

**RANCANG BANGUN SENSOR KELEMBAPAN TANAH
BERBASIS ANTENA MIKROSTRIP HIBRIDA CSRR-SRR
PADA FREKUENSI 2,5 GHz DENGAN PENINGKATAN *DEPTH*
*RESONANCE DIP***



**Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Program Studi Pendidikan Teknik Elektronika**

Oleh:

LLANO KUSUMA DEWA

NIM: 1513622032

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
Intelligentia - Dignitas
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI
PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRONIKA
TAHUN 2026

HALAMAN JUDUL

**RANCANG BANGUN SENSOR KELEMBAPAN TANAH
BERBASIS ANTENA MIKROSTRIP HIBRIDA CSRR-SRR
PADA FREKUENSI 2,5 GHz DENGAN PENINGKATAN *DEPTH*
*RESONANCE DIP***



Intelligentia - Dignitas

**Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelara Sarjana Program Studi Pendidikan Teknik Elektronika**

Oleh:

LLANO KUSUMA DEWA

NIM: 1513622032

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI

PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRONIKA

TAHUN 2026

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

BENTUK: SKRIPSI SARJANA

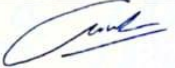
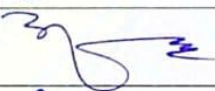
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

BENTUK: SKRIPSI SARJANA

Nama Mahasiswa : Llano Kusuma Dewa
 NIM : 1513622032
 Program Studi/Fakultas : Pendidikan Teknik Elektronika/Teknik
 Judul Penelitian : Rancang Bangun Sensor Kelembapan Tanah Berbasis Antena Mikrostrip Hibrida CSRR-SRR Pada Frekuensi 2,5 GHz Dengan Peningkatan *Depth Resonance Dip*

Ini telah dipertahankan dihadapan dewan penguji dan dinyatakan (*Lulus /Tidak-Lulus*)*
 Ujian Tugas Akhir oleh Tim Penguji pada Tanggal 29 Juni 2026.

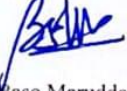
Tim Penguji,

	Nama	Tanda Tangan
Ketua Penguji	<u>Dr. Wisnu Djatmiko, M.T.</u> NIDN. 0014026706	
Anggota Penguji (Penguji Ahli 1)	<u>Muhamad Wahyu Iqbal, M.T.</u> NUPTK. 0438774675130243	
Anggota Penguji (Penguji Ahli 2)	<u>Radimas Putra Muhamad Davi Labib, M.T.</u> NIDN. 0710079402	
Anggota Penguji (Pembimbing 1)	<u>Prof. Dr. Efri Sandi, S.Pd., M.T.</u> NIDN. 0002027508	
Anggota Penguji (Pembimbing 2)	<u>Dr. Baso Maruddani, S.T., M.T.</u> NIDN. 0002058301	

Mengetahui,
 Dekan/Direktur,


 Prof. Dr. Neneng Siti Silfi Ambarwati, S.Si., Apt., M.Si.
 NIDN. 0029027204

Koordinator Program Studi
 Pendidikan Teknik Elektronika


 Dr. Baso Maruddani, S.T., M.T.
 NIDN. 0002058301

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Nama : Llano Kusuma Dewa
NIM : 1513622032
Program Studi : Pendidikan Teknik Elektronika
Fakultas : Teknik
Judul : Rancang Bangun Sensor Kelembapan Tanah Berbasis Antena
Mikrostrip Hibrida CSRR-SRR Pada Frekuensi 2,5 GHz
Dengan Peningkatan *Depth Resonance Dip*

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya tulis ilmiah ini.

Jakarta, 20 Mei 2026

Yang Menyatakan,



Llano Kusuma Dewa
NIM. 1513622032



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
PERPUSTAKAAN DAN KEARSIPAN

Jalan Rawamangun Muka Jakarta 13220

Telepon/Faksimili: 021-4894221

Laman: lib.unj.ac.id

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Negeri Jakarta, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Llano Kusuma Dewa
NIM : 1513622032
Fakultas/Prodi : Teknik/Pendidikan Teknik Elektronika
Alamat email : llanoxdewa@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

☒ Skripsi ☐ Tesis ☐ Disertasi ☐ Lain-lain (... ..)

yang berjudul :

Rancang Bangun Sensor Kelembapan Tanah Berbasis Antena Mikrostrip Hibrida CSRR-SRR Pada Frekuensi 2,5 Ghz Dengan Peningkatan *Depth Resonance Dip*

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalihmediakan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain secara **fulltext** untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 8 Agustus 2026

Penulis

(Llano Kusuma Dewa)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga peneliti dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sensor Kelembapan Tanah Berbasis Antena Mikrostrip Hibrida CSRR-SRR Pada Frekuensi 2,5 GHz Dengan Peningkatan *Depth resonance dip*” dengan baik dan lancar.

Penelitian skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Efri Sandi, M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah sabar membimbing, memberikan arahan, masukan, serta motivasi selama proses penelitian skripsi ini.
2. Bapak Dr. Baso Maruddani, M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bantuan, arahan, dan dukungan selama proses penelitian dan penelitian skripsi ini.
3. Bapak dan Ibu tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, semangat, serta pengorbanan yang tidak ternilai selama peneliti menempuh pendidikan hingga proses penelitian skripsi ini selesai. Dukungan moral maupun materi yang diberikan menjadi motivasi terbesar bagi peneliti dalam menyelesaikan penelitian ini.

Peneliti menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penelitian skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menjadi referensi dalam pengembangan penelitian di bidang antena mikrostrip dan sensor berbasis gelombang mikro.

Jakarta, 20 Mei 2026

Peneliti,



Llano Kusuma Dewa
1513622032

Rancang Bangun Sensor Kelembapan Tanah Berbasis Antena Mikrostrip Hibrida CSRR-SRR Pada Frekuensi 2,5 GHz Dengan Peningkatan *Depth Resonance Dip*

Llano Kusuma Dewa (1513622032)

Dosen Pembimbing: Prof. Dr. Efri Sandi, M.T. dan Dr. Baso Maruddani, M.T.

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan purwarupa sensor prediktif awal kelembapan tanah berbasis antena mikrostrip hibrida *Complementary Split-Ring Resonator-Split-Ring Resonator* (CSRR-SRR) yang bekerja pada frekuensi 2,5 GHz, dengan struktur CSRR disisipkan pada *ground plane* dan struktur SRR pada *patch* antena. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan *rapid prototyping*, meliputi perhitungan dimensi, simulasi menggunakan CST Microwave Studio Suite 2019, fabrikasi pada substrat FR-4, serta pengukuran karakteristik menggunakan *Vector network analyzer* (VNA) LiteVNA64. Hasil pengukuran menunjukkan antena beresonansi pada 2,5 GHz dengan *return loss* (S11) sebesar -41 dB dan VSWR sebesar 1,01, mendekati hasil simulasi (S11 -42 dB) dan memenuhi kriteria kelayakan antena sebagai elemen peradiasi ($S_{11} \leq -10$ dB, $VSWR \leq 2$). Simulasi menunjukkan penambahan CSRR berkaitan dengan pengurangan dimensi *patch* dan substrat tanpa mengubah frekuensi kerja, sedangkan penambahan SRR berkaitan dengan *peningkatan depth resonance dip* dari -17 dB menjadi -42 dB. Analisis distribusi arus permukaan, medan listrik, dan medan magnet memperkuat mekanisme kerja CSRR dan SRR sebagai resonator elektromagnetik berbasis rangkaian ekuivalen LC. Pada pengujian terhadap sampel tanah liat, peningkatan nilai *Gravimetric water content* (GWC) acuan dari 0,35% hingga 14,39% menyebabkan frekuensi resonansi antena bergeser dari 2500 MHz menjadi 2410 MHz. Hubungan tersebut dimodelkan melalui regresi linear sederhana, menghasilkan persamaan $GWC(\%) = 0,4454 + 0,1546\Delta f$ dengan R^2 sebesar 0,9922, MAE sebesar 0,35 GWC(%), dan RMSE sebesar 0,43 GWC(%). Nilai-nilai tersebut menunjukkan kesesuaian model yang baik pada satu rangkaian data, tetapi belum membuktikan keterulangan (*repeatability*) pembacaan sensor, karena setiap variasi GWC hanya diukur satu kali. Hasil penelitian ini masih terbatas sebagai bukti konsep (*proof of concept*) purwarupa prediktif awal pada kondisi laboratorium dan satu jenis tanah, sehingga pengujian keterulangan, variasi jenis tanah, pengaruh suhu, salinitas, serta kondisi lapangan masih perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Kata kunci: antena mikrostrip, CSRR-SRR, pergeseran frekuensi resonansi, regresi linear, *Gravimetric water content*

Design and Development of a Soil moisture Sensor Based on Hybrid CSRR-SRR Microstrip Antenna at 2.5 GHz Frequency with Increased Resonance Dip Depth

Llano Kusuma Dewa (1513622032)

Supervisor: Prof. Dr. Efri Sandi, M.T. and Dr. Baso Maruddani, M.T.

ABSTRACT

This study developed an early-stage predictive soil moisture sensor prototype based on a hybrid Complementary Split-Ring Resonator–Split-Ring Resonator (CSRR-SRR) microstrip antenna operating at 2,5 GHz, with the CSRR structure embedded in the ground plane and the SRR structure on the antenna patch. The research applied a Research and Development (R&D) method with a rapid prototyping approach, covering dimensional calculation, simulation using CST Microwave Studio Suite 2019, fabrication on an FR-4 substrate, and characterization using a LiteVNA64 Vector network analyzer (VNA). Measurement results show the antenna resonates at 2.5 GHz with a return loss (S_{11}) of -41 dB and a VSWR of 1.01, closely matching the simulation results (S_{11} of -42 dB) and satisfying the antenna feasibility criteria as a radiating element ($S_{11} \leq -10$ dB, $VSWR \leq 2$). Simulation results indicate that adding the CSRR structure is associated with a reduction in patch and substrate dimensions without altering the operating frequency, while adding the SRR structure is associated with an increase in depth resonance dip from -17 dB to -42 dB. Surface current, E-field, and H-field distribution analyses support the working mechanism of CSRR and SRR as electromagnetic resonators based on an equivalent LC circuit. In testing on clay soil samples, an increase in reference Gravimetric water content (GWC) from 0,35% to 14,39% shifted the antenna's resonant frequency from 2500 MHz to 2410 MHz. This relationship was modeled through simple linear regression, producing the equation $GWC(\%) = 0,4454 + 0,1546\Delta f$ with an R^2 of 0,9922, an MAE of 0,35 GWC(%), and an RMSE of 0,43 GWC(%). These values indicate good model fit on a single dataset but do not demonstrate the repeatability of the sensor response, since each GWC condition was measured only once. The findings remain limited to a laboratory-scale proof-of-concept prototype tested on a single soil type; repeatability testing, other soil types, temperature effects, salinity effects, and field conditions still need to be examined in future research.

Keywords : *microstrip antenna, CSRR-SRR, resonant frequency shift, linear regression, Gravimetric water content*

Intelligentia - Dignitas

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Identifikasi Masalah	6
1.3. Pembatasan Masalah	7
1.4. Perumusan Masalah	9
1.5. Tujuan Penelitian.....	9
1.6. Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1. Konsep Pengembangan Produk.....	10
2.2. Konsep Produk yang Dikembangkan.....	12
2.3. Kerangka Teoritik.....	17
2.3.1. Penelitian yang Relevan	17
2.3.2. Penelitian R&D	22
2.3.3. Metode Penelitian.....	23

2.3.4. Karakteristik Elektromagnetik Tanah.....	25
2.3.5. Antena Mikrostrip	27
2.3.6. <i>Complementary Split ring resonator</i> (CSRR).....	35
2.3.7. Perancangan Desain CSRR Pada Bidang <i>Ground plane</i>	37
2.3.8. <i>Split ring resonator</i> (SRR).....	40
2.3.9. Perancangan Desain SRR.....	42
2.3.10. Pengaruh Kelembapan Tanah terhadap Parameter Elektromagnetik	44
2.3.11. Penggunaan Frekuensi 2,5 GHz	46
2.3.12. Antena Mikrostrip sebagai Sensor Kelembapan Tanah.....	48
2.3.13. <i>Gravimetric water content</i> (GWC)	50
2.4. Rancangan Produk	52
2.5. Diagram Alir Pengembangan Antena Sebagai Sensor Kelembapan Tanah	56
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	60
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian.....	60
3.2. Metode Pengembangan Produk.....	60
3.2.1. Tujuan Pengembangan	62
3.2.2. Tahapan Pengembangan.....	64
3.2.3. Sasaran Produk.....	68
3.2.4. Instrumen Penelitian.....	70
3.3. Prosedur Pengembangan	72
3.3.1. <i>Initial Requirements</i>	72
3.3.2. Menentukan Spesifikasi Antena.....	73
3.3.3. Menentukan Jenis Material Antena.....	75
3.3.4. Menentukan Spesifikasi Antena Sebagai Sensor	76
3.3.5. Tahap <i>Create/Update Prototype</i>	76
3.3.6. Evaluasi.....	81

3.3.7. Fabrikasi dan Pengukuran	83
3.3.8. Kalibrasi Alat Ukur dengan Metode Gravimetrik	84
3.3.9. Pengujian Antena Sebagai Sensor Prediktif Kelembapan Tanah	86
3.3.10. Validasi Awal Model Prediksi	87
3.4. Teknik Pengumpulan Data	89
3.5. Teknik Analisis Data	90
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	94
4.1. Hasil Pengembangan Produk	94
4.1.1. Proses Pengembangan Produk	96
4.1.2. Simulasi Variasi Permittivitas Relatif	124
4.1.3. Fabrikasi Antena.....	136
4.1.4. Pengukuran Menggunakan VNA	140
4.1.5. Pengujian Antena Sebagai Sensor Prediktif Kelembapan Tanah	146
4.1.6. Validasi Awal Model Regresi	159
4.1.7. Hasil Akhir Produk.....	160
4.2. Kelayakan Produk (Teoritik dan Empiris)	164
4.2.1. Kelayakan Teoritik	165
4.2.2. Kelayakan Empiris	166
4.3. Efektivitas Produk.....	168
4.3.1. Peningkatan Performa Antena Akibat Struktur CSRR-SRR.....	169
4.3.2. Pengurangan Dimensi Antena Akibat Struktur CSRR-SRR	171
4.3.3. Sensitivitas Sensor Terhadap Perubahan Nilai Permittivitas Relatif..	173
4.4. Pembahasan.....	174
BAB V KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN	178
5.1. Kesimpulan	178
5.2. Implikasi.....	179

5.3. Saran.....	180
DAFTAR PUSTAKA.....	182
LAMPIRAN.....	187
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	202



Intelligentia - Dignitas

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
2.1.	Perbandingan Penelitian Relevan	14
2.2.	Perbandingan Penelitian Relevan	17
2.3.	Target Parameter Keberhasilan Produk	54
3.1.	Spesifikasi Antena Sebagai Elemen Peradiasi	75
3.2.	Spesifikasi Jenis Substrat yang Digunakan	75
3.3.	Spesifikasi Bahan <i>Patch</i> dan <i>Ground Plane</i>	76
3.4.	Spesifikasi Antena Sebagai Sensor Prediktif Awal	76
3.5.	Format Dimensi Antena Mikrostrip Hasil Perhitungan	78
3.6.	Format Dimensi CSRR Hasil Perhitungan	78
3.7.	Format Dimensi <i>Split Ring Resonator</i> Antena Hasil Perhitungan	79
3.8.	Format Hasil Simulasi Antena	80
3.9.	Format Hasil Simulasi Variasi Permittivitas Tanah	81
3.10.	Format Hasil Pengukuran Antena CSRR-SRR	84
3.11.	Format Hasil Kalibrasi Alat Ukur dengan Metode Gravimetrik	86
3.12.	Format Hasil Pengukuran Kelembapan Tanah Antena CSRR-SRR	86
3.13.	Jenis dan Sumber Data Penelitian	89
4.1.	Dimensi Antena Konvensional Hasil Perhitungan	102
4.2.	Dimensi Antena Konvensional Iterasi 1	105
4.3.	Hasil Simulasi Antena Konvensional Iterasi 1	105
4.4.	Dimensi Antena Konvensional Iterasi 2 (Final)	106
4.5.	Hasil Simulasi Antena Konvensional Iterasi 2 (Final)	106
4.6.	Dimensi CSRR	107
4.7.	Variasi Dimensi Struktur CSRR pada Tahap Optimalisasi	110
4.8.	Dimensi CSRR Iterasi 1	111
4.9.	Dimensi Antena Iterasi 1	111
4.10.	Hasil Simulasi Antena CSRR Iterasi 1	111
4.11.	Dimensi CSRR Iterasi 2	112
4.12.	Dimensi Antena Iterasi 2	112
4.13.	Hasil Simulasi Antena CSRR Iterasi 2	112
4.14.	Dimensi CSRR Iterasi 3 (Final)	113
4.15.	Dimensi Antena Iterasi 3 (Final)	113
4.16.	Hasil Simulasi Antena CSRR Iterasi 3 (Final)	113
4.17.	Parameter Dimensi Struktur SRR	115
4.18.	Variasi Optimasi Jumlah dan Jarak Struktur SRR	117
4.19.	Dimensi SRR Iterasi 1	119
4.20.	Dimensi Antena CSRR-SRR Iterasi 1	119
4.21.	Hasil Simulasi Antena CSRR-SRR Iterasi 1	119
4.22.	Hasil Simulasi Antena CSRR-SRR Iterasi 2	120
4.23.	Hasil Simulasi Antena CSRR-SRR Iterasi 3 (Final)	121
4.24.	Perbandingan Antena Konvensional, CSRR, dan CSRR-SRR	122

4.25.	Hasil Simulasi <i>Soil Moisture</i> Antena Konvensional	128
4.26.	Hasil Simulasi <i>Soil Moisture</i> Antena Hibrida CSRR-SRR	130
4.27.	Data Regresi Linear Sederhana Antena Konvensional	131
4.28.	Analisis Regresi Linear Simulasi Permittivitas Antena Konvensional	132
4.29.	Data Regresi Linear Sederhana Antena CSRR-SRR	134
4.30.	Analisis Regresi Linear Simulasi Permittivitas Antena CSRR-SRR	135
4.31.	Perbandingan Hasil Analisis Regresi Linear Simulasi Permittivitas	136
4.32.	Hasil Pengukuran Dimensi <i>Substrate</i> dan <i>Patch</i> Antena Fabrikasi	139
4.33.	Hasil Pengukuran Dimensi CSRR Antena Fabrikasi	139
4.34.	Hasil Pengukuran Dimensi SRR Antena Fabrikasi	139
4.35.	Perbandingan Parameter Antena antara Hasil Simulasi dan Pengukuran	145
4.36.	Hasil Kalibrasi Alat Ukur <i>Soil Moisture</i> dengan Metode Gravimetrik	148
4.37.	Data Regresi Linear Sederhana Metode Gravimetri	149
4.38.	Hasil Analisis Regresi Linear Kalibrasi Alat Ukur	150
4.39.	Error Prediksi GWC (%) Model Regresi Alat Ukur	151
4.40.	Hasil Pengukuran Sampel Tanah Antena CSRR-SRR	154
4.41.	Data Regresi Linear Sederhana Prediksi	155
4.42.	Hasil Analisis Regresi Linear Pergeseran Frekuensi terhadap Nilai GWC	156
4.43.	Error Prediksi GWC (%) Model Regresi Pergeseran Frekuensi	157
4.44.	Data Hasil Pengukuran untuk Validasi Kalibrasi Gravimetrik	159
4.45.	Validasi Model Prediksi GWC (%) Kalibrasi Gravimetrik	159
4.46.	Data Hasil Pengukuran Antena untuk Validasi	160
4.47.	Validasi Model Prediksi GWC (%) Model Regresi Pergeseran Frekuensi	160
4.48.	Perbandingan Simulasi Antena CSRR-SRR dengan Konvensional	169
4.49.	Perbandingan Dimensi Antena Konvensional dan Antena CSRR-SRR	172
4.50.	Tabel Perbandingan Hasil Simulasi Permittivitas Relatif	173

Intelligentia - Dignitas

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul Gambar	Halaman
2.1.	Struktur Antena Mikrostrip	28
2.2.	Posisi Sampel Tanah terhadap Patch dan Daerah <i>Medan Fringing</i>	30
2.3.	Teknik <i>Feeding</i> Antena <i>Microstrip</i> : (a) <i>microstrip-line</i> , (b) <i>probe coaxial</i> , (c) <i>aperture-coupling</i> , (d) <i>proximity-coupling</i>	33
2.4.	Desain <i>Rectangular Patch</i>	34
2.5.	(a) <i>Outer ring</i> of CSRR (b) <i>Inner ring</i> of CSRR	38
2.6.	Dimensi Detail <i>Split Ring Resonator</i>	42
2.7.	<i>Flowchart</i> Kerangka Berpikir	59
4.1.	Hasil Simulasi Distribusi Arus Permukaan: (a) Bagian Depan, (b) Bagian Belakang	95
4.2.	Perhitungan Lebar <i>Feedline</i> Menggunakan <i>Feed CST</i>	100
4.3.	Desain Antena Konvensional pada CST Microwave Studio	102
4.4.	Hasil Simulasi S11 Antena Konvensional	103
4.5.	Hasil Simulasi VSWR Antena Konvensional	103
4.6.	Grafik Perbandingan S11 pada Setiap Iterasi Antena Konvensional	105
4.7.	<i>Design Final</i> Antena Konvensional: (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang	107
4.8.	Desain Antena dengan Struktur CSRR: (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang	108
4.9.	Hasil Simulasi S11 Antena CSRR	108
4.10.	Hasil Simulasi VSWR Antena CSRR	109
4.11.	Grafik Perbandingan S11 pada Setiap Iterasi Antena CSRR	110
4.12.	<i>Design Final</i> Antena CSRR: (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang	114
4.13.	Desain Antena dengan Struktur SRR: (a) Tampak Depan, (b) Dimensi SRR	115
4.14.	Hasil Simulasi S11 Antena Hibrida CSRR-SRR	116
4.15.	Hasil Simulasi VSWR Antena Hibrida CSRR-SRR	116
4.16.	Grafik S11 pada Setiap Iterasi Antena CSRR-SRR	117
4.17.	Konfigurasi SRR Iterasi 1	118
4.18.	Konfigurasi SRR Iterasi 2	120
4.19.	<i>Design Final</i> Antena CSRR-SRR: (a) Tampak Depan, (b) Dimensi SRR, (c) Dimensi CSRR	122
4.20.	Pemodelan Material Tanah pada CST Microwave Studio	125
4.21.	Konfigurasi Material Tanah pada CST Microwave Studio	126
4.22.	<i>Setup</i> Simulasi <i>Soil Moisture</i> Antena Konvensional: (a) Tampak Samping, (b) Tampak Belakang	127
4.23.	Grafik Pergeseran Frekuensi Resonansi Antena Konvensional	127

	<i>Setup Simulasi Soil Moisture Antena Hibrida CSRR-SRR:</i>	
4.24.	(a) Tampilan Tampak Samping, (b) Tampilan Tampak Belakang	129
4.25.	Grafik Pergeseran Frekuensi Resonansi Antena Hibrida CSRR-SRR terhadap Variasi Kelembapan Tanah	129
4.26.	Grafik Regresi Linear Simulasi Permittivitas Antena Konvensional	131
4.27.	Grafik Regresi Linear Simulasi Permittivitas Antena CSRR-SRR	133
4.28.	<i>Layout</i> Desain Antena Sebelum Proses Fabrikasi: (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang	137
4.29.	Konektor SMA <i>Female</i> pada Antena Mikrostrip	138
4.30.	Antena Hasil Fabrikasi: (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang	139
4.31.	Kondisi <i>Open</i> pada Kalibrator VNA	141
4.32.	Kondisi <i>Short</i> pada Kalibrator VNA	142
4.33.	Kondisi <i>Load</i> pada Kalibrator VNA	142
4.34.	Tampilan Layar VNA Setelah Kalibrasi	143
4.35.	Grafik Hasil Pengukuran S11 Antena Menggunakan VNA	144
4.36.	Grafik Perbandingan Nilai <i>Return Loss</i> (S11) Simulasi dan Pengukuran	145
4.37.	Grafik Regresi Linear Kalibrasi <i>Gravimetric</i>	151
4.38.	Konfigurasi Pengukuran <i>Soil Moisture</i> dengan Antena CSRR-SRR	153
4.39.	Grafik Pergeseran Frekuensi Hasil Pengujian Kelembapan Tanah	154
4.40.	Grafik Regresi Linear GWC dengan Pergeseran Frekuensi	156
4.41.	Distribusi Medan Listrik (<i>E-Field</i>): (a) Bagian <i>Ground Plane</i> (Struktur CSRR), (b) Bagian <i>Patch</i> (Struktur SRR)	162
4.42.	Distribusi Medan Magnet (<i>H-Field</i>): (a) Bagian <i>Ground Plane</i> (Struktur CSRR), (b) Bagian <i>Patch</i> (Struktur SRR)	162
4.43.	Distribusi Arus Permukaan Antena Konvensional: (a) Tampak Depan (Bidang <i>Patch</i>), (b) Tampak Belakang (Bidang <i>Ground Plane</i>)	170
4.44.	Distribusi Medan Listrik (<i>E-Field</i>) Antena Konvensional: (a) Tampak Depan (Bidang <i>Patch</i>), (b) Tampak Belakang (Bidang <i>Ground Plane</i>)	171
4.45.	Distribusi Medan Magnet (<i>H-Field</i>) Antena Konvensional: (a) Tampak Depan (Bidang <i>Patch</i>), (b) Tampak Belakang (Bidang <i>Ground Plane</i>)	171

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul Lampiran	Halaman
Lampiran 1.	Dokumentasi Produk dan Fabrikasi Antena	187
Lampiran 2.	Gambar Teknik Antena CSRR SRR	187
Lampiran 3.	Lampiran 3 Data Simulasi CST	188
Lampiran 4.	Data Mentah Pengukuran VNA	190
Lampiran 5.	Data Pengukuran GWC	191
Lampiran 6.	Perhitungan Regresi Linear dan R^2	198
Lampiran 7.	Dokumentasi Setup Pengukuran <i>Soil moisture</i>	199
Lampiran 8.	Dokumentasi Kalibrasi VNA <i>Open Short Load</i>	200
Lampiran 9.	Data Pengukuran Dimensi Hasil Fabrikasi	201
Lampiran 10.	Perhitungan MAE, RMSE, GWC prediksi, GWC acuan	201



Intelligentia - Dignitas