangga mekanik sekaligus pengontrol sifat elektromagnetik struktur. Parameter dielektrik substrat, seperti permitivitas relatif dan ketebalan, berpengaruh signifikan terhadap frekuensi resonansi, bandwidth, serta tingkat penyerapan gelombang elektromagnetik. Oleh karena itu, pemilihan substrat dilakukan secara cermat agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan rentang frekuensi yang ditargetkan. *Ground plane* berfungsi sebagai reflektor penuh yang mencegah transmisi gelombang elektromagnetik ke sisi belakang struktur. Keberadaan *ground plane* ini bertujuan untuk mengoptimalkan mekanisme penyerapan energi gelombang melalui interferensi

destruktif dan resonansi permukaan, sehingga energi gelombang elektromagnetik dapat diredam secara maksimal oleh struktur *metasurface*.

Penelitian ini difokuskan pada rentang frekuensi 5 –7 GHz, yang termasuk dalam pita C-band radar. Rentang frekuensi tersebut dipilih karena banyak digunakan dalam sistem radar pengawasan, radar cuaca, dan aplikasi pertahanan, sehingga pengembangan material penyerap gelombang elektromagnetik pada pita ini memiliki nilai aplikatif yang tinggi. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain *metasurface* FSS yang efektif untuk aplikasi anti-radar dan pengendalian jejak elektromagnetik pada sistem radar modern.

Berikut merupakan spesifikasi struktur lapisan dari FSS yang akan dibuat

1. *Patch* dan Groun Plane
 - Material: Tembaga (Copper)
 - Konduktivitas tinggi untuk mendukung resonansi arus permukaan
 - Ketebalan: 0,035 mm
2. Substrat Dielektrik
 - Material: FR4
 - Ketebalan: 1,5 mm
 - Berfungsi sebagai media penyimpanan energi medan listrik dan menghasilkan rugi-rugi dielektrik (dielectric loss)

Pemilihan FR4 didasarkan pada kemudahan fabrikasi, ketersediaan material, serta karakteristik loss dielektrik yang mendukung mekanisme penyerapan gelombang mikro.

3.5 Perancangan *Unit cell*

Tahapan perancangan diawali dengan penentuan panjang gelombang operasi yang sesuai dengan frekuensi resonansi yang ditargetkan. Pada frekuensi kerja sekitar 6 GHz, panjang gelombang gelombang elektromagnetik di ruang bebas adalah ± 50 mm. Panjang gelombang diperoleh dari persamaan (7)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Nilai ini digunakan sebagai acuan awal dalam menentukan skala geometris struktur yang akan dirancang. Untuk memastikan *metasurface* berperilaku sebagai medium efektif, dimensi *unit cell* ditetapkan lebih kecil dari panjang gelombang operasi, sehingga memenuhi prinsip struktur sub-panjang gelombang dan menghindari terjadinya difraksi orde tinggi.

Selanjutnya, proses perancangan difokuskan pada pengaturan geometri *patch* sebagai elemen utama resonator. Ukuran *patch* persegi divariasikan secara sistematis untuk menggeser posisi frekuensi resonansi hingga berada pada rentang frekuensi yang diinginkan, yaitu pita C-band. Variasi dimensi dilakukan secara bertahap dengan perubahan kecil pada panjang sisi *patch*, sehingga pengaruh setiap parameter terhadap respons elektromagnetik struktur dapat diamati dengan jelas.

Setiap konfigurasi hasil variasi kemudian dievaluasi menggunakan parameter refleksi (S11) sebagai indikator utama kinerja struktur. Nilai S11 dianalisis pada rentang frekuensi operasi untuk mengidentifikasi tingkat pemantulan gelombang elektromagnetik oleh *metasurface*. Desain optimum ditentukan berdasarkan konfigurasi yang menghasilkan nilai S11 paling rendah pada frekuensi target, yang menunjukkan terjadinya resonansi dan interaksi elektromagnetik yang paling efektif antara gelombang datang dan struktur *metasurface*. Dengan pendekatan ini, diperoleh desain *metasurface* FSS yang sesuai dengan spesifikasi frekuensi dan tujuan penelitian.

3.6 Dimensi *Unit cell*

Penentuan dimensi awal *metasurface* dilakukan sebagai langkah awal perancangan agar struktur yang terdiri atas *ground plane*, substrat dielektrik, dan *patch* konduktif dapat beroperasi pada frekuensi target 6 GHz. Frekuensi ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan skala dimensi lateral *unit cell* berdasarkan panjang gelombang operasi, dengan tetap memenuhi prinsip struktur sub – panjang gelombang.

Ukuran *ground plane* ditetapkan mengikuti dimensi *unit cell* agar dapat berfungsi sebagai reflektor penuh, sedangkan dimensi *patch* ditentukan berdasarkan pendekatan resonansi awal pada frekuensi 6 GHz. Nilai dimensi yang

diperoleh pada tahap ini belum bersifat final, melainkan masih berupa estimasi awal yang perlu diuji dan dievaluasi melalui simulasi. Proses pengujian dilakukan dengan memvariasikan dimensi *patch* dan *unit cell* untuk memperoleh respons elektromagnetik yang paling sesuai dengan frekuensi target. Dimensi akhir *metasurface* kemudian ditetapkan berdasarkan hasil evaluasi tersebut dan dibahas lebih lanjut pada bab pembahasan dan hasil.

3.6 Metode Simulasi Elektromagnetik

3.6.1 Pengaturan *Boundary* dan Lingkungan Simulasi

Simulasi numerik pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *unit cell* tunggal dengan asumsi bahwa struktur *metasurface* tersusun secara periodik dan membentang tak hingga. Pendekatan ini dipilih untuk merepresentasikan perilaku elektromagnetik struktur periodik tanpa harus memodelkan keseluruhan array, sehingga proses simulasi menjadi lebih efisien namun tetap akurat.

Untuk merealisasikan kondisi periodik tersebut, pada sisi lateral *unit cell* diterapkan batasan *Perfect Electric Conductor* (PEC) dan *Perfect Magnetic Conductor* (PMC). Penerapan batasan ini bertujuan untuk mensimulasikan pengulangan struktur secara periodik pada arah lateral, sehingga respons elektromagnetik yang diperoleh mewakili karakteristik *metasurface* secara keseluruhan.

Pada arah propagasi gelombang elektromagnetik, digunakan *radiation boundary* untuk mensimulasikan ruang bebas dan memungkinkan gelombang merambat keluar dari domain simulasi tanpa mengalami pantulan balik yang tidak diinginkan. Selain itu, *Radiation box* diatur dengan ukuran yang mencakup panjang gelombang operasi, yaitu sekitar 50 mm pada frekuensi 6 GHz. Pengaturan ini dilakukan untuk memastikan bahwa medan elektromagnetik dapat berkembang secara optimal di dalam domain simulasi, sehingga hasil perhitungan parameter hamburan yang diperoleh tetap akurat dan stabil.

3.6.2 Metode Eksitasi

Eksitasi gelombang elektromagnetik pada simulasi menggunakan wave port yang ditempatkan pada sisi atas dan bawah struktur *metasurface*. Pemilihan metode wave port didasarkan pada kemampuannya dalam mengekstraksi parameter hamburan, khususnya koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}), secara langsung dan akurat pada rentang frekuensi yang dianalisis.

Penggunaan wave port juga memberikan kestabilan numerik yang baik, terutama untuk struktur yang dilengkapi *ground plane*, sehingga kondisi batas yang diterapkan tetap konsisten selama proses simulasi. Selain itu, wave port mampu mendeteksi dan mengeksitasi mode propagasi yang relevan secara otomatis, sehingga meminimalkan kemungkinan kesalahan akibat pemilihan mode yang tidak sesuai.

Arah medan listrik (E-field) serta arah propagasi gelombang diatur sedemikian rupa sehingga tegak lurus terhadap permukaan FSS. Pengaturan ini bertujuan untuk menyerupai kondisi pengujian eksperimental pada insiden normal, sehingga hasil simulasi yang diperoleh dapat merepresentasikan perilaku struktur *metasurface* secara realistis dan dapat dibandingkan secara langsung dengan hasil pengukuran.

3.6 Parameter yang Dianalisis

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Koefisien Refleksi (S_{11})

Parameter ini menunjukkan besarnya gelombang elektromagnetik yang dipantulkan kembali oleh *metasurface* ketika dikenai gelombang datang. Nilai S_{11} digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi resonansi serta mengevaluasi tingkat pencocokan impedansi antara struktur *metasurface* dan ruang bebas. Semakin kecil nilai S_{11} pada frekuensi target, semakin baik kemampuan struktur dalam meminimalkan refleksi.

2. Koefisien Transmisi (S_{21})

S_{21} merepresentasikan proporsi energi gelombang elektromagnetik yang dapat menembus struktur *metasurface*. Pada desain yang menggunakan *ground plane*, nilai S_{21} diharapkan sangat kecil atau mendekati nol, yang

menandakan bahwa hampir tidak ada energi gelombang yang diteruskan melalui struktur.

3. Tingkat Penyerapan (*Absorption rate*)

Tingkat penyerapan dihitung berdasarkan hubungan antara parameter S_{11} dan S_{21} . Parameter ini menggambarkan kemampuan *metasurface* dalam menyerap energi gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu, sehingga menjadi indikator utama kinerja struktur sebagai material penyerap gelombang.

4. Impedansi Permukaan (*Surface Impedance*)

Impedansi permukaan dianalisis untuk memahami mekanisme interaksi gelombang elektromagnetik dengan *metasurface*. Nilai impedansi yang mendekati impedansi ruang bebas menunjukkan terjadinya pencocokan impedansi yang baik, yang berkontribusi pada penurunan refleksi dan peningkatan penyerapan energi.

5. Distribusi Medan Listrik dan Medan Magnet

Analisis distribusi medan listrik dan medan magnet digunakan untuk mengamati pola resonansi dan lokasi konsentrasi medan pada struktur *metasurface*. Hasil visualisasi ini memberikan pemahaman fisis mengenai mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik serta peran masing-masing elemen struktur dalam menghasilkan respons elektromagnetik yang diinginkan.

3.7 Fabrikasi Metasurface

Tahapan fabrikasi *metasurface* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan teknologi PCB konvensional, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Replikasi single *unit cell* menjadi array

Desain *unit cell* hasil simulasi diperbanyak secara periodik untuk membentuk array *metasurface*. Replikasi ini bertujuan agar struktur yang difabrikasi merepresentasikan asumsi periodik tak hingga pada tahap simulasi dan menghasilkan respons elektromagnetik yang seragam.

2. Pemotongan PCB

Papan PCB dipotong sesuai dengan ukuran array yang telah ditentukan. Proses ini dilakukan dengan presisi untuk memastikan dimensi fisik *metasurface* sesuai dengan desain dan meminimalkan ketidaksesuaian pada tahap pengujian.

3. Pengamplasan permukaan

Permukaan tembaga pada PCB diamplas secara merata untuk menghilangkan lapisan oksida dan kotoran. Tahap ini penting untuk meningkatkan kualitas adhesi pola desain pada saat proses transfer dan memastikan hasil etching yang lebih rapi.

4. Transfer desain ke PCB

Pola *metasurface* ditransfer dari desain digital ke permukaan PCB menggunakan metode transfer yang sesuai. Proses ini bertujuan untuk membentuk pola *patch* konduktif secara akurat sebelum dilakukan penghilangan tembaga.

5. Proses etching

PCB yang telah diberi pola kemudian melalui proses *etching* untuk melarutkan bagian tembaga yang tidak diperlukan. Tahap ini menghasilkan pola *patch* konduktif sesuai dengan desain *metasurface* yang telah direncanakan.

6. Pembersihan akhir

Setelah etching, PCB dibersihkan untuk menghilangkan sisa bahan kimia dan residu proses fabrikasi. Pembersihan ini dilakukan agar struktur *metasurface* siap digunakan pada tahap pengujian dan pengukuran karakteristik elektromagnetik.

3.8 Metode Pengukuran Eksperimental

Pengukuran karakteristik elektromagnetik *metasurface* dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) yang dihubungkan dengan antena horn, pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz. Konfigurasi pengukuran ini dirancang untuk mengevaluasi respons refleksi struktur secara sistematis melalui beberapa skenario, sebagai berikut:

1. Antena horn tanpa reflektor (*baseline*)

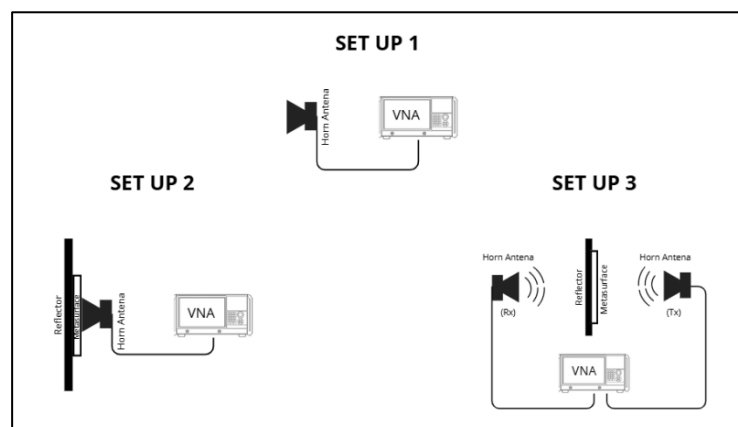
Skenario ini digunakan sebagai kondisi acuan untuk mengukur karakteristik pantulan dasar dari sistem pengukuran tanpa adanya objek pemantul tambahan. Data yang diperoleh merepresentasikan level refleksi alami dari antena dan lingkungan pengukuran, sehingga dapat digunakan sebagai referensi awal dalam analisis.

2. Antena horn dengan reflektor

Pada skenario ini, sebuah reflektor konduktif ditempatkan di depan antena horn untuk menghasilkan kondisi pantulan maksimum. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui respon refleksi tertinggi yang dapat terjadi pada sistem, sekaligus memvalidasi sensitivitas dan konsistensi pengukuran VNA dan antena horn.

3. Antena horn, *metasurface*, dan reflektor

Skenario utama dilakukan dengan menempatkan *metasurface* di antara antena horn dan reflektor. Konfigurasi ini digunakan untuk mengukur pengaruh *metasurface* terhadap gelombang elektromagnetik yang dipantulkan oleh reflektor. Penurunan level refleksi yang terukur pada kondisi ini dibandingkan dengan skenario reflektor saja menunjukkan kemampuan *metasurface* dalam menyerap energi gelombang elektromagnetik.



Gambar 3. 4 Metode pengukuran

Melalui perbandingan hasil dari ketiga skenario tersebut, kontribusi *metasurface* terhadap penurunan refleksi gelombang elektromagnetik dapat dievaluasi secara terpisah dari pengaruh antenna dan reflektor. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih objektif terhadap kinerja *metasurface* sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz.

3.8.1 Konfigurasi Pengukuran S11

Pengukuran parameter S11 dilakukan untuk mengetahui karakteristik refleksi gelombang elektromagnetik dari objek yang diuji. Pada konfigurasi ini digunakan satu antenna horn yang terhubung dengan *Vector Network Analyzer* (VNA). Antenna horn berfungsi sebagai pemancar gelombang elektromagnetik sekaligus penerima gelombang yang dipantulkan oleh objek pengujian.

Pada pengukuran S11, *metasurface* dan reflektor ditempatkan pada posisi yang relatif dekat terhadap aperture antenna horn sesuai dengan konfigurasi eksperimen. Penempatan tersebut mempertimbangkan ukuran *metasurface* yang digunakan, serta karakteristik beamwidth antenna horn. Beamwidth menyebabkan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan antenna membentuk area iluminasi tertentu dan area tersebut semakin luas ketika jarak antara antenna dengan objek bertambah.

Oleh karena itu, posisi objek yang relatif dekat digunakan agar area iluminasi pada permukaan pengujian tidak semakin melebar dan interaksi gelombang elektromagnetik dengan *metasurface* dapat diamati secara lebih terkontrol. Jarak aktual pada konfigurasi pengukuran dicantumkan berdasarkan kondisi eksperimen yang dilakukan.

3.8.2 Konfigurasi Pengukuran S21

Pengukuran parameter S21 dilakukan untuk mengetahui karakteristik transmisi gelombang elektromagnetik melalui area pengujian. Berbeda dengan pengukuran S11 yang menggunakan satu antenna, pengukuran S21 menggunakan dua antenna horn yang masing – masing berfungsi sebagai *transmitter* (Tx) dan *receiver* (Rx).

Antenna *transmitter* digunakan untuk memancarkan gelombang elektromagnetik menuju *metasurface*, sedangkan antenna *receiver* digunakan untuk

menerima gelombang elektromagnetik yang berhasil diteruskan melalui area pengujian. Metasurface ditempatkan di antara kedua antenna dan reflektor ditempatkan pada sisi belakang metasurface sesuai dengan konfigurasi pengujian.

Jarak antara antenna *transmitter*, *metasurface* dan reflektor, serta antenna receiver merupakan bagian dari konfigurasi pengukuran yang perlu diperhatikan. Jarak tersebut berkaitan dengan beamwidth antenna horn karena beamwidth menentukan luas area iluminasi gelombang elektromagnetik pada posisi objek pengujian. Semakin jauh posisi objek dari antenna, semakin luas area pancaran yang terbentuk.

3.8.3 *Beamwidth*, Jarak, dan Ukuran *Metasurface*

Karakteristik *beamwidth* antenna horn menjadi salah satu pertimbangan dalam menentukan konfigurasi pengukuran. Beamwidth menunjukkan lebar sudut pancaran utama antenna sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan luas area yang mendapatkan iluminasi gelombang elektromagnetik pada jarak tertentu dari antenna.

Ukuran area iluminasi pada posisi pengujian dipengaruhi oleh beamwidth dan jarak antara antenna dengan objek. Secara sederhana, lebar area pancaran dapat diperkirakan menggunakan persamaan:

$$W \approx 2d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (14)$$

Hubungan tersebut menunjukkan bahwa semakin jauh posisi objek dari antenna, semakin besar area iluminasi yang terbentuk. Apabila area iluminasi antenna lebih besar daripada ukuran metasurface, tidak seluruh energi elektromagnetik yang dipancarkan antenna akan berinteraksi langsung dengan *metasurface*. Sebagian energi dapat mengenai area di luar sampel sehingga hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh kondisi di sekitar objek pengujian.

Oleh karena itu, konfigurasi dan jarak pengukuran ditentukan dengan mempertimbangkan karakteristik beamwidth antenna serta ukuran *metasurface*. Pertimbangan tersebut digunakan untuk memperoleh interaksi gelombang elektromagnetik dengan sampel yang lebih terkontrol, terutama pada pengukuran refleksi dan transmisi.

3.8.4 Penggunaan Reflektor

Reflektor digunakan dalam konfigurasi pengukuran untuk menghasilkan kondisi referensi pantulan dan membantu meminimalkan gelombang elektromagnetik yang melewati bagian luar area pengujian. Penggunaan reflektor mempertimbangkan karakteristik beamwidth antena horn dan ukuran area iluminasi pada posisi reflektor.

Ukuran reflektor dibuat lebih besar daripada area iluminasi utama yang dihasilkan oleh beam antena horn pada posisi pengujian. Hal tersebut bertujuan agar sebagian besar energi elektromagnetik yang dipancarkan menuju area pengujian mengenai reflektor, sehingga kemungkinan gelombang melewati bagian luar reflektor dapat diminimalkan.

Pada pengukuran refleksi, reflektor digunakan sebagai kondisi referensi untuk mengetahui respons pantulan ketika gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan permukaan reflektif. Selanjutnya, *metasurface* ditempatkan di depan reflektor untuk mengetahui perubahan respons pantulan akibat keberadaan metasurface.

Dengan demikian, reflektor pada penelitian ini tidak digunakan sebagai objek pembanding utama terhadap metasurface, tetapi sebagai kondisi referensi dan bagian dari konfigurasi pengujian. Perbandingan dilakukan antara kondisi reflektor sebagai referensi dengan kondisi *metasurface* yang dikombinasikan dengan reflektor.

3.9 Metode Analisis Data

Nilai S_{11} efektif diperoleh dengan mengurangkan hasil pengukuran reflektor dari hasil pengukuran *metasurface*, sehingga efek sistem pengukuran dapat dieliminasi. Hasil simulasi dan pengukuran kemudian dibandingkan untuk menganalisis:

1. Analisis pergeseran frekuensi resonansi

Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran dilakukan untuk mengidentifikasi adanya pergeseran frekuensi resonansi. Pergeseran ini

mencerminkan perbedaan antara kondisi ideal dalam simulasi dan kondisi nyata pada hasil fabrikasi, yang dapat dipengaruhi oleh toleransi dimensi dan sifat material.

2. Perbandingan nilai refleksi dan transmisi

Nilai parameter refleksi dan transmisi dari hasil simulasi dibandingkan dengan hasil pengukuran untuk mengevaluasi kesesuaian performa *metasurface*. Selisih nilai yang muncul digunakan untuk menilai tingkat rugi-rugi tambahan dan ketidaksempurnaan struktur pada kondisi aktual.

3. Evaluasi kesesuaian impedansi permukaan

Kesesuaian impedansi permukaan dianalisis untuk menilai tingkat pencocokan impedansi antara *metasurface* dan ruang bebas. Pencocokan impedansi yang baik menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan gelombang elektromagnetik bekerja secara efektif pada frekuensi target.

Hasil keseluruhan analisis digunakan untuk mengevaluasi akurasi desain *metasurface* yang telah dirancang. Selain itu, pengaruh toleransi fabrikasi serta karakteristik material nyata terhadap kinerja absorber dianalisis untuk memahami perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran.

3.10 Validasi dan Kriteria Keberhasilan

Kriteria keberhasilan desain *metasurface* dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan beberapa parameter kinerja elektromagnetik sebagai berikut:

1. Nilai koefisien refleksi ($S_{11} < -10$ dB)

Desain *metasurface* dianggap memenuhi kriteria apabila nilai S_{11} berada di bawah -10 dB pada frekuensi target. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi gelombang elektromagnetik tidak dipantulkan kembali, sehingga refleksi yang terjadi relatif kecil dan struktur mampu berinteraksi secara efektif dengan gelombang datang.

2. Nilai koefisien transmisi ($S_{21} < -10$ dB)

Nilai S_{21} yang lebih kecil dari -10 dB menandakan bahwa energi gelombang elektromagnetik yang diteruskan melalui struktur sangat rendah.

Pada *metasurface* yang dilengkapi *ground plane*, kondisi ini menunjukkan bahwa gelombang tidak menembus struktur dan energi diarahkan untuk dipantulkan atau diserap.

3. Tingkat penyerapan lebih dari 80%

Tingkat penyerapan yang melebihi 80% menunjukkan bahwa *metasurface* mampu meredam sebagian besar energi gelombang elektromagnetik pada frekuensi target. Parameter ini menjadi indikator utama efektivitas *metasurface* sebagai material penyerap gelombang elektromagnetik.

4. Impedansi permukaan mendekati 377Ω

Impedansi permukaan yang mendekati impedansi ruang bebas, yaitu sekitar 377Ω , menunjukkan terjadinya pencocokan impedansi yang baik antara *metasurface* dan medium sekitarnya. Kondisi ini berperan penting dalam meminimalkan refleksi gelombang elektromagnetik pada permukaan struktur.

Secara keseluruhan, pemenuhan kriteria-kriteria tersebut menunjukkan bahwa *metasurface* telah mencapai kondisi matching impedansi yang efektif.

3.11 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar (PRTS), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada ketersediaan fasilitas laboratorium pengujian elektromagnetik, perangkat ukur berstandar nasional, serta infrastruktur pendukung yang memadai untuk menunjang proses perancangan, simulasi, dan validasi eksperimental penelitian. Pelaksanaan penelitian dilakukan dalam rentang waktu 7 bulan dari bulan februari – juli 2025 yang mencakup tahapan studi literatur, perancangan model, simulasi numerik, pengujian, analisis data, hingga penyusunan laporan penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil penelitian yang diperoleh melalui proses penelitian, simulasi, serta pengujian terhadap model yang telah dikembangkan. Data yang dihasilkan mencakup parameter utama seperti sifat refleksi, transmisi, dan tingkat penyerapan yang digunakan untuk mengukur seberapa baik struktur yang dirancang berfungsi.

Bagian pembahasan, fokus diarahkan pada interpretasi hasil yang diperoleh berdasarkan fenomena yang terjadi pada model, termasuk pengaruh variasi parameter desain terhadap kinerja sistem. Analisis dilakukan secara logis dan terstruktur untuk mengidentifikasi pola, kecenderungan, serta hubungan antar variabel yang diamati. Dengan demikian, bab ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa desain yang diusulkan serta implikasinya terhadap tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

4.1 Perancangan Awal Simulasi *Unit cell* dan Penyesuaian Dimensi

Pada tahap awal, perancangan simulasi *unit cell* dilakukan dengan menetapkan struktur dasar yang terdiri atas substrat, *patch*, dan *ground plane*. Dimensi substrat telah ditentukan dengan panjang dan lebar sebesar 32 mm x 32 mm serta ketebalan 1,5 mm menggunakan material FR4. Sementara itu, *ground plane* menggunakan material tembaga dengan dimensi 32 mm x 32 mm dan ketebalan 0,035 mm. Dimensi substrat dan *ground plane* dipertahankan tetap selama proses simulasi karena keduanya berfungsi sebagai parameter pendukung struktur. Oleh karena itu, proses optimasi difokuskan pada perubahan dimensi *patch* sebagai elemen utama yang menentukan karakteristik resonansi dan penyerapan gelombang elektromagnetik.

Dimensi awal *patch* tidak ditentukan secara acak, melainkan diperoleh melalui perhitungan teoritis berdasarkan frekuensi kerja yang ditargetkan, yaitu 6 GHz, serta karakteristik material substrat FR4 yang memiliki permitivitas relatif (ϵ_r) sebesar 4,4. Perhitungan ini bertujuan untuk memperoleh dimensi awal *patch*

yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses pemodelan dan optimasi menggunakan perangkat lunak HFSS.

Perhitungan diawali dengan menentukan permitivitas efektif (ϵ_{eff}) menggunakan persamaan (6)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-1/2}$$

Karena w belum diketahui dilakukan pendekatan awal menggunakan:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}$$

Sehingga untuk menghitung panjang dan permitivitas frekuensi 6GHz dengan konstanta dielektrik FR4 adalah 4.4 sebagai berikut:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} = \frac{4.4 + 1}{2} = 2.7$$

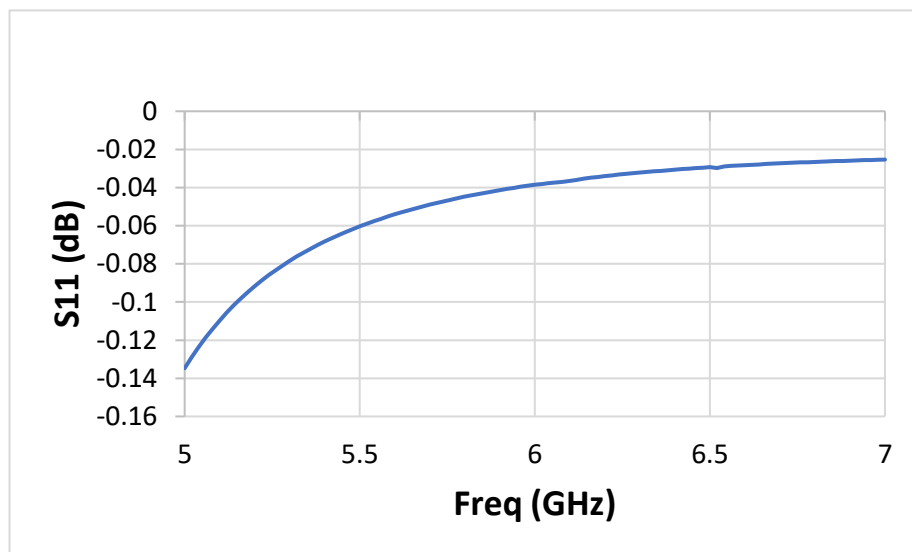
Maka perhitungan panjang *patch*nya menggunakan persamaan (5)

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 6 \times 10^9 \times \sqrt{2.7}}$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 6 \times 10^9 \times 1.643} = 15.2 \text{ mm}$$

Karena patch berbentuk persegi maka panjang dan lebarnya adalah 15.2 mm



Gambar 4. 1 Grafik Hasil Simulasi Patch 15.2 mm

Hasil simulasi awal menggunakan dimensi *patch* hasil perhitungan teoritis sebesar 15.2 mm x 15.2 mm menunjukkan bahwa karakteristik refleksi yang diperoleh masih belum sesuai dengan target perancangan. Berdasarkan Gambar ..., nilai return loss (S11) pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz tidak membentuk titik resonansi yang mencapai -10 dB, bahkan nilai S11 cenderung meningkat dari sekitar $-0,14$ dB pada frekuensi 5 GHz menjadi sekitar $-0,03$ dB pada frekuensi 7 GHz. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur metasurface belum mengalami resonansi pada frekuensi target 6 GHz, sehingga dimensi patch hasil perhitungan awal belum mampu menghasilkan mekanisme pencocokan impedansi (*impedance matching*) yang diperlukan untuk memperoleh penyerapan gelombang elektromagnetik secara optimal. Oleh karena itu, dimensi patch hasil perhitungan teoritis tidak dapat langsung digunakan sebagai dimensi akhir dan masih memerlukan proses optimasi.

Sebelum diperoleh dimensi patch yang memenuhi kriteria perancangan, dilakukan serangkaian proses optimasi melalui variasi ukuran patch secara bertahap. Setiap perubahan dimensi menghasilkan karakteristik S11 yang berbeda, sehingga pengaruh ukuran patch terhadap frekuensi resonansi dapat diamati secara sistematis. Sebagian besar variasi yang dicoba masih menunjukkan respon yang belum memenuhi target, baik karena frekuensi resonansinya belum berada di sekitar 6 GHz maupun karena nilai return loss yang dihasilkan belum mencapai -10 dB. Oleh sebab itu, proses optimasi dilakukan secara iteratif dengan mengubah dimensi patch hingga diperoleh konfigurasi yang memberikan respon paling mendekati spesifikasi penelitian.

Tabel 4. 1 Variasi Dimensi Patch

Variasi Dimensi <i>Patch</i> (mm)	Frekuensi (GHz)	S11 (dB)
15.2 x 15.2	5	-0.13
13 x 13	5.06	-11.69
11 x 11	5.94	-14.09
10.6 x 10.6	6.14	-14.68

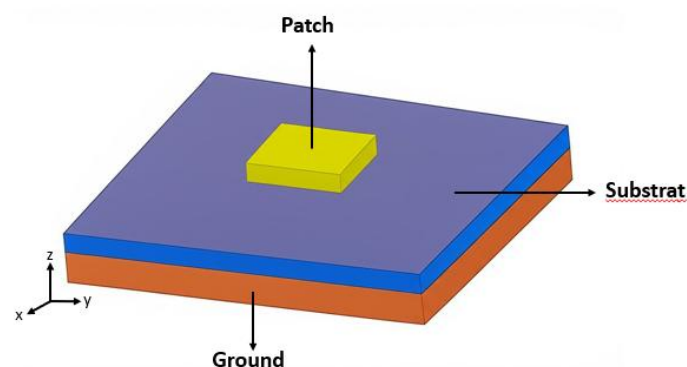
Tabel 4.1 di atas menunjukkan hasil dari beberapa variasi ukuran *patch* yang belum mencapai tingkat kinerja sesuai dengan standar yang ditentukan. Dari data tersebut terlihat bahwa setiap perubahan ukuran *patch* menghasilkan respons yang berbeda, tetapi sebagian besar masih belum mencapai tingkat penyerapan yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran *patch* memengaruhi karakteristik yang dihasilkan secara signifikan, sehingga perlu penyesuaian secara bertahap. Perlu diketahui bahwa dalam proses ini ketebalan bahan tidak ikut divariasikan, karena ketebalan substrat FR4 sudah ditentukan oleh produsen dan tidak bisa berubah. Maka dari itu, seluruh proses optimasi dilakukan dengan mengubah ukuran *patch* hingga diperoleh dimensi yang lebih sesuai dengan tujuan desain yang diinginkan.

4.2 Fiksasi desain, material dan dimensi struktur *unit cell*

Penentuan dimensi desain *unit cell* menjadi tahap yang krusial dan sangat menentukan keberhasilan simulasi serta efektivitas fungsional struktur untuk penyerapan gelombang elektromagnetik.

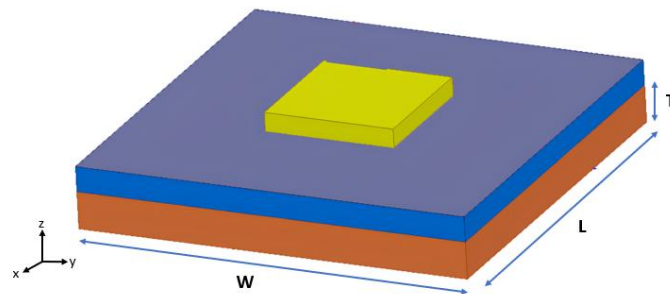
4.2.1 Struktur dan Dimensi Geometrik

Desain *unit cell* memiliki struktur planar 3 lapis yang terdiri dari *ground plane*, susbstrat dan *patch*.



Gambar 4. 2 Struktur Unit Cell

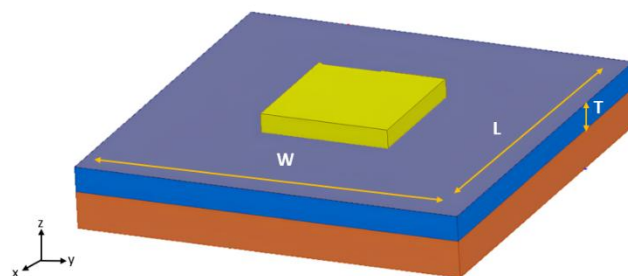
a) *Ground plane*



Gambar 4. 3 Ground Plane

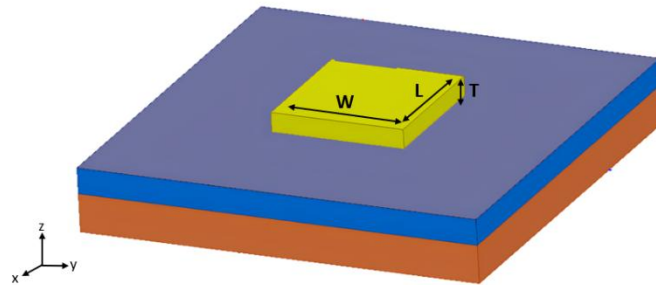
Merupakan Permukaan konduktif yang berfungsi sebagai reflector dan jalur balik arus untuk elemen radiasi antenna, dimensi yang ditetapkan untuk desain ini adalah: panjang 32 mm, lebar 32 mm, tebal, 0.035 mm dengan material berupa copper

b) Substrat



Gambar 4. 4 Substrat

Substrat berperan sebagai lapisan dielektrik yang memisahkan antara *patch* dan ground plane sekaligus sebagai media propagasi gelombang dan media tempat terjadinya resonansi medan listrik, dalam desain ini dimensi substrat yang dipakai adalah: panjang 32 mm, lebar 32 mm, tebal 1,5 mm dan material yang digunakan merupakan FR4

c) *Patch*

Gambar 4. 5 Patch

Patch merupakan elemen utama yang berfungsi sebagai resonator elektromagnetik. Dimensi *patch* sangat menentukan frekuensi resonansi. Untuk frekuensi kerja 6GHz, *patch* dirancang dengan dimensi: panjang 10.6 mm, lebar 10.6 mm, tebal 0.035 mm dengan material copper.

4.2.2 Pengaturan Radiation Box

Radiation box merupakan domain udara yang mengelilingi struktur *unit cell* dalam simulasi. *Radiation box* disini berfungsi untuk mensimulasikan medan bebas dan mencegah pemantulan gelombang yang tidak diinginkan dari batas domain. Untuk ukuran *Radiation box* ditentukan berdasarkan panjang gelombang dari frekuensi kerja target.

Untuk menghitung panjang gelombang dapat menggunakan persamaan (7)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Dimana :

λ = panjang gelombang

$c = 3 \times 10^8$ m/s (kecepatan cahaya diruang hampa)

f = Frekuensi target

maka untuk perhitungan panjang gelombang dengan frekuensi kerja 6GHz sebagai berikut:

diketahui :

λ = panjang gelombang

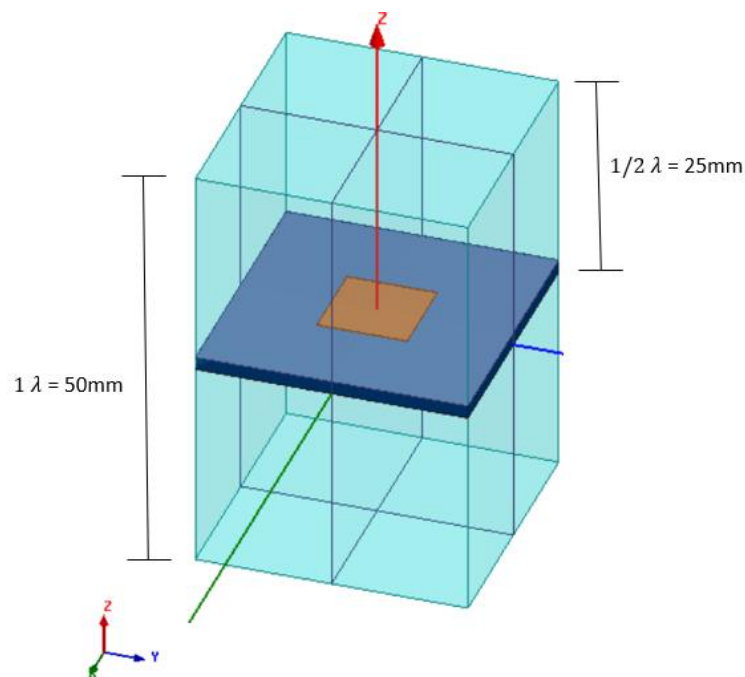
$c = 3 \times 10^8$ m/s (kecepatan cahaya diruang hampa)

$f = 6\text{GHz}$ (6×10^9 Hz)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^9} = 0.05\text{m} = 50\text{mm}$$

Dengan demikian *Radiation box* dirancang dengan ukuran 50mm, jarak antara substrat dan batas atas *Radiation box* $\lambda/2$ (25mm).

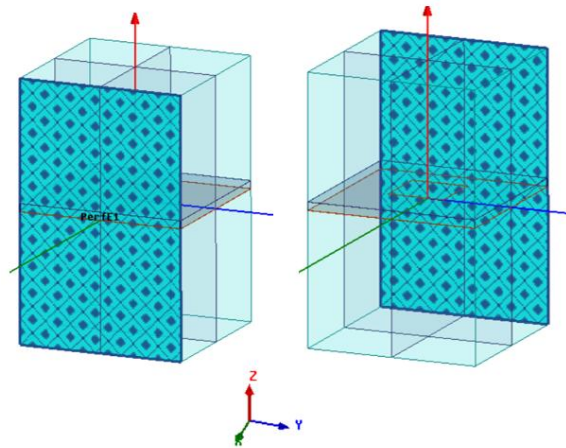


Gambar 4. 6 Radiation Box

4.2.3 Boundary Conditions

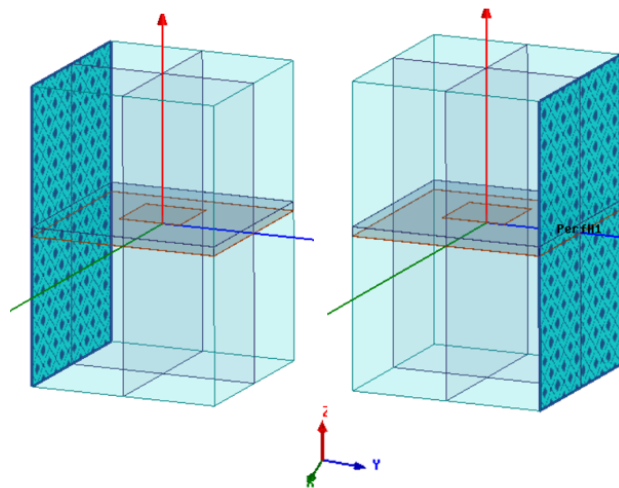
Pada simulasi *unit cell* ini menggunakan pendekatan *periodic boundary* PEC dan PMC

a) PEC Boundary



Gambar 4. 7 PEC Boundary

b) PMC Boundary

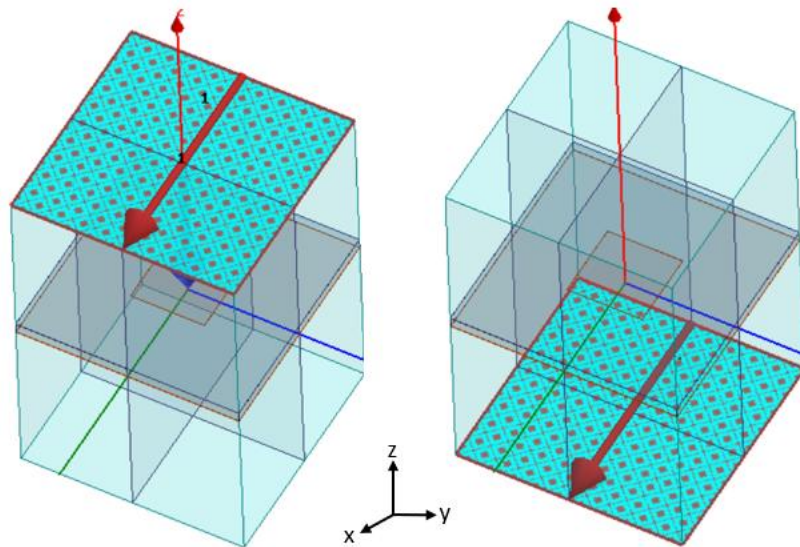


Gambar 4. 8 PMC Boundary

Konfigurasi ini menciptakan seolah olah struktur tersusun secara periodik tak terhingga, sehingga merepresentasikan kondisi nyata.

4.2.4 Eksitasi Gelombang Elektromagnetik

Sumber eksitasi pada simulasi *unit cell* ini menggunakan wave port. Yang ditempatkan pada bagian atas dan bawah *radiation box*.



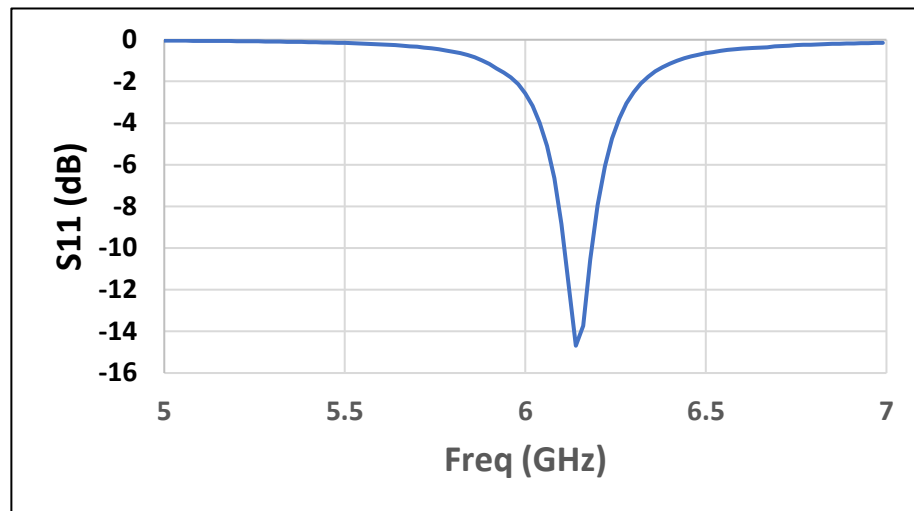
Gambar 4. 9 Wave Port

4.3 Hasil Simulasi yang Diperoleh

pada tahap ini, dilakukan proses simulasi terhadap struktur *unit cell* menggunakan software HFSS untuk mengevaluasi performa elektromagnetik dari desain yang telah dibuat. Dalam simulasi ini rentang frekuensi yang dipakai mulai dari 5 Ghz sampai 7 Ghz. Rentang ini dipilih untuk memastikan respon elektromagnetik dan struktur material dapat diamati secara menyeluruh serta untuk memperoleh parameter parameter utama seperti koefisien refleksi (S11), koefisien transmisi (S21), *absorption rate*, serta impedansi permukaan.

Selain parameter S dan turunanya, dilakukan juga analisis terhadap medan listrik (E – Field) dan medan magnet (H – Field) pada frekuensi kerja telah yang ditentukan.

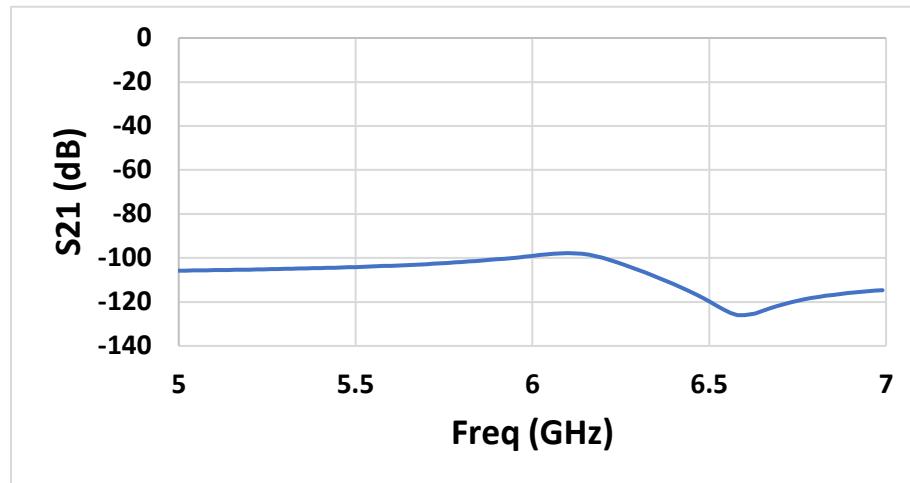
4.3.1 Parameter S11 (Koefisien Refleksi)



Gambar 4. 10 Grafik S11 Hasil Simulasi

Berdasarkan gambar 4.10 hasil simulasi yang diperoleh, terlihat bahwa struktur *unit cell* menunjukkan resonansi pada frekuensi 6.14 GHz dengan nilai return loss sebesar -14.68 dB. Walaupun frekuensi kerja yang ditargetkan awal pada 6 GHz pergeseran sebesar 140 MHz ke arah kanan yang sedikit lebih tinggi tetapi masih dapat diterima dan dianggap wajar dalam konteks simulasi elektromagnetik. Perubahan kecil ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti karakteristik substrat FR4 yang digunakan. Dimana nilai permitivitas FR4 tidak selalu konstan dan dapat berubah tergantung frekuensi atau kondisi lingkungan, selain itu akurasi dimensi fisik seperti tebal, panjang maupun lebar *patch* dan substrat juga sangat mempengaruhi posisi resonansi. Pengaturan mesh juga tak kalah penting terhadap ketelitian hasil yang di dapat. Nilai return loss sebesar -14.68 dB menunjukkan bahwa sekitar 96.6% dari gelombang yang datang berhasil di serap dan diteruskan oleh struktur dan Sebagian kecil dipantulkan Kembali. Dilihat secara keseluruhan pada parameter S11, hasil simulasi membuktikan bahwa desain *unit cell* yang telah dibuat berhasil mendekati frekuensi yang ditargetkan dengan performa penyerapan gelombang yang cukup baik.

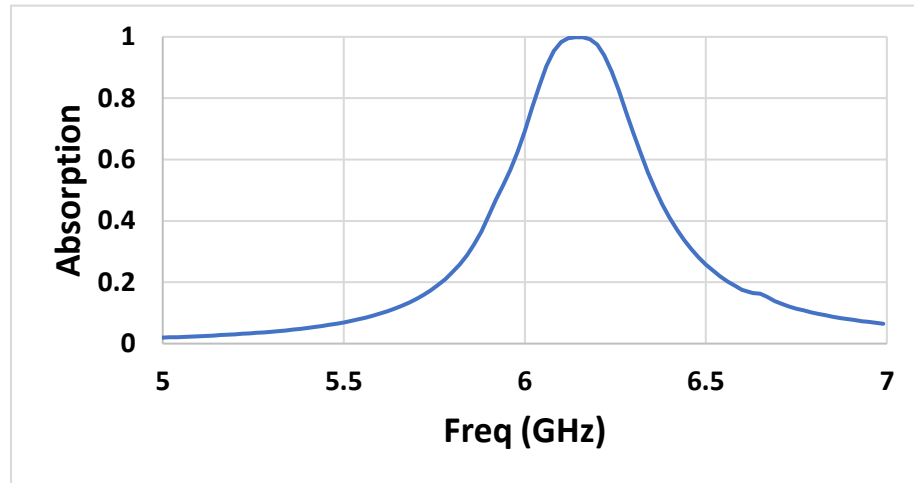
4.3.2 Parameter S21 (Koefisien Transmisi)



Gambar 4. 11 Grafik S21 Hasil Simulasi

Gambar 4.11 merupakan grafik yang diperoleh dari simulasi terlihat bahwa nilai S21 yang terjadi pada frekuensi 6.14 GHz sebesar -98.11 dB ini menunjukkan bahwa nilai sangat rendah yang mengindikasikan bahwa hampir tidak ada gelombang yang di transmisikan melalui struktur pada frekuensi target, yang artinya struktur benar benar menyerap hampir seluruh gelombang elektromagnetik yang datang. Secara keseluruhan nilai S21 yang sangat rendah ini menunjukkan bahwa struktur *unit cell* yang telah dirancang berhasil menciptakan kondisi destructive interference internal serta *impedance matching* yang sangat luar biasa baik terutama pada frekuensi 6.14 GHz. Kondisi ini memfasilitasi terjadinya total absorption.

4.3.4 Absorption rate



Gambar 4. 12 Grafik Absorption Rate Hasil Simulasi

Pada gambar 4.12 di atas, grafik laju penyerapan (*absorption rate*) yang sudah di dapatkan dari hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur *unit cell* yang telah di desain memiliki kemampuan menyerap gelombang elektromagnetik yang sangat tinggi pada frekuensi sekitar 6.14 GHz.

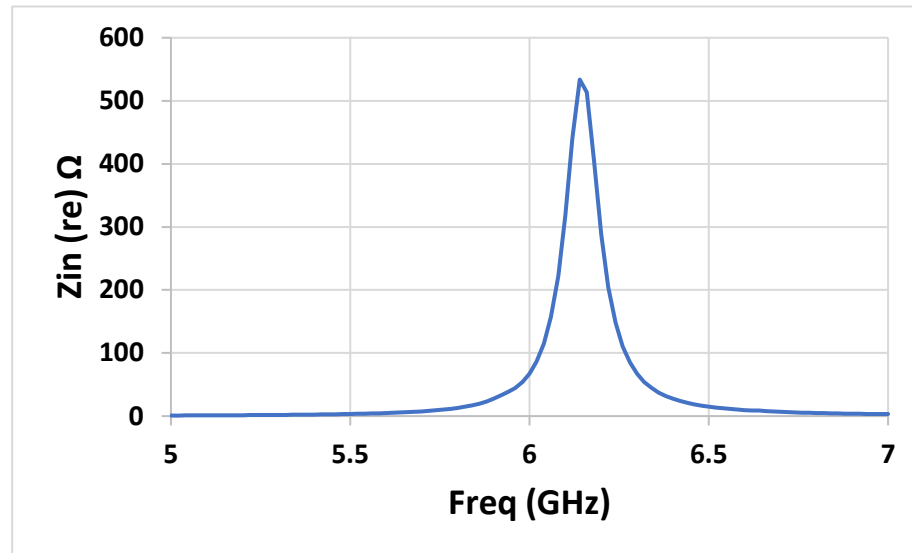
Grafik absorption rate yang di hasilkan merupakan hasil dari pengolahan parameter S11 dan S21 dengan menggunakan persamaan (10)

$$A(f) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

Rumus ini merupakan prinsip dasar konversi energi dalam dua port, yang berarti total energi gelombang elektromagnetik yang datang pada suatu frekuensi menjadi tiga bagian yaitu dipantulkan, diteruskan atau di transmisikan dan diserap.

Dalam hal ini laju penyerapan mendekati 1.00 yang dapat diartikan hampir seluruh gelombang berhasil diserap oleh struktur tanpa dipantulkan ataupun diteruskan. Hal ini sejalan dengan parameter S11 dan S21 sebelumnya.

4.3.5 Surface Impedance (Impedansi Permukaan)

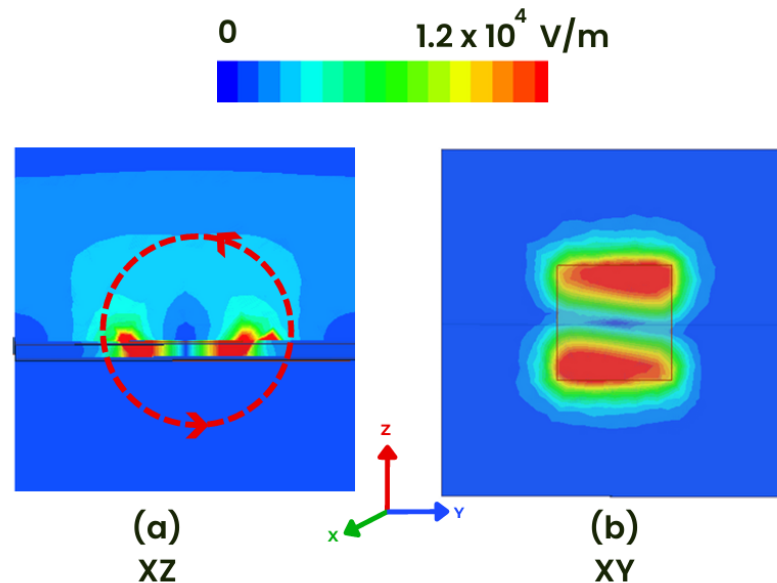


Gambar 4. 13 Grafik Surface Impedance Hasil Simulasi

Gamabr 4.13 merupakan grafik surface impedance (Z_{in}) hasil simulasi terhadap frekuensi, yang bertujuan untuk melihat seberapa besar kesesuaian antara struktur *metasurface* dengan impedansi ruang bebas. Pada grafik terlihat bahwa nilai Z_{in} mencapai 533 ohm di frekuensi 6.14 GHz, yang artinya terjadi mismatch terhadap impedansi ruang bebas yang idealnya adalah 377 ohm.

Mismatch ini menyebabkan gelombang tidak dapat sepenuhnya diserap oleh struktur, karena terjadi perbedaan karakteristik antara medium datang (udara) dan struktur *metasurface*. Akibatnya, sebagian gelombang dipantulkan kembali dan hanya sebagian yang terserap. Kondisi ini tentu tidak ideal untuk aplikasi penyerap gelombang seperti *stealth* atau anti-radar. Disini menegaskan pentingnya kecocokan impedansi (impedance matching) untuk mencapai refleksi minimum dan penyerapan maksimum. Meskipun hasil simulasi menunjukkan adanya deviasi, hal ini bisa menjadi dasar untuk perbaikan desain, misalnya dengan penyesuaian dimensi *unit cell* atau pemilihan bahan yang lebih tepat agar mendekati 377 ohm di frekuensi target.

4.3.6 E – field (Medan Listrik)

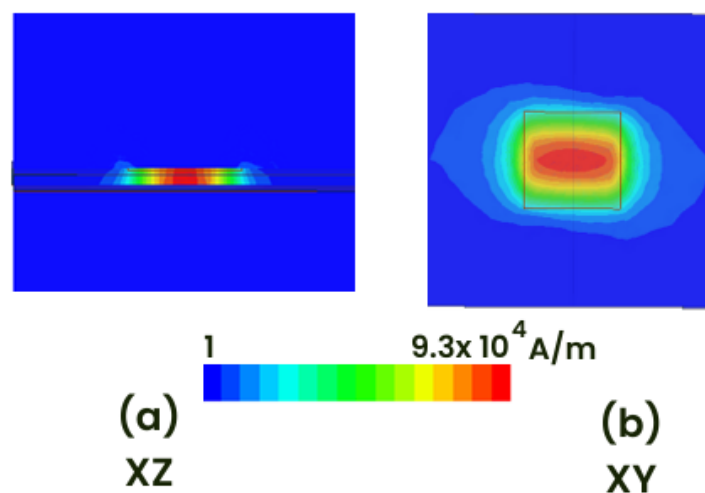


Gambar 4. 14 Distribusi Medan Listrik

Gambar 4.14 (a) menunjukkan distribusi medan listrik pada bidang xz penampang vertikal yang memperlihatkan hubungan antara *patch* tembaga, substrat FR4, dan *ground plane*. Intensitas medan listrik paling tinggi terlihat di sekitar permukaan *patch* dan sedikit merambat ke dalam lapisan substrat, tampak dari warna hijau hingga kuning. Sebaliknya, *ground plane* didominasi warna biru, menandakan medan listrik sangat kecil atau hampir tidak ada. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa resonansi terutama terjadi pada antarmuka antara *patch* tembaga dan substrat FR4. Medan listrik tidak menembus *ground plane* karena *ground plane* bersifat konduktor sehingga memantulkan gelombang elektromagnetik. Akibatnya, energi gelombang terkonsentrasi di sekitar *patch* dan substrat sehingga terbentuk resonansi pada frekuensi kerja. Selain itu, penyebaran medan yang terbatas di sekitar permukaan *patch* menunjukkan resonansi bersifat terlokalisasi (localized resonance). Energi elektromagnetik tidak menyebar ke seluruh struktur tetapi tersimpan di sekitar resonator, meningkatkan interaksi medan listrik dengan material dielektrik FR4. Interaksi ini mengakibatkan sebagian energi gelombang berubah menjadi panas akibat rugi-rugi dielektrik (dielectric loss), yang merupakan salah satu mekanisme utama penyerapan gelombang pada *metasurface*

Gambar 4.14 (b) menunjukkan distribusi medan listrik pada bidang xy yaitu tampak atas dari struktur *metasurface*. Terlihat bahwa intensitas medan listrik paling tinggi berada pada kedua sisi *patch* yang saling berhadapan, ditunjukkan oleh warna merah hingga kuning. Sebaliknya, bagian tengah *patch* dan area di luar *patch* memiliki intensitas medan yang lebih rendah. Konsentrasi medan listrik pada tepi *patch* menunjukkan adanya akumulasi muatan listrik (charge accumulation) akibat perubahan medan pada batas konduktor. Daerah tepi memiliki perbedaan potensial yang paling besar sehingga menghasilkan medan listrik maksimum. Fenomena ini merupakan karakteristik umum resonator mikrostrip berbentuk persegi. Distribusi yang simetris pada kedua sisi *patch* juga menunjukkan bahwa resonansi berlangsung secara seimbang pada struktur. Hal ini mengindikasikan bahwa dimensi square *patch* telah sesuai dengan frekuensi resonansi yang dirancang sehingga mampu mengkopel energi gelombang datang secara efektif. Medan listrik yang kuat di sekitar tepi *patch* kemudian meningkatkan penyimpanan energi elektromagnetik sebelum energi tersebut didisipasikan melalui rugi-rugi konduktor pada tembaga dan rugi-rugi dielektrik pada substrat FR4.

4.3.7 H – field (Medan Magnet)



Gambar 4. 15 Distribusi Medan Magnet

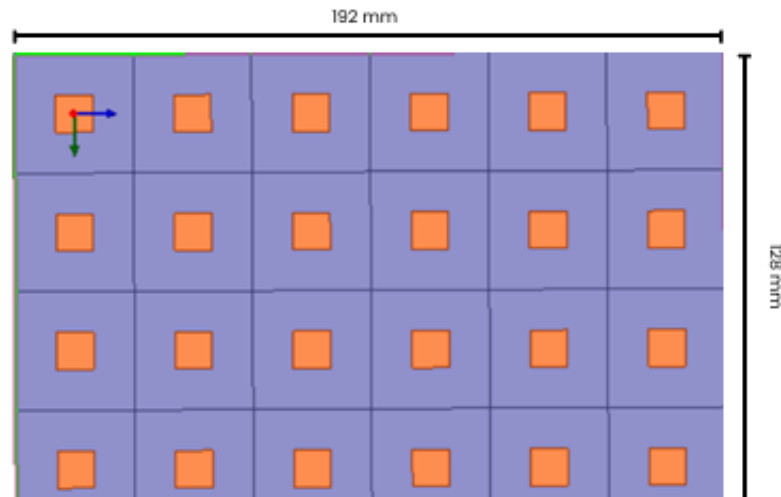
Gambar 4.15 (a) memperlihatkan distribusi medan magnet pada bidang XZ, yaitu penampang vertikal yang menunjukkan arah propagasi gelombang terhadap struktur *metasurface*. Intensitas medan magnet tertinggi ditunjukkan oleh warna

merah hingga kuning yang berada tepat di sekitar permukaan *patch* tembaga. Sebaliknya, daerah di atas dan di bawah struktur didominasi warna biru yang menunjukkan bahwa kuat medan magnet semakin kecil ketika menjauhi *metasurface*. Konsentrasi medan magnet pada area *patch* menunjukkan bahwa resonansi terjadi akibat terbentuknya arus permukaan (surface current) pada lapisan tembaga. Ketika gelombang elektromagnetik mengenai *metasurface*, medan listrik menginduksi arus pada *patch*. Arus tersebut kemudian menghasilkan medan magnet sesuai dengan Persamaan Ampere-Maxwell, sehingga medan magnet maksimum muncul pada lokasi dengan kerapatan arus terbesar. Selain itu, distribusi medan magnet yang hanya berada di sekitar permukaan *patch* menunjukkan bahwa energi magnetik terlokalisasi pada resonator dan tidak menyebar secara signifikan ke ruang bebas. Hal ini menandakan bahwa struktur *metasurface* mampu mengurung energi elektromagnetik di sekitar permukaannya sehingga meningkatkan proses penyerapan gelombang.

Gambar 4.15 (b) menunjukkan distribusi medan magnet pada bidang XY, yaitu tampak atas dari struktur *metasurface*. Terlihat bahwa intensitas medan magnet paling tinggi berada di bagian tengah *patch* dengan pola yang simetris. Nilai medan magnet kemudian menurun secara bertahap menuju bagian tepi *patch* dan area di luar struktur, yang ditunjukkan oleh perubahan warna dari merah, kuning, hijau hingga biru. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa arus permukaan pada *patch* mengalir secara merata dan menghasilkan medan magnet yang terkonsentrasi di pusat resonator. Pola yang simetris mengindikasikan bahwa resonansi berlangsung secara stabil dan tidak mengalami penyimpangan distribusi medan. Kondisi ini menunjukkan bahwa dimensi square *patch* telah sesuai dengan frekuensi resonansi yang dirancang sehingga mampu menghasilkan kopling elektromagnetik yang optimal. Hubungan antara distribusi medan magnet dan medan listrik juga terlihat dari hasil simulasi. Pada distribusi medan listrik, intensitas maksimum berada di sekitar tepi *patch* akibat akumulasi muatan listrik. Sebaliknya, medan magnet mencapai nilai maksimum pada daerah yang menjadi jalur utama aliran arus permukaan. Fenomena ini sesuai dengan Persamaan Ampere-Maxwell yang menyatakan bahwa arus listrik maupun perubahan medan

listrik akan menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Oleh karena itu, distribusi H-Field pada *metasurface* merupakan konsekuensi langsung dari arus resonansi yang terbentuk pada *patch* tembaga.

4.4 Pembentukan Single Unit cell ke Array



Gambar 4. 16 Array Unit Cell

Setelah diperoleh dimensi single *unit cell* yang memberikan karakteristik resonansi sesuai dengan frekuensi kerja yang ditargetkan, tahap selanjutnya adalah menyusun *unit cell* tersebut menjadi suatu struktur array. Pada penelitian ini, penyusunan dilakukan dengan mengulang *unit cell* secara periodik hingga membentuk susunan berukuran 192 mm x 128 mm, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.16

Pembentukan array dilakukan karena pada implementasi sebenarnya *metasurface* tidak digunakan dalam bentuk satu *unit cell* saja, melainkan terdiri atas banyak elemen yang tersusun secara berulang pada suatu bidang. Susunan periodik ini memungkinkan karakteristik elektromagnetik yang telah diperoleh dari simulasi single *unit cell* dapat direpresentasikan pada ukuran struktur yang lebih mendekati kondisi nyata. Dengan demikian, hasil simulasi dan pengukuran menjadi lebih relevan terhadap aplikasi absorber pada sistem radar.

Setiap elemen pada array memiliki dimensi dan jarak antarunit yang sama seperti hasil optimasi single *unit cell*. Pengulangan tersebut bertujuan untuk mempertahankan frekuensi resonansi serta distribusi arus permukaan yang telah diperoleh pada tahap simulasi awal. Keseragaman geometri juga diperlukan agar

respons elektromagnetik yang dihasilkan setiap elemen tetap konsisten sehingga kinerja keseluruhan *metasurface* tidak mengalami perubahan yang signifikan.

Selain sebagai representasi kondisi aplikasi sebenarnya, struktur array juga digunakan untuk mengevaluasi performa absorber secara menyeluruh. Ketika gelombang elektromagnetik datang mengenai permukaan *metasurface*, interaksi tidak hanya terjadi pada satu elemen, tetapi melibatkan seluruh *unit cell* yang tersusun pada permukaan. Oleh karena itu, pembentukan array memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kemampuan *metasurface* dalam mereduksi gelombang pantul dibandingkan jika hanya menggunakan satu *unit cell*.

Pada penelitian ini, struktur array yang telah terbentuk selanjutnya digunakan sebagai desain akhir untuk proses fabrikasi menggunakan teknologi PCB. Desain tersebut kemudian menjadi sampel yang diuji menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dan antena horn guna mengevaluasi karakteristik refleksi pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz. Dengan demikian, pembentukan array merupakan tahapan penting yang menghubungkan hasil optimasi simulasi single *unit cell* dengan proses fabrikasi serta pengujian eksperimental.

4.5 Hasil Pengukuran

Tahapan pengukuran merupakan langkah penting dalam menguji apakah desain *unit cell* yang telah dirancang benar-benar bekerja sebagaimana mestinya ketika dikenai gelombang elektromagnetik. Setelah proses simulasi dilakukan secara teoritis, dibutuhkan pengujian secara langsung di laboratorium untuk memastikan bahwa struktur yang dibuat memang memiliki kemampuan sesuai yang diharapkan terutama dalam meredam atau menghamburkan gelombang pada frekuensi tertentu.

Dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan menggunakan antena horn dalam tiga konfigurasi yang berbeda. Pertama, digunakan konfigurasi tanpa media pantul sebagai referensi awal atau baseline. Kedua, reflektor logam ditempatkan di depan antena untuk mengetahui seberapa besar gelombang yang dipantulkan secara maksimal. Ketiga, struktur *unit cell* diletakkan di depan reflektor untuk melihat seberapa besar perannya dalam menyerap gelombang.

Dengan membandingkan ketiga kondisi tersebut, peneliti dapat menilai sejauh mana efektivitas struktur *unit cell* dalam menahan pantulan. Data dari

pengujian ini nantinya akan dibandingkan dengan hasil simulasi untuk melihat apakah performa di dunia nyata sesuai dengan yang telah diprediksi secara teoritis.

Melalui pendekatan ini, diharapkan hasil pengukuran dapat memberikan gambaran nyata tentang kemampuan struktur *unit cell* dalam menyerap gelombang elektromagnetik, serta memperkuat kesimpulan bahwa desain ini memiliki potensi sebagai material anti-pantulan atau anti-radar.

Pengukuran dilakukan dengan tiga tahap untuk menganalisis pengaruh *unit cell* terhadap reflektansi gelombang elektromagnetik

1. Pengukuran 1: Horn Antena (Referensi Bebas Pantulan)

Pengukuran tahap pertama dilakukan dengan hanya menggunakan horn antena yang mengarah ke ruang bebas tanpa adanya objek reflektif di depannya. Konfigurasi ini bertujuan untuk merekam baseline atau referensi bebas pantulan, sehingga semua sinyal yang terekam di sini berasal dari pancaran langsung tanpa gangguan atau pantulan dari media lain. Data dari pengukuran ini digunakan sebagai acuan normalisasi terhadap hasil pengukuran berikutnya, agar dapat diketahui besarnya pantulan yang benar-benar berasal dari struktur uji.

2. Pengukuran 2: Horn Antena + Reflektor

Pada tahap kedua, dilakukan penempatan permukaan reflektor (biasanya berupa plat logam datar seperti aluminium atau tembaga) di depan horn antena. Tujuannya adalah untuk mengukur pantulan maksimum dari gelombang elektromagnetik terhadap permukaan yang sepenuhnya reflektif. Hasil pengukuran ini menjadi acuan pantulan maksimum yang digunakan sebagai pembanding terhadap pantulan yang dihasilkan oleh struktur *metasurface*. Reflektor ini mensimulasikan kondisi ideal di mana tidak ada energi yang terserap atau ditransmisikan.

3. Pengukuran 3: Horn Antena + *Metasurface* + Reflektor

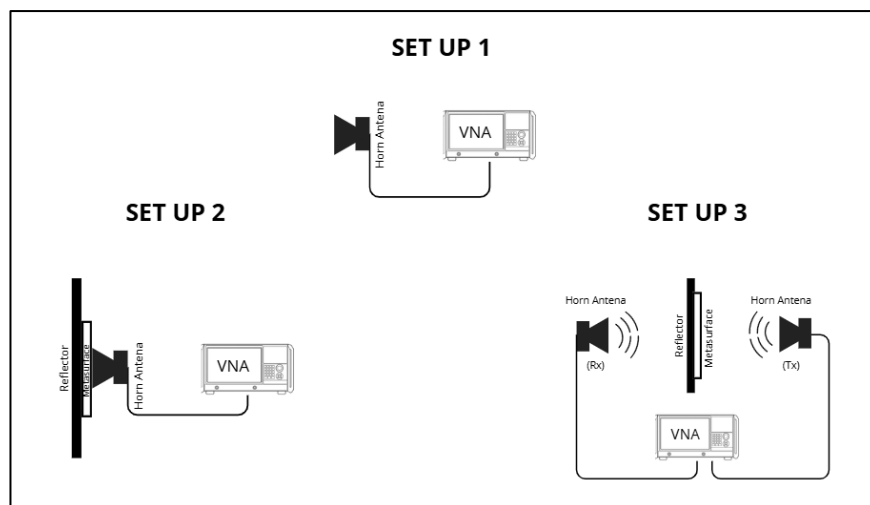
Tahap terakhir merupakan konfigurasi utama yang menguji struktur *unit cell*. Dalam pengukuran ini, *metasurface* diletakkan di depan reflektor, sehingga gelombang elektromagnetik akan melalui *metasurface* terlebih dahulu sebelum mengenai reflektor. Tujuannya adalah untuk mengamati

efek redaman atau absorpsi yang terjadi akibat kehadiran *metasurface*. Apabila *metasurface* bekerja sebagai penyerap gelombang (absorber), maka sinyal pantulan yang terdeteksi akan menurun secara signifikan dibandingkan dengan konfigurasi hanya menggunakan reflektor.

Dengan membandingkan ketiga hasil pengukuran ini, dapat ditentukan sejauh mana efektivitas struktur *metasurface* dalam menyerap atau meredam gelombang elektromagnetik, yang ditunjukkan melalui penurunan nilai koefisien refleksi (S_{11}) pada frekuensi kerja yang ditargetkan.

4.5.1 Set – up Pengukuran

Pengukuran menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) menggunakan dua antenna horn, setup pertama untuk mengukur parameter S_{11} dan untuk setup kedua untuk mengukur parameter S_{21} .

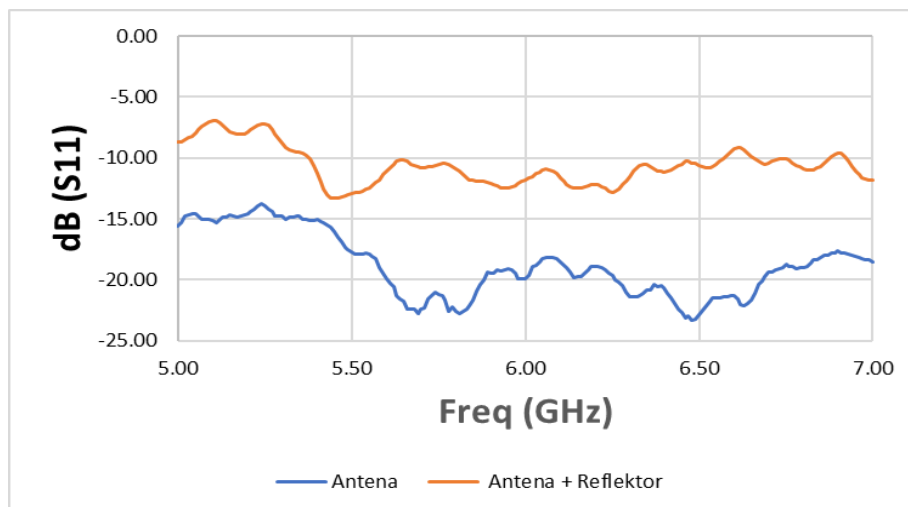


Gambar 4. 17 Set - Up Pengukuran

4.5.2 Pengukuran menggunakan horn antenna dan pengukuran menggunakan horn antenna + reflector



Gambar 4.18 Pengukuran Menggunakan Horn Antena dan Pengukuran Menggunakan Horn Antena + Reflektor



Gambar 4.19 Grafik Perbandingan S11 Hasil Pengukuran Antena dan Antena + Reflektor

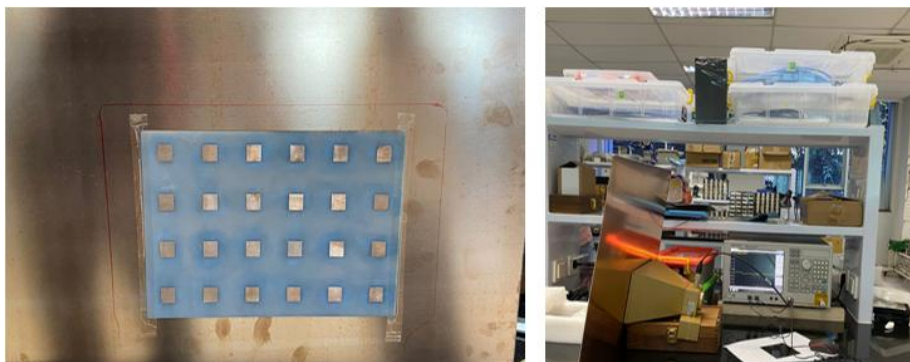
Pada kegiatan pengukuran ini, dilakukan analisis terhadap parameter S11 menggunakan alat ukur Vector Network Analyzer (VNA) pada dua skenario berbeda, yaitu hanya menggunakan horn antenna dan kombinasi horn antenna dengan reflector. Gambar 4.18 di sebelah kiri menunjukkan konfigurasi horn antenna tanpa reflector, sedangkan gambar di tengah memperlihatkan kondisi saat

penambahan reflector diletakkan sejajar di belakang antenna. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan reflector terhadap pantulan gelombang balik yang ditangkap oleh antenna, yang kemudian direpresentasikan dalam parameter S11 (return loss).

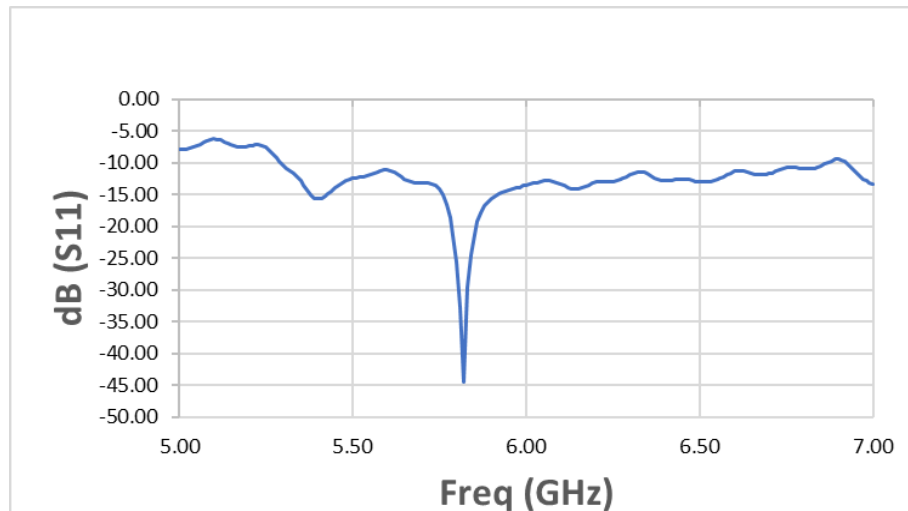
Berdasarkan gambar 4.19 grafik hasil, terlihat bahwa kurva berwarna biru yang merepresentasikan pengukuran hanya dengan horn antenna menunjukkan nilai S11 yang lebih rendah, mencapai sekitar -23 dB di frekuensi 6 GHz. Nilai ini menandakan bahwa sebagian besar daya yang dipancarkan oleh antenna diserap atau diteruskan ke media, sehingga hanya sedikit yang dipantulkan kembali suatu indikasi performa antenna yang baik. Sebaliknya, pada kurva berwarna oranye yang merepresentasikan pengukuran dengan tambahan reflector, nilai S11 lebih tinggi (sekitar -11 dB), yang berarti terdapat lebih banyak gelombang yang dipantulkan kembali ke arah antenna akibat kehadiran reflector.

Penambahan reflector secara konseptual memang menyebabkan sebagian energi yang telah dipancarkan akan dipantulkan kembali ke antenna, sehingga meningkatkan nilai pantulan (refleksi) yang terdeteksi oleh VNA. Hal ini konsisten dengan prinsip dasar gelombang elektromagnetik, di mana permukaan reflektif di belakang antenna dapat memperkuat sinyal arah depan, namun juga meningkatkan kemungkinan terjadinya standing wave atau gelombang diam. Secara umum, pengujian ini menunjukkan bagaimana konfigurasi fisik antenna dan lingkungan di sekitarnya, seperti penggunaan reflector, sangat memengaruhi kinerja sistem antenna yang direpresentasikan oleh parameter S11.

4.5.3 Pengukuran Horn antenna + *Metasurface* + Reflector



Gambar 4. 20 Pengukuran Horn Antena + *Metasurface* + Reflektor



Gambar 4. 21 Grafik S11 Hasil Pengukuran Horn antenna + metasurface + reflektor

Konfigurasi sistem mengalami penambahan elemen penting yaitu *metasurface* yang ditempatkan di antara horn antenna dan reflector. Gambar 4.20 kiri atas menunjukkan wujud dari *metasurface* yang digunakan terdiri dari pola struktur periodik yang dirancang khusus untuk memanipulasi gelombang elektromagnetik secara presisi. Disamping kanan, gambar 4.20 merupakan instalasi lengkap sistem: horn antenna, *metasurface*, dan reflector yang disusun dalam satu garis lurus untuk mengoptimalkan interaksi gelombang.

Tujuan utama dari penambahan *metasurface* ini adalah untuk meningkatkan efisiensi pantulan dan kontrol arah gelombang balik, sehingga mampu menurunkan nilai S11 secara signifikan. Hasil pengukuran menggunakan VNA yang ditampilkan pada gambar 4.21 grafik menunjukkan pencapaian luar biasa: nilai S11 mencapai -44.50 dB pada frekuensi 5.82 GHz. Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan pengukuran sebelumnya tanpa *metasurface*, yang berarti hampir seluruh daya gelombang terserap atau diteruskan, dengan pantulan balik yang sangat minim.

Secara fisik, nilai S11 yang sangat rendah tersebut mengindikasikan bahwa *metasurface* berhasil mengkondisikan fasa dan amplitudo gelombang pantul secara optimal.

Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi *metasurface* dengan sistem horn antenna dan reflector secara signifikan meningkatkan performa antenna dalam hal return loss. Hal ini menjadi bukti empiris bahwa rekayasa *metasurface* bukan hanya sebatas konsep teoritis, tetapi juga sangat aplikatif untuk peningkatan kinerja antenna dalam berbagai sistem komunikasi modern.

4.5.4 Analisa Konfigurasi Pengukuran

Konfigurasi pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan dengan mempertimbangkan karakteristik antenna horn, ukuran *metasurface*, jarak pengujian, serta tujuan pengukuran S_{11} dan S_{21} . Antena horn memiliki beamwidth tertentu sehingga gelombang elektromagnetik yang dipancarkan membentuk area iluminasi yang semakin luas seiring bertambahnya jarak dari antenna.

Metasurface yang digunakan memiliki ukuran $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$. Oleh karena itu, ukuran sampel tersebut perlu dibandingkan dengan area iluminasi yang dihasilkan oleh antenna horn pada posisi pengujian. Apabila area iluminasi lebih besar daripada ukuran *metasurface*, sebagian energi elektromagnetik dapat mengenai area di luar sampel dan tidak seluruhnya berinteraksi dengan struktur *metasurface*.

Pada pengukuran S_{11} , objek ditempatkan pada posisi yang relatif dekat dengan antenna untuk memperoleh kondisi interaksi yang lebih terkontrol dengan mempertimbangkan beamwidth antenna dan ukuran sampel. Sementara itu, pengukuran S_{21} menggunakan dua antenna horn dengan *metasurface* dan reflektor berada di antara antenna *transmitter* dan *receiver*.

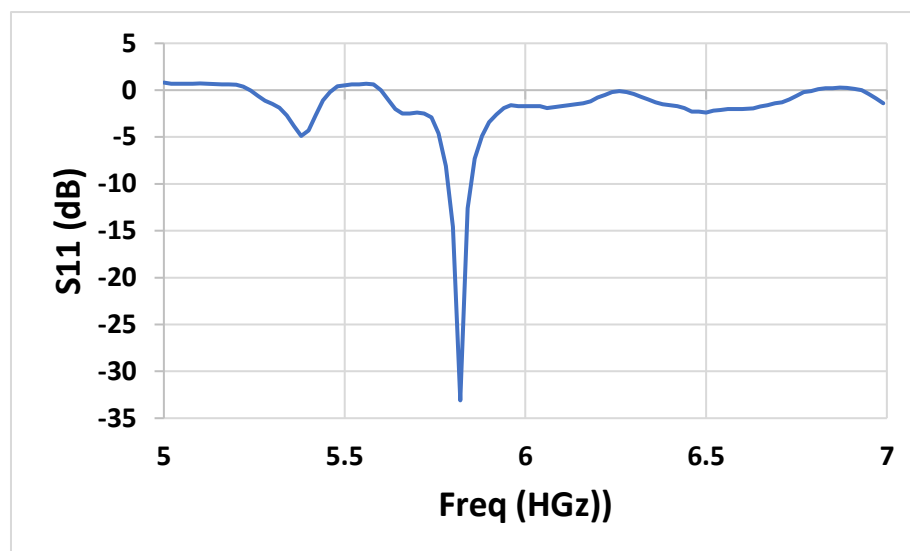
Reflektor digunakan dengan ukuran yang lebih besar daripada area iluminasi utama antenna pada posisi pengujian. Konfigurasi tersebut bertujuan untuk meminimalkan kemungkinan gelombang elektromagnetik melewati bagian luar reflektor dan kemudian diterima oleh antenna receiver. Dengan demikian, sebagian besar energi yang diarahkan menuju area pengujian dapat berinteraksi dengan struktur *metasurface* dan reflektor.

Pengukuran tidak dimaksudkan untuk membandingkan *metasurface* tanpa reflektor dengan *metasurface* yang dikombinasikan dengan reflektor sebagai dua kondisi utama. Reflektor digunakan sebagai kondisi referensi pantulan, sedangkan

konfigurasi metasurface dan reflektor digunakan untuk mengetahui perubahan respons pantulan setelah metasurface ditambahkan. Pendekatan tersebut memungkinkan perubahan respons akibat keberadaan metasurface diamati terhadap kondisi referensi pada konfigurasi pengukuran yang sama.

Selain itu, hasil pengukuran S11 dan S21 dianalisis secara bersama-sama. S11 menunjukkan energi elektromagnetik yang dipantulkan, sedangkan S21 menunjukkan energi elektromagnetik yang diteruskan menuju antenna receiver. Oleh karena itu, kemampuan penyerapan metasurface tidak ditentukan hanya berdasarkan rendahnya S11, tetapi juga mempertimbangkan rendahnya S21 pada frekuensi yang sama.

4.5.5 Hasil Analisa Utama

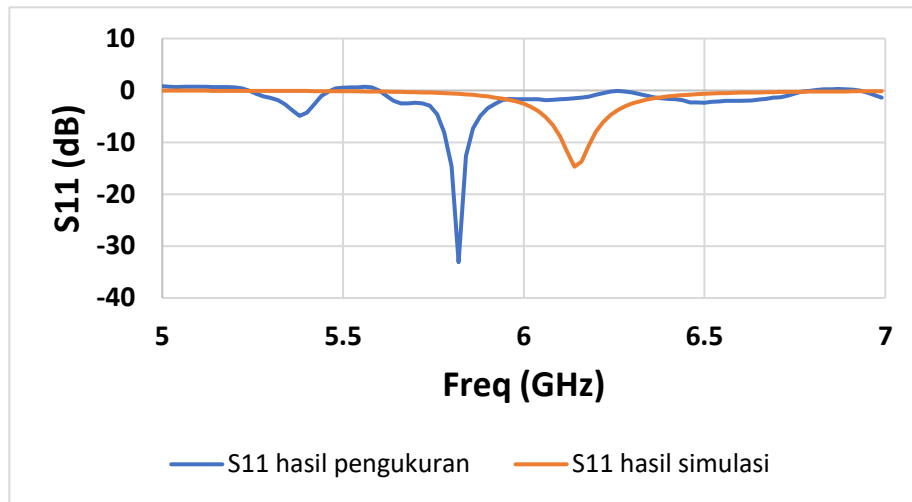


Gambar 4. 22 Grafik S11 Hasil Analisa Pengukuran

Pada tahap analisis utama ini, dilakukan perhitungan nilai S11 efektif dengan cara mengurangi hasil pengukuran S11 sistem lengkap (horn antenna + metasurface + reflector) dengan hasil pengukuran referensi (horn antenna + reflector saja). Tujuan dari pendekatan ini adalah untuk mengekstrak kontribusi murni dari metasurface atau unit cell terhadap penurunan pantulan sinyal. Pada gambar 4.22 Hasilnya menunjukkan nilai S11 mencapai sekitar -33.10 dB pada frekuensi 5.82 GHz, yang menandakan bahwa metasurface berfungsi sangat baik

dalam mereduksi gelombang pantul secara signifikan dan meningkatkan efisiensi sistem antenna.

4.5.6 Perbandingan hasil parameter S11 simulasi dengan hasil pengukuran



Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan S11 Hasil Simulasi dan Pengukuran

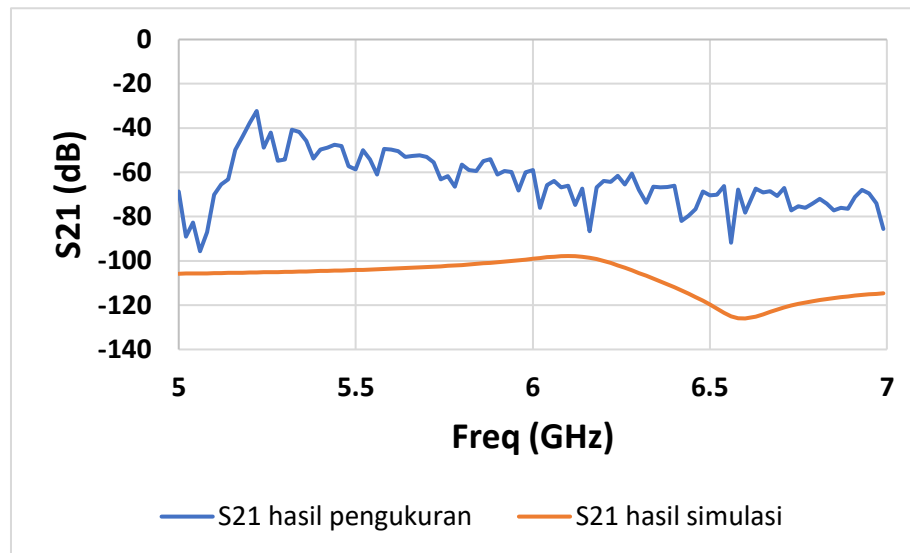
Gambar 4.23 merupakan grafik perbandingan antara hasil S11 dari simulasi (garis oranye) dan hasil pengukuran langsung (garis biru) untuk sistem horn antenna yang dilengkapi dengan *metasurface* dan reflector. Terlihat bahwa pada hasil pengukuran, nilai minimum S11 berada di frekuensi 5.82 GHz dengan kedalaman hingga -33.10 dB, sementara pada hasil simulasi, resonansi terjadi di frekuensi 6.14 GHz dengan nilai S11 -14.68 dB. Artinya, terjadi pergeseran frekuensi resonansi sekitar ± 320 MHz antara simulasi dan pengukuran.

Perbedaan ini bisa terjadi karena beberapa faktor teknis. Pertama, adanya toleransi fabrikasi yang umum terjadi saat proses pembuatan *metasurface*, di mana ukuran fisik dan dimensi nyata bisa sedikit meleset dari desain. Kedua, karakteristik bahan seperti FR4 yang digunakan dalam praktik bisa memiliki nilai permitivitas yang berbeda dari model ideal yang digunakan saat simulasi. Ketiga, pengaruh lingkungan pengukuran seperti pantulan dari objek sekitar atau ketidakstabilan posisi antenna juga berkontribusi pada hasil yang tidak sepenuhnya identik.

Menariknya, hasil pengukuran justru menunjukkan kinerja resonansi yang lebih tajam dan dalam dibandingkan simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa secara empiris, unit *metasurface* yang diuji mampu meredam pantulan sinyal dengan

sangat baik, bahkan lebih baik dari prediksi model. Temuan ini cukup positif dan memperkuat validitas desain *metasurface* yang digunakan.

4.5.7 Perbandingan hasil parameter S21 simulasi dengan hasil pengukuran



Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan S21 Hasil Simulasi dan Pengukuran

Gambar 4.24 diatas merupakan grafik perbandingan hasil S21 antara simulasi (garis oranye) dan pengukuran langsung (garis biru). Parameter S21 ini merepresentasikan seberapa besar sinyal yang berhasil ditransmisikan dari port input ke port output dengan kata lain, seberapa banyak daya yang “lolos” atau diteruskan oleh sistem.

Dari grafik terlihat bahwa hasil Hasil simulasi menunjukkan nilai S21 sebesar $-98,11$ dB, sedangkan hasil pengukuran menunjukkan nilai S21 sebesar $-58,97$ dB. Nilai S21 hasil pengukuran lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi, yang menunjukkan bahwa pada kondisi eksperimen masih terdapat sebagian kecil energi elektromagnetik yang diteruskan atau terdeteksi oleh antenna receiver.

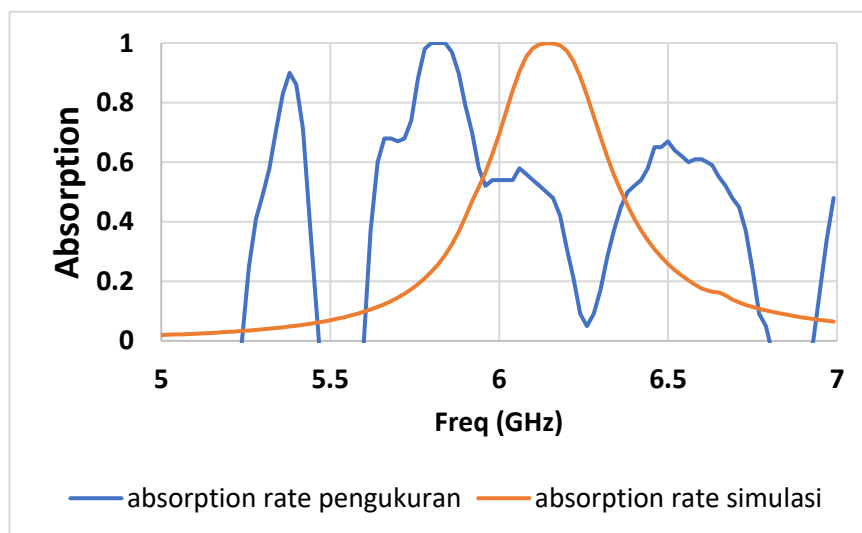
Pada simulasi, struktur dimodelkan dalam kondisi yang lebih ideal dan terkontrol, meliputi geometri, material, boundary condition, serta lingkungan elektromagnetik. Kondisi tersebut memungkinkan transmisi melalui struktur ditekan hingga menghasilkan nilai S21 yang sangat rendah.

Sebaliknya, pada pengukuran eksperimen terdapat kondisi yang tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan dalam simulasi, seperti toleransi fabrikasi, ketidaksejajaran antena, difraksi pada tepi sampel, pengaruh lingkungan pengukuran, serta keterbatasan sistem pengukuran. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan sebagian kecil energi tetap diterima oleh antena receiver.

Penggunaan reflektor yang berukuran lebih besar daripada area iluminasi utama antena bertujuan untuk meminimalkan gelombang yang melewati bagian luar area pengujian. Meskipun demikian, konfigurasi eksperimen tidak dapat sepenuhnya menghilangkan seluruh energi yang terdeteksi oleh antena receiver. Hal tersebut dapat menjadi salah satu faktor yang menyebabkan nilai S_{21} pengukuran lebih besar dibandingkan dengan simulasi.

Dengan demikian, nilai S_{21} pengukuran sebesar $-58,97$ dB menunjukkan bahwa masih terdapat sebagian kecil energi elektromagnetik yang terdeteksi pada sisi receiver, tetapi tingkat transmisinya tetap sangat rendah. Perbedaan antara hasil simulasi dan pengukuran lebih menunjukkan adanya perbedaan kondisi ideal simulasi dengan kondisi nyata eksperimen daripada menunjukkan kegagalan struktur metasurface dalam menekan transmisi.

4.5.8 Perbandingan *absorption rate* hasil simulasi dan pengukuran



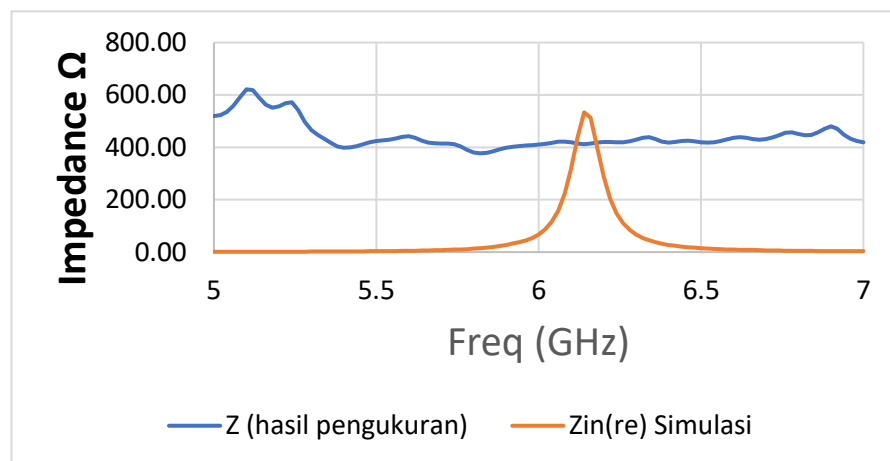
Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Absorption Rate Hasil Simulasi dan Pengukuran

Hasil perbandingan *absorption rate* antara pengukuran langsung dan simulasi. Gambar 4.25 Grafik memperlihatkan seberapa besar gelombang elektromagnetik yang berhasil diserap oleh struktur *metasurface* pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz. Pada hasil pengukuran (garis biru), puncak serapan terjadi di frekuensi 5.82 GHz dengan nilai *absorption rate* sebesar 0.99, yang berarti hampir 99% gelombang berhasil diserap menunjukkan kinerja penyerap yang sangat efektif. Sementara pada hasil simulasi (garis oranye), nilai puncak terjadi di 6.14 GHz dengan *absorption rate* sebesar 0.97, juga tergolong sangat tinggi.

Perbedaan puncak frekuensi ini bisa dijelaskan oleh faktor-faktor teknis seperti perbedaan bahan nyata dengan model simulasi, ketidaksempurnaan fabrikasi, serta kondisi lingkungan saat pengukuran. Meskipun begitu, kedua hasil sama-sama menunjukkan bahwa struktur *metasurface* yang dirancang mampu menyerap hampir seluruh energi gelombang pada frekuensi targetnya.

Secara keseluruhan, baik hasil simulasi maupun pengukuran memberikan gambaran yang sangat positif bahwa desain yang dibuat efektif sebagai struktur penyerap gelombang dan ini menjadi bukti nyata bahwa rancangan tersebut berhasil diimplementasikan dengan baik secara praktis.

4.5.9 Perbandingan *surface impedance* hasil simulasi dengan pengukuran



Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Surface Impedance Hasil Simulasi dan Pengukuran

Hasil pengolahan data surface impedance (Z) berdasarkan parameter S_{11} yang sudah diukur sebelumnya. Nilai impedansi permukaan tidak bisa diukur secara langsung, melainkan dihitung menggunakan persamaan (13)

$$Z(\omega) = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

Dengan Z_0 adalah impedansi karakteristik udara (biasanya 377Ω). Gambar 4.26 grafik hasil dari perhitungan pengukuran menunjukkan bahwa pada frekuensi 5.82 GHz, nilai impedansi permukaan mendekati 377Ω , yang artinya sudah matching dengan impedansi udara bebas. Kondisi ini sangat ideal karena saat impedansi permukaan dan udara seimbang, gelombang elektromagnetik tidak akan dipantulkan kembali, melainkan terserap sempurna oleh struktur itulah yang menyebabkan terjadi refleksi minimum dan penyerapan maksimum.

Sebaliknya, gambar 4.26 grafik hasil simulasi (garis oranye), nilai impedansi pada puncak resonansi (6.14 GHz) justru jauh dari nilai ideal sekitar 533Ω , yang menandakan adanya mismatching. Akibatnya, sebagian besar gelombang dipantulkan kembali karena struktur tidak sesuai dengan karakteristik udara.

Kesimpulannya, perhitungan surface impedance dari hasil pengukuran menunjukkan performa yang lebih baik daripada simulasi. Ini mengindikasikan bahwa desain yang diuji di lapangan telah berhasil mencapai kondisi optimal untuk aplikasi penyerap gelombang.

4.5.10 Keterbatasan Pengukuran

Pengukuran karakteristik metasurface dilakukan menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dan dua horn antenna sebagai transmitter dan receiver. Pengukuran dilakukan di luar anechoic chamber, sehingga kondisi lingkungan pengukuran belum sepenuhnya bebas dari pantulan gelombang elektromagnetik. Gelombang yang dipancarkan oleh antenna dapat mengalami refleksi dari objek di sekitar area pengukuran dan kemudian diterima kembali oleh antenna receiver. Kondisi tersebut dapat memberikan kontribusi terhadap nilai S-parameter yang terukur.

Selain kondisi lingkungan, ketidaktepatan dalam penentuan posisi antena juga dapat memengaruhi hasil pengukuran. Ketinggian dan posisi horn antenna transmitter dan *receiver* tidak diukur secara presisi menggunakan sistem alignment khusus, sehingga terdapat kemungkinan terjadinya ketidaksejajaran antara sumbu utama kedua antena dengan posisi sampel. Ketidaksejajaran tersebut dapat menyebabkan perubahan arah datang dan penerimaan gelombang elektromagnetik pada sampel, sehingga energi yang diterima oleh *receiver* tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi ideal seperti pada simulasi. Akibatnya, hasil pengukuran dapat mengalami pergeseran frekuensi resonansi maupun perbedaan nilai S_{11} dan S_{21} dibandingkan dengan hasil simulasi.

Pada proses pengukuran, VNA digunakan sebagai sumber sinyal sekaligus instrumen untuk mengukur parameter S. Daya sinyal yang diberikan oleh VNA digunakan untuk mengeksitasi horn antenna transmitter, kemudian gelombang elektromagnetik yang berinteraksi dengan metasurface diterima oleh horn antenna receiver dan dianalisis oleh VNA. Oleh karena itu, daya eksitasi dalam pengukuran dikendalikan melalui pengaturan output power pada VNA.

Dengan demikian, perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran tidak secara langsung menunjukkan ketidaksesuaian desain metasurface, tetapi dapat dipengaruhi oleh kondisi eksperimen yang berbeda dengan kondisi simulasi yang ideal. Faktor tersebut meliputi pantulan lingkungan, ketidaksejajaran posisi antena, ketidakpresisian jarak dan ketinggian antena, toleransi fabrikasi, serta karakteristik konektor dan kabel yang digunakan selama pengukuran.

BAB 5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. *Metasurface* berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS) yang mampu menyerap gelombang elektromagnetik secara optimal pada rentang frekuensi 5 – 7 GHz dengan frekuensi kerja utama 6 GHz, dengan nilai koefisien refleksi (S_{11}) dan koefisien transmisi (S_{21}) lebih kecil dari -10 dB, tingkat penyerapan lebih dari 80%, serta impedansi permukaan yang mendekati 377Ω telah berhasil dirancang dan difabrikasi.
2. Hasil simulasi dan pengukuran, memperlihatkan bahwa struktur *metasurface* yang dirancang memiliki performa yang sangat baik dalam mengendalikan gelombang elektromagnetik, khususnya pada frekuensi sekitar 5.82 GHz. Terdapat pergeseran frekuensi antara simulasi (6.14 GHz) dan pengukuran (5.82 GHz) sekitar ± 320 MHz, namun secara umum kinerja struktur dalam menyerap sinyal justru lebih optimal saat diuji secara langsung. Hal ini terlihat dari nilai S_{11} pengukuran yang mencapai -33.10 dB, jauh lebih rendah dibanding simulasi, serta *absorption rate* mendekati 99%, menandakan hampir seluruh energi gelombang berhasil diserap.
3. Nilai impedansi permukaan hasil pengukuran pun mendekati 377Ω pada puncak frekuensi, artinya struktur berhasil dicocokkan dengan karakteristik ruang bebas, sehingga refleksi diminimalkan dan penyerapan maksimal dapat dicapai. Sementara hasil simulasi mengalami mismatching yang menyebabkan refleksi lebih besar.
4. Dimensi geometris *unit cell* meta surface yang optimum untuk digunakan memiliki ukuran substrat 32 mm dengan ketebalan 1,5 mm, *patch* 10,6 mm dengan tebal 0,035 mm, dan *ground plane* setebal 0,035 mm. Struktur ini berhasil menghasilkan refleksi rendah ($S_{11} < -10$ dB), transmisi lemah ($S_{21} < -10$ dB), dan absorpsi tinggi ($>80\%$), sehingga sangat potensial untuk diaplikasikan pada sistem penyerap gelombang elektromagnetik seperti teknologi anti-radar.

Dengan performa empiris yang lebih baik dari prediksi simulasi, struktur

metasurface ini terbukti tidak hanya efektif secara teori, tetapi juga andal dan aplikatif dalam implementasi nyata.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan desain *metasurface* dengan menggunakan variasi bentuk resonator selain square patch, seperti circular, hexagonal, atau kombinasi beberapa geometri untuk memperoleh karakteristik penyerapan yang lebih optimal dan bandwidth yang lebih lebar. Selain itu, penggunaan material substrat dengan nilai konstanta dielektrik dan loss tangent yang lebih rendah, seperti Rogers RT/duroid, dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan performa absorber. Pengujian juga perlu dilakukan pada berbagai sudut datang gelombang dan kondisi polarisasi yang berbeda agar karakteristik *metasurface* dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh sesuai dengan kondisi aplikasi sebenarnya. Dari sisi pengukuran, penggunaan ruang anechoic dan sistem pengukuran yang telah terkalibrasi dengan baik diharapkan mampu mengurangi pengaruh pantulan dari lingkungan sehingga hasil pengukuran memiliki tingkat kesesuaian yang lebih tinggi dengan hasil simulasi. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan *metasurface* menjadi struktur multiband atau broadband serta melakukan analisis terhadap penurunan Radar Cross Section (RCS) sehingga efektivitas *metasurface* sebagai material penyerap gelombang radar dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkarim, Y. I., Mohanty, A., Acharya, O. P., & Appasani, B. (2022). *A Review on Metamaterial Absorbers: Microwave to Optical*. 10(April), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.893791>
- Ali, S. A., Abu, M., Zabri, S. N., & Hamzah, S. A. (2021). *Wide-band metamaterial perfect absorber through double arrow shape printed on a thin dielectric*. 10(5), 2488–2495. <https://doi.org/10.11591/eei.v10i5.3154>
- Alzamil, A., Amir, M., Hin, W., Alenezi, A. M., Alawad, M. A., Maash, A. A., Soliman, M. S., Hussain, R., & Tariqul, M. (2026). Journal of Science : Advanced Materials and Devices Design and performance evaluation of a multi-band metamaterial absorber for oil quality sensing. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 11(1), 101081. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.101081>
- Amir, M., Tariqul, M., Hin, W., Islam, S., Hwang, H., Agustiono, T., Ur, N., Junejo, R., Soliman, M. S., & Waheed, A. (2025). International Journal of Electronics and Communications Design and validation of a multi-band metamaterial absorber for microwave applications. *AEUE - International Journal of Electronics and Communications*, 193, 155718. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2025.155718>
- Coelho, H. J. S., Araújo, B., Silva, M. W. B., Ferreira, T. N., Campos, A. L. P. S., & Junqueira, C. (2023). *Multiband Metasurface-Based Absorber for Applications in X , Ku , and K Bands*. 1–11. <https://doi.org/10.1029/2023RS007711>
- Dewi, S., Kusumawati, D. H., & Taryana, Y. (2025). *PENGARUH PENAMBAHAN REDUCED GRAPHENE OXIDE (r GO) DALAM KOMPOSIT F e 3 O 4 / r GO SEBAGAI PENYERAP GELOMBANG RADAR DALAM RENTANG X-BAND*. 14, 361–368.
- Gunaydin OmerFaruk, C. S. (2024). *Optically Transparent Frequency Selective*

Surfaces with Wideband Capability for IoT Applications :

- Güngördü, Ö. B. (2024). *REVIEW ARTICLE A Complementary Overview and Challenges in Radar Cross Section Modeling of Phased Array Antennas*. 1, 86–91. <https://doi.org/10.53525/jster.1493809>
- Hakim, M. L., TouhidulAlam, Islam, M., Baharuddin, M. H., AhmedAlzamil, & AndMd.ShabiulIslam. (2022). *Quad-Band Polarization-Insensitive Square Split-Ring*.
- Hang, S. H. Z., Ang, Z. U. Y., Iu, B. I. L., Uo, J. I. E. L., & Ang, Z. H. I. H. O. N. G. H. (2023). *Optical perfectly matched layers based on the integration of photonic crystals and material loss*. 31(7), 11080–11088.
- Hasan, M. M., Islam, M. T., M, M. S., Almalki, S. H. A., Alharbi, A. G., Alsaif, H., Islam, M. S., & Samsuzzaman, M. (2022). Polarization insensitive dual band metamaterial with absorptance for 5G sub-6 GHz applications. *Scientific Reports*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12106-7>
- Hayat, B., Zhang, J., Khan, A., Abbas, S. M., & Majeed, A. (2024). *A Flexible and Optical Transparent Metasurface Absorber with Broadband RCS Reduction Characteristics*. 1–10.
- He, Y., Zhang, Z., Wang, Q., Wang, Q., Fu, Q., & Zhang, Y. (2025). *Reconfigurable Microwave Absorption Properties and Principles of Double-Layer Metasurface Absorbers*. 1–13.
- Jasim, M. B., & Sayidmarie, K. H. (2023). *Radar Cross-section Reduction of Planar Absorbers Using Resistive FSS Unit cells*.
- Jin, Y., Yu, H., Wang, Y., & Wang, L. (2024). *Recent Progress in Electromagnetic Wave Absorption Coatings : From Design Principles to Applications*.
- Kanjanasit, K., Tantipiriyakul, T., & Wang, C. (2024). Heliyon Thin film resonant *metasurface* absorbers using *patch*-based arrays on liquid crystal polymer substrates for centimeter-wave applications. *Heliyon*, 10(15), e35399.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35399>

Kong, L., Kong, X., Jiang, S., Li, Y., Xing, L., & Bian, B. (n.d.). *Switchable Frequency- Selective Rasorber With Polarization Selectivity*. March 2022.

Kurt, M., Ozturk, G., & Ertugrul, M. (2025). Hepta-Band Ultra-Thin *Metasurface* Absorber for S-, C-, X-, Ku-, and K-Band Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(21), 17813–17826. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10140-x>

Leadtrees, W., & Needs, W. C. (2025). *MITOR : Jurnal Teknik Elektro*. 39–46. <https://doi.org/10.23917/emit.v24i2.5535>

Lee, C., Kim, K., Park, P., Jang, Y., Jo, J., Choi, T., & Lee, H. (2023). *Ultra-Wideband Electromagnetic Composite Absorber Based on Pixelated Metasurface with Optimization Algorithm*. 1–16.

Li, Y., Jian, D., Yang, H., Zheng, L., Wang, X., & Gong, R. (2023). *Impedance matching characteristic parameters of microwave absorbing materials for specular reflection and non-specular scattering suppression*. September 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0139804>

Mahmud, S., Ray, A., Hannan, S., Tariqul, M., Alshammari, A. S., & Soliman, M. S. (2024). Heliyon Polarization-selective metamaterial absorber using tailored Y-shaped SRR for UWB device and Doppler navigation aids applications. *Heliyon*, 10(23), e40102. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40102>

Mohammad, I., Islam, T., Islam, S. S., & Islam, R. (2024). Nano - structured metamaterial absorber based on a plus - shaped resonator for optical wavelength applications. *Journal of Engineering and Applied Science*, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00465-z>

Mohammed, O. K., Tahir, A. S., & Al-Tumah, W. A. G. (2024). Effect of *Radar Absorbing Materials* on Radar Cross-Section Reduction of Complex Targets. *Iraqi Journal of Applied Physics*, 20(2 A), 209–214.

- Montejo-garai, J. R., Page, J. E., Perez-palomino, G., & Guirado, R. (2024). *Response Designed by the Extracted Pole Technique*.
- Mou, N., Tang, B., Li, J., Dong, H., & Zhang, L. (2022). Switchable ultra - broadband terahertz wave absorption with - VO 2 - based *metasurface*. *Scientific Reports*, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04772-4>
- Narayanaswamy, N. K., Satheesha, T. Y., & Alzahrani, Y. (2024). *Metasurface absorber for millimeter waves : a deep learning- optimized approach for enhancing the isolation of wideband dual-port MIMO antennas*.
- Olga Rac-Rumijowska Fss, F. S. (2024). *Influence of Flexible and Textile Substrates on Frequency-Selective Surfaces (FSS)*. 1–12.
- Ozpinar, H., & Aksimsek, S. (2022). Fractal interwoven resonator based penta - band metamaterial absorbers for THz sensing and imaging. *Scientific Reports*, 0123456789, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23390-8>
- Pan, Y., Dong, J., Wang, M., & Luo, H. (2024). Results in Physics Design of tunable ultra-wideband *metasurface* absorber with pixelated checkerboard pattern based on BGWO. *Results in Physics*, 57(October 2023), 107376. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107376>
- Qian, S. (2020). *Field-Only Surface Integral Equations : Scattering from a Perfect Electric Conductor*. 37(2), 276–283. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.378665>.Field-Only
- Rasiman, Y., Ketty, Y., & Muchaddats, M. (2025). *PRIMARY SURVEILLANCE RADAR (PSR).* 4(2).
- Roth, T. E., & Braun, C. A. (2023). *Theoretical and Numerical Study of Wave Port Boundary Conditions for Lorenz Gauge Potential-Based Finite Element Methods*. 131(March), 119–133.
- Saadeldin, A. S., Sayed, A. M., Amr, A. M., & Sayed, M. O. (2023). Broadband polarization insensitive metamaterial absorber. *Optical and Quantum*

- Electronics*, 55(7), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04881-y>
- Sahoo, P., Saini, L., Dixit, A., Sahoo, P., Saini, L., & Dixit, A. (2022). *Microwave-absorbing materials for stealth application : a holistic overview Microwave-absorbing materials for stealth application : a holistic overview*.
- Singh, P., Menkudale, S., Soni, S., Tank, V. R., & Raj, A. A. B. (2025). *Comprehensive Survey on Radar Systems and Its Target Classification Techniques*. 234–269.
- Smirnova, A. S. (2023). *Development of a wide-angle dual band metasurface absorber for S and C band communication systems*. 4(2), 15–17.
- Song, D., Zhang, K., Qian, M., Liu, Y., & Wu, X. (2023). *Ultra-Broadband Perfect Absorber based on Titanium Nanoarrays for Harvesting Solar Energy*. 1–11.
- Sudarsan, H., Mahendran, K., & Rathika, S. (2024). Results in Optics Design of microwave metamaterial absorber for Ku- , X- , and C- band applications. *Results in Optics*, 15(September 2023), 100653. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2024.100653>
- Umair, M., Ghaffar, A., Alkanhal, M. A. S., Khan, Y., Shahid, M. U., & Ali, M. A. (2025). *Plasmonic characteristics of magnetized plasma – graphene-magnetized plasma – perfect magnetic conductor planar waveguides*.
- Viji, J., & Anujan, T. (2023). A Review on Electromagnetic Metamaterial Absorbers. *2023 International Conference on Control, Communication and Computing (ICCC)*, May, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCC57789.2023.10165509>
- Wang, Z., Huang, J., Sun, D., Zeng, Q., & Song, M. (2023). *UWB Frequency-Selective Surface Absorber Based on Graphene Featuring Wide-Angle Stability*.
- Wulandari Fira Putri, Aisyah Audrey Nur, C. E. G. (2024). *FT-UMSU FT-UMSU*. 7(1), 151–159.

- Xian, Y. X., Yang, J. S., Li, H. Z., Xu, C., & Wang, X. W. (2024). A Novel Frequency-Selective Surface-Enhanced Composite Honeycomb Absorber with Excellent Microwave Absorption. *Polymers*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/polym16233312>
- Yuan, J., Kong, X., Wang, X., Jiang, S., & Kong, L. (n.d.). *Polarization-independent reconfigurable frequency selective rasorber / absorber with low insertion loss*. 1–3.
- Zhang, D., Chen, Y., & Zhou, Q. (2025). Results in Physics Multilayer broadband metamaterial for microwave absorption based on resistive *Frequency Selective Surfaces*. *Results in Physics*, 73(February), 108261. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108261>
- Zhang, W., Wang, X., & Yang, K. (2024). *OPEN A dual-band broadband absorber using Frequency Selective Surface for satellite antenna*. 1–9.
- Zheng, H., Chen, L., & Lee, Y. P. (2022). Flexible Metamaterial Absorber with Tailored Bandwidth and High Absorption Performance. *Crystals*, 12(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/cryst12020182>

LAMPIRAN - LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Sheet Antena Horn

BHA 9118 BROADBAND HORN ANTENNA 1 to 18 GHz



BHA 9118

- Broadband horn antenna
- Frequency range 1 to 18 GHz
- Uniform gain
- High power handling
- Low VSWR

The BHA 9118 is a linearly polarised broadband antenna which is ideal for many applications particularly EMC/RF measurements. It can be used for both receiving and transmitting. A precision 'N' connector is used to provide low VSWR and high power handling capability.

The mounting bracket allows easy adjustment for vertical, horizontal and 45 deg polarisations, and has a standard camera thread (1/4" X 20) hole that allows fitting to many support structures including all Teseq tripods (note Teseq adapters may be required).

The precision design is rugged and corrosion resistant. However, as with any precision instrument, care should be taken when using the BHA 9118. A protective strip protects the two fiberglass sides from accidental damage.

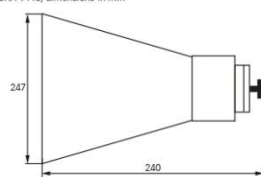
Technical specifications

Frequency range:	1 to 18 GHz
Typical gain:	4 to 15 dBi (4 to 32 numeric)
Impedance (nominal):	50 Ω
Maximum continuous power:	200 W
Cross polarisation:	20 dB minimum
Connector:	precision N type female
VSWR:	2.5:1 max, 2:1 max (2 to 18 GHz)
Field strength capability:	250 V/m at 1 m, 50 Ω source, free space conditions
Size antenna (L x H x W in mm):	approx. 240 X 147 X 247 (see drawings below)
Size transport box (L x H x W in mm):	approx. 510 X 310 X 215
Weight:	approx. 1.9 kg, approx. 4.5 kg (transport box with antenna)
Recommended tripods:	BTP 6020A plus adapter CHA 9435 or CTP 6099 plus adapter CHA 9443

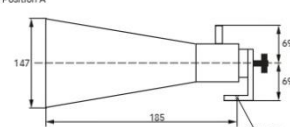


BHA 9118 plus adapter CHA 9435 onto tripod BTP 6020A

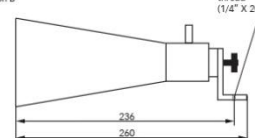
BHA 9118, dimensions in mm



Position A



Position B

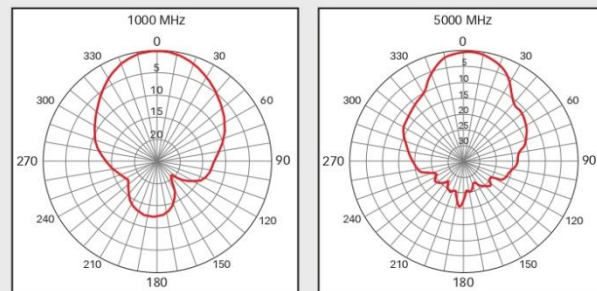


AMETEK
COMPLIANCE TEST SOLUTIONS

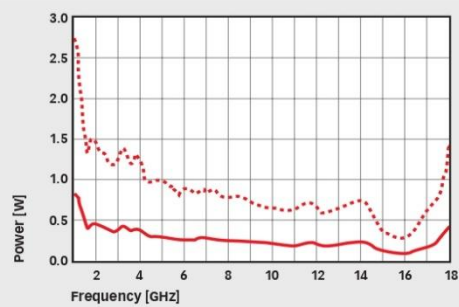
TESEQ
Advanced Test Solutions for EMC

BHA 9118 BROADBAND HORN ANTENNA 1 to 18 GHz

Typical E field polar patterns

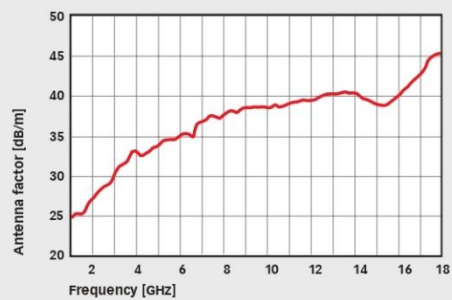


Typical drive power for 10 V/m at 1 m, — CW power, - - - power with 80% modulation



BHA 9118
BROADBAND HORN ANTENNA 1 to 18 GHz

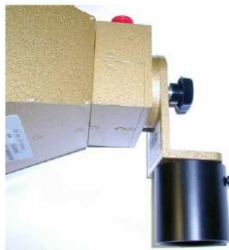
Typical antenna factor



Typical gain

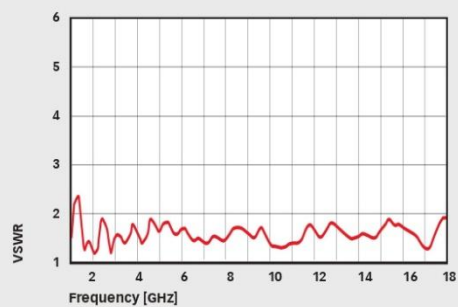


BHA 9118 BROADBAND HORN ANTENNA 1 to 18 GHz



BHA 9118 plus adapter CHA 9435

Typical VSWR



Delivery information

Part number	Description
344-550	BHA 9118 Double ridged horn antenna 1 - 18 GHz
97-244570	Ant Cert-TC Traceable calibration (ISO17025), order only with the antenna, free space calibration (horizontal), other calibrations on request
248504	BTP 6020A-0880 EMC Tripod with tube 880 mm and mounting head for antennas with 22 mm tube
248505	BTP 6020A-0680 EMC Tripod with tube 680 mm and mounting head for antennas with 22 mm tube
248523	BTP 6020A-1370 EMC Tripod with tube 1370 mm and mounting head for antennas with 22 mm tube
348-810	CHA 9435 To fit field probes or BHA 9118 onto BTP 6020 (boss fits outside fibreglass pole, 50 mm), fitted with 1/4 " camera thread

AMETEK CTS Europe GmbH
Landsberger Str. 255 · 12623 Berlin · Germany
T +49 30 56 59 00 35 F +49 30 56 59 00 34
info.rf.cts@ametek.com www.ametek-cts.com

© December 2017 Teseq®
Specifications subject to change without notice.
Teseq® is an ISO-registered company. Its products are designed and manufactured under the strict quality and environmental requirements of the ISO 9001. This document has been carefully checked. However, Teseq® does not assume any liability for errors or inaccuracies.

02-344-550 E01 December 2017

AMETEK
COMPLIANCE TEST SOLUTIONS

Teseq
Advanced Test Solutions for EMC

Lampiran 2 Perhitungan

PERHITUNGAN S11 SIMULASI 96.6 %

Jika menggunakan Ground Plane penuh S21 dianggap 0 nilai absorption dihitung menggunakan

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$$

Konversi S11 dB ke Magnitude/linear

Nilai S11 yg diperoleh = -14.68 dB

$$|S_{11}| = 10^{\frac{-14.68}{20}}$$

$$|S_{11}| = 10^{-0.734}$$

$$|S_{11}| = 0.1884$$

Menghitung daya yang dipantulkan

$$|S_{11}|^2 = (0.1884)^2$$

$$|S_{11}|^2 = 0.0340 \quad \text{Atau } 3.40 \% \text{ daya dipantulkan}$$

Menghitung Absorpsi atau penyerapannya

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$$

$$A(\omega) = 1 - 0.0340$$

$$A(\omega) = 0.966 \quad \text{Atau } 96.6 \% \text{ gelombang diserap}$$

PERHITUNGAN S21 SIMULASI 96.6 % dianggap 0

Konversi S21 dB ke Magnitude/linear

Nilai S21 yg diperoleh = -98.11 dB

$$|S_{21}| = 10^{\frac{-98.11}{20}}$$

$$|S_{21}| = 1.242 \times 10^{-5}$$

Menghitung daya yang dipantulkan

$$|S_{21}^2| = (1.242 \times 10^{-5})^2$$

$$|S_{21}^2| = 1.54 \times 10^{-10}$$

Dinyatakan dalam persen

$$1.54 \times 10^{-10} \times 100\% = 1.54 \times 10^{-8}\%$$

Artinya energi yang diteruskan 0.0000000154%

Praktis dikatan atau dianggap 0

ABSORPTION RATE

Nilai **absorption rate (A)** berada pada rentang:

- **A = 0** → tidak ada energi yang diserap (0%).
- **A = 1** → seluruh energi diserap (100%), sehingga tidak ada energi yang dipantulkan maupun diteruskan.

Perhitungan dan grafik dihasilkan dari pengolahan S11 dan S21

$$A(f) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

Diketahui

$$|S_{11}|^2 = 0.034 \text{ atau } 3.40\%$$

$$|S_{21}^2| = 1.54 \times 10^{-10} \text{ Dianggap nol}$$

Dihitung

$$A(f) = 1 - 0.034 - 0$$

$$A(f) = 0.966 \text{ atau } 0.97$$

0.97 mendekati 1 berarti 97% gelombang diserap

PERHITUNGAN S11 PENGUKURAN 99.95 %

Jika menggunakan Ground Plane penuh S21 dianggap 0 nilai absorption dihitung menggunakan

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$$

Konversi S11 dB ke Magnitude/linear

Nilai S11 yg diperoleh = -33.10 dB

$$|S_{11}| = 10^{\frac{-33.10}{20}}$$

$$|S_{11}| = 10^{-1.655}$$

$$|S_{11}| = 0.022130947$$

Menghitung daya yang dipantulkan

$$|S_{11}^2| = (0.022130947)^2$$

$$|S_{11}^2| = 0.00048978$$

Menghitung Absorpsi atau penyerapannya

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$$

$$A(\omega) = 1 - 0.000492$$

$$A(\omega) = 0.99951022 \text{ Atau } 99.95 \% \text{ gelombang diserap}$$

PERHITUNGAN S21 SIMULASI 96.6 %

Konversi S21 dB ke Magnitude/linear

Nilai S21 yg diperoleh = -58.97 dB

$$|S_{21}| = 10^{\frac{-58.97}{20}}$$

$$|S_{21}| = 0.0011259$$

Menghitung daya yang dipantulkan

$$|S_{21}|^2 = (0.0011259)^2$$

$$|S_{21}|^2 = 1.26765 \times 10^{-6}$$

Dinyatakan dalam persen

$$1.26765 \times 10^{-6} \times 100\% = 0.00000126765\%$$

Artinya energi yang diteruskan 0.00000126765%

ABSORPTION RATE HASIL PENGUKURAN

Nilai **absorption rate (A)** berada pada rentang:

- **A = 0** → tidak ada energi yang diserap (0%).
- **A = 1** → seluruh energi diserap (100%), sehingga tidak ada energi yang dipantulkan maupun diteruskan.

Perhitungan dan grafik dihasilkan dari pengolahan S11 dan S21

$$A(f) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$$

Diketahui

$$|S_{11}|^2 = 0.000492$$

$$|S_{21}|^2 = 0.00000126765$$

Dihitung

$$A(f) = 1 - 0.000492 - 0.00000126765$$

$$A(f) = 0.99950673 \text{ atau } 0.99$$

0.99 mendekati 1 berarti 99% gelombang diserap

Lampiran 3 Dokumentasi Pengukuran

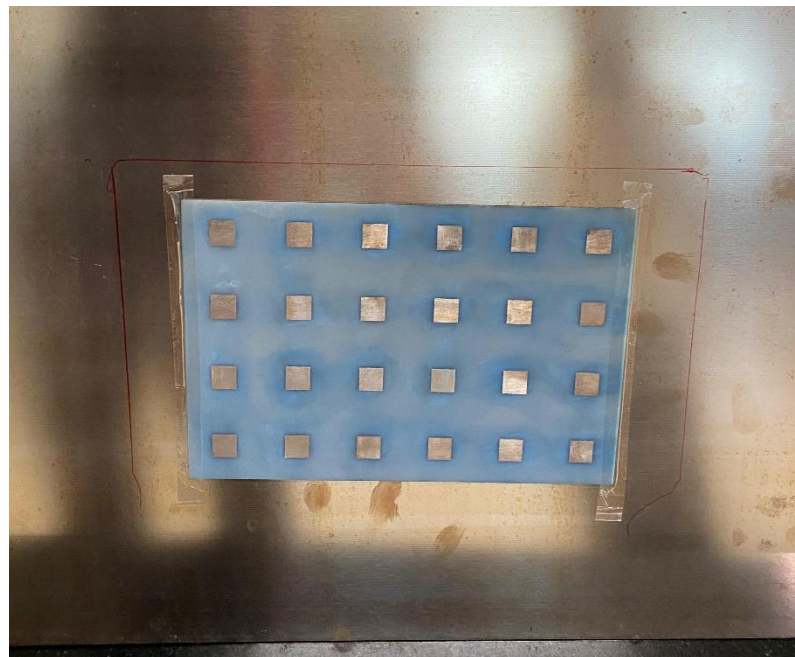


Pengukuran S11





Pengukuran S21



Lampiran 4 Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Pembimbing 1

 Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA	Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Sarjana	Kode Arsip :
		04/Prodi-El/Akad/2026
		Program Studi Teknik Elektro

Jakarta, 24-Juli- 2026

Bismillahirrahmanirrahim,

Dengan ini, saya sebagai pembimbing I / II ¹ menyatakan bahwa,

Nama : Jujun Junaedi
 NIM : 2203025025
 Alamat : Kp. Citugar, Rt/Rw 01/05, Desa Cikancana. Kec. Sukaresmi
 Kab. Cianjur, Jawa Barat

Judul Tugas Akhir : Desain Metamaterial Anti – Radar Berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS)

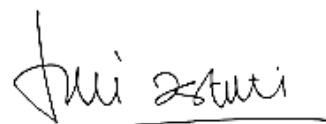
bahwa nama yang tertera diatas dinyatakan **Layak / Tidak Layak** ¹ untuk mengikuti sidang sarjana (S-1) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Prof. DR. Hamka.

Segala kekurangan dan kelebihan selama melakukan pengawasan dalam melakukan penelitian dan penulisan menjadi tanggung jawab saya sebagai pembimbing I / II ².
 Terima kasih atas perhatian dan kerjasama.

Jakarta, 24-Juli-2026
 Pembimbing I / ~~II~~

Mengetahui
 Ketua Program Studi
 Teknik Elektro – FT UHAMKA


 (Ir. Harry Ramza, ST, MT, PhD)


 (Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T.)

Cc :

1. Yang bersangkutan.
2. Arsip.

¹ Coret yang tidak perlu.

² Coret yang tidak perlu.

³ Coret yang tidak perlu

Lampiran 5 Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Pembimbing 2

 Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA	Surat Pernyataan Kelayakan Sidang Sarjana	Kode Arsip :
		04/Prodi-EI/Akad/2026
		Program Studi Teknik Elektro

Jakarta, 23 Juni 2026

Bismillahirrahmanirrahim,

Dengan ini, saya sebagai pembimbing I / (II)¹ menyatakan bahwa,

N a m a : Jujun Junaedi

N I M : 2203025025

Alamat : Kp. Citugar, Rt/Rw 01/05, Desa Cikancana. Kec. Sukaresmi
Kab. Cianjur, Jawa Barat

Judul Tugas Akhir : Desain Metamaterial Anti – Radar Berbasis *Frequency Selective Surface* (FSS)

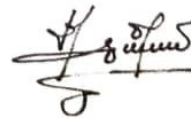
bahwa nama yang tertera diatas dinyatakan **Layak / ~~Tidak Layak~~²** untuk mengikuti sidang sarjana (S-1) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Prof. DR. Hamka.

Segala kekurangan dan kelebihan selama melakukan pengawasan dalam melakukan penelitian dan penulisan menjadi tanggung jawab saya sebagai pembimbing I / (II)³
Terima kasih atas perhatian dan kerjasama.

Mengetahui
Ketua Program Studi
Teknik Elektro – FT UHAMKA

(Ir. Harry Ramza, ST, MT, PhD)

Jakarta, 23 Juni 2026
Pembimbing I / II³



(Mohamad Khoirul Anam, S.Si., Ph.D.)

Cc :

1. Yang bersangkutan.
2. Arsip.

¹ Coret yang tidak perlu.

² Coret yang tidak perlu.

³ Coret yang tidak perlu

Lampiran 6 Lembar Bimbingan Mahasiswa

7/24/26, 10:12 AM

Bimbingan Tugas Akhir - 2203025025

BIMBINGAN TUGAS AKHIR

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA
Tahun Akademik 2025/2026 - Semester Genap

NIM : 2203025025
Nama : JUJUN JUNAEDI
Fakultas : Tekn. Industri & Informatika
Program Studi : Teknik Elektro
Dosen Pembimbing I : DWI ASTUTI CAHYASIWI, Dr., ST., MT.

No	Tanggal	Judul/Bab	Catatan Pembimbing	Status
1	23/07/2026 13:29:07	BAB I	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
2	23/07/2026 13:30:36	BAB II	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
3	23/07/2026 13:36:27	BAB II	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
4	23/07/2026 13:45:35	BAB II	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
5	23/07/2026 13:47:43	BAB II	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
6	23/07/2026 13:54:04	BAB II	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
7	23/07/2026 13:49:20	BAB III	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
8	23/07/2026 13:50:46	BAB IV	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI
9	23/07/2026 13:51:43	BAB IV	Dituju : PBB1	PBB1 : DISET UJUI

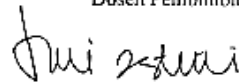
7/24/26, 10:12 AM

Bimbingan Tugas Akhir - 2203025025

No	Tanggal	Judul/Bab	Catatan Pembimbing	Status
			PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	
10	23/07/2026 13:52:29	BAB V	Dituju : PBB1 PBB1 : Disetujui otomatis melalui persetujuan final.	PBB1 : DISET UJUI

Status Bimbingan	DISETUJUI
Progres Bimbingan	125%
Total Sesi	10 / 8

Dosen Pembimbing 1,


DWI ASTUTI CAHYASIWI, Dr., ST., MT.

NUPTK: - | NIDN: 0323027401

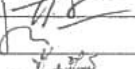
Lampiran 7 Lembar Revisi Penguji 1

LEMBAR REVISI SIDANG SKRIPSI TEKNIK ELEKTRO (PENGUJI-1)
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA UHAMKA

Nama Mahasiswa	Hjun Junaldi
NIM	2203025025
Hari Tanggal Sidang	Kamis, 6 Agustus 2026
Nama Pembimbing Skripsi	Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T.
Judul Skripsi	Desain Metamaterial Anti - Radar Berbasis Frequency Selective Surface (FSS)

Catatan

1	
2	
3	
4	
5	
6	

VALIDASI REVISI	NAMA DOSEN	TANGGAL REVISI	PARAF
(Ketua Sidang) Penguji-1	Ir. Kun Fiyankun, ST., MT	11/8/2026	
Penguji-2	Ir. Harry Ramza, ST., MT., Ph.D.	11/8/2026	
Pembimbing-1	Dr. Dwi Astuti Cahyasiwi, S.T., M.T.	11/8 - 2026	
Pembimbing-2	Mohamad Khoirul Anam S Si., Ph.D	10/08/2026	

Selanjutnya, yang bersangkutan harus segera menyelesaikan permasalahan sehubungan dengan skripsi ini, selambat-lambatnya 7 (tujuh) hari setelah tanggal pelaksanaan sidang.

- u Apabila revisi telah selesai dan mendapatkan approval (penguji, pembimbing, Kaprodi dan Dekan), maka tulisan (Skripsi, Jurnal) dan Program dikumpulkan di spss uhamka.ac.id atau Google Drive (Fakultas/Perpustakaan, Pembimbing dan Program Studi)
- u Berkas disusun sesuai petunjuk dan tanda tangan setiap berkas Asli
- u Batas Akhir Revisi
- u Batas Akhir Pengumpulan Berkas Skripsi dan Jurnal/Resume

(hh/bb/ttt)
(hh/bb/ttt)

Basmillah, Alhamdulillah dan Rohmatullahi wa Barakaatuh.

Ir. Harry Ramza, ST., MT., Ph.D.
Ketua Program Studi Teknik Elektro

Catatan: Daftar revisi ini diserahkan kepada mahasiswa untuk acuan revisi bagi Dosen Pembimbing

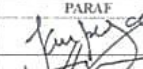
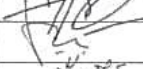
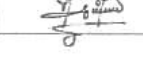
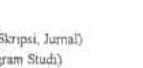
Lampiran 8 Lembar Revisi Penguji 2

LEMBAR REVISI SIDANG SKRIPSI TEKNIK ELEKTRO (PENGUJI-2) FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN INFORMATIKA UHAMKA

Nama Mahasiswa	Jujun Junardi
NIM	2203025025
Hari Tanggal Sidang	Kamis, 6 Agustus 2026
Nama Pembimbing Skripsi	Dr. Dwi Astuti Cahyaniwi, S.T., M.T.
Judul Skripsi	Desain Metamaterial Anti - Radar Berbasis Frequency Selective Surface (Fss)

Catatan

1	perbaiki sesuai buku panduan.
2	
3	
4	
5	
6	

VALIDASI REVISI	NAMA DOSEN	TANGGAL REVISI	PARAF
(Ketua Sidang) Penguji-1	Ir Kun Fayakun, ST., MT.	11/8/2026	
Penguji-2	Ir Harry Ramza, ST., MT., Ph.D.	11/8/2026	
Pembimbing-1	Dr. Dwi Astuti Cahyaniwi, S.T., M.T.	11/8-2026	
Pembimbing-2	Mohamad Khotul Anam S.Si., Ph.D.	10/08/2026	

Selanjutnya, yang bersangkutan harus segera menyelesaikan permasalahan sehubungan dengan skripsi ini, selambat-lambatnya 7 (tujuh) hari setelah tanggal pelaksanaan sidang.

- ü Apabila revisi telah selesai dan mendapatkan approval (penguji, pembimbing, Kaprodi dan Dekan), maka tulisan (Skripsi, Jurnal) dan Program dikumpulkan di spss uhamka.ac.id atau Google Drive (Fakultas-Perpustakaan, Pembimbing dan Program Studi)
- ü Berkas disusun sesuai petunjuk dan tanda tangan setiap berkas Asli

ü Batas Akhir Revisi

ü Batas Akhir Pengumpulan Berkas Skripsi dan Jurnal/Resume

Inshallahu 'Allohu wa Rohmatullahi wa Barokatuhi.


Ir. Harry Ramza, S.T., M.T., Ph.D.
Ketua Program Studi Teknik Elektro

Catatan: Daftar revisi ini diserahkan kepada mahasiswa untuk acuan revisi bagi Dosen Pembimbing

Lampiran 9 Cek Hasil Turnitin



Page 1 of 86 - Cover Page

Submission ID trn:oid::3618:147909786

Layanan Perpustakaan Uhamka

JUJUN JUNAEDI-DESAIN METAMATERIAL ANTI – RADAR BERBASIS FREQUENCY SELECTIVE SURFACE (FSS)

10/8/2026

Document Details

Submission ID

trn:oid::3618:147909786

Submission Date

Aug 11, 2026, 8:52 AM GMT+7

Download Date

Aug 11, 2026, 9:07 AM GMT+7

File Name

JUJUN JUNAEDI_TURNITIN KE 2 SKRIPSI - Jujun Jnady.docx

File Size

2.9 MB

79 Pages

14,596 Words

99,581 Characters



Page 1 of 86 - Cover Page

Submission ID trn:oid::3618:147909786



8% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 4%  Internet sources
- 1%  Publications
- 6%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.





Top Sources

4% Internet sources
1% Publications
6% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Student papers	Universitas Negeri Jakarta on 2026-07-31	<1%
2	Internet	www.theemcshop.com	<1%
3	Student papers	Universitas Negeri Jakarta on 2026-07-31	<1%
4	Internet	repository.uin-suska.ac.id	<1%
5	Internet	repository.its.ac.id	<1%
6	Student papers	Fakultas Teknik on 2026-07-14	<1%
7	Student papers	Fakultas Teknik on 2026-07-14	<1%
8	Student papers	UPN Veteran Yogyakarta on 2026-08-03	<1%
9	Internet	edoc.pub	<1%
10	Student papers	Sekolah Teknik Elektro & Informatika on 2025-09-15	<1%
11	Student papers	Fakultas Teknik on 2025-07-17	<1%





12	Internet	repository.ulb.ac.id	<1%
13	Internet	mdpi-res.com	<1%
14	Student papers	Politeknik Negeri Bandung on 2017-08-04	<1%
15	Publication	Buana, Arya Sula Cakra. "Desain Kendali PID-MPSO pada Sistem Dual Axis Solar Tr...	<1%
16	Student papers	Fakultas Teknik on 2026-07-15	<1%
17	Student papers	Universitas Negeri Jakarta on 2017-02-13	<1%
18	Student papers	Universitas Islam Riau on 2025-09-19	<1%
19	Internet	repo.darmajaya.ac.id	<1%
20	Student papers	Universitas Sumatera Utara on 2026-06-15	<1%
21	Internet	docplayer.info	<1%
22	Student papers	Fakultas Teknik on 2025-08-05	<1%
23	Student papers	Fakultas Teknik on 2025-08-11	<1%
24	Publication	Mohammad Efendi Lasulika, Yulianty Lasena, Kartika Chandra Pelangi, Yusrianto ...	<1%
25	Student papers	Universitas Pancasila on 2026-02-02	<1%





26	Student papers	Universitas Pancasila on 2026-02-02	<1%
27	Student papers	Universitas Pendidikan Indonesia on 2026-08-10	<1%
28	Student papers	Fakultas Teknik on 2026-07-15	<1%
29	Student papers	Universitas Negeri Jakarta on 2026-08-01	<1%
30	Student papers	Hawaii Preparatory Academy on 2025-02-11	<1%
31	Student papers	SDM Universitas Gadjah Mada on 2021-10-08	<1%
32	Internet	herlinacandra.wordpress.com	<1%
33	Student papers	Perpustakaan on 2026-05-20	<1%
34	Internet	dokumen.tips	<1%
35	Internet	repository.usd.ac.id	<1%
36	Student papers	Universitas Jember on 2023-03-26	<1%
37	Internet	digilib.uin-suka.ac.id	<1%
38	Internet	www.scribd.com	<1%
39	Internet	yopivijaya88.blogspot.com	<1%





40	Student papers	The University of Manchester on 2017-09-04	<1%
41	Internet	eprints.uad.ac.id	<1%
42	Student papers	Universitas Negeri Jakarta on 2017-08-21	<1%
43	Internet	eprints.upj.ac.id	<1%
44	Internet	etheses.whiterose.ac.uk	<1%
45	Internet	id.wikipedia.org	<1%
46	Internet	journal.unas.ac.id	<1%
47	Internet	pt.scribd.com	<1%
48	Internet	repository.polimedia.ac.id	<1%
49	Internet	www.coursehero.com	<1%
50	Internet	www.elektro.undip.ac.id	<1%
51	Student papers	Fakultas Teknik on 2025-10-14	<1%
52	Student papers	Institut Teknologi Sumatera on 2025-09-17	<1%
53	Publication	Megastin Massang Lumembang, Bualkar Abdullah. "Rancang Bangun Antena Mik...	<1%



54	Student papers	UM Surabaya on 2026-06-22	<1%
55	Student papers	UPN Veteran Yogyakarta on 2026-06-04	<1%
56	Student papers	Universitas Muhammadiyah Surakarta on 2014-08-06	<1%
57	Student papers	Universitas Pertamina on 2025-07-18	<1%
58	Student papers	Universiti Malaysia Pahang on 2017-01-25	<1%
59	Internet	core.ac.uk	<1%
60	Internet	linknovate.com	<1%
61	Internet	repositori.usu.ac.id	<1%
62	Internet	seo.uklis.net	<1%
63	Student papers	FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM on 2025-07-17	<1%
64	Student papers	Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti on 2019-09-18	<1%
65	Publication	Romi Fadli Syahputra, Nurul Aisah, Delovita Ginting, Debi Yana et al. "Perancanga...	<1%
66	Student papers	College of Banking and Financial Studies on 2025-12-15	<1%