

**TUGAS AKHIR - EE 184081**

**PERANCANGAN RECTIFIER ANTENA UNTUK SISTEM  
TRANSFER DAYA NIRKABEL PADA FREKUENSI RADIO  
2.45 GHz BERBASIS SOFTWARE-DEFINED RADIO**

**ALFIAN HAFIZH**

NRP 07111840000172

Dosen Pembimbing

**Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D**

NIP 197210012003121002

**Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.**

NIP 195904281986011001

**Program Studi Sarjana Teknik Elektro**

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022





**TUGAS AKHIR - EE 184081**

**PERANCANGAN RECTIFIER ANTENNA UNTUK SISTEM  
TRANSFER DAYA NIRKABEL PADA FREKUENSI RADIO  
2.45 GHz BERBASIS SOFTWARE-DEFINED RADIO**

**ALFIAN HAFIZH**

**NRP 07111840000172**

Dosen Pembimbing

**Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D**

**NIP 197210012003121002**

**Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.**

**NIP 195904281986011001**

**Program Studi Sarjana Teknik Elektro**

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



**FINAL PROJECT - EE 184081**

**RECTIFIER ANTENNA DESIGN FOR WIRELESS POWER  
TRANSFER SYSTEM AT 2.45 GHz RADIO FREQUENCY  
BASED ON SOFTWARE-DEFINED RADIO**

**ALFIAN HAFIZH**

**NRP 07111840000172**

Advisor

**Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D**

**NIP 197210012003121002**

**Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.**

**NIP 195904281986011001**

**Bachelor of Electrical Engineering Study Program**

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN RECTIFIER ANTENNA UNTUK SISTEM TRANSFER DAYA NIRKABEL PADA FREKUENSI RADIO 2.45 GHz BERBASIS SOFTWARE-DEFINED RADIO






#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi Sarjana Teknik Elektro  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : ALFIAN HAFIZH

NRP. 07111840000172

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- |   |               |   |
|---|---------------|---|
| 1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D           | Pembimbing    |  |
| 2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.                 | Ko-pembimbing |  |
| 3. Prof.Ir. Gamantyo Hendratoro, M.Eng.,Ph.D. | Penguji       |  |
| 4. Dr.Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.            | Penguji       |  |
| 5. Dr.Ir. Puji Handayani, MT.                 | Penguji       |  |

SURABAYA

Juli, 2022

# APPROVAL SHEET

## RECTIFIER ANTENNA DESIGN FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM AT 2.45 GHz RADIO FREQUENCY BASED ON SOFTWARE-DEFINED RADIO

### TUGAS AKHIR

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program Bachelor of Electrical Engineering  
Electrical Engineering Department  
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : ALFIAN HAFIZH

NRP. 07111840000172

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D

Advisor



2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.

Co-Advisor



3. Prof.Ir. Gamantyo Hendratoro, M.Eng.,Ph.D.

Examiner



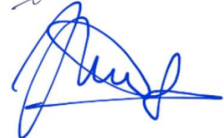
4. Dr.Ir. Achmad Mauludiyanto, MT.

Examiner



5. Dr.Ir. Puji Handayani, MT.

Examiner



SURABAYA

July, 2022

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Alfian Hafizh / 07111840000172  
Program studi : Teknik Elektro  
Dosen Pembimbing / NIP : 1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D /197210012003121002  
2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT./ 195904281986011001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan Rectifier Antenna untuk Sistem Transfer Daya Nirkabel pada Frekuensi Radio 2.45 GHz Berbasis Software-Defined Radio.”

adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D  
NIP. 19721001200312100

Mahasiswa



Alfian Hafizh  
NRP. 07111840000172

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:


Name of student / NRP : Alfian Hafizh / 07111840000172  
Department : Electrical Engineering  
Dosen Pembimbing / NIP : 1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D /197210012003121002  
2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT./ 195904281986011001

Hereby declare that the Final Project with the title of “RECTIFIER ANTENNA DESIGN FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM AT 2.45 GHz RADIO FREQUENCY BASED ON SOFTWARE-DEFINED RADIO” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is discrepancy with statement then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember,

Surabaya, July 2022

Acknowledge  
Advisor



Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D  
NIP. 19721001200312100

Student



Alfian Hafizh  
NRP. 07111840000172

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**PERANCANGAN RECTIFIER ANTENNA UNTUK SISTEM TRANSFER DAYA NIRKABEL PADA FREKUENSI 2.45 GHz BERBASIS SOFTWARE-DEFINED RADIO**” dengan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S1 Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, karunia dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kepada keluarga penulis, yaitu kedua orang tua serta kakak penulis atas doa dan segala dukungan yang diberikan kepada penulis dalam keadaan apapun.
3. Bapak Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D dan Bapak Ir. Gatot Kusrahardjo, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu selama masa perkuliahan berlangsung.
5. Teman-teman e58 yang saling berjuang dan memberi semangat satu sama lain dalam pengerjaan tugas akhir.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan dari tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi khalayak luas maupun dari pribadi penulis sendiri.

Surabaya, Juni 2022



Penulis

## ABSTRAK

### PERANCANGAN RECTIFIER ANTENNA UNTUK SISTEM TRANSFER DAYA NIRKABEL PADA FREKUENSI 2.45 GHz BERBASIS SOFTWARE-DEFINED RADIO

**Nama Mahasiswa / NRP** : Alfian Hafizh / 0711184000172  
**Departemen** : Teknik Elektro FTEIC - ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D  
2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.

#### Abstrak

Internet of Things (IoT) telah menarik minat penelitian di seluruh dunia. Karena sebagian besar perangkat komunikasi di IoT adalah ditenagai oleh baterai, perangkat ini selalu memiliki waktu pengoperasian yang terbatas. Teknologi Wireless Power Transfer (WPT), yang dapat mentransfer daya melalui media nirkabel (tanpa kabel), dapat menghindari kebutuhan untuk mengganti atau mengisi ulang baterai perangkat nirkabel di IoT secara manual. Selain itu, konsep Transfer Daya Nirkabel yang mendasari penelitian ini yaitu dengan adanya Proyek Kolaborasi Pusat ITS yang berjudul “Wahana Nirawak: Aspek Keamanan Data, Pengisian Energi, dan Desain Antena 26 GHz”.

Pada tugas akhir ini melakukan pemodelan dan perancangan rectenna (*rectifier antenna*) yang digunakan sebagai sistem penerima sistem WPT. Antena yang digunakan adalah antena mikrostrip *Array 2x1* dengan ukuran 6.5 x 5.4 cm yang didesain bekerja pada frekuensi 2.45 GHz. Pemodelan antena menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 dan dilakukan fabrikasi. Dengan memodelkan SDR HackRF One dan teknik modulasi divariasikan melalui pemrograman pada *software* GNU Radio. Modulasi yang digunakan meliputi: AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi, dengan frekuensi pembawa 2.45 GHz. Metode penelitian ini adalah eksperimen, memisahkan pemancar dan penerima dengan jarak tertentu, kemudian diambil data berupa Daya Terima RF, Output Tegangan DC, dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC. Apabila dievaluasi pada jarak 10 cm, *rectenna* tipe pertama dengan teknik modulasi 2-tone merupakan yang paling efisien dengan  $\eta_{RF-DC}$  mencapai 91.78%. *Rectenna* tipe kedua menggunakan teknik modulasi 4-tone merupakan paling efisien dengan  $\eta_{RF-DC}$  mencapai 7.9%.

**Kata kunci:** WPT, Teknik Modulasi, Rectenna, RF Power Transfer, SDR

## ABSTRACT

### RECTIFIER ANTENNA DESIGN FOR WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM AT 2.45 GHz RADIO FREQUENCY BASED ON SOFTWARE-DEFINED RADIO

**Student Name / NRP** : Alfian Hafizh / 07111840000172  
**Department** : Teknik Elektro FTEIC - ITS  
**Advisor** : 1. Ir. Eko Setijadi, ST., MT., Ph.D  
2. Ir. Gatot Kusrahardjo, MT.

#### Abstract

*The Internet of Things (IoT) has attracted research interest around the world. Since most communication devices in IoT are battery powered, these devices always have a limited run time. Wireless Power Transfer (WPT) technology, which can transfer power over a wireless medium (without cables), can avoid the need to manually replace or recharge the batteries of wireless devices in IoT. In addition, the concept of Wireless Power Transfer that underlies this research is the ITS Center Collaboration Project entitled "Wireless Vehicles: Aspects of Data Security, Energy Charging, and 26 GHz Antenna Design".*

*In this final project, modeling and designing a rectenna (rectifier antenna) which is used as a receiving system for the WPT system. The antenna used is a 2x1 array microstrip antenna with a size of 6.5 x 5.4 cm designed to work at a frequency of 2.45 GHz. Antenna modeling using CST Studio Suite 2019 software and fabricated. By modeling the HackRF One SDR and varying the modulation technique through programming on the GNU Radio software. The modulations used include AM, FM, 2-tone, 4-tone, and without modulation, with a carrier frequency of 2.45 GHz. This research method is an experiment, separating the transmitter and receiver with a certain distance, then data is taken in the form of RF Receive Power, DC Voltage Output, and RF-to-DC Power Conversion Efficiency. When evaluated in at a distance of 10cm, the 2-tone modulation technique is the most efficient with  $\eta_{RF-DC}$  reaching 91.78%. The second type of rectenna using 4-tone modulation technique is the most efficient with  $\eta_{RF-DC}$  reaching 7.9%.*

**Keywords:** *WPT, Teknik Modulasi, Rectenna, RF Power Transfer, SDR*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
APPROVAL SHEET .....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	15
1.1 Latar Belakang.....	15
1.2 Rumusan Masalah .....	15
1.3 Batasan Masalah .....	15
1.4 Tujuan .....	16
1.5 Metodologi .....	16
1.5.1 Studi Literatur .....	16
1.5.2 Pemodelan Sistem RF WPT.....	16
1.5.3 Perancangan Desain <i>Rectenna (Rectifier Antenna)</i> .....	16
1.5.4 Pengukuran dan Analisa.....	17
1.5.5 Penulisan Buku Laporan Tugas Akhir .....	17
1.6 Sistematika Penulisan.....	17
1.6.1 BAB I Pendahuluan.....	17
1.6.2 BAB II Tinjauan Pustaka .....	17
1.6.3 BAB III Metodologi Penelitian.....	18
1.6.4 BAB IV Hasil Dan Analisa .....	18
1.6.5 BAB V Kesimpulan Dan Saran.....	18
1.7 Manfaat.....	18
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	19
2.1 Penelitian Terdahulu.....	19
2.2 Wireless Sensor Network (WSN).....	19
2.3 Wireless Power Transfer (WPT) .....	20



2.4	Software-Defined Radio (SDR).....	20
2.5	Antena Mikrostrip .....	21
2.5.1	Pencatuan Antena.....	22
2.5.2	Antena <i>Array</i> .....	22
2.5.3	Koefisien Refleksi .....	23
2.5.4	Voltage Standing Wave Ratio (VSWR).....	23
2.6	Teknik Modulasi.....	23
2.6.1	Amplitude Modulation (AM).....	24
2.6.2	Frequency Modulation (FM).....	24
2.6.3	Multisine/ Multitone Modulation.....	24
2.7	Daya dari Sinyal .....	25
2.8	Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC.....	25
2.9	Teori Rectifier.....	26
2.9.1	<i>Half-Wave Rectifier</i> .....	26
2.9.2	<i>Full-wave Rectifier</i> .....	27
BAB 3	METODOLOGI .....	28
3.1	Diagram Alir dan Fishbone Penelitian .....	28
3.2	Pemodelan sistem RF WPT.....	29
3.2.1	Pemodelan SDR sebagai Transmitter.....	30
3.2.2	Pengukuran Frekuensi Kerja Antena yang Digunakan .....	31
3.2.3	Pemodelan Rectenna sebagai Receiver .....	31
3.2.4	Signal Processing melalui GNU Radio .....	35
3.3	Variasi Teknik Modulasi .....	35
3.3.1	Modulasi Amplitudo (AM) .....	36
3.3.2	Modulasi Frekuensi (FM).....	37
3.3.3	Modulasi Multitone.....	38
3.3.4	Tanpa Modulasi.....	40
3.4	Metode Pengukuran dan Analisa.....	41
3.4.1	Verifikasi Sinyal yang Diterima.....	41
3.4.2	Pengukuran Praktis.....	43
3.4.3	Analisa Hasil Pengukuran .....	43
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1	Hasil Pemodelan Rectenna .....	44
4.1.1	Pemodelan Antena.....	44

4.1.2	Pemodelan Rectifier .....	47
4.1.3	Hasil Fabrikasi Rectenna.....	48
4.2	Hasil Pengukuran Antena yang Digunakan.....	49
4.2.1	Pola Radiasi Antena .....	50
4.3	Hasil Verifikasi Sinyal Terima .....	51
4.4	Hasil Pengukuran Daya Terima RF (HackRF One Spectrum Analyzer) .....	51
4.5	Hasil Pengukuran Daya Terima RF (GWINSTEK Spectrum Analyzer) .....	53
4.6	Hasil pengukuran Output Tegangan DC .....	54
4.6.1	Hasil Pengukuran <i>Rectenna</i> Tipe Pertama.....	54
4.6.2	Hasil Pengukuran Rectenna Tipe Kedua.....	55
4.7	Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC .....	56
4.7.1	Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna Pertama.....	57
4.7.2	Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC <i>Rectenna</i> Kedua ...	59
4.8	Analisa dan Pembahasan .....	62
4.8.1	Analisa Pengukuran Daya Terima RF.....	62
4.8.2	Analisa Pengukuran Output Tegangan DC .....	63
4.8.3	Analisa pada Rectenna Tipe Pertama.....	63
4.8.4	Analisa Pada Rectenna Tipe Kedua .....	63
4.8.5	Analisa Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC .....	64
4.8.6	Rectenna Tipe Pertama.....	64
4.8.7	Rectenna Tipe Kedua .....	65
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran .....	67
	DAFTAR PUSTAKA .....	68
	LAMPIRAN.....	69
	BIODATA PENULIS .....	86

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Interaksi antar node pada WSN .....	19
Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem WPT Penelitian.....	20
Gambar 2.3 Diagram Blok SDR HackRF One .....	21
Gambar 2.4 Bagian Antena Mikrostrip.....	21
Gambar 2.5 Macam-macam bentuk patch pada antena mikrostrip(Constantine A Balanis, 2005) .....	22
Gambar 2. 6 Rangkaian Dasar Penyearah.....	26
Gambar 2. 7 Half-Wave Rectifier .....	26
Gambar 2. 8 Full-wave Rectifier .....	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	28
Gambar 3.2 Fishbone Penelitian .....	29
Gambar 3. 3 Model Sistem RF WPT .....	29
Gambar 3.4 Blok Diagram Penelitian .....	30
Gambar 3. 5 Hasil capture pengukuran (a) $S_{11}$ dan (b) VSWR.....	31
Gambar 3.6 Pemodelan Antenna Mikrostrip .....	32
Gambar 3.7 Hasil capture pengukuran $S_{11}$ .....	32
Gambar 3.8 Hasil capture pengukuran VSWR .....	32
Gambar 3.9 Hasil capture Farfield dan Gain .....	33
Gambar 3.10 Rangkaian penyearah rectenna penelitian.....	33
Gambar 3. 11 Rectifier tipe Full Wave .....	34
Gambar 3.12 Desain Antena yang terintegrasi dengan rectifier. ....	34
Gambar 3.13 Tampilan GNU Radio Companion (GRC).....	35
Gambar 3.14 Tampilan GNU Command Prompt .....	35
Gambar 3.15 Pengaturan blok Signal Source AM.....	36
Gambar 3.16 Pengaturan blok Osmocom Sink.....	37
Gambar 3.17 flowchart GRC teknik AM.....	37
Gambar 3.18 Pengaturan blok FM Preemphasis.....	37
Gambar 3.19 Pengaturan blok Frequency Mod .....	38
Gambar 3.20 Flowchart GRC Teknik FM .....	38
Gambar 3.21 Pengaturan blok Signal Source (a) 2-tone dan (b) 4-tone .....	39
Gambar 3. 22 Flowchart GRC Teknik (a) 2-tone dan (b) 4-tone.....	40
Gambar 3. 23 Pengaturan blok Signal Source tanpa modulasi.....	41
Gambar 3. 24 Flowchart GRC Teknik Tanpa Modulasi.....	41
Gambar 3. 25 Tampilan awal HackRF Sweep Spectrum Analyzer.....	42
Gambar 4. 1 Antena Mikrostrip pada Referensi .....	44
Gambar 4. 2 $S_{11}$ dan Antena Referensi .....	45
Gambar 4. 3 Modifikasi Antena tahap awal .....	45
Gambar 4. 4 $S_{11}$ pada Antena Tahap Awal .....	46
Gambar 4. 5 Desain Final Antena Mikrostrip.....	46
Gambar 4. 6 $S_{11}$ pada Antena Mikrostrip.....	46
Gambar 4. 7 Farfield dan Gain pada Antena Mikrostrip .....	47

Gambar 4. 8 Rangkaian Rectifier pada Referensi.....	47
Gambar 4. 9 Rangkaian Rectifier pada Tugas Akhir.....	47
Gambar 4. 10 Desain PCB Layout Rangkaian Rectifier.....	48
Gambar 4. 11 Hasil Fabrikasi Rectifier .....	48
Gambar 4. 12 Hasil Fabrikasi Rectenna dengan antena terpisah.....	49
Gambar 4. 13 Hasil Fabrikasi Rectenna dengan antena terintegrasi dengan rectifier .....	49
Gambar 4. 14 <b>.(S11)</b> .....	50
Gambar 4. 15 VSWR.....	50
Gambar 4. 16 Hasil Perbandingan Daya Terima RF (HackRF One Spectrum Analyzer).62	62
Gambar 4. 17 Hasil Perbandingan Daya Terima RF (GWINSTEK Spectrum Analyzer).62	62
Gambar 4. 18 Hasil Pengukuran Output Tegangan DC Rectenna tipe Pertama.....	63
Gambar 4. 19 Hasil Pengukuran Output Tegangan DC Rectenna tipe Kedua .....	63
Gambar 4. 20 Hasil Perbandingan Konversi Daya RF-to-DC (HackRF One Spectrum Analyzer).....	64
Gambar 4. 21 Hasil Perbandingan Konversi Daya RF-to-DC (GWINSTEK Spectrum Analyzer).....	64
Gambar 4. 22 Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna (HackRF One Spectrum Analyzer).....	65
Gambar 4. 23 Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna (GWINSTEK Spectrum Analyzer).....	65

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi SDR HackRF One .....	30
Tabel 3.2 Spesifikasi RF Amplifier .....	30
Tabel 3. 3 Spesifikasi Antena yang diinginkan .....	32
Tabel 3. 4 Komponen rangkaian penyearah rectenna .....	34
Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran <b><i>Pin RF</i></b> Teknik AM .....	51
Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran <b><i>Pin RF</i></b> Teknik FM .....	52
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran <b><i>Pin RF</i></b> Teknik 2-tone .....	52
Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran <b><i>Pin RF</i></b> Teknik 4-tone .....	52
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran <b><i>Pin RF</i></b> tanpa modulasi.....	52
Tabel 4. 6 Teknik AM.....	53
Tabel 4. 7 Teknik FM .....	53
Tabel 4. 8 Teknik 2-Tone.....	53
Tabel 4. 9 Teknik 4-Tone.....	53
Tabel 4. 10 Tanpa Modulasi .....	54
Tabel 4. 11 Teknik AM.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 12 Teknik FM .....	54
Tabel 4. 13 Teknik 2-tone .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 14 Teknik 4-tone .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 15 Tanpa Modulasi .....	55
Tabel 4. 16 Teknik AM.....	55
Tabel 4. 17 Teknik FM .....	55
Tabel 4. 18 Teknik 2-tone .....	56
Tabel 4. 19 Teknik 4-tone .....	56
Tabel 4. 20 Tanpa Modulasi .....	56
Tabel 4. 21 teknik AM .....	57
Tabel 4. 22 teknik FM.....	57
Tabel 4. 23 teknik 2-tone .....	57
Tabel 4. 24 teknik 4-tone .....	57
Tabel 4. 25 tanpa modulasi .....	58
Tabel 4. 26 Teknik AM.....	58
Tabel 4. 27 Teknik FM .....	58
Tabel 4. 28 Teknik 2-Tone.....	58
Tabel 4. 29 Teknik 4-Tone.....	59
Tabel 4. 30 Tanpa Modulasi .....	59
Tabel 4. 31 Teknik AM.....	59
Tabel 4. 32 Teknik FM .....	59
Tabel 4. 33 Teknik 2-Tone.....	60
Tabel 4. 34 Teknik 4-Tone.....	60
Tabel 4. 35 Tanpa Modulasi .....	60
Tabel 4. 36 Teknik AM.....	60
Tabel 4. 37 Teknik FM .....	61

Tabel 4. 38 Teknik 2-Tone.....	61
Tabel 4. 39 Teknik 4-Tone.....	61
Tabel 4. 40 Tanpa Modulasi .....	61

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Internet Seluler dan *Internet of Things (IoT)* adalah dua hal utama untuk sistem komunikasi seluler generasi kelima (5G) dan telah menarik minat penelitian di seluruh dunia. Sebagian besar perangkat komunikasi nirkabel di IoT didukung oleh baterai, perangkat ini selalu memiliki waktu pengoperasian yang terbatas. Untuk memperpanjang masa pakai IoT, cara yang umum adalah dengan mengganti atau mengisi ulang baterai, yang biasanya tidak nyaman, mahal, dan terkadang berbahaya (misalnya, di lingkungan beracun) atau bahkan tidak layak (misalnya, untuk perangkat medis implan). *Energy Harvesting (EH)* telah mendapat banyak perhatian. Namun, sistem komunikasi EH konvensional yang menggunakan energi terbarukan seperti energi matahari atau angin, mungkin tidak praktis dalam beberapa situasi karena sebagian besar sumber energi terbarukan bervariasi, tidak terkendali, dan tidak tersedia di dalam ruangan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, transfer daya nirkabel (WPT), yang dapat mengirimkan energi melalui media nirkabel telah dipertimbangkan sebagai solusi yang layak untuk memasok energi.

Seperti penelitian yang saat ini sedang berjalan pada Proyek Kolaborasi Pusat ITS berjudul “Wahana Nirawak: Aspek Keamanan Data, Pengisian Energi, dan Desain Antena 26 GHz”, pada salah satu proyeknya adalah pemanfaatan pesawat nirawak (*drone*) yang memancarkan gelombang RF untuk mengisi daya *node-node* pada jaringan sensor nirkabel. Permasalahan ini dapat diterapkan dengan *Radio Frequency Wireless Power Transfer (RF WPT)* yang mampu menambah lifetime dan performa dari sensor nirkabel (Tran & Kaddoum, 2018). Implementasi solusi ini memungkinkan untuk mengisi daya perangkat dari jarak jauh.

Pada penelitian Tugas Akhir ini akan diteliti tentang perancangan atau desain *Rectenna (rectifier antenna)*. *Rectenna* disini berfungsi untuk mendapatkan tegangan DC dari sebuah gelombang radio (AC). Perangkat *Rectenna* ini sangat diperlukan untuk memanen energi dari gelombang elektromagnetik (RF). Pada tugas akhir ini perlu diteliti bagaimana perancangan atau desain *rectenna* terhadap penerimaan daya pada *wireless power transfer*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana merancang atau desain *rectenna (rectifier antenna)* pada sistem penerima *wireless power transfer*.
2. Bagaimana pengaruh performansi *rectenna (rectifier antenna)* yang didesain terhadap performa penerimaan daya RF-to-DC pada sistem *RF wireless power transfer*.

## 1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang akan diperhatikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. SDR yang digunakan adalah HackRF One.
2. *Software* yang digunakan adalah GNU Radio, CST Studio Suite, Proteus 8.
4. Fabrikasi antena mikrostrip dan rangkaian *rectifier*.

5. Parameter yang akan di analisa adalah sebagai berikut: Daya Terima RF, Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC, dan Output Tegangan DC

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari pembahasan Tugas Akhir terkait penelitian pengaruh teknik modulasi yang digunakan pada sistem transfer daya nirkabel adalah:

1. Mendapatkan rancangan atau desain *rectenna (rectifier antenna)* pada sistem penerima *wireless power transfer*
2. Mengetahui pengaruh rancangan atau desain *rectenna (rectifier antenna)* terhadap performa penerimaan daya RF-to-DC pada sistem *RF wireless power transfer*

## 1.5 Metodologi

Dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, akan digunakan metodologi yang akan diuraikan seperti berikut:

### 1.5.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari beberapa buku, *paper*, dan jurnal baik skala nasional maupun internasional yang dapat menunjang tugas akhir ini. Pada tahap ini akan mempelajari beberapa materi utama yang terkait WPT, SDR (khususnya HackRF One), teknik modulasi pada komunikasi frekuensi radio, penggunaan GNU Radio untuk memprogram SDR yang ada, dan *rectenna (rectifier antenna)* sebagai sistem penerima. Dilakukan pula perbandingan beberapa teknik modulasi yang pernah diterapkan pada sistem transfer daya nirkabel, sehingga didapatkan keunggulan dan kekurangan yang dimiliki masing-masing teknik yang dipakai. Selain itu, juga bertujuan untuk memperoleh parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi performa dari transfer daya nirkabel.

### 1.5.2 Pemodelan Sistem RF WPT

Pemodelan sistem transfer daya nirkabel dilakukan pada tahap ini dan simulasi dilakukan dengan *software* GNU Radio. Sinyal akan dipancarkan oleh SDR yang sudah diprogram melalui *software* GNU Radio untuk memancarkan gelombang RF dengan teknik modulasi yang diinginkan. Penerima pada sistem WPT ini akan digunakan *rectenna* untuk menerima gelombang dengan frekuensi 2,45 GHz.

### 1.5.3 Perancangan Desain *Rectenna (Rectifier Antenna)*

Dikarenakan Tugas Akhir ini meneliti mengenai perancangan *rectenna* untuk sistem transfer daya nirkabel pada frekuensi 2.45 GHz berbasis *software-defined radio*, maka pada tahap ini akan merancang desain *rectenna* yang digunakan pada sistem penerima. Terlebih dahulu ditentukan standar parameter dari perancangan desain antena mikrostrip. Parameter yang ditentukan adalah diameter *ground*, *substrate*, *patch*, dan rangkaian *rectifier*. Perancangan desain antena menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 dan pemodelan rangkaian menggunakan *software* Proteus. *Rectenna* yang sudah jadi akan dilakukan fabrikasi untuk dilakukan pengukuran dan analisa data.



#### 1.5.4 Pengukuran dan Analisa

Langkah selanjutnya setelah memodelkan sistem WPT dan menggunakan *rectenna* yang sudah difabrikasi sebagai penerima pada sistem WPT, akan dilakukan pengukuran untuk mendapatkan data dari setiap jenis sinyal baik dengan modulasi maupun tanpa modulasi. Sebelum dilakukan pengukuran, dilakukan verifikasi terhadap bentuk sinyal yang diterima dengan cara meletakkan SDR HackRF One (selain yang digunakan sebagai pemancar) bersebalahan dengan *rectenna*, untuk memastikan sinyal yang diterima adalah sesuai. Parameter yang akan diukur adalah: Daya RF yang diterima; *Output* Tegangan DC; dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC. Dari hasil pengukuran, dilakukan analisa dari hasil data pengukuran sehingga didapatkan keluaran berupa rekomendasi desain *rectenna* pada sistem penerima untuk sistem transfer daya nirkabel.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- SDR HackRF One, digunakan sebagai pemancar dan *Spectrum Analyzer (SA)*
- *Rectenna*, digunakan sebagai penerima
- *Vector Network Analyzer (VNA)* Agilent Technologies N9923A, digunakan untuk mengukur antena yang digunakan
- Multimeter, digunakan untuk mengukur tegangan DC pada sisi penerima
- Laptop atau Komputer, digunakan untuk memprogram SDR melalui *software* GNU Radio dan *software* lain yang diperlukan.

#### 1.5.5 Penulisan Buku Laporan Tugas Akhir

Tahap akhir dari metodologi ini adalah penulisan laporan Tugas Akhir berdasarkan pengukuran, analisis dan kesimpulan yang diperoleh. Laporan Tugas Akhir kemudian akan disajikan dalam bentuk buku. Penulisan dimulai dari Bab 1 yaitu Bab yang berisi tentang Pendahuluan, dilanjutkan Bab 2 (Tinjauan Pustaka), Bab 3 (Metodologi), Bab 4 (Hasil dan Analisa), diakhiri dengan Bab 5 (Penutup berupa Kesimpulan dan Saran).

### 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini akan disusun dalam beberapa bab dengan perincian seperti berikut.

#### 1.6.1 BAB I Pendahuluan

Pada bagian pendahuluan akan dipaparkan mengenai latar belakang dari permasalahan yang diangkat, perumusan masalah, batasan, tujuan, dan manfaat dari penelitian ini yang berfokus mengenai desain *rectenna* yang digunakan sebagai penerima pada sistem RF WPT.

#### 1.6.2 BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini memaparkan tentang dasar-dasar dari teori-teori yang digunakan pada Tugas Akhir ini. Dasar teori mengutip dari referensi, baik berupa jurnal, buku, maupun publikasi lain, yang relevan dengan topik penelitian dan menunjang penyelesaian masalah yang dirumuskan pada bab sebelumnya.

### **1.6.3 BAB III Metodologi Penelitian**

Pada bagian metodologi menjelaskan mengenai detail dan langkah-langkah pengerjaan dalam melakukan penelitian, mulai dari studi literatur hingga penyusunan laporan buku. Proses pengerjaan divisualisasikan menjadi grafik berupa *fishbone* (memaparkan detail pekerjaan yang diperlukan) dan *flowchart* (memaparkan langkah pengerjaan yang dilakukan).

### **1.6.4 BAB IV Hasil Dan Analisa**

Pada bagian keempat laporan akan dijelaskan tentang data pengukuran yang diambil beserta hasil analisa. Pengukuran dilakukan untuk parameter berikut: Daya RF yang diterima; Output Tegangan DC; dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC. Sedangkan untuk analisa, data yang diperoleh akan dibandingkan antara teknik modulasi satu dan lainnya (termasuk sinyal tanpa modulasi) dan juga akan dianalisa

### **1.6.5 BAB V Kesimpulan Dan Saran**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

### **1.7 Manfaat**

Hasil dari tugas akhir ini dapat diterapkan dan dikontribusikan dalam penelitian yang sedang berjalan di ITS, yaitu mengenai sistem WPT yang diterapkan pada pesawat nirawak (*drone*) untuk mengisi daya dari *node-node* yang sulit dijangkau pada sebuah jaringan sensor nirkabel, sehingga dapat ditentukan metode transfer daya yang efektif dengan mengolah sinyal yang dipancarkan.

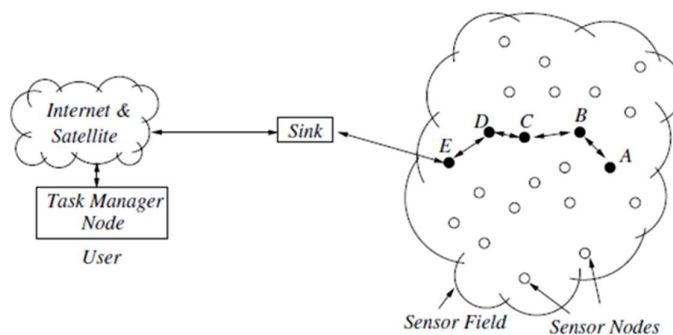
## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian sebelumnya meneliti mengenai pengaruh teknik modulasi yang digunakan terhadap kinerja penerimaan daya pada sistem WPT, dengan sinyal pemodulasi *tone* tunggal dan jamak. Dengan memodelkan pemancar menggunakan SDR HackRF One dan penerima menggunakan *rectenna*, teknik modulasi divariasikan melalui pemrograman pada *software* GNU Radio. Modulasi yang dikaji meliputi: AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi, dengan frekuensi pembawa 2.45 GHz. Metode penelitian adalah eksperimen, memisahkan pemancar dan penerima pada jarak tertentu dengan komunikasi *line-of-sight*, kemudian diambil data berupa Daya Terima RF, Output Tegangan DC, dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC. Apabila dievaluasi dari segi efisiensi konversi daya, teknik modulasi 4-tone merupakan yang paling efisien dengan  $\eta_{RF-DC}$  mencapai 80.34% pada jarak 40 cm. Pada 60 hingga 120 cm, nilai efisiensi dari kelima teknik modulasi mengalami penurunan yang signifikan menjadi 1~10%. Semakin tinggi PAPR maka efisiensi konversi juga naik, dengan membandingkan PAPR dari modulasi AM 1-tone, 2-tone, dan 4-tone. Sistem penerima pada penelitian sebelumnya menggunakan *rectenna* dengan antena dan rangkaian yang terpisah lalu dihubungkan dengan konektor SMA. Antena yang digunakan adalah antena ESP 8266 dan rangkaian *rectifier* dipasang di PCB Dot Matrix 3x7.

### 2.2 Wireless Sensor Network (WSN)

Seiring dengan berkembangnya teknologi *micro electro-mechanical systems* (MEMS), komunikasi nirkabel turut berkembang dengan hadirnya node sensor berukuran kecil yang mampu untuk keperluan sensing, pemrosesan data, dan komunikasi. Hal ini memungkinkan realisasi dari *Wireless Sensor Networks*, atau Jaringan Sensor Nirkabel (JSN) yang melibatkan node-node sensor dalam jumlah besar. Node sensor tunggal dalam JSN umumnya terdiri dari 3 komponen utama, bisa dalam bentuk board individu ataupun tertanam dalam satu sistem tunggal, yaitu: modul nirkabel, board sensor, dan board pemrograman. WSN terdiri dari sistem tertanam individu yang mampu berinteraksi dengan lingkungan melalui berbagai sensor, memproses informasi dan mengkomunikasikan informasi secara nirkabel. Node-node sensor ini akan tersebar pada sebuah sensor field seperti pada Gambar 2.1. Node sensor memiliki kemampuan untuk mengumpulkan data dan merutekan data kembali ke sink/gateway dan pengguna akhir (Fuat & Can, n.d., 2010).

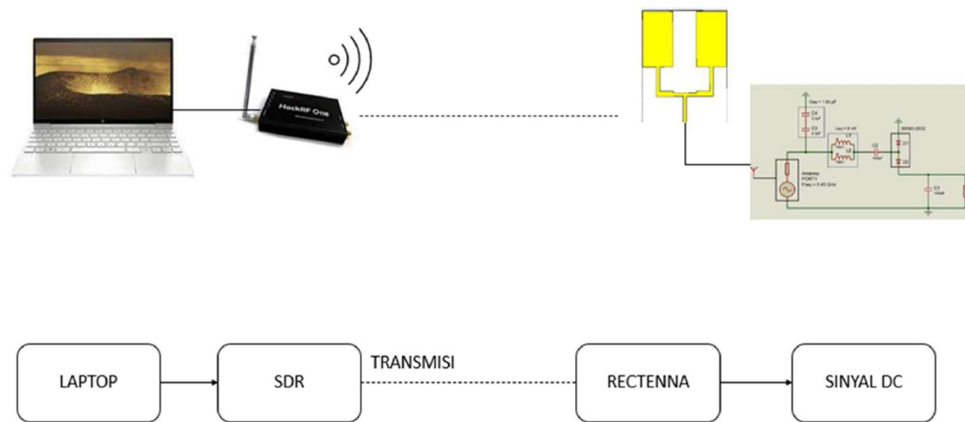


Gambar 2.1 Interaksi antar *node* pada WSN

### 2.3 Wireless Power Transfer (WPT)

Transfer Daya Nirkabel atau dalam *Wireless Power Transfer* adalah teknologi untuk mentransmisikan energi melalui medan elektromagnetik. Ketika energi listrik dari catu daya arus bolak-balik (AC) seperti catu daya komersial atau dari catu daya arus searah (DC) seperti solar sel diubah menjadi energi listrik frekuensi tinggi dengan menggunakan inverter frekuensi tinggi, perangkat *feeding* nirkabel (Tx.) melepaskan energi listrik melalui perangkat transmisi ke sebuah ruang. Kemudian, sistem penerima (Rx.) mengubah daya listrik menjadi DC di alat listrik penerima (Naoki Shinohara, 2018).

Sistem Transfer Daya Nirkabel yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Proyek Kolaborasi Pusat ITS “Wahana Nirawak: Aspek Keamanan Data, Pengisian Energi, dan Desain Antena 26 GHz” yang menggunakan konsep pemancar yang terhubung dengan sumber berupa antena yang dapat membangkitkan medan elektromagnetik yang bervariasi terhadap waktu dan dapat ditransmisikan melalui medium udara menuju *Wireless Sensor Network (WSN)* sebagai penerima. Teknik WPT dibagi menjadi 2 kategori utama, yaitu medan dekat (*near-field*) dan medan jauh (*far-field*). Pada teknik *far-field* (atau *radiative*), daya dipancarkan melalui beam dari radiasi elektromagnetik, seperti pada gelombang mikro dan RF (Poveda-Garcia et al., 2019). Teknik *far-field* digunakan pada WPT jenis ini dikarenakan teknik ini dapat transfer energi melalui sebuah pesawat nirawak (*drone*) pada pengisian *node-node* sensor yang sulit dijangkau. Pemancar (*drone*) memancarkan gelombang RF menuju penerima (*node WSN*). Pemancar pada Tugas Akhir ini disimulasikan menggunakan SDR dan penerima menggunakan *rectenna* (*Rectifier Antenna*).

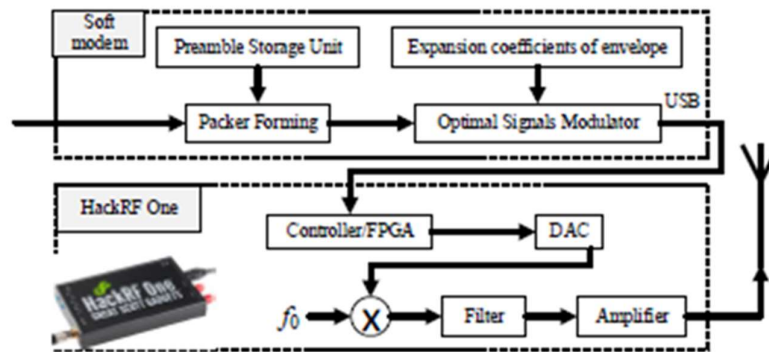


Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem WPT Penelitian

### 2.4 Software-Defined Radio (SDR)

Salah satu perkembangan dari teknologi komunikasi radio adalah *software-defined radio* (SDR). SDR telah mengubah sistem elektronik dari sejumlah aplikasi mencakup bidang komunikasi, pengolahan data, serta pemrosesan sinyal dengan memungkinkan sebuah perangkat radio untuk lebih fleksibel, baik dari sisi fungsi maupun konfigurasi karena berbasis perangkat lunak. SDR merupakan sistem komunikasi frekuensi radio dimana komponen yang sebelumnya diimplementasikan melalui *hardware* (*mixer, filter, amplifier, dll.*), menjadi diimplementasikan dengan *software* pada sebuah komputer. Tahap pemrosesan sinyal tidak lagi dilakukan oleh *hardware* dengan fungsi spesifik (rangkainan elektronika), melainkan

diserahkan kepada prosesor dengan tujuan umum. Dengan rancangan sedemikian rupa, sistem komunikasi radio dapat dilakukan dengan protokol radio yang berbeda-beda secara luas tergantung hanya kepada *software* yang digunakan. Tugas akhir ini menggunakan perangkat SDR dari HackRF One sebagai pemancar. Dengan menggunakan *software* GNU Radio, *signal processing* dilakukan pada komputer untuk mengubah parameter dari sinyal yang akan digunakan (Ilnur R. Ishkaev, 2018).

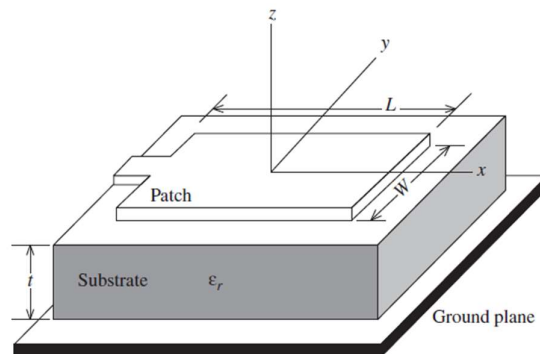


Gambar 2.3 Diagram Blok SDR HackRF One

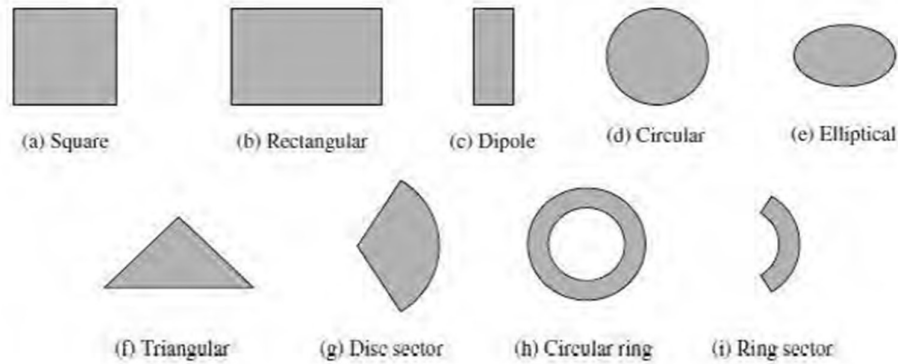
## 2.5 Antena Mikrostrip

Antena didefinisikan sebagai suatu peralatan yang bersifat konduktor (biasanya berbentuk balok dan kawat) untuk memancarkan atau mengirimkan gelombang, dengan kata lain antena merupakan struktur transisi antara ruang bebas dan perangkat pemandu (Constantine A Balanis, 2005). Perangkat itu bisa berupa saluran transmisi ataupun kabel koaksial, yang kemudian digunakan untuk membawa energi elektromagnetik dari pemancar ke antena penerima, atau dari antena pemancar ke penerima.

Antena mikrostrip adalah jenis antena cetak khusus, yang dibuat menggunakan metode yang mirip dengan yang digunakan untuk sirkuit tercetak. Antena mikrostrip terdiri dari tambalan logam (*patch*) dicetak di atas media tipis (*substrate*) dengan bidang dasar (*ground plane*) di bagian bawah media, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bagian Antena Mikrostrip



Gambar 2.5 Macam-macam bentuk patch pada antenna mikrostrip (Constantine A Balanis, 2005)

*Patch* merupakan lapisan paling atas dari substrat pada antenna mikrostrip. *Patch* biasanya terbuat dari konduktor, contohnya tembaga. *Patch* berfungsi untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara. Ada berbagai bentuk *patch* untuk mendapatkan suatu pola radiasi yang diinginkan. Selain persegi, bentuk lain yang digunakan bisa berupa lingkaran, segitiga, dan lain-lain. Berbagai bentuk *patch* dijelaskan pada Gambar 2.5. *Substrate* adalah elemen yang terletak di bagian tengah, diantara *patch* dan *groundplane*. *Substrate* berfungsi menyalurkan sinyal elektromagnetik dari satu daya. *Ground plane* pada antenna mikrostrip terbuat dari konduktor dan berfungsi untuk memantulkan sinyal yang tidak diinginkan atau untuk menghasilkan karakteristik tertentu pada antenna.

### 2.5.1 Pencatuan Antena

Pencatuan (*feeding*) adalah saluran yang digunakan untuk menyuplai satu daya dari sumber ke antenna. Ada beberapa metode atau jenis saluran yang bisa digunakan untuk pencatuan antenna mikrostrip antara lain pencatuan *electromagnetik coupled*, pencatuan *microstrip line*, dan pencatuan *coaxial probe*. Pada tugas akhir ini menggunakan pencatuan *microstrip line*, teknik ini menghubungkan *line* pencatuan dengan *patch* antenna. Teknik ini sangat mudah dalam proses fabrikasi karena *feedline* dan *patch* dicetak pada substrat yang sama.

### 2.5.2 Antena Array

Antena *array* adalah antenna yang terdiri dari sejumlah elemen *patch* peradiasi yang digabungkan (IEEE Antennas and Propagation Society, 2013). Perancangan antenna *array* digunakan untuk mendapatkan gain yang lebih tinggi dan pola radiasi yang lebih sempit. Ada beberapa susunan *array* antara lain *linear*, *planar*, dan *circular*. *Array linear* adalah antenna *array* yang tersusun pada satu garis lurus. *Array planar* adalah antenna yang tersusun membentuk segiempat. *Array circular* adalah antenna *array* yang tersusun membentuk lingkaran. Pada tugas akhir ini antenna menggunakan *array linear 2x1*.

### 2.5.3 Koefisien Refleksi

Nilai koefisien refleksi dapat diperoleh melalui pengukuran maupun perhitungan secara teoritis. Alat pengukuran (misal *Vector Network Analyzer* / VNA) biasanya menampilkan *return loss*, RL (atau parameter S11, yang menunjukkan seberapa banyak daya yang dipantulkan dari antena), sebagai cara untuk mengukur refleksi. RL memiliki satuan dB dan terkait dengan koefisien refleksi ( $\Gamma$ ) yang dinyatakan dalam rumus berikut (Warren L. Stutzman, 2012)

$$RL = 20 \log |\Gamma| \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

Magnitudo dari koefisien refleksi dapat juga ditentukan dari pengukuran VSWR.

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (2.2)$$

Untuk kondisi *matched* sempurna, nilai  $\Gamma = 0$  dan  $RL = -\infty$ , sehingga antena tidak memiliki *loss mismatch*.

### 2.5.4 Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

Parameter VSWR adalah sebuah ukuran secara angka untuk mendeskripsikan seberapa baik impedansi antena *match* dengan *transmission line*. VSWR merupakan fungsi dari koefisien refleksi, yang menyatakan daya dipantulkan dari antena. Apabila koefisien refleksi dilambangkan dengan  $\Gamma$ , maka VSWR dinyatakan dalam rumus berikut.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.3)$$

VSWR akan selalu bernilai *real* dan positif. Semakin kecil nilai VSWR, semakin *match* antena dengan *transmission line* dan daya yang dihantarkan pada antena semakin besar. Pada kondisi ideal (antena *matched*),  $VSWR = 1$  dan tidak ada daya yang dipantulkan antena.

Spesifikasi dari antena (khususnya frekuensi kerja) ditentukan dari *match* impedansi tipikal, yaitu apabila nilai  $VSWR \leq 2$ , bersesuaian dengan  $|\Gamma| \leq 0.333$  dan  $RL \leq -9.5 \text{ dB}$  (Warren L. Stutzman, 2012).

## 2.6 Teknik Modulasi

Transmisi daya pada sistem WPT menggunakan gelombang RF dapat dilakukan dengan menerapkan berbagai macam modulasi pada sinyal yang dipancarkan, untuk mengetahui pengaruh dari teknik modulasi yang digunakan terhadap daya terima dan efisiensi dari konversi energi pada sisi penerima WPT. Pada (Ayir et al., 2021) telah diteliti pengaruh dari beberapa teknik modulasi yang berbeda (*Multisine/Multi-tone*, M-QAM, M-PSK) pada end-to-end

efficiency dari sistem *SWIPT* (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) pada frekuensi 868 MHz.

Tugas Akhir ini menerapkan teknik modulasi berikut, untuk kemudian dianalisa pengaruhnya terhadap daya terima RF, output tegangan DC, dan efisiensi konversi daya dari RF ke DC.

### 2.6.1 Amplitude Modulation (AM)

Modulasi ini diartikan dengan modulasi yang memodifikasi amplitudo pada sinyal pembawa yang sesuai dengan amplitudo sinyal pemodulasi. Sinyal pemodulasi ini dapat berupa analog dan digital. Amplitude Modulation dinyatakan melalui persamaan berikut (Couch, 2013).

$$s(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(\omega_c t) \quad (2.4)$$

Dimana  $A_c$  merupakan amplitudo dari sinyal carrier,  $m(t)$  merupakan sinyal pemodulasi dan  $\omega_c = 2\pi f_c$  yang  $f_c$  merupakan frekuensi dari sinyal carrier.

### 2.6.2 Frequency Modulation (FM)

Modulasi frekuensi adalah modulasi yang memodifikasi frekuensi pada sinyal pembawa yang sesuai dengan amplitudo sinyal pemodulasi (digital atau analog). Persamaan modulasi frekuensi dinyatakan sebagai berikut (Couch, 2013).

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] \quad (2.5)$$

Dimana  $A_c$  merupakan amplitudo dari sinyal *carrier* dan  $\omega_c = 2\pi f_c$  yang  $f_c$  merupakan frekuensi dari sinyal *carrier*. Fase  $\theta(t)$  adalah fungsi linear dari sinyal pemodulasi  $m(t)$ . Untuk FM, fase proporsional dengan integral dari  $m(t)$ , sehingga

$$\theta(t) = D_f \int_{-\infty}^t m(t) dt \quad (2.6)$$

$D_f$  merupakan konstanta deviasi frekuensi dengan satuan *rad/Vs*.

### 2.6.3 Multisine/ Multitone Modulation

Multisine semakin penting di dunia instrumentasi dan pengukuran, karena dapat dibangkitkan dan direkam dengan sangat efisien untuk tindakan sistematis. Persamaan umumnya adalah

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (2.7)$$

Gelombang *multisine* merupakan jumlahan dari beberapa sinusoidal yang dibangkitkan bersama-sama. Dimana  $A_k$  adalah amplitudo,  $\theta_k$  adalah fase ke- $k$  dari sinusoidal,  $N$  merupakan jumlah (*tone*) dari sinusoidal, dan  $\omega_k = \omega_0 + (k - 1)\Delta\omega$ , dengan  $\omega_0$  merupakan



frekuensi dari *tone* pertama dan  $\Delta\omega$  separasi frekuensi diantaranya yang bernilai konstan(Carvalho et al., 2008).

## 2.7 Daya dari Sinyal

Dalam sistem komunikasi, apabila daya sinyal yang diterima (rata-rata) bernilai relatif cukup besar dibandingkan daya derau (rata-rata), informasi dapat diterima dengan baik. Sehingga, daya rata-rata (*average power*) merupakan konsep penting yang perlu dipahami. Perhitungan daya rata-rata dari sinyal  $s(t)$  secara teoritis dinyatakan dalam persamaan berikut(Couch, 2013).

$$P = \langle s^2(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s^2(t) dt \quad (2.8)$$

Apabila sinyal  $s(t)$  merupakan sinyal periodik dengan periode T, maka persamaan tersebut menjadi:

$$P = \langle s^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (2.9)$$

Apabila sinyal yang dihitung merupakan sinyal sinusoidal dengan amplitudo V, maka daya rata-rata sinyal dapat dihitung melalui nilai root-mean-square (RMS), dengan cara:

$$V_{rms} = \frac{V}{\sqrt{2}}, P = (V_{rms})^2 = \frac{V^2}{2} \quad (2.10)$$

## 2.8 Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

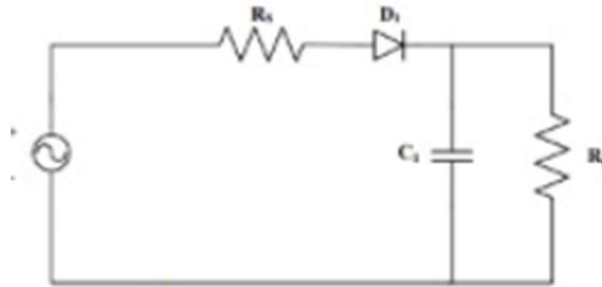
Pada penelitian ini akan dibandingkan 2 data yaitu daya RF diterima dan tegangan DC keluaran yang terukur, untuk kemudian dievaluasi efisiensi dari konversi daya yang dilakukan. Efisiensi konversi daya RF-to-DC ( $\eta_{RF-DC}$ ) dihitung melalui rumus berikut (Collado & Georgiadis, 2014).

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{out DC}}{P_{in RF}} = \frac{(V_{out DC})^2 / R_L}{P_{in RF}} \quad (2.11)$$

$P_{out DC}$  merupakan daya DC keluar pada *rectifier*, sedangkan  $P_{in RF}$  merupakan daya RF masuk pada penerima yang sudah diubah dari dBm menjadi miliWatt. Pengukuran *rectifier* menggunakan multimeter sehingga didapatkan tegangan keluaran DC ( $V_{out DC}$ ) dengan  $R_L$  merupakan hambatan ( $\Omega$ ) pada *rectifier*.

## 2.9 Teori Rectifier

Rangkaian penyearah adalah blok bangunan dasar dari sistem pemanenan energi nirkabel. Penyearah adalah perangkat yang mengubah energi sekitar yang ditangkap dari lingkungan menjadi daya DC. Model penyearah dasar ditunjukkan pada Gambar 2.7. Dalam model ini, satu dioda dihubungkan antara sumber dan beban untuk penyearah. Dioda yang dipilih harus menyediakan stabilitas tinggi dan *ripples* yang rendah (Binor Kumaj Kanaujia, 2021).



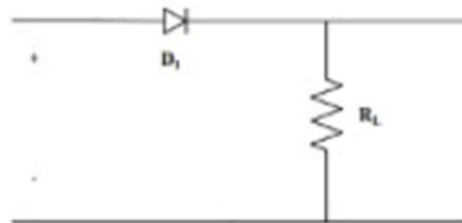
Gambar 2. 6 Rangkaian Dasar Penyearah

### 2.9.1 Half-Wave Rectifier

Rangkaian penyearah setengah gelombang hanya terdiri dari satu dioda dan hanya dapat menyearahkan setengah siklus positif. Oleh karena itu, disebut penyearah setengah gelombang pada penyearah satu arah. Sebuah siklus penuh selama periode  $T$  ditunjukkan pada Gambar 2.8. Untuk siklus  $0 - T/2$ , dioda menyala dan memberikan output yang sama dengan input. Dalam hal ini, dioda bertindak sebagai ekuivalen hubung singkat. Dioda dimatikan untuk  $T/2 - t$  setengah siklus berikutnya dan bertindak sebagai ekuivalen rangkaian terbuka. Sirkuit terbuka memberikan tegangan keluaran nol (Binor Kumaj Kanaujia, 2021).

Tegangan Output DC dapat dihitung sebagai berikut:

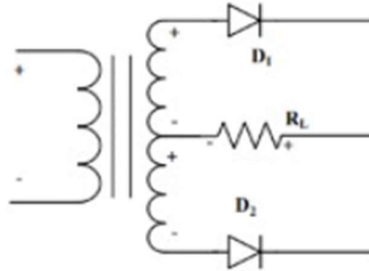
$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt \quad 2.12$$



Gambar 2. 7 Half-Wave Rectifier

### 2.9.2 Full-wave Rectifier

Konfigurasi ini terdiri dari dua dioda dengan tap di tengah. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa untuk setengah siklus positif  $0 - T/2$ . Diode  $D1$  menyala dan bertindak sebagai *short circuit*. Sedangkan  $D2$  mati dan bertindak sebagai *open circuit*. . Diode  $D2$  menyala dan bertindak sebagai *short circuit*. Sedangkan Diode  $D1$  mati dan bertindak sebagai *open circuit*(Binor Kumaj Kanaujia, 2021).



Gambar 2. 8 Full-wave Rectifier

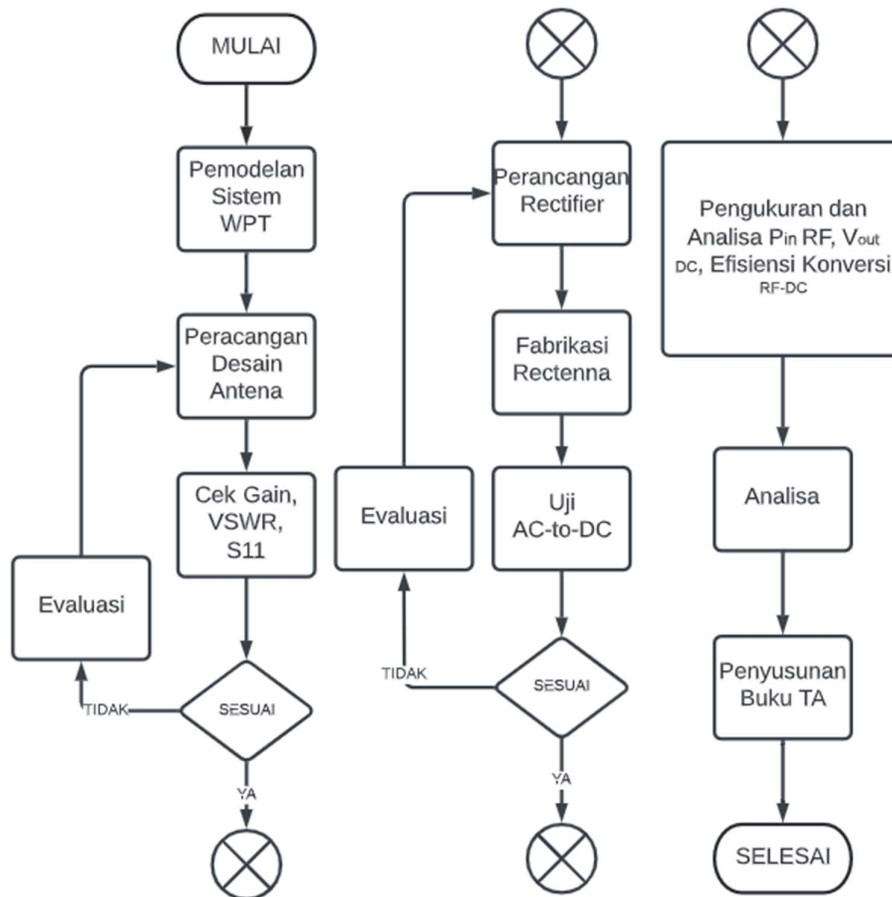
Persamaan tegangan *output DC* sebagai berikut:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt \quad 2.13$$

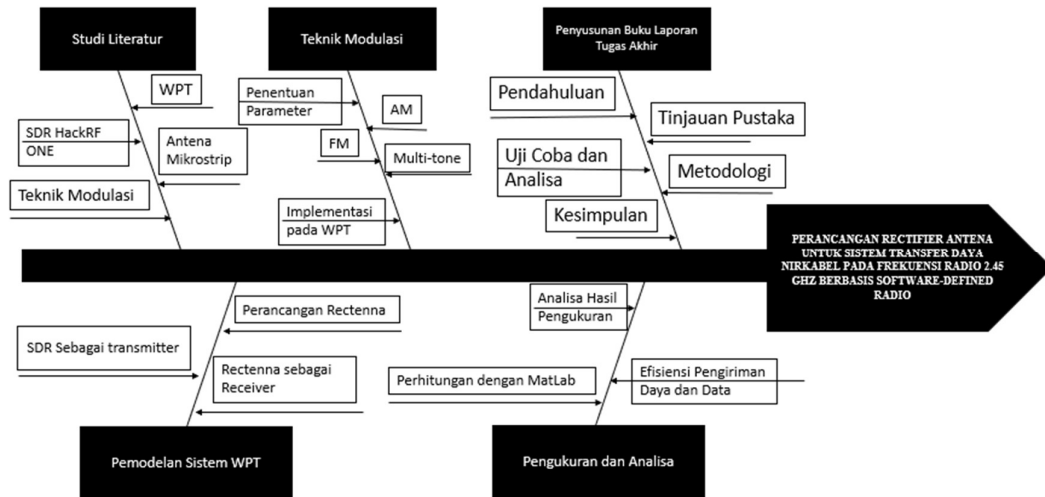
## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir dan Fishbone Penelitian

Penelitian dilakukan dengan 6 tahapan, yaitu: Studi Literatur, Pemodelan sistem WPT, Perancangan desain *rectenna*, variasi teknik modulasi, Pengukuran dan Analisa, serta Penyusunan Buku Laporan Tugas Akhir. Diagram *flowchart* dan *fishbone* di bawah menggambarkan penelitian tugas akhir ini.



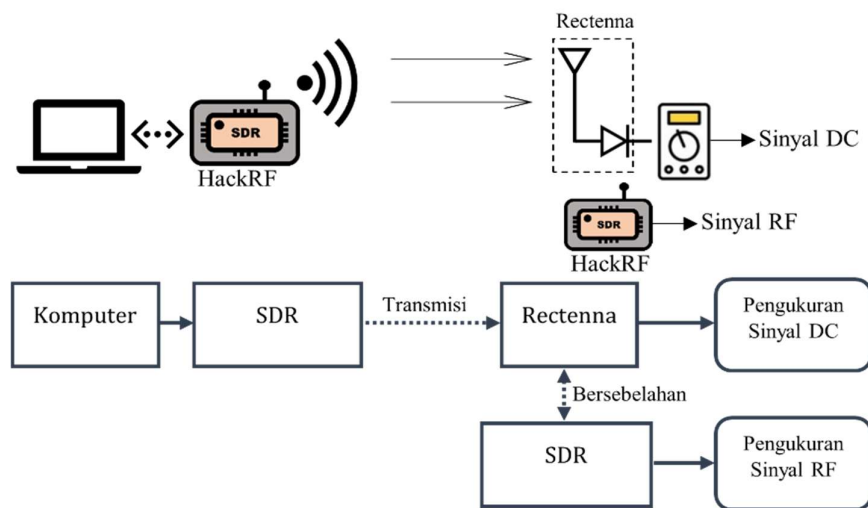
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Fishbone Penelitian

### 3.2 Pemodelan sistem RF WPT

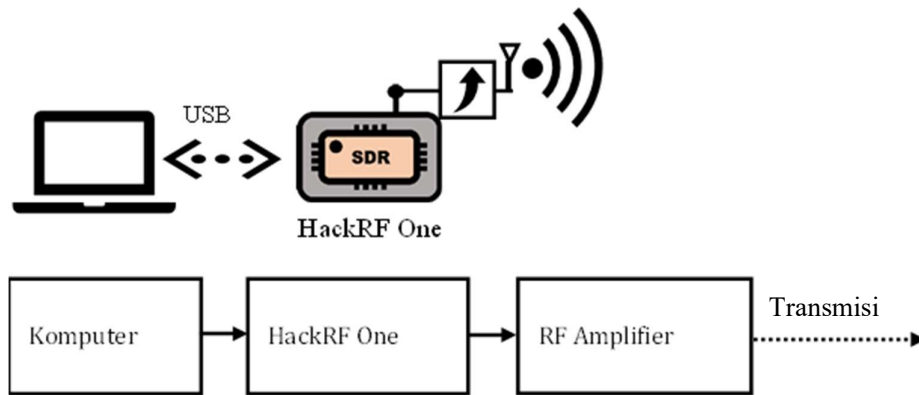
Pemodelan sistem WPT pada penelitian ini menggunakan jenis *far-field* dimana *drone* akan memancarkan gelombang berfrekuensi radio untuk mengisi daya node-node sensor nirkabel yang tersebar di lokasi yang sulit dijangkau. Pemodelan sistem WPT akan dimodelkan dengan SDR sebagai pemancar dan *rectenna* sebagai penerima. Menggunakan *software* GNU Radio akan mengubah sinyal yang dipancarkan oleh SDR dengan mempertimbangkan teknik modulasi yang diterapkan. Blok diagram pemancar akan dijelaskan pada gambar 3.1. Spesifikasi dari HackRF One dan RF Amplifier disajikan dalam Tabel 3.1 dan 3.2. SDR akan diprogram pada melalui *software* GNU Radio yang akan dijelaskan pada bagian 3.2.3 dan 3.3.



Gambar 3. 3 Model Sistem RF WPT

### 3.2.1 Pemodelan SDR sebagai Transmitter

Sistem WPT pada penelitian ini akan menggunakan SDR sebagai pemancar sinyal gelombang radio. HackRF one dipilih sebagai SDR yang digunakan pada penelitian ini. SDR HackRF One terhubung dengan laptop menggunakan kabel Micro USB. RF Amplifier disisipkan antara SDR dan antena pemancar. RF Amplifier disini berfungsi untuk menguatkan daya sinyal yang dipancarkan, sehingga dapat memancar lebih jauh hingga jarak maksimal penerima-pemancar (batas maksimal ditentukan apabila keluaran tegangan DC bernilai nol atau sangat kecil).



Gambar 3.4 Blok Diagram Penelitian

Tabel 3.1 Spesifikasi SDR HackRF One

No	Spesifikasi Teknis	
1	SDR	HackRF One oleh Great Scott Gadgets
2	Mode komunikasi	Transceiver Half-Duplex
3	Frekuensi kerja	1 MHz ~ 6 GHz
4	Laju sample yang didukung	2 Msps ~ 20 Msps (quadrature)
5	Resolusi	8 bits
6	Antarmuka	High Speed USB (dengan konektor USB Micro-B)
7	Catu daya	USB bus power
8	Daya port antena	Maks. 50 mA pada 3.3 V
9	Konektor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SMA female antenna connector (50 Ω)</li> <li>• SMA female clock input dan output untuk sinkronisasi</li> </ul>

Tabel 3.2 Spesifikasi RF Amplifier

Spesifikasi RF Amplifier	
Frekuensi kerja	5 ~ 6000 MHz
Gain	Maks. 20 dB
Catu daya	+5 V DC
Arus kerja	Maks. 85 mA
Konektor	2 SMA female (RF in dan RF out)

### 3.2.2 Pengukuran Frekuensi Kerja Antena yang Digunakan

Pengukuran parameter antena mikrostrip dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) Agilent Technologies: N9923A, untuk memastikan antena bisa beroperasi pada frekuensi 2.45 GHz. Parameter yang diukur adalah  $S_{11}$  (Return Loss) dan *VSWR*. Contoh hasil *capture* pengukuran dua parameter tersebut oleh VNA ditampilkan pada Gambar 3.4. Kemudian salinan file .csv yang diambil dari VNA digunakan untuk plot ulang hasil pengukuran melalui *software* MATLAB, hasil plot grafik dapat dilihat pada Bab IV: Hasil dan Analisa.



(a)



(b)

Gambar 3. 5 Hasil capture pengukuran (a) S11 dan (b) VSWR

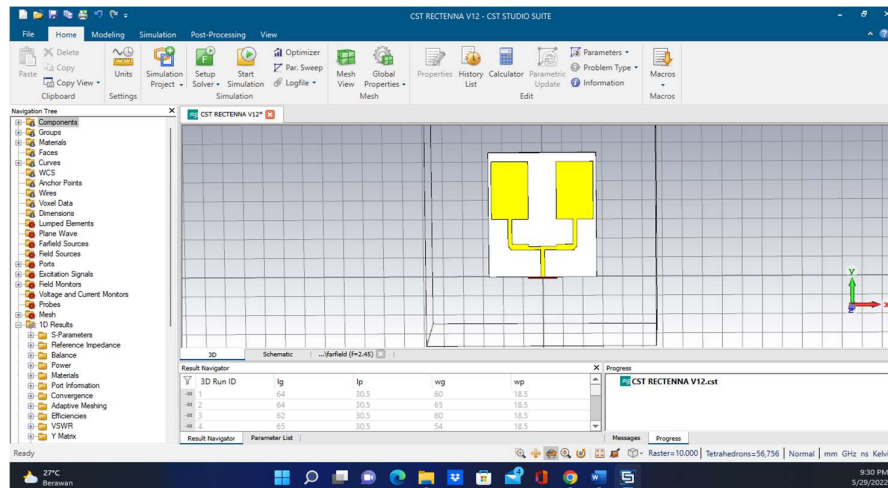
### 3.2.3 Pemodelan Rectenna sebagai Receiver

Pada sistem WPT pada penelitian ini untuk mendapatkan tegangan DC dari sebuah gelombang frekuensi radio (AC), diperlukan perangkat *rectenna* (*rectifier antenna*), untuk memanen energi dari gelombang elektromagnetik (RF) di sekitarnya. Proses memanen daya RF ini kemudian disebut dengan *RF Energy Harvesting*. Pada tahap ini akan membuat *rectenna* yang berfungsi sebagai penerima pada sistem WPT. Antena pada penelitian ini akan menggunakan antena mikrostrip yang di desain menggunakan *software* CST Studio Suite 2019 dan perancangan rangkaian *rectifier* akan menggunakan *software* Proteus 8. Pemodelan antena

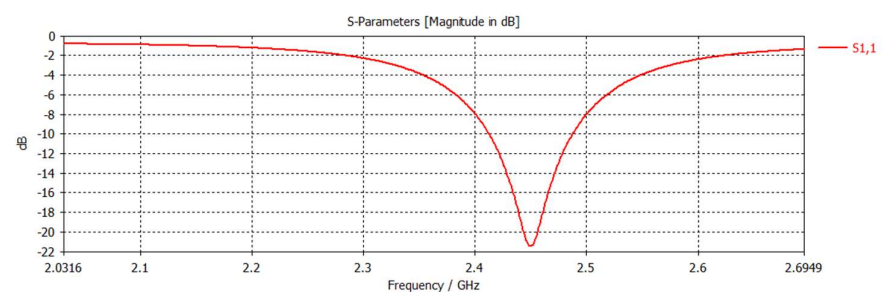
mikrostrip ini mengutip pada jurnal (Koohestani et al., 2020) dan dilakukan beberapa perubahan dari jurnal dikarenakan parameter seperti frekuensi kerja, VSWR, dan gain yang tidak sesuai. Hasil dari modifikasi antenna adalah menggunakan *array* 2x1 bekerja di frekuensi 2.45 GHz,  $VSWR \leq 2$  dB, dan memiliki *gain* 6.58 dBi.

Tabel 3. 3 Spesifikasi Antena yang diinginkan

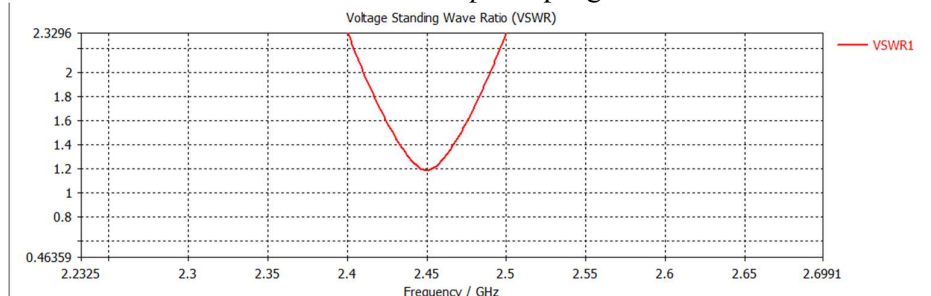
<i>Return Loss</i>	$\leq -9.5$ dB
<i>VSWR</i>	$\leq 2$
<i>Gain</i>	$\geq 3$ dBi



Gambar 3.6 Pemodelan Antenna Mikrostrip

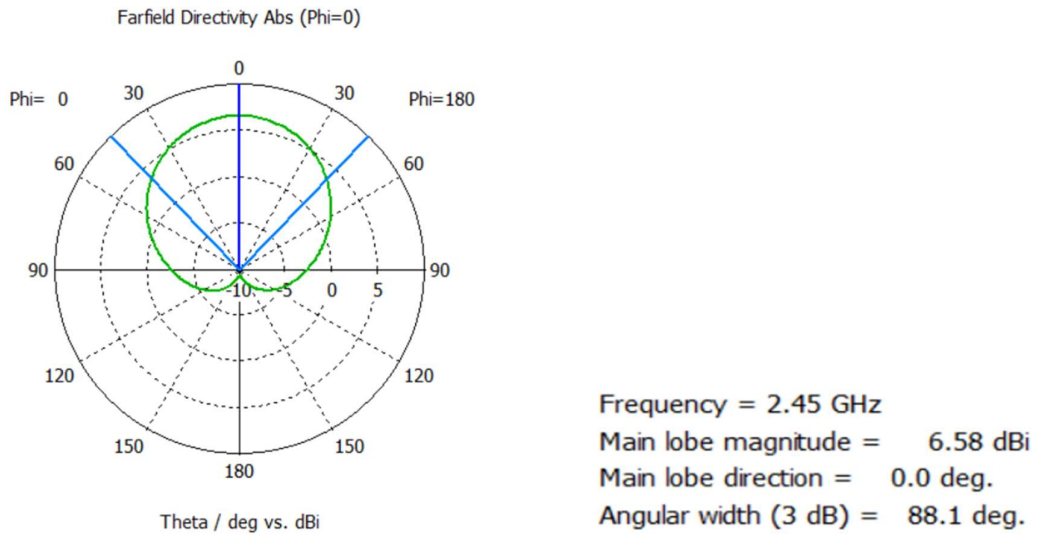


Gambar 3.7 Hasil *capture* pengukuran  $S_{11}$



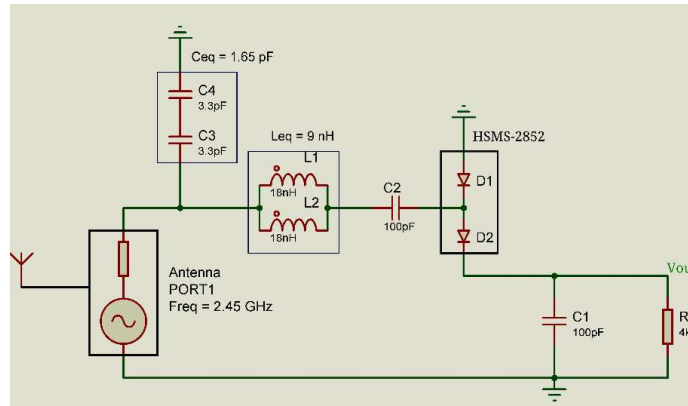
Gambar 3.8 Hasil *capture* pengukuran VSWR



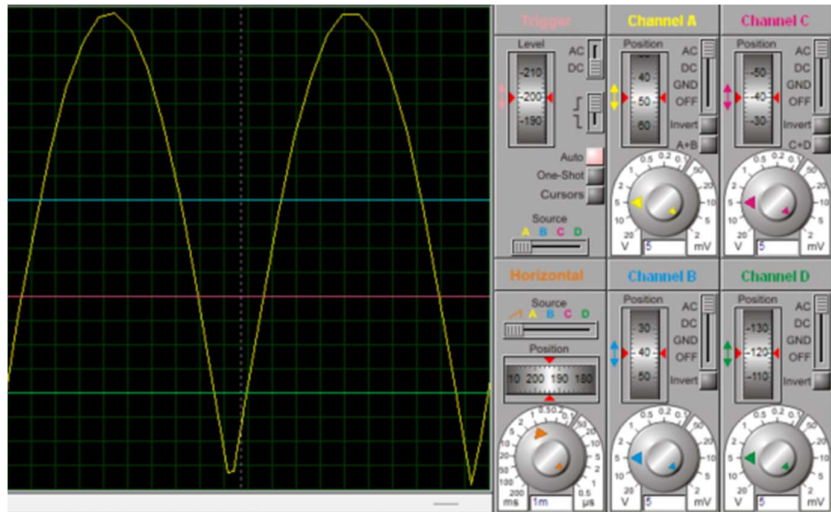


Gambar 3.9 Hasil *capture Farfield* dan *Gain*

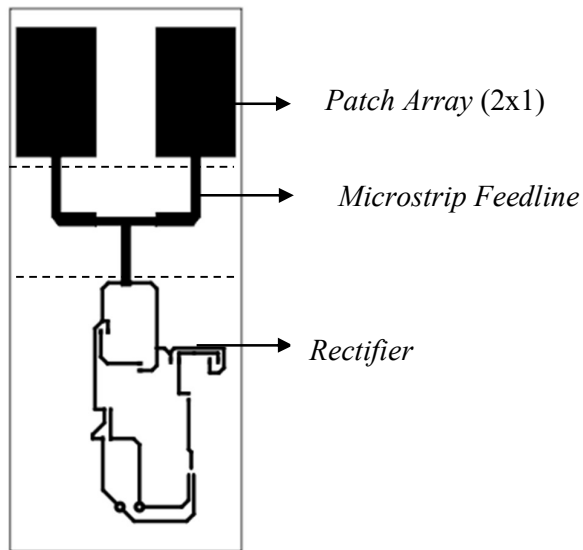
Pemodelan rangkaian *rectifier* mengutip pada jurnal (Koohestani et al., 2020) dan dilakukan modifikasi pada rangkaian tersebut dikarenakan terdapat beberapa komponen yang tidak dapat diperoleh (induktor 9 nH dan kapasitor 1.6 pF). Komponen yang digunakan pada *rectifier* ini dapat dilihat pada tabel 3.3. Skematik rangkaian yang sudah dimodifikasi dapat dilihat pada Gambar 3.8. Hasil jadi *rectenna* secara fisik dicantumkan pada Bab IV.



Gambar 3.10 Rangkaian penyearah *rectenna* penelitian



Gambar 3. 11 Rectifier tipe Full Wave



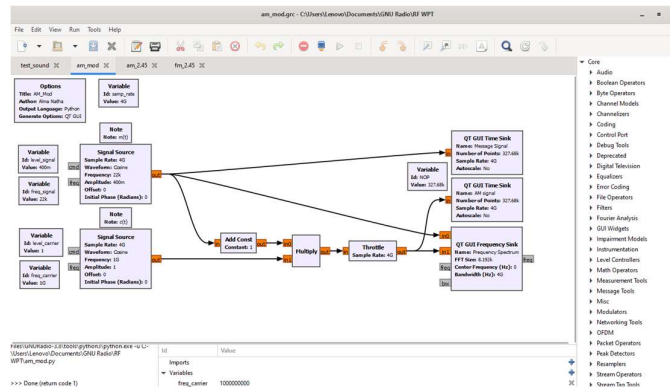
Gambar 3.12 Desain Antena yang terintegrasi dengan *rectifier*.

Tabel 3. 4 Komponen rangkaian penyearah *rectenna*

Nama Komponen	Jumlah	Simbol pada Skematik
Schottky Diode HSMS-2852	1	HSMS-2852
Resistor SMD 0805 4.7 $K\Omega$	1	RL
Induktor SMD 0805 18 $nH$	2	L1, L2
Kapasitor SMD 0603 100 $pF$	2	C1, C2
Kapasitor SMD 0805 3.3 $pF$	2	C3, C4

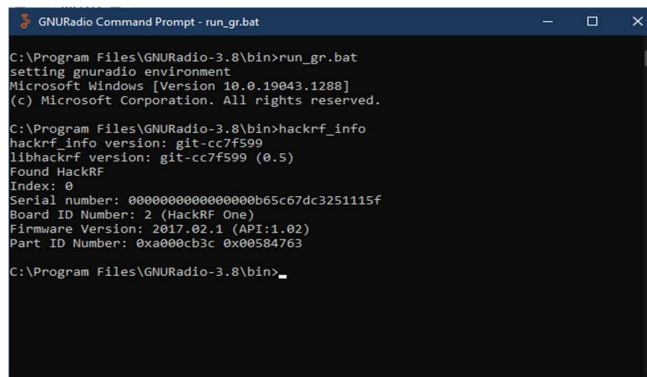
### 3.2.4 Signal Processing melalui GNU Radio

GNU Radio merupakan toolkit pengembangan berupa *software* gratis yang menyediakan blok-blok pemrosesan sinyal untuk mengimplementasikan *software-defined radio* dan sistem *signal-processing*. *Software* ini dapat digunakan dengan *hardware* RF eksternal untuk mengaplikasikan SDR, atau tanpa *hardware* untuk sekedar membuat simulasi. GNU Radio menyediakan *framework* dan *tools* untuk membangun dan menjalankan *software* radio yang disebut dengan *flowgraphs*. *Flowgraphs* merupakan serangkaian blok *signal processing* yang terhubung bersama-sama sehingga membentuk data flow. *Flowgraphs* ini dapat ditulis dengan bahasa pemrograman C++ atau Python.



Gambar 3.13 Tampilan GNU Radio Companion (GRC)

GNU Radio Companion (GRC) adalah antarmuka secara grafis yang dipakai untuk mengembangkan aplikasi GNU Radio. Versi GNU Radio yang digunakan untuk penelitian ini adalah versi 3.8 untuk *Microsoft Windows*. Tampilan awal dari GNU Radio Companion dan GNU Radio Command Prompt ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.14 Tampilan GNU Command Prompt

### 3.3 Variasi Teknik Modulasi

Pada tahap ini akan melakukan pemrosesan sinyal menggunakan *software* GNU Radio. pemrosesan sinyal yang dilakukan meliputi: pembangkitan sinyal pemodulasi; modulasi sinyal; dan terakhir mengirimkan sinyal pada SDR. Pemrograman ini dilakukan dengan menghubungkan dan mengatur blok diagram yang diperlukan pada GNU Radio Companion.

Pembangkitan sinyal pemodulasi terdapat pada blok “*signal source*”. Pada blok ini didefinisikan bentuk gelombang (sinusoidal, segitiga, gigi gergaji, dll.), amplitudo, frekuensi, fasa, dan laju sample. Untuk keperluan simulasi dan pengecekan sinyal, blok “QT GUI Time

Sink” dan “QT GUI Frequency Sink” digunakan untuk plot grafik sinyal pada domain waktu dan domain frekuensi. Modulasi pada GNU Radio dilakukan dengan menambahkan blok-blok yang bersesuaian, seperti: “Add Const” (AM), “FM Preemphasis”, Frequency Mod” (FM). Terakhir, semua blok diagram akan terhubung dengan “osmocom sink”, yaitu blok untuk berkomunikasi dengan SDR (HackRF One) yang akan memancarkan sinyal pada frekuensi radio. sebelum menuju osmocom, sinyal yang diproses akan di up-sample dengan blok “Rational Resampler” untuk memenuhi spesifikasi laju sample dari *hardware* SDR yang digunakan.

### 3.3.1 Modulasi Amplitudo (AM)

*Flowchart* untuk Teknik Modulasi AM mengikuti persamaan modulasi amplitudo, yaitu  $s(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(\omega_c t)$ . Sebelum dikalikan dengan sinyal carrier, sinyal pemodulasi ditambah dengan konstanta 1, sehingga dari blok Signal Source dihubungkan dengan blok Add Const dengan nilai 1.

- Sinyal pemodulasi didefinisikan melalui blok signal source, dengan parameter sebagai berikut:

Persamaan :  $m(t) = 0.5 \cos(2\pi 10 \cdot 10^3 t)$

Nama blok : Signal Source

Waveform : Cosine (Sinusoidal)

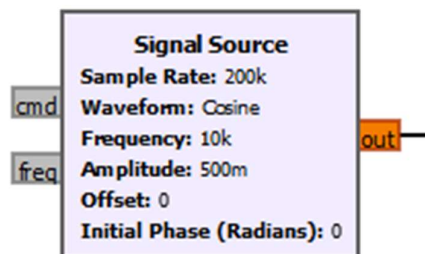
Amplitude : 500 mV

Frequency : 10 kHz

Phase (rad) : 0

Sample rate : 200 kHz

Output type : float



Gambar 3.15 Pengaturan blok Signal Source AM

- Untuk melakukan proses modulasi (mengalikan dengan sinyal carrier), serangkaian blok dihubungkan dengan blok osmocom sink yang berkomunikasi dengan SDR, dengan parameter sebagai berikut:

Nama blok : osmocom Sink

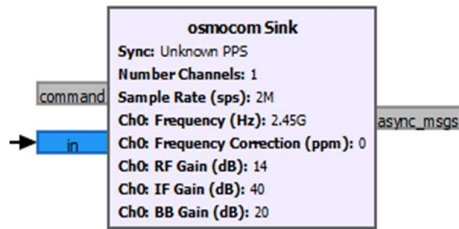
Sample rate : 2 Msps

Frequency : 2.45 GHz

RF Gain : 14 dB

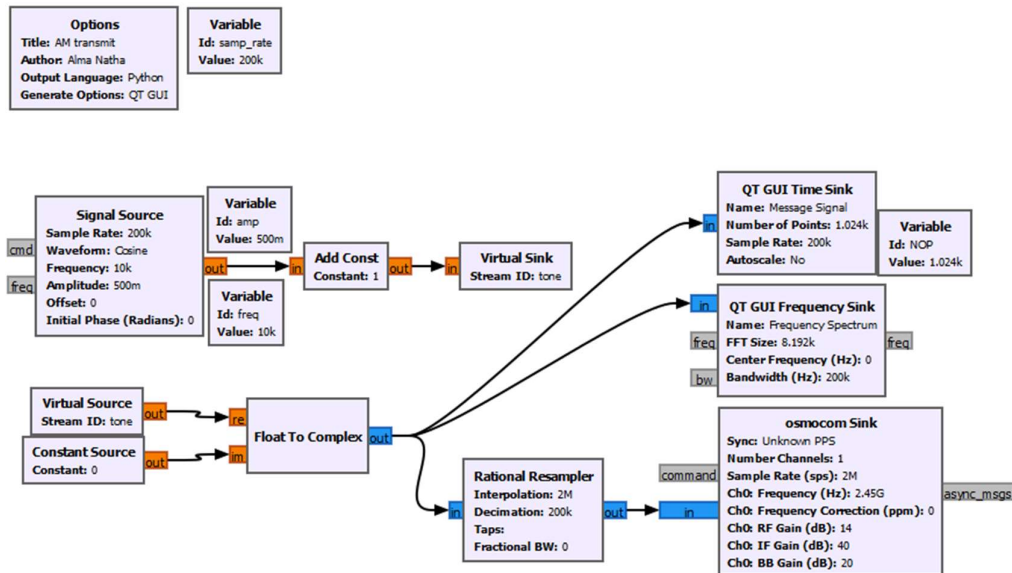
IF Gain : 40 dB

BB Gain : 20 dB



Gambar 3.16 Pengaturan blok Osmocom Sink

Flowchart keseluruhan teknik AM dapat dilihat pada Gambar 3.14 Sebelum menuju blok osmocomblock Sink, sinyal di up-sample terlebih dahulu menggunakan blok Rational Resampler (200k → 2M), menyesuaikan sample rate minimal dari HackRF (20 Msp/s). Blok Time Sink dan Frequency Sink digunakan untuk simulasi sinyal pada domain waktu dan frekuensi sebelum proses modulasi.

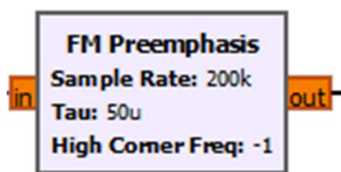


Gambar 3.17 flowchart GRC teknik AM

### 3.3.2 Modulasi Frekuensi (FM)

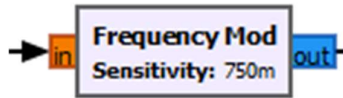
Flowchart GNU Radio untuk teknik modulasi frekuensi menggunakan blok diagram khusus yang disediakan, yaitu FM Preemphasis dan Frequency Mod.

- Parameter blok *signal source* dan osmocomblock Sink sama dengan teknik AM, dapat dilihat pada gambar 3.15 dan 3.16.
- Blok FM preemphasis memiliki parameter “tau” (time constant), dimana  $\tau = 50 \mu s$  (EUR) atau  $\tau = 75 \mu s$  (US). Broadcast FM di Indonesia mengikuti standar eropa (EUR).



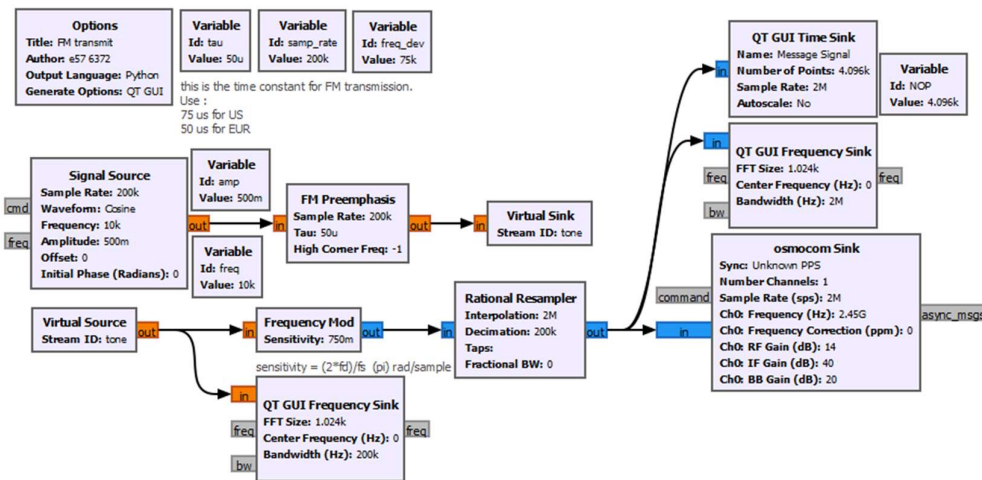
Gambar 3.18 Pengaturan blok FM Preemphasis

- Blok FM memiliki parameter “sensitivity”, dihitung melalui  $sensitivity = 2\pi \frac{f\Delta}{f_s}$  rad/sample. Deviasi frekuensi bernilai 74 kHz, sedangkan frekuensi sampling diambil dari signal source bernilai 200 kHz. Sehingga  $sensitivity = 2\pi \left(\frac{75k}{200k}\right) = 0.75 \pi$  rad/sample.



Gambar 3.19 Pengaturan blok Frequency Mod

Flowchart keseluruhan teknik modulasi FM dapat dilihat pada Gambar 3.17 Sebelum menuju blok osmocom Sink, sinyal di up-sample terlebih dahulu menggunakan blok Rational Resampler (200k → 2M), menyesuaikan sample rate minimal dari HackRF (20MSPS). Blok Time Sink dan Frequency Sink digunakan untuk simulasi sinyal pada domain waktu dan frekuensi sebelum dan sesudah proses modulasi.



Gambar 3.20 Flowchart GRC Teknik FM

### 3.3.3 Modulasi Multitone

Flowschart GNU Radio untuk teknik multitone mengikuti tinjauan pustaka, dimana sinyal pemodulasi merupakan jumlahan dari beberapa sinyal sinusoidal. Blok Signal Source sejumlah N (banyaknya tone) akan dijumlahkan melalui blok Add, kemudian jumlahan sinyal akan dihubungkan dengan blok Add Const (Modulasi AM). Modulasi multitone yang diteliti meliputi 2-tone dan 4-tone.

- Modulasi 2-tone menggunakan 2 Signal Source dengan parameter sebagai berikut:

Jumlah tone : 2

Sinyal ke-1 :  $m_1(t) = 0.25 \cos(2\pi 9.10^3 t)$

Sinyal ke-2 :  $m_2(t) = 0.25 \cos(2\pi 10.10^3 t)$

Nama blok : Signal Source

Waveform : Cosine (Sinusoidal)

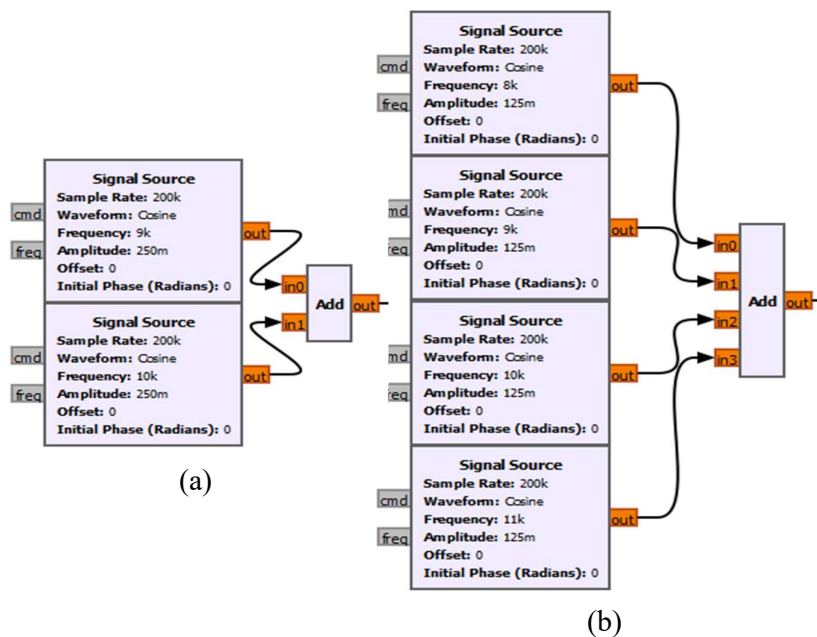
Amplitude : 250 mV setiap tone

Frequency : 9 kHz dan 10 kHz

Phase (rad) : 0 setiap tone

Sample rate : 200 kHz

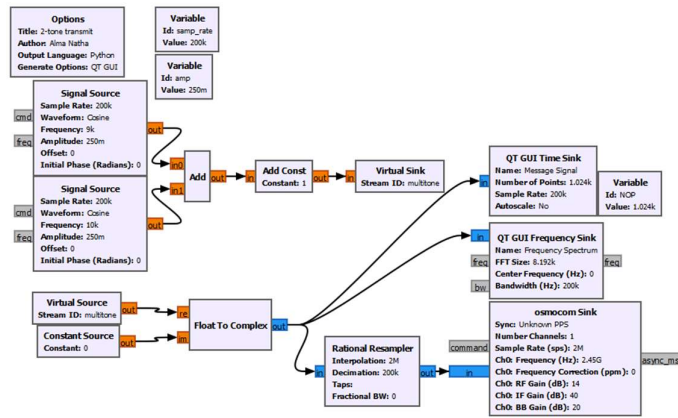
- Modulasi 4-tone menggunakan 4 signal source dengan parameter sebagai berikut:  
 Sinyal ke-1 :  $m_1(t) = 0.125 \cos(2\pi 8.10^3 t)$   
 Sinyal ke-2 :  $m_2(t) = 0.125 \cos(2\pi 9.10^3 t)$   
 Sinyal ke-3 :  $m_3(t) = 0.125 \cos(2\pi 10.10^3 t)$   
 Sinyal ke-4 :  $m_4(t) = 0.125 \cos(2\pi 11.10^3 t)$   
 Nama blok : Signal Source  
 Waveform : Cosine (Sinusoidal)  
 Amplitude : 125 mV setiap tone  
 Frequency : 8 kHz, 9 kHz, 10 kHz, dan 11 kHz  
 Phase (rad) : 0 setiap tone  
 Sample rate : 200 kHz
- Parameter blok osmoccom Sink sama dengan teknik AM, dapat dilihat pada Gambar 3.13.



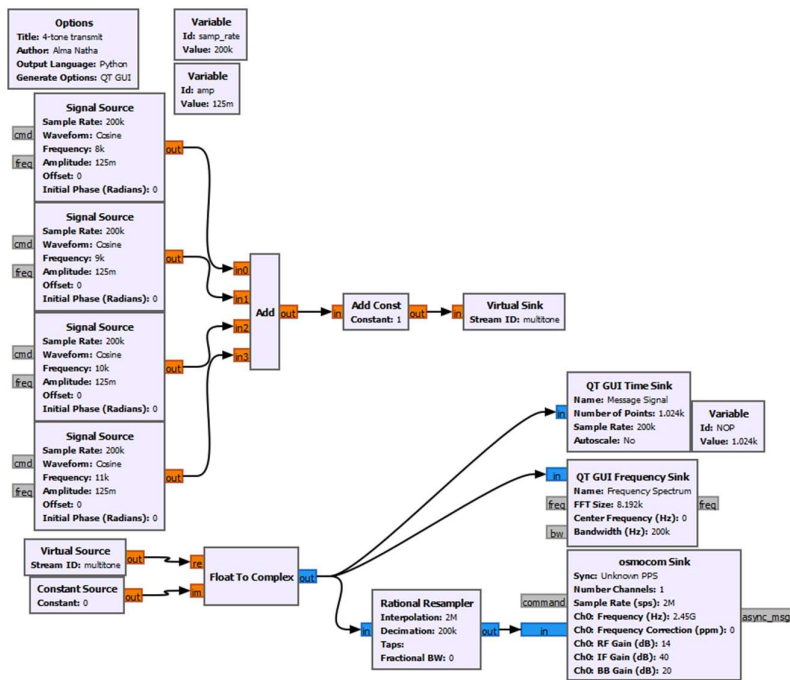
Gambar 3.21 Pengaturan blok Signal Source (a) 2-tone dan (b) 4-tone

*Flowchart* keseluruhan teknik multitone dapat dilihat pada Gambar 3.19. sebelum menuju blok osmoccom sink, sinyal di up-sample terlebih dahulu menggunakan blok Rational Resampler (200k  $\rightarrow$  2M), menyesuaikan sample rate minimal dari HackRF (20 Msps). Blok Time Sink dan Frequency Sink digunakan untuk simulasi sinyal pada domain waktu dan frekuensi sebelum proses modulasi.





(a)



(b)

Gambar 3. 22 Flowchart GRC Teknik (a) 2-tone dan (b) 4-tone

### 3.3.4 Tanpa Modulasi

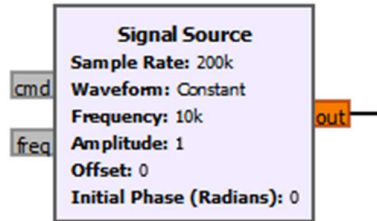
Flowchart GNU Radio untuk mengirimkan sinyal carrier saja (tanpa modulasi), dilakukan dengan cara mengalikan sinyal carrier dengan sinyal konstan (DC) dengan amplitudo 1,  $m(t) = 1$ . Sehingga apabila dinyatakan dalam persamaan  $s(t) = m(t) \cdot c(t) = 1 \cdot A_c \cdot \cos(\omega_c t) = c(t)$ . Membangkitkan sinyal konstan dapat dilakukan dengan mengatur parameter 'waveform' dari blok signal source.

- Sinyal pemodulasi berupa sinyal konstan DC didefinisikan melalui blok signal source, dengan parameter sebagai berikut:

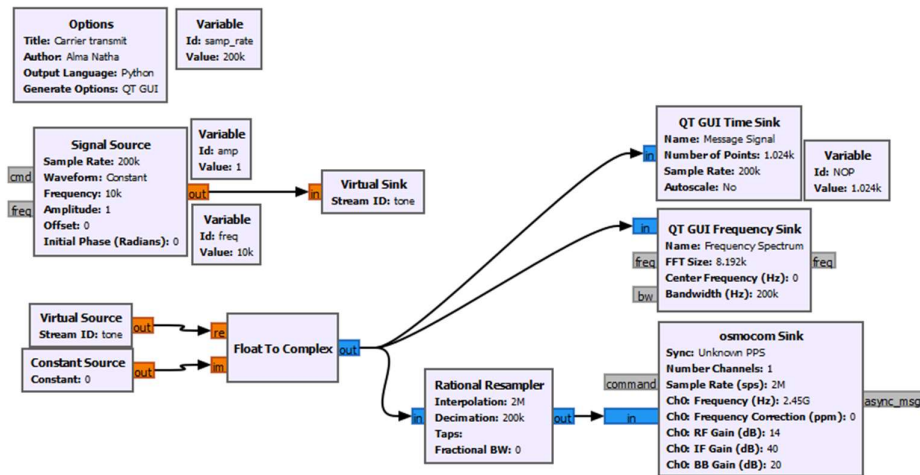
Persamaan :  $m(t)=1$   
 Nama blok : Signal Source  
 Waveform : Constant



Amplitude : 1 V  
 Frequency : 10 kHz  
 Phase (rad) : 0  
 Sample rate : 200 kHz  
 Output type : float



Gambar 3. 23 Pengaturan blok Signal Source tanpa modulasi



Gambar 3. 24 Flowchart GRC Teknik Tanpa Modulasi

- Parameter blok osmoccom sink sama dengan teknik AM, dapat dilihat pada Gambar 3.13  
 Flowchart keseluruhan teknik tanpa modulasi dapat dilihat pada Gambar 3.21 Sebelum menuju blok Rational Resampler (200k → 2M). Menyesuaikan sample rate minimal HackRF (20Msps). Blok Time Sink dan Frequency Sink digunakan untuk simulasi sinyal pada domain waktu dan frekuensi sebelum proses modulasi.

### 3.4 Metode Pengukuran dan Analisa

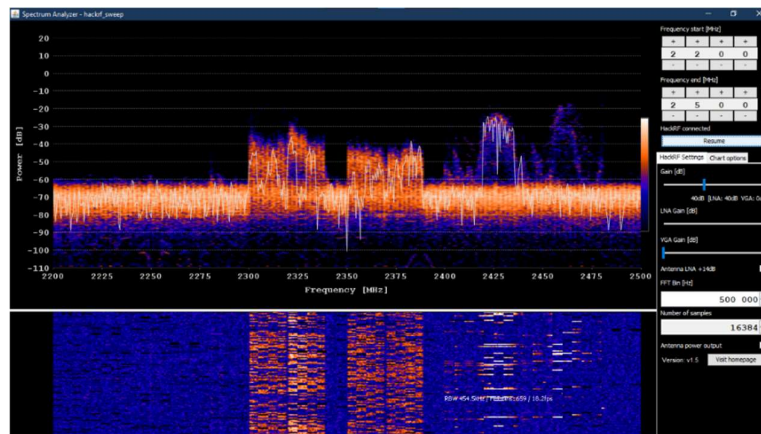
Pada langkah ini dilakukan terhadap parameter Daya Terima RF, Output Tegangan, dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC, untuk setiap teknik modulasi yang dilakukan. Kemudian setelah didapatkan data akan dilakukan analisa dan melakukan perbandingan antara *rectenna* dengan rangkaian *rectifier* terpisah dengan *rectenna* yang terintegrasi langsung dengan rangkaian *rectifier*.

#### 3.4.1 Verifikasi Sinyal yang Diterima

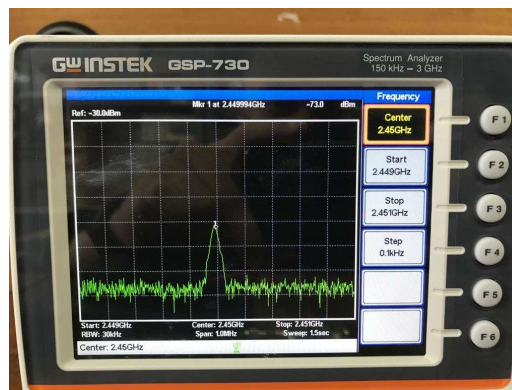
Pada tahap ini dilakukan verifikasi sinyal yang diterima untuk memastikan sinyal tersebut adalah sinyal yang ditransmisikan (sinyal dengan modulasi AM, FM, atau *Multitone* dan tanpa modulasi). Metode verifikasi yang digunakan adalah memanfaatkan SDR kedua dengan

menggunakan antena mikrostrip yang telah didesain pada sisi penerima, yang difungsikan sebagai *Spectrum Analyzer (SA)*. SDR dapat difungsikan sebagai SA dengan *software HackRF Sweep Spectrum Analyzer for Windows*, dengan tampilan seperti Gambar 3.22. Diamati spektrum frekuensi dari sinyal yang diterima.

Dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan ukur dari SDR HackRF One dan *software Spectrum Analyzer*, metode verifikasi sinyal yang diterima disederhanakan. Sebelum SDR pemancar dinyalakan, tampilan layar *software SA* bernilai datar ( $\sim 90$  dBm sepanjang *frequency span* yang diatur). Sinyal terima diverifikasi benar apabila saat SDR pemancar dinyalakan, tampilan SA mendeteksi sinyal pada spektrum frekuensi yang ditampilkan dan terdapat puncak magnitudo pada frekuensi 2.45 GHz.



Gambar 3. 25 Tampilan awal *HackRF Sweep Spectrum Analyzer*



Tampilan awal *GWINSTEK Sweep Spectrum Analyzer*

- Parameter *frequency span* pada *software Spectrum Analyzer* diatur sebagai berikut.  
Frequency start : 2400 MHz  
Frequency end : 2500 MHz
- Bagian 'HackRF Settings' pada *software Spectrum Analyzer* diatur sebagai berikut.  
Gain : 0 dB  
LNA Gain : 0 dB  
FFT bin : 100000 Hz  
Number of samples : 8192

- Bagian ‘Chart Options’ pada *software* Spectrum Analyzer diatur sebagai berikut.  
Waterfall enabled : yes  
Persistent Display : yes  
Persistence time: 10 sec.

### 3.4.2 Pengukuran Praktis

Pengukuran secara praktis dimaksudkan dengan mengukur langsung di lapangan Skenario pengukuran sesuai gambar, sedangkan dokumentasi pengukuran langsung terlampir pada akhir buku. Pemancar dan penerima dipisahkan oleh jarak pengukuran sebesar 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, dan 50 cm. Pemancar terdiri dari seperangkat alat seperti: laptop; SDR HackRF One; RF Amplifier, dan Antena mikrostrip. Penerima merupakan *rectenna* yang bersebelahan dengan SDR lain yang difungsikan sebagai *spectrum analyzer (SA)*, digunakan untuk mengukur *Output* Tegangan DC dan Daya terima RF secara berurutan.

#### 3.4.2.1 Pengukuran Daya Terima RF

Langkah ini meletakkan SDR lain sebagai SA sesuai jarak pengukuran yang ditentukan. Data pengukuran (Daya Terima RF/  $P_{in\ RF}$ ) didapatkan dengan mengamati tampilan dari software HackRF Sweep Spectrum Analyzer. Nilai yang diambil adalah magnitudo puncak pada frekuensi yang telah ditetapkan yaitu 2.45 GHz.

#### 3.4.2.2 Pengukuran Output Tegangan DC

Pada langkah ini yaitu meletakkan *rectenna* sesuai jarak pengukuran yang ditentukan. Data pengukuran (Output Tegangan DC /  $V_{out\ DC}$ ) didapatkan dengan menggunakan multimeter untuk mengukur tegangan pada ujung-ujung resistor 4.7 K $\Omega$  (RL). Nilai diambil ketika tegangan mencapai keadaan cukup stabil.

#### 3.4.2.3 Perhitungan Efisiensi Konversi Daya

Langkah ini menghitung efisiensi konversi dari daya RF menuju daya DC, dengan membandingkan kedua data yang didapatkan pada langkah sebelumnya. Rumus efisiensi konversi daya RF-to-DC ( $\eta_{RF-DC}$ ) dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta_{RF-DC} = \frac{(V_{out\ DC})^2 / R_L}{P_{in\ RF}} = \frac{(V_{out\ DC})^2}{4700(P_{in\ RF})} \times 100\% \quad 3.1$$

Perlu diperhatikan bahwa  $V_{out\ DC}$  untuk satuan Volt dan  $P_{in\ RF}$  untuk satuan Watt, sehingga diperlukan konversi satuan yang sesuai dengan data hasil pengukuran (satuan mV dan dBm).

### 3.4.3 Analisa Hasil Pengukuran

Langkah ini merupakan penutup dari serangkaian metodologi, yaitu membandingkan keseluruhan data pengukuran dari setiap teknik modulasi yang dilakukan. Hasil perbandingan data digunakan untuk Hasil perbandingan data digunakan untuk menarik kesimpulan teknik modulasi mana yang memiliki performa terbaik untuk sistem transfer daya nirkabel membandingkan dua *rectenna* (*rectenna* dengan antena terpisah dan *rectenna* tidak terpisah).

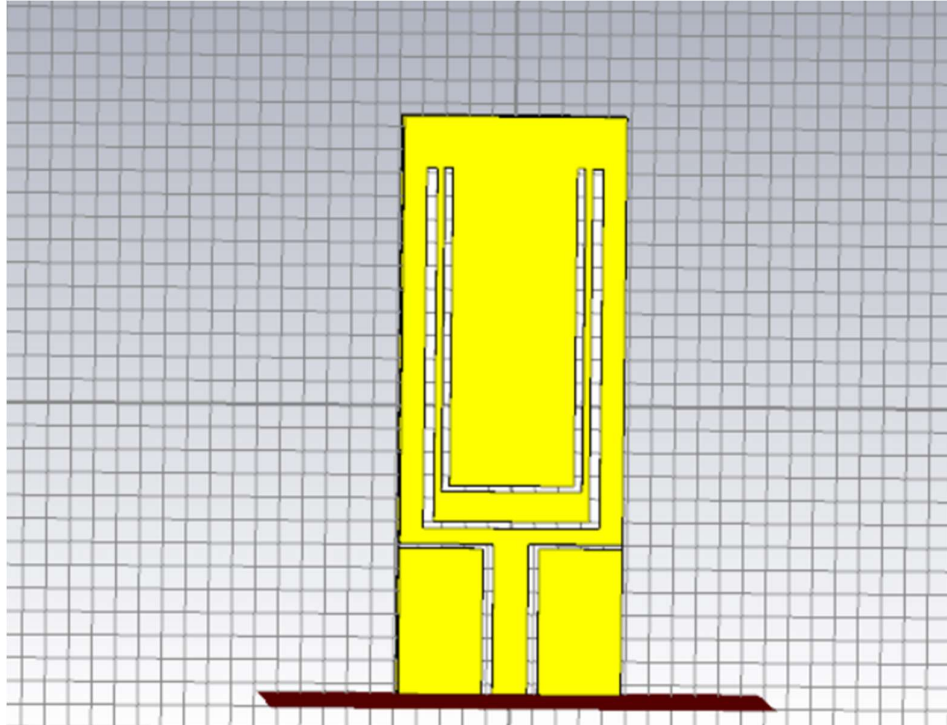
## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pemodelan Rectenna

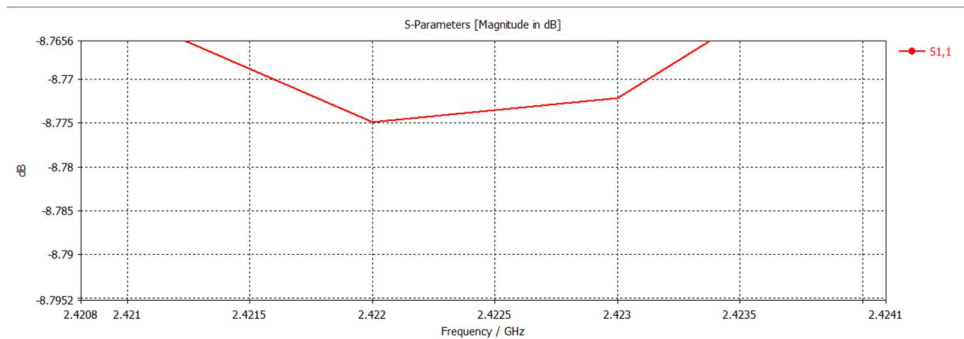
#### 4.1.1 Pemodelan Antena

Melanjutkan dari subbab 3.2.2., pemodelan *rectenna* menggunakan *software* Proteus 8 (rangkaiian *rectifier*) dan CST Studio Suite 2019 (Pemodelan Antena Mikrostrip). Pemodelan *rectenna* pada tugas akhir ini mengutip dari referensi (Koohestani et al., 2020) lalu dimodifikasi sehingga parameter seperti  $S_{11}$ , VSWR, *Return Loss* dan *Gain* tercapai.

Pada tahap pertama pemodelan antena, antena dibuat mirip sesuai dengan referensi, namun  $S_{11}$  dan *return loss* belum memenuhi. Frekuensi kerja antena tersebut berada pada 2.42 GHz dan *return loss* pada -8.7 dB.

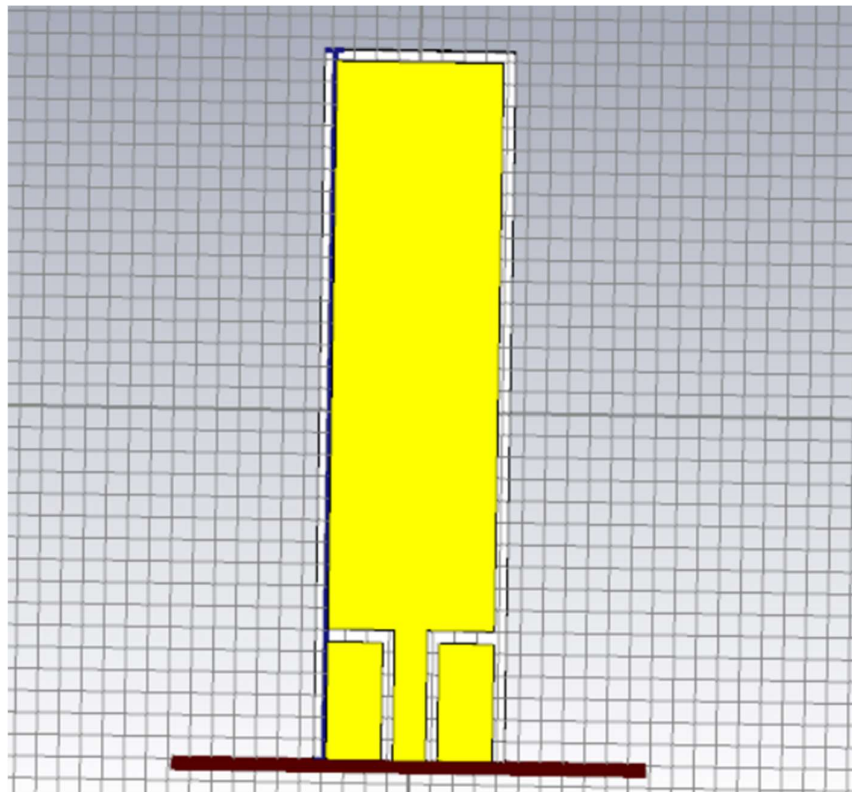


**Gambar 4. 1** Antena Mikrostrip pada Referensi

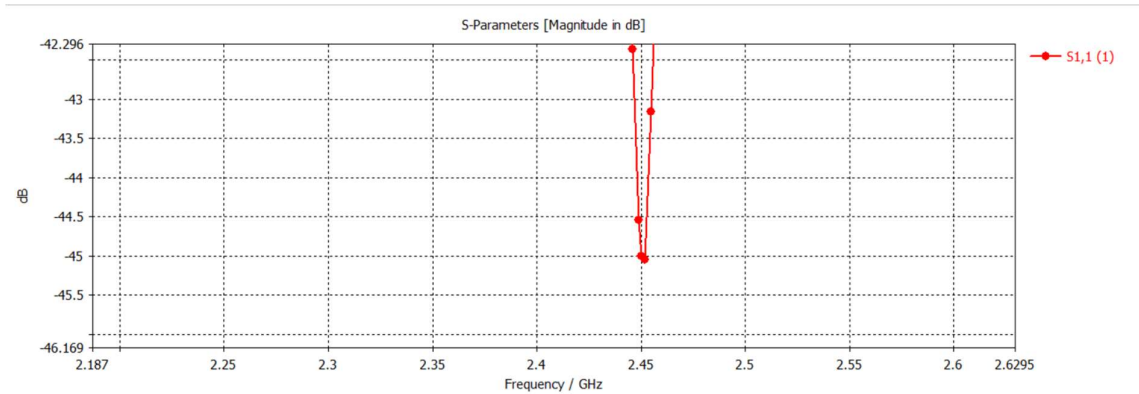


**Gambar 4. 2** S<sub>11</sub> dan Antena Referensi

Tahap selanjutnya memodifikasi menghilangkan *slot* pada patch terlebih dahulu, lalu mengatur *substrate* dan *groundplane* lebih lebar dari patch agar *return loss* pada antenna dapat mencapai dibawah -10dB dan frekuensi kerja berada pada 2.45 GHz.

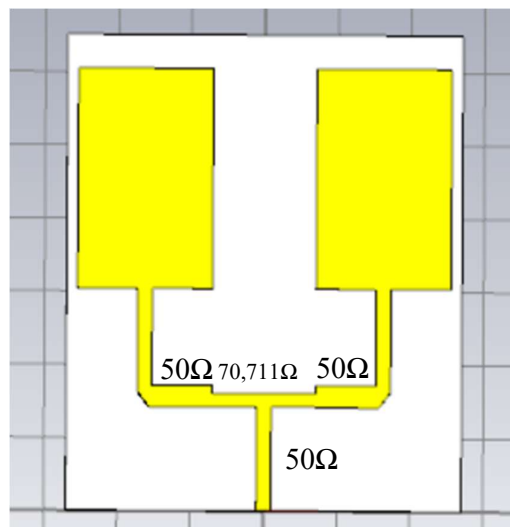


**Gambar 4. 3** Modifikasi Antena tahap awal

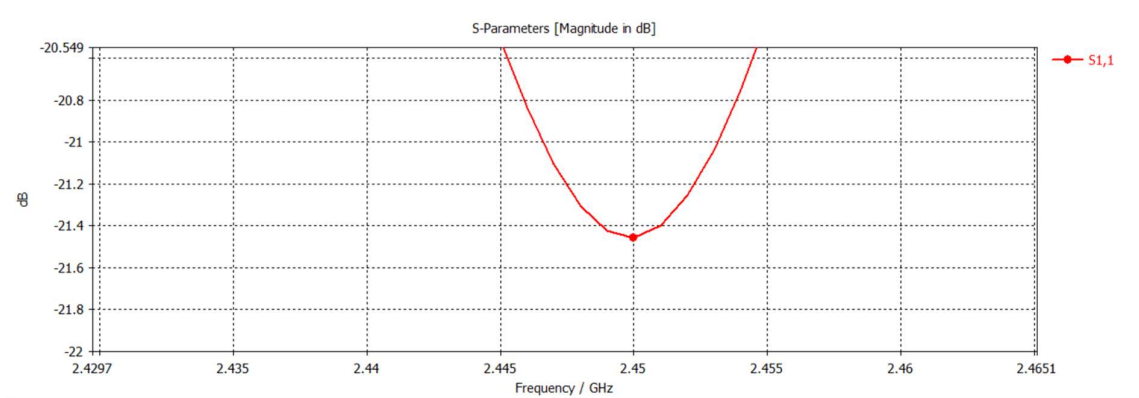


Gambar 4. 4  $S_{11}$  pada Antena Tahap Awal

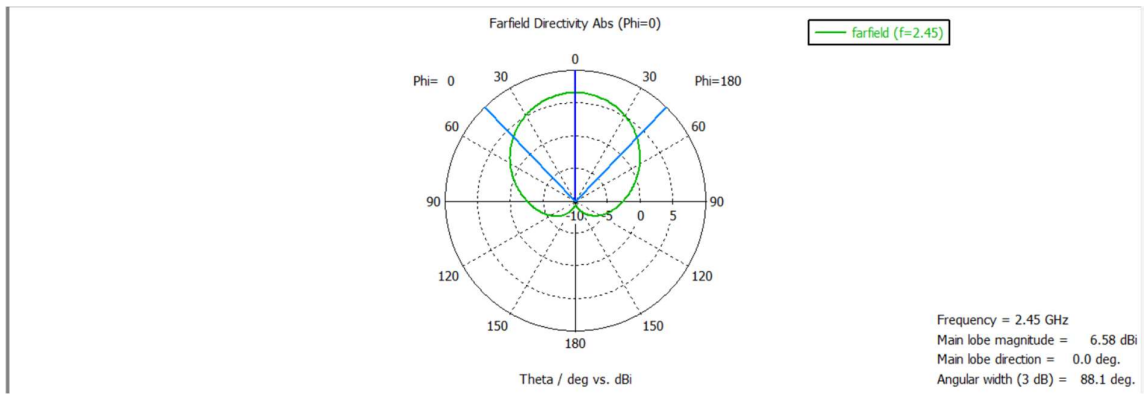
$S_{11}$ , *Return Loss* sudah tercapai pada tahap tersebut namun untuk *Gain* yang didapatkan belum mencapai 3 dB. Pada tahap akhir yaitu memodifikasi patch menggunakan teknik *Array* pada antenna agar *Gain* bisa lebih dari 3 dB. Seperti pada tinjauan pustaka 2.4.2, teknik *Array* ini dapat digunakan untuk mendapatkan *Gain* yang lebih tinggi. Model terakhir pada antenna tertera pada Gambar 4.5



Gambar 4. 5 Desain Final Antena Mikrostrip



Gambar 4. 6  $S_{11}$  pada Antena Mikrostrip

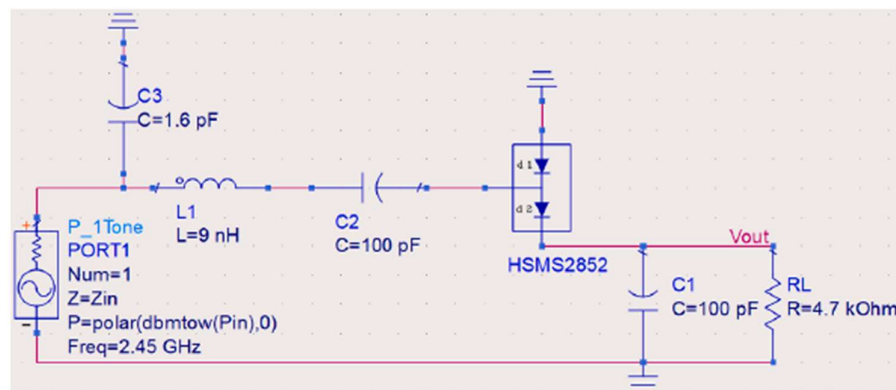


Gambar 4. 7 *Farfield* dan *Gain* pada Antena Mikrostrip

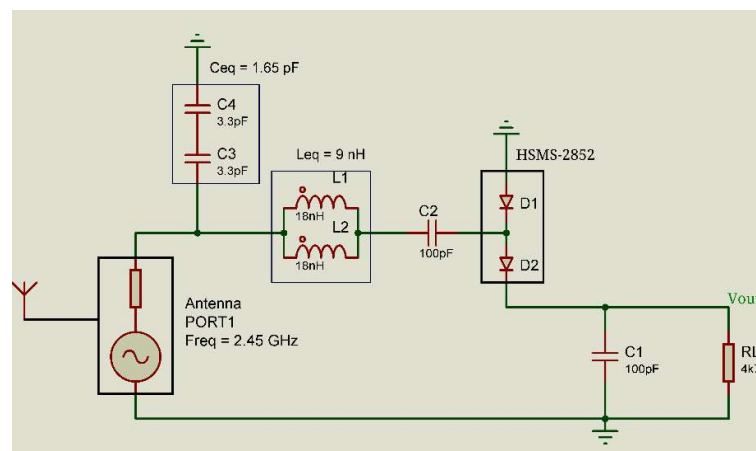
Parameter pada model terakhir antenna dapat tercapai seperti frekuensi yang bekerja di 2.45 GHz, *return loss* lebih dari -10 dB, dan *gain* yang mencapai 6.58 dB. Karena parameter antenna sudah tercapai, antenna akan lanjut ke tahap fabrikasi

#### 4.1.2 Pemodelan Rectifier

Pemodelan rangkaian *rectifier* ini mengutip pada jurnal (Koohestani et al., 2020) dan dilakukan modifikasi dikarenakan ada komponen pada jurnal yang tidak ada (induktor 9 nH dan kapasitor 1.6 pF). Modifikasi rangkaian *rectifier* ini menggunakan software Proteus 8.



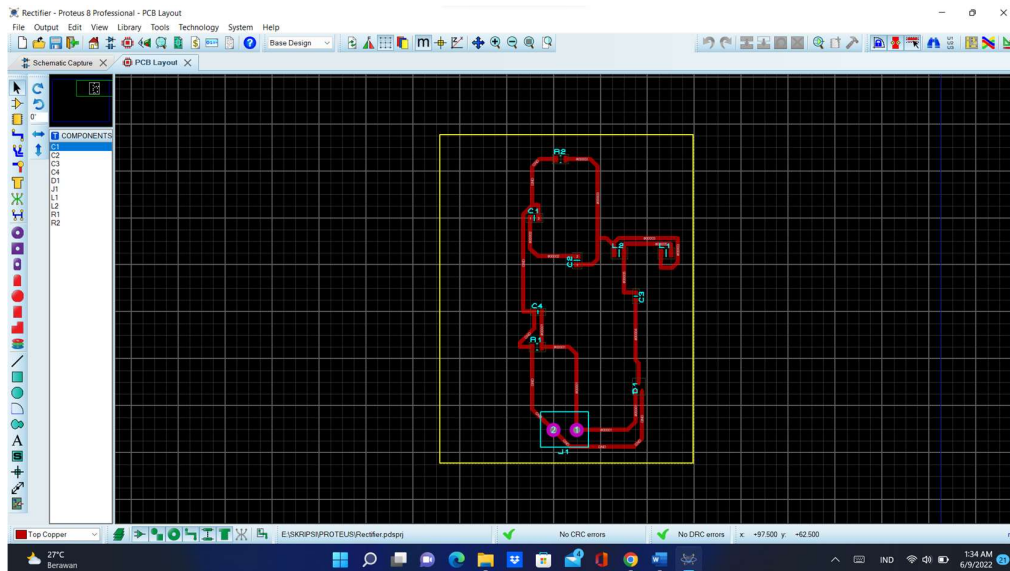
Gambar 4. 8 Rangkaian Rectifier pada Referensi



Gambar 4. 9 Rangkaian Rectifier pada Tugas Akhir



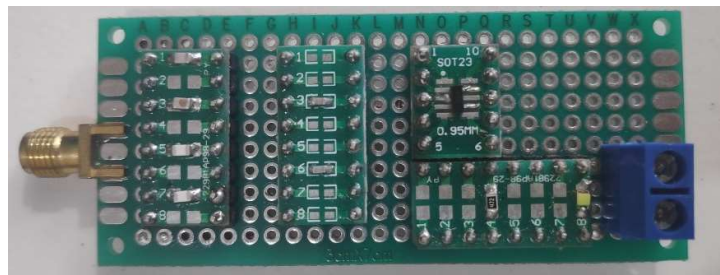
Setelah melakukan pemodelan rangkaian tahap selanjutnya melakukan *routing* untuk jalur pada *layout* PCB. Tujuan *routing* tersebut agar rangkaian bisa tercetak di antenna mikrostrip dan terintegrasi dengan antenna mikrostrip tanpa menggunakan konektor.



Gambar 4. 10 Desain PCB Layout Rangkaian Rectifier

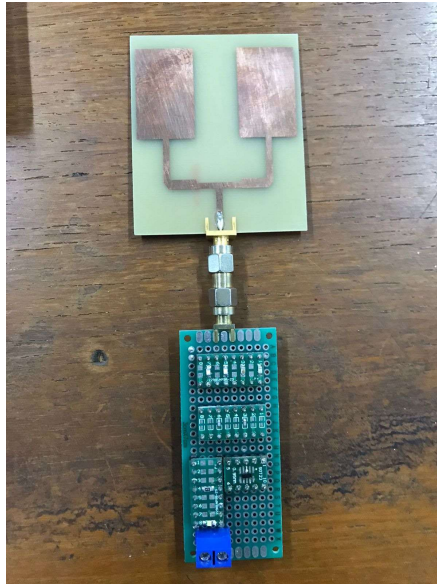
### 4.1.3 Hasil Fabrikasi Rectenna

Dilakukan fabrikasi dua tipe rectenna, yang pertama adalah rectenna dengan antenna dan rangkaian *rectifier* yang dihubungkan dengan menggunakan konektor, fabrikasi rangkaian *rectifier* dilakukan pada sebuah PCB Dot Matrix FR4 Dual Layer dengan ukuran 3x7 cm dan tebal 1.6 mm. Tipe kedua yaitu fabrikasi antenna dan rangkaian *rectifier* yang terhubung secara langsung tanpa menggunakan konektor. Komponen yang digunakan pada rangkaian ini adalah jenis SMD. Rectenna tipe pertama diperlukan adaptor SMD 0805 dan 0603 (untuk komponen resistor, induktor, dan kapasitor) serta SOT-23 (untuk komponen diode HSMS-2852) supaya dapat terpasang pada PCB dengan spasi 0.1 inch/ 2.54 mm. Untuk memudahkan pengukuran tegangan DC menggunakan multimeter, ujung-ujung resistor 4.7K $\Omega$  dirangkai secara parallel dengan terminal blok-2 pin, sehingga probe multimeter dapat terhubung dengan mudah.

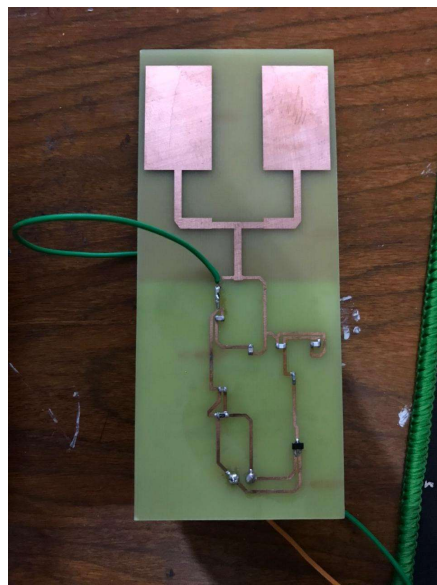


Gambar 4. 11 Hasil Fabrikasi Rectifier





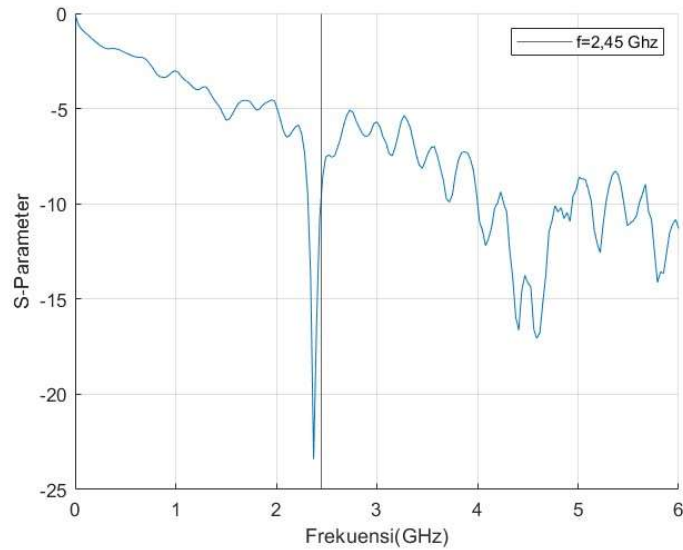
Gambar 4. 12 Hasil Fabrikasi *Rectenna* dengan antenna terpisah



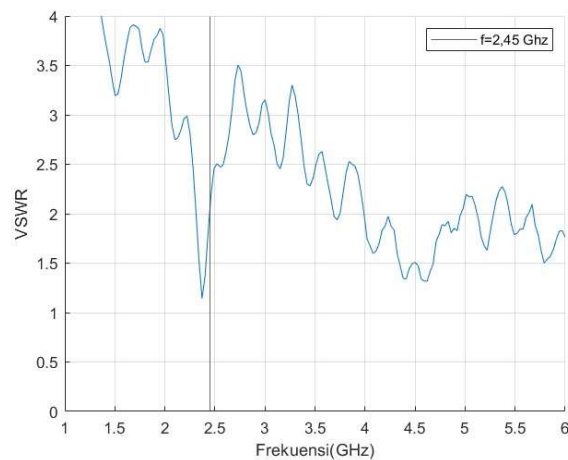
Gambar 4. 13 Hasil Fabrikasi *Rectenna* dengan antenna terintegrasi dengan rectifier

## 4.2 Hasil Pengukuran Antena yang Digunakan

Melanjutkan dari subbab 3.2.2., antena penerima yang telah diukur pada VNA akan disalin data pengukurannya berupa file berformat .csv. Kemudian dari file tersebut digunakan sebagai data yang di-import menuju software MATLAB untuk diplot ulang grafik hasil pengukuran. Hasil plot ulang dapat diamati pada Gambar 4.13. ( $S_{11}$ ) dan Gambar 4.14 ( $V_{SWR}$ ) di bawah



Gambar 4. 14  $(S_{11})$

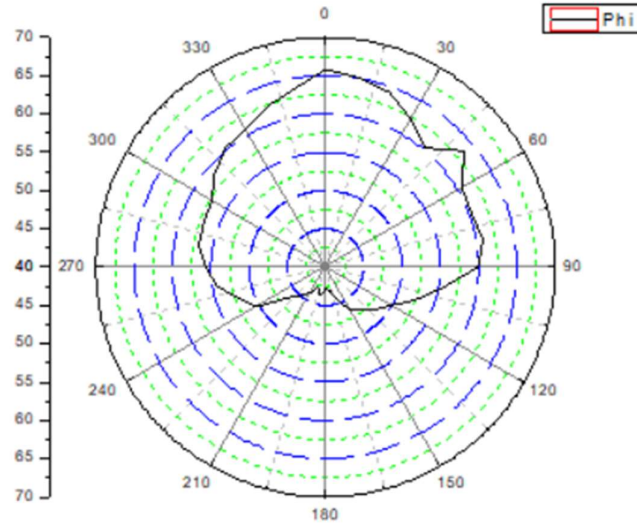


Gambar 4. 15 VSWR

Grafik plot ulang dari MATLAB menunjukkan antenna memiliki  $S_{11} = -9.416$  dB dan  $VSWR = 2.04$  pada  $f = 2.45$  GHz. Hasil pengukuran menunjukkan parameter antenna berubah setelah difabrikasi beroperasi pada frekuensi 2.45 GHz.

#### 4.2.1 Pola Radiasi Antena

Pengukuran pola radiasi antenna dilakukan pada area yang luas agar tidak terjadi pantulan. Pengukuran melakukan menggunakan SDR HackRF One untuk melakukan tranmisi dan antenna mikrostrip dipasang pada spectrum analyzer untuk dilihat berapa daya yang masuk. Pengukuran dilakukan menggunakan busur dan disesuaikan dengan sudut yang diinginkan. Setelah dilakukan pengukuran data di plot ulang menggunakan *software* Origin8 Pro.



Gambar 4. 16 Pola Radiasi Antena

### 4.3 Hasil Verifikasi Sinyal Terima

Proses verifikasi sinyal terima dilakukan untuk setiap jarak penelitian yang ditentukan yaitu 10, 20, 30, 40, dan 50 cm. Hasil *capture* tampilan *software* SA untuk teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan Tanpa modulasi pada jarak yang bervariasi terlampir (lihat lampiran A: Hasil Terima Sinyal Terima).

### 4.4 Hasil Pengukuran Daya Terima RF (HackRF One Spectrum Analyzer)

Pengukuran Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ ) dilakukan dengan mengambil nilai puncak dari magnitudo pada frekuensi 2.45 GHz, sesuai dengan tampilan dari *software* HackRF *Sweep Spectrum Analyzer*, atau SDR yang difungsikan sebagai *Spectrum Analyzer*. Secara berurutan Tabel 4.1 hingga Tabel 4.5 menunjukkan hasil pengukuran Daya Terima RF untuk teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 10~50 cm.

Tabel 4. 1 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-21.2	$7.6 \times 10^{-3}$
20	-22.2	$6 \times 10^{-3}$
30	-26	$2.5 \times 10^{-3}$
40	-27.3	$1.9 \times 10^{-3}$
50	-29.1	$1.2 \times 10^{-3}$

Tabel 4. 2 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-21.2	$7.6 \times 10^{-3}$
20	-21.2	$7.6 \times 10^{-3}$
30	-24.9	$3.2 \times 10^{-3}$
40	-27	$2 \times 10^{-3}$
50	-28	$1.6 \times 10^{-3}$

Tabel 4. 3 Teknik 2-tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-21.2	$7.6 \times 10^{-3}$
20	-22.5	$5.6 \times 10^{-3}$
30	-26.3	$2.3 \times 10^{-3}$
40	-28	$1.6 \times 10^{-3}$
50	-28.7	$1.3 \times 10^{-3}$

Tabel 4. 4 Teknik 4-tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-21.2	$7.6 \times 10^{-3}$
20	-22.5	$5.6 \times 10^{-3}$
30	-26.3	$2.3 \times 10^{-3}$
40	-27.7	$1.7 \times 10^{-3}$
50	-29.1	$1.2 \times 10^{-3}$

Tabel 4. 5 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-21.5	$7.1 \times 10^{-3}$
20	-22.5	$5.6 \times 10^{-3}$
30	-26	$2.5 \times 10^{-3}$
40	-28.4	$1.4 \times 10^{-3}$
50	-29.4	$1.1 \times 10^{-3}$

#### 4.5 Hasil Pengukuran Daya Terima RF (GWINSTEK Spectrum Analyzer)

Pengukuran Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ ) dilakukan dengan mengambil nilai puncak dari magnitudo pada frekuensi 2.45 GHz, sesuai dengan tampilan dari *GWINSTEK Sweep Spectrum Analyzer*. Secara berurutan Tabel 4.6 hingga Tabel 4.10 menunjukkan hasil pengukuran Daya Terima RF untuk teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 10~50 cm

Tabel 4. 6 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-22	$6.31 \times 10^{-3}$
20	-29	$1.25 \times 10^{-3}$
30	-34	$3.98 \times 10^{-4}$
40	-36	$2.51 \times 10^{-4}$
50	-38	$1.58 \times 10^{-4}$

Tabel 4. 7 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-17	$1.99 \times 10^{-2}$
20	-20	$10 \times 10^{-2}$
30	-25	$3.16 \times 10^{-3}$
40	-34	$3.98 \times 10^{-5}$
50	-48	$1.58 \times 10^{-5}$

Tabel 4. 8 Teknik 2-Tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-20	$10 \times 10^{-2}$
20	-29	$1.25 \times 10^{-3}$
30	-34	$3.98 \times 10^{-4}$
40	-36	$2.51 \times 10^{-4}$
50	-38	$1.58 \times 10^{-4}$

Tabel 4. 9 Teknik 4-Tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-20	$10 \times 10^{-2}$
20	-22	$6.3 \times 10^{-3}$
30	-29	$1.25 \times 10^{-3}$
40	-34	$3.98 \times 10^{-4}$
50	-35	$3.16 \times 10^{-4}$

Tabel 4. 10 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [cm]	Daya Terima RF ( $P_{in RF}$ )	
	[dBm]	[mW]
10	-23	$5.01 \times 10^{-2}$
20	-27	$1.99 \times 10^{-2}$
30	-30	$10 \times 10^{-3}$
40	-31	$7.94 \times 10^{-4}$
50	-38	$1.58 \times 10^{-4}$

## 4.6 Hasil pengukuran Output Tegangan DC

Tahap selanjutnya adalah pengukuran Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ). Dilakukan dengan menghubungkan probe multimeter pada terminal block 2-pin, yang terangkai parallel dengan ujung-ujung resistor  $4.7K\Omega$ . Hasil pengukuran Output Tegangan DC untuk Rectenna dengan teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi tertera pada Tabel 4.6 hingga Tabel 4.15 dan Hasil Pengukuran Output Tegangan DC dengan jarak yang bervariasi dari 10~50 cm.

### 4.6.1 Hasil Pengukuran Rectenna Tipe Pertama

Tabel 4. 11 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	143.5
20	57.1
30	23.3
40	7.3
50	1.2

Tabel 4. 12 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	128
20	119
30	38.5
40	23.5
50	1.9

Tabel 4. 13 Teknik 2-Tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	180.9
20	23.5
30	16.5
40	10.3
50	3.7

Tabel 4. 14 Teknik 4-Tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	99.7
20	45.4
30	9.1
40	8.2
50	2.3

Tabel 4. 15 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	129.8
20	30.5
30	21.2
40	5.2
50	1.7

#### 4.6.2 Hasil Pengukuran Rectenna Tipe Kedua

Tabel 4. 16 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	52
20	5.1
30	4.9
40	2
50	0.3

Tabel 4. 17 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	50.4
20	4.9
30	2.6
40	1.6
50	0.7

Tabel 4. 18 Teknik 2-tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	34.2
20	2
30	3.3
40	1.4
50	0.7

Tabel 4. 19 Teknik 4-tone

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	53.1
20	3.3
30	1.1
40	2.2
50	0.5

Tabel 4. 20 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [cm]	Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) [mV]
10	48.6
20	3.5
30	3.1
40	1.1
50	0.5

#### 4.7 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC ( $\eta_{RF-DC}$ ) dihitung menggunakan rumus berikut, mengutip dari tinjauan pustaka 2.9.

$$\eta_{RF-DC} = \frac{(V_{out DC})^2 / R_L}{P_{in RF}} = \frac{(V_{out DC})^2}{4700(P_{in RF})} \times 100\%$$

Sebelumnya dilakukan konversi satuan dari pengukuran ( $dBm$  dan  $mV$ ) menuju perhitungan ( $Watt$  dan  $Volt$ ) untuk memudahkan perhitungan. Tabel 4.16 hingga Tabel 4.25 menunjukkan hasil perhitungan efisiensi konversi daya dari teknik AM, FM, 2-Tone, 4-Tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 10~50 cm.



#### 4.7.1 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna Pertama

##### 4.7.1.1 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC (*HackRF One SA*)

Tabel 4. 21 teknik AM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.6 \times 10^{-6}$	$4.38 \times 10^{-6}$	57.757%
0.2	$6 \times 10^{-6}$	$6.94 \times 10^{-7}$	11.513%
0.3	$2.5 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-7}$	4.598%
0.4	$1.9 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-8}$	0.609%
0.5	$1.2 \times 10^{-6}$	$3.06 \times 10^{-10}$	0.025%

Tabel 4. 22 teknik FM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.6 \times 10^{-6}$	$3.49 \times 10^{-6}$	45.954%
0.2	$7.6 \times 10^{-6}$	$3.01 \times 10^{-6}$	39.719%
0.3	$3.2 \times 10^{-6}$	$3.15 \times 10^{-7}$	9.746%
0.4	$2 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-7}$	5.889%
0.5	$1.6 \times 10^{-6}$	$7.68 \times 10^{-10}$	0.048%

Tabel 4. 23 teknik 2-tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.6 \times 10^{-6}$	$6.96 \times 10^{-6}$	91.787%
0.2	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-7}$	2.089%
0.3	$2.3 \times 10^{-6}$	$5.79 \times 10^{-8}$	2.471%
0.4	$1.6 \times 10^{-6}$	$2.26 \times 10^{-8}$	1.424%
0.5	$1.3 \times 10^{-6}$	$2.91 \times 10^{-9}$	0.216%

Tabel 4. 24 teknik 4-tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.6 \times 10^{-6}$	$2.11 \times 10^{-6}$	27.880%
0.2	$5.6 \times 10^{-6}$	$4.39 \times 10^{-7}$	7.799%
0.3	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.76 \times 10^{-8}$	0.752%
0.4	$1.7 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-8}$	0.842%
0.5	$1.2 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-9}$	0.091%

Tabel 4. 25 tanpa modulasi

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.1 \times 10^{-6}$	$3.58 \times 10^{-6}$	50.635%
0.2	$5.6 \times 10^{-6}$	$1.98 \times 10^{-7}$	3.520%
0.3	$2.5 \times 10^{-6}$	$9.56 \times 10^{-8}$	3.807%
0.4	$1.4 \times 10^{-6}$	$5.75 \times 10^{-9}$	0.398%
0.5	$1.1 \times 10^{-6}$	$6.15 \times 10^{-10}$	0.054%

#### 4.7.1.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC (GWINSTEK SA)

Tabel 4. 26 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$6.31 \times 10^{-6}$	$4.38 \times 10^{-6}$	21.959%
0.2	$1.25 \times 10^{-6}$	$6.94 \times 10^{-7}$	21.937%
0.3	$3.98 \times 10^{-7}$	$1.16 \times 10^{-7}$	9.175%
0.4	$2.51 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-8}$	2.848%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$3.06 \times 10^{-10}$	0.122%

Tabel 4. 27 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$1.99 \times 10^{-5}$	$3.49 \times 10^{-6}$	17.471%
0.2	$10 \times 10^{-5}$	$3.01 \times 10^{-6}$	30.130%
0.3	$3.16 \times 10^{-6}$	$3.15 \times 10^{-7}$	9.973%
0.4	$3.98 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-7}$	29.515%
0.5	$1.58 \times 10^{-8}$	$7.68 \times 10^{-10}$	4.846%

Tabel 4. 28 Teknik 2-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$10 \times 10^{-5}$	$6.96 \times 10^{-6}$	69.627%
0.2	$1.25 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-7}$	9.333%
0.3	$3.98 \times 10^{-7}$	$5.79 \times 10^{-8}$	14.550%
0.4	$2.51 \times 10^{-7}$	$2.26 \times 10^{-8}$	8.986%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$2.91 \times 10^{-9}$	1.838%

Tabel 4. 29 Teknik 4-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$10 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-6}$	21.149%
0.2	$6.3 \times 10^{-6}$	$4.39 \times 10^{-7}$	6.950%
0.3	$1.25 \times 10^{-6}$	$1.76 \times 10^{-8}$	1.400%
0.4	$3.98 \times 10^{-7}$	$1.43 \times 10^{-8}$	3.594%
0.5	$3.16 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-9}$	0.356%

Tabel 4. 30 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$5.01 \times 10^{-5}$	$3.58 \times 10^{-6}$	71.524%
0.2	$1.99 \times 10^{-5}$	$1.98 \times 10^{-7}$	9.920%
0.3	$10 \times 10^{-6}$	$9.56 \times 10^{-8}$	9.563%
0.4	$7.94 \times 10^{-7}$	$5.75 \times 10^{-9}$	0.724%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$6.15 \times 10^{-10}$	0.388%

#### 4.7.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC *Rectenna* Kedua

##### 4.7.2.1 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC (HackRF One SA)

Tabel 4. 31 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.58 \times 10^{-6}$	$5.75 \times 10^{-7}$	7.584%
0.2	$6.02 \times 10^{-6}$	$5.53 \times 10^{-9}$	0.092%
0.3	$2.51 \times 10^{-6}$	$5.11 \times 10^{-9}$	0.203%
0.4	$1.86 \times 10^{-6}$	$8.51 \times 10^{-10}$	0.046%
0.5	$1.23 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-11}$	0.002%

Tabel 4. 32 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.58 \times 10^{-6}$	$5.40 \times 10^{-7}$	7.125%
0.2	$7.58 \times 10^{-6}$	$5.11 \times 10^{-9}$	0.067%
0.3	$3.23 \times 10^{-6}$	$1.44 \times 10^{-9}$	0.044%
0.4	$1.99 \times 10^{-6}$	$5.45 \times 10^{-10}$	0.027%
0.5	$1.58 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-11}$	0.007%

Tabel 4. 33 Teknik 2-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.58 \times 10^{-6}$	$2.49 \times 10^{-7}$	3.281%
0.2	$5.62 \times 10^{-6}$	$8.51 \times 10^{-10}$	0.015%
0.3	$2.34 \times 10^{-6}$	$2.32 \times 10^{-9}$	0.099%
0.4	$1.58 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-10}$	0.026%
0.5	$1.34 \times 10^{-6}$	$1.04 \times 10^{-10}$	0.008%

Tabel 4. 34 Teknik 4-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.58 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-7}$	7.908%
0.2	$5.62 \times 10^{-6}$	$2.32 \times 10^{-9}$	0.041%
0.3	$2.34 \times 10^{-6}$	$2.57 \times 10^{-10}$	0.011%
0.4	$1.69 \times 10^{-6}$	$1.03 \times 10^{-9}$	0.061%
0.5	$1.23 \times 10^{-6}$	$5.32 \times 10^{-11}$	0.004%

Tabel 4. 35 Tanpa Modulasi

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$7.07 \times 10^{-6}$	$5.03 \times 10^{-7}$	7.099%
0.2	$5.62 \times 10^{-6}$	$1.98 \times 10^{-7}$	3.520%
0.3	$2.51 \times 10^{-6}$	$9.56 \times 10^{-8}$	3.807%
0.4	$1.44 \times 10^{-6}$	$5.75 \times 10^{-9}$	0.398%
0.5	$1.14 \times 10^{-6}$	$6.15 \times 10^{-10}$	0.054%

#### 4.7.2.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC (GWINSTEK SA)

Tabel 4. 36 Teknik AM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$6.31 \times 10^{-6}$	$5.75 \times 10^{-7}$	2.883%
0.2	$1.25 \times 10^{-6}$	$5.53 \times 10^{-9}$	0.175%
0.3	$3.98 \times 10^{-7}$	$5.11 \times 10^{-9}$	0.406%
0.4	$2.51 \times 10^{-7}$	$8.51 \times 10^{-10}$	0.214%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$1.91 \times 10^{-11}$	0.008%

Tabel 4. 37 Teknik FM

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$1.99 \times 10^{-5}$	$5.40 \times 10^{-7}$	2.709%
0.2	$10 \times 10^{-5}$	$5.11 \times 10^{-9}$	0.051%
0.3	$3.16 \times 10^{-6}$	$1.44 \times 10^{-9}$	0.045%
0.4	$3.98 \times 10^{-6}$	$5.45 \times 10^{-10}$	0.137%
0.5	$1.58 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-10}$	0.658%

Tabel 4. 38 Teknik 2-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$10 \times 10^{-5}$	$2.49 \times 10^{-7}$	2.489%
0.2	$1.25 \times 10^{-6}$	$8.51 \times 10^{-10}$	0.068%
0.3	$3.98 \times 10^{-7}$	$2.32 \times 10^{-9}$	0.582%
0.4	$2.51 \times 10^{-7}$	$4.17 \times 10^{-10}$	0.166%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$1.04 \times 10^{-10}$	0.066%

Tabel 4. 39 Teknik 4-Tone

Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$10 \times 10^{-5}$	$6.00 \times 10^{-7}$	5.999%
0.2	$6.3 \times 10^{-6}$	$2.32 \times 10^{-9}$	0.037%
0.3	$1.25 \times 10^{-6}$	$2.57 \times 10^{-10}$	0.020%
0.4	$3.98 \times 10^{-7}$	$1.03 \times 10^{-9}$	0.259%
0.5	$3.16 \times 10^{-7}$	$5.32 \times 10^{-11}$	0.017%

Tabel 4. 40 Tanpa Modulasi

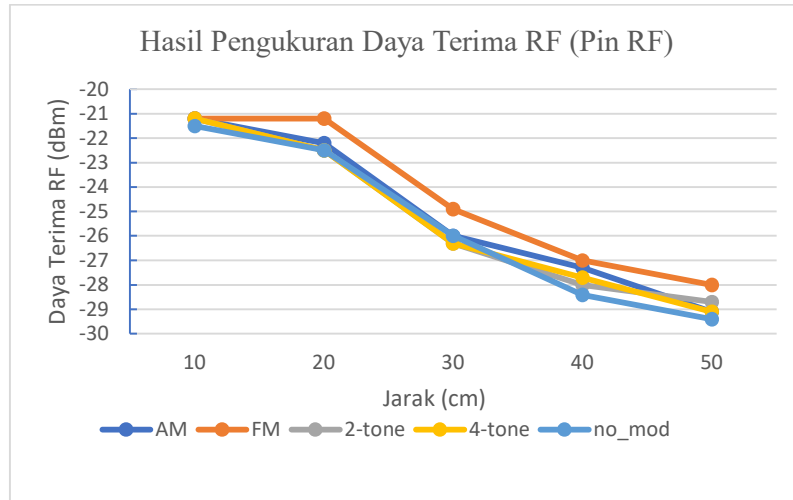
Jarak ( $d$ ) [m]	$(P_{in\ RF})$ [W]	$(P_{out\ DC}) = \frac{(V_{out\ DC})^2}{RL}$ [W] = $[V^2/\Omega]$	$(\eta_{RF-DC})$
0.1	$5.01 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-7}$	10.027%
0.2	$1.99 \times 10^{-5}$	$2.61 \times 10^{-9}$	0.131%
0.3	$10 \times 10^{-6}$	$2.04 \times 10^{-9}$	0.204%
0.4	$7.94 \times 10^{-7}$	$2.57 \times 10^{-10}$	0.032%
0.5	$1.58 \times 10^{-7}$	$5.32 \times 10^{-11}$	0.034%

## 4.8 Analisa dan Pembahasan

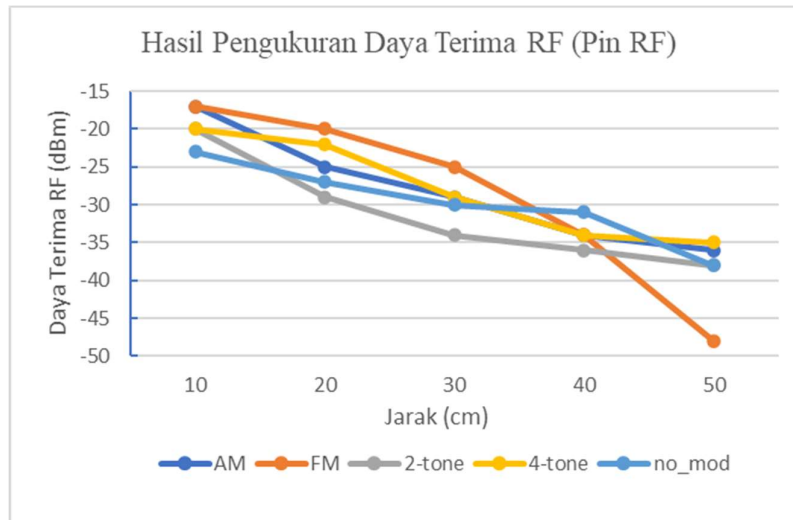
Pada bagian Analisa dan Pembahasan ini akan dipaparkan analisa dari seluruh pengukuran yang telah dilakukan sesuai metode yang telah dijelaskan sebelumnya. Di akhir bagian ini akan ditarik kesimpulan dari analisa data, mengenai teknik modulasi yang optimal untuk digunakan dalam sistem transfer daya nirkabel.

### 4.8.1 Analisa Pengukuran Daya Terima RF

Dari tabel 4.1 hingga tabel 4.5 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 4.15., dengan variabelnya adalah Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ ) banding Jarak ( $d$ ) antara Tx-Rx untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).



Gambar 4. 17 Hasil Perbandingan Daya Terima RF (*HackRF One Spectrum Analyzer*)



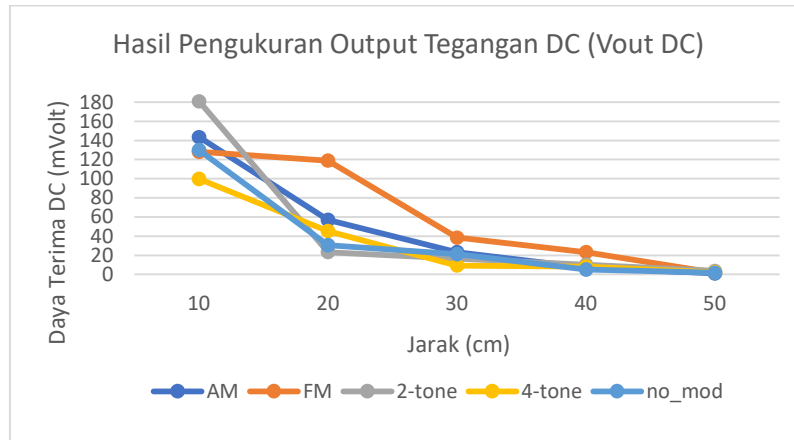
Gambar 4. 18 Hasil Perbandingan Daya Terima RF (*GWINSTEK Spectrum Analyzer*)

Dari grafik tersebut, daya RF yang diterima turun secara eksponensial negatif. Penurunan daya sesuai dengan penambahan loss dari ruang bebas (*Free Space Loss / FSL*) yang naik secara eksponensial. Kelima teknik modulasi yang dilakukan memiliki Daya Terima RF yang tidak jauh berbeda untuk semua jarak pengukuran.

## 4.8.2 Analisa Pengukuran Output Tegangan DC

### 4.8.3 Analisa pada Rectenna Tipe Pertama

Dari tabel 4.6 hingga tabel 4.10 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 4.14., dengan variabelnya adalah Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) banding jarak ( $d$ ) antara Tx-Rx untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).

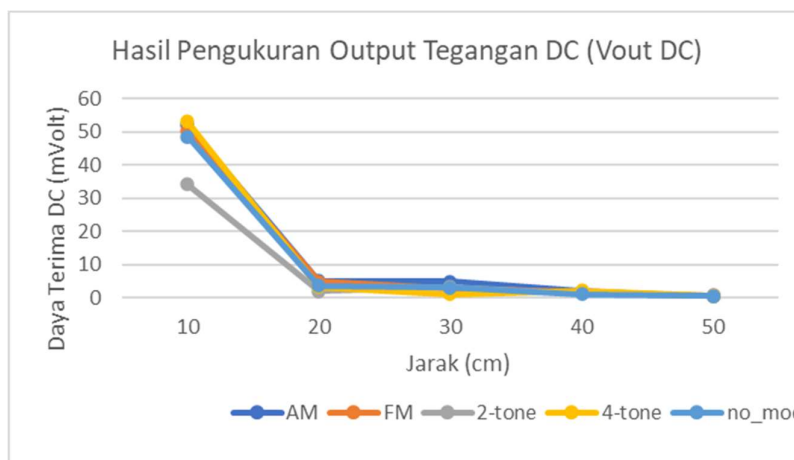


Gambar 4. 19 Hasil Pengukuran Output Tegangan DC *Rectenna* tipe Pertama

Dari grafik komparasi di atas, tegangan DC keluaran pada *rectenna* turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 20 cm keatas. Pada jarak pengukuran 10 cm, teknik modulasi 2-tone memiliki nilai Output Tegangan DC tertinggi dengan nilai 180.9 mV, diikuti oleh teknik AM (143.5 mV), tanpa modulasi (129.8 mV), FM (128 mV), 4-tone (99.7 mV). Apabila dirata-rata, teknik modulasi FM memiliki Output Tegangan DC yang relatif lebih besar dibanding teknik lainnya.

### 4.8.4 Analisa Pada Rectenna Tipe Kedua

Dari tabel 4.11 hingga tabel 4.15 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 4.18., dengan variabelnya adalah Output Tegangan DC ( $V_{out DC}$ ) banding jarak ( $d$ ) antara Tx-Rx untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi).



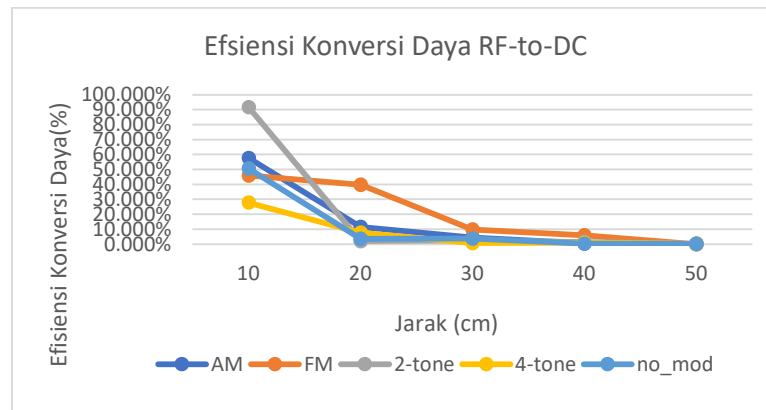
Gambar 4. 20 Hasil Pengukuran Output Tegangan DC *Rectenna* tipe Kedua

Dari grafik komparasi diatas, tegangan DC keluaran pada *rectenna* turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 20 cm keatas. Pada jarak pengukuran 10 cm, teknik modulasi 4-tone memiliki nilai Output Tegangan DC tertinggi dengan nilai 53.1 mV, diikuti oleh teknik AM (52 mV), FM(50.4 mV), Tanpa Modulasi (48.6 mV), 2-tone (34.2 mV). Apabila dirata-rata, teknik modulasi FM memiliki Output Tegangan DC yang relatif lebih besar dibanding teknik lainnya.

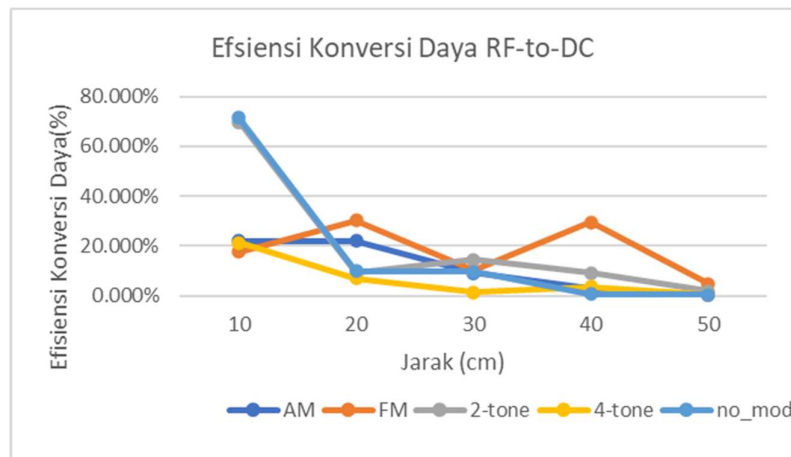
#### 4.8.5 Analisa Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

#### 4.8.6 Rectenna Tipe Pertama

Dari Tabel 4.16. hingga Tabel 4.20. divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 4.19., dengan variabelnya adalah Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC ( $\eta_{RF-DC}$ ) banding Jarak ( $d$ ) antara Tx-Rx untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).



Gambar 4. 21 Hasil Perbandingan Konversi Daya RF-to-DC (*HackRF One Spectrum Analyzer*)



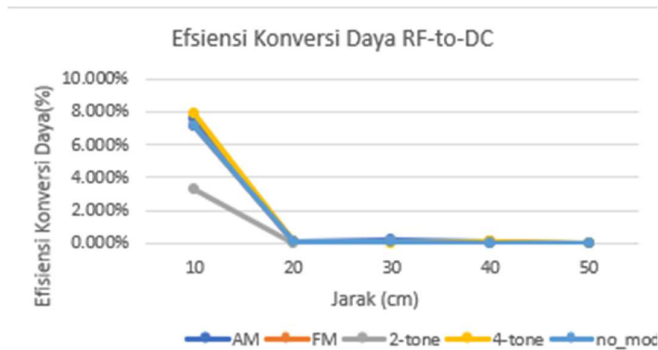
Gambar 4. 22 Hasil Perbandingan Konversi Daya RF-to-DC (*GWINSTEK Spectrum Analyzer*)



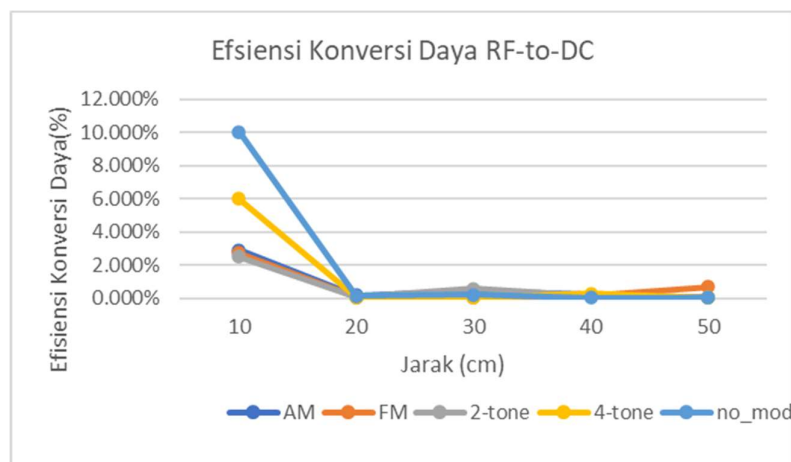
Dari grafik perbandingan diatas, nilai  $\eta_{RF-DC}$  menggunakan Hackrf One spectrum analyzer turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 20 cm keatas, hal ini disebabkan oleh Output Tegangan DC yang juga turun signifikan pada jarak pengukuran tersebut. Pada jarak pengukuran 10 cm, teknik modulasi 2-tone memiliki nilai Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC tertinggi dengan 91.78%, diikuti oleh teknik AM (57.75%), tanpa modulasi (50.63%), FM (45.95%), 4-tone (27.88%). Pengukuran menggunakan GWINSTEK Spectrum Analyzer memiliki hasil yang berbeda, pengukuran tanpa modulasi dengan jarak 10 cm memiliki nilai yang paling tinggi yaitu 71.52%, Teknik 2-Tone dengan efisiensi tertinggi kedua (69.62%), teknik AM (21.95%), teknik 4-Tone (21.14%), dan teknik FM (17.471%).

#### 4.8.7 Rectenna Tipe Kedua

Dari Tabel 4.16. hingga Tabel 4.20. divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 4.19., dengan variabelnya adalah Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC ( $\eta_{RF-D}$ ) banding Jarak ( $d$ ) antara Tx-Rx untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).



Gambar 4. 23 Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna (*HackRF One Spectrum Analyzer*)



Gambar 4. 24 Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC Rectenna (*GWINSTEK Spectrum Analyzer*)

Dari grafik perbandingan diatas, pada *HackRF One Spectrum Analyzer* dan *GWINSTEK Spectrum Analyzer* nilai  $\eta_{RF-DC}$  turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 20 cm keatas, hal ini disebabkan oleh Output Tegangan DC yang juga turun signifikan pada jarak pengukuran tersebut. Pada jarak pengukuran 10 cm, teknik modulasi 4-Tone memiliki nilai Efisiensi

Konversi Daya RF-to-DC tertinggi dengan (7.9%), diikuti oleh teknik AM (7.58%), FM (7.1%), tanpa modulasi (7%), 2-Tone (3.2%). Pengukuran menggunakan *GWINSTEK Spectrum Analyzer* pengukuran tanpa modulasi memiliki nilai Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC tertinggi dengan 10% pada jarak 10 cm, diikuti oleh teknik 4-Tone (5.9%), teknik AM (2.8%), teknik FM (2.7%), dan teknik 2-Tone (2.4%).

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Setelah analisa dan pembahasan yang dilakukan dari Tugas Akhir ini dengan judul “Perancangan Rectifier Antenna untuk Sistem Transfer Daya Nirkabel pada Frekuensi 2.45 GHz erbasis Software-Defined Radio”, ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan dan perancangan rectenna. Pemodelan antenna mikrostrip array 2x1 menggunakan software CST Studio Suite. Hasil yang didapat dari simulasi antenna mikrostrip adalah frekuensi kerja 2.45 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  -21.4 dB dan  $VSWR$  1.18 hal ini membuktikan antenna mikrostrip yang telah dibuat memenuhi syarat antenna karakteristik yang baik.
2. Penggunaan teknik *array* dapat menambah Gain pada sebuah antenna mikrostrip. Hasil Gain semula 2.72 dB menjadi 6.38 dB. Teknik *array* yang digunakan adalah *rectangular patch array* 2x1 dengan teknik pencatutan *microstrip feedline*.
3. Pengukuran Daya Terima RF ( $P_{in\ RF}$ ) menunjukkan kelima teknik modulasi (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi) memiliki selisih nilai yang tidak signifikan antar satu teknik dengan teknik lainnya.  $P_{in\ RF}$  turun secara eksponensial negatif seiring jarak pengukuran yang bertambah.
4. Pengukuran Output Tegangan DC ( $V_{out\ DC}$ ) menunjukkan tegangan keluaran menurun secara signifikan pada jarak pengukuran  $d \geq 30\ cm$ . Teknik modulasi 2-tone menghasilkan tegangan keluaran relatif lebih besar dari 4 teknik lain, dengan  $V_{out\ DC} = 180.4\ mV$  untuk  $d = 10\ cm$ .
5. Perancangan *rectifier* yang terpisah dengan antenna mikrostrip mendapatkan hasil lebih optimal dibandingkan dengan *rectifier* yang terintegrasi langsung dengan antenna mikrostrip. Terdapat penambahan resistansi yang disebabkan oleh *layout* PCB yang panjang pada *rectifier* yang terintegrasi langsung dengan antenna mikrostrip.

### 5.2 Saran

1. Dapat diteliti teknik modulasi Multitone dengan ordo tone lebih tinggi atau modulasi digital (M-ASK, M-FSK, M-PSK) sehingga sistem transfer daya dan data dapat dilakukan secara bersamaan (SWIPT/ *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*).
2. Penyempurnaan *rectenna* yang digunakan, dengan cara penyesuaian impedansi dan menggunakan PCB yang sudah didesain sebelumnya. Penggunaan solder uap untuk fabrikasi *rectenna* sangat dianjurkan.

## DAFTAR PUSTAKA

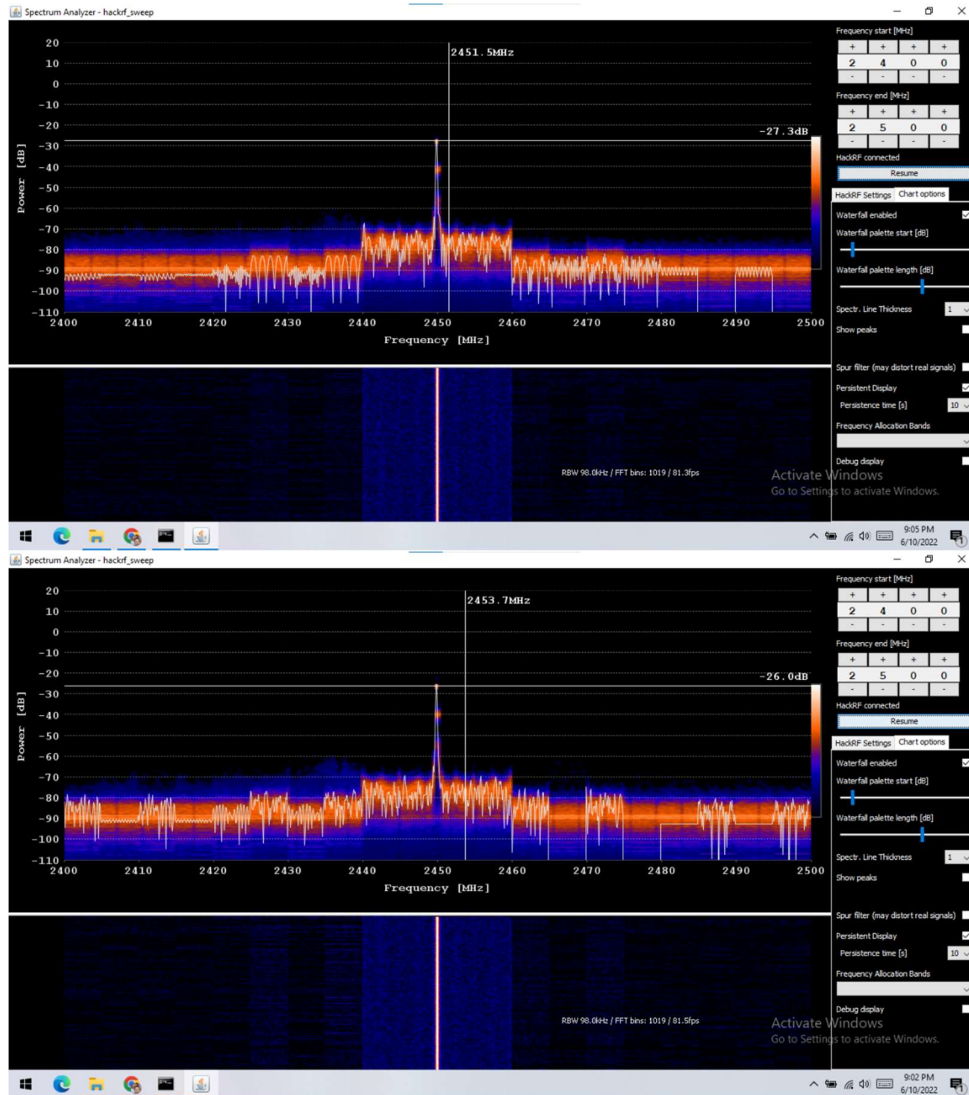
- Ayir, N., Riihonen, T., Allen, M., & Trujillo Fierro, M. F. (2021). Waveforms and End-to-End Efficiency in RF Wireless Power Transfer Using Digital Radio Transmitter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(3), 1917–1931. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3047654>
- Binor Kumaj Kanaujia. (2021). *Rectenna: Wireless Energy Harvesting System*.
- Carvalho, N., Remley, K., Schreurs, D., & Gard, K. (2008). Multisine signals for wireless system test and design. *IEEE Microwave Magazine*, 9(3), 122–138. <https://doi.org/10.1109/MMM.2008.919938>
- Collado, A., & Georgiadis, A. (2014). Optimal waveforms for efficient wireless power transmission. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 24(5), 354–356. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2309074>
- Constantine A Balanis. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design* .
- Couch, L. W. (2013). *Digital and analog communication systems*. Pearson.
- Fuat, I., & Can, M. (n.d.). *Wireless Sensor Networks*.
- IEEE Antennas and Propagation Society. (2013). *IEEE Standard Definitions of Terms*.
- Ilnur R. Ishkaev. (2018). *Possibility\_of\_Peak-to-Average\_Power\_Ratio\_Reduction\_by\_Application\_of\_Optimal\_Signal\_for\_Transmitter\_Based\_on\_SDR\_HackRF\_One*.
- Koohestani, M., Tissier, J., & Latrach, M. (2020). A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153478>
- Naoki Shinohara. (2018). *Wireless power transfer*. The Institution of Engineering and Technology.
- Poveda-Garcia, M., Oliva-Sanchez, J., Sanchez-Iborra, R., Canete-Rebenaque, D., & Gomez-Tornero, J. L. (2019). Dynamic wireless power transfer for cost-effective wireless sensor networks using frequency-scanned beaming. *IEEE Access*, 7, 8081–8094. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886448>
- Tran, H. V., & Kaddoum, G. (2018). RF wireless power transfer: Regreening future networks. *IEEE Potentials*, 37(2), 35–41. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2017.2749118>
- Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele - *Antenna Theory and Design-Wiley (2012)*. (n.d.).

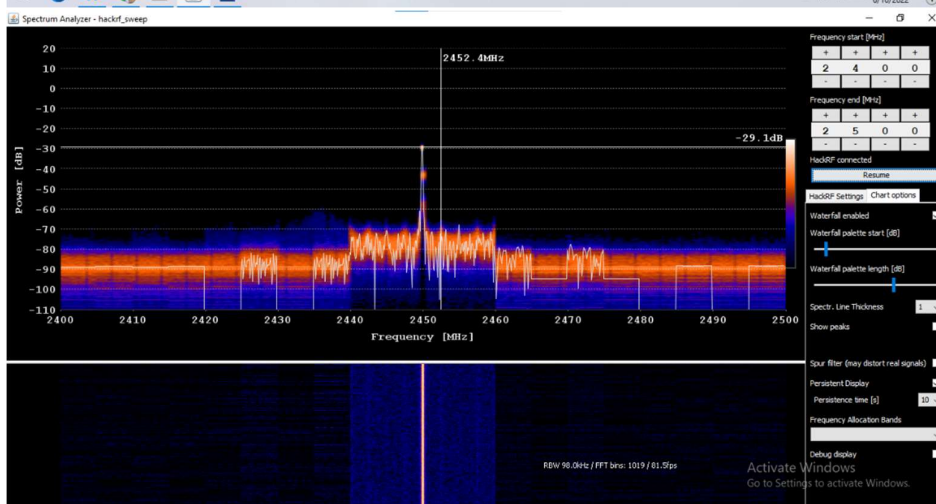
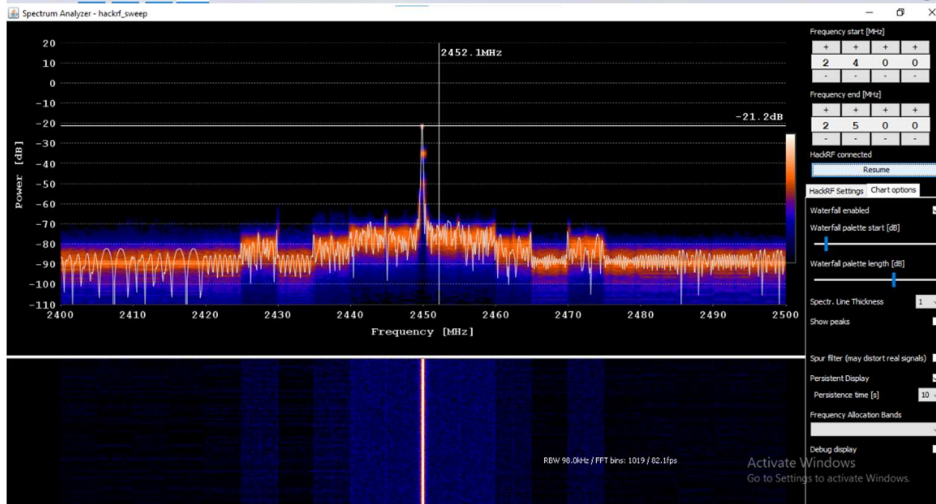
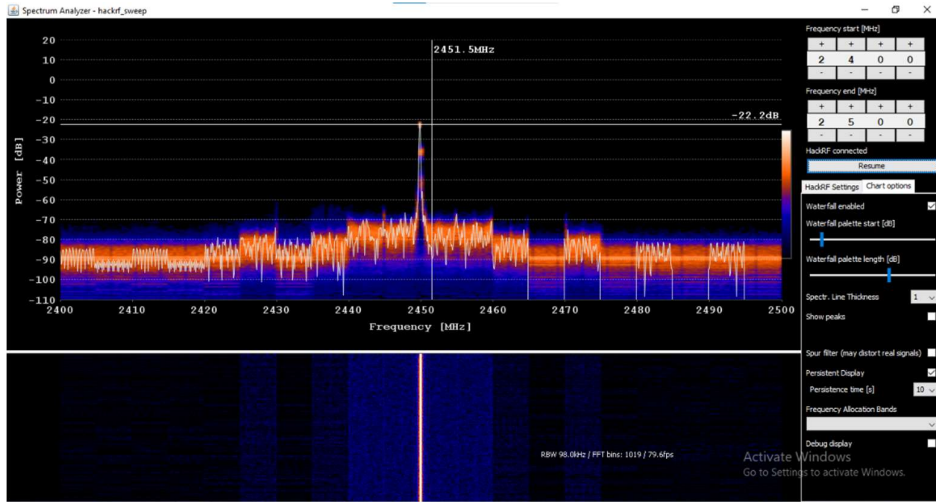
# LAMPIRAN

## LAMPIRAN A:

### Hasil Verifikasi Sinyal Terima (*HackRF One Spectrum Analyzer*)

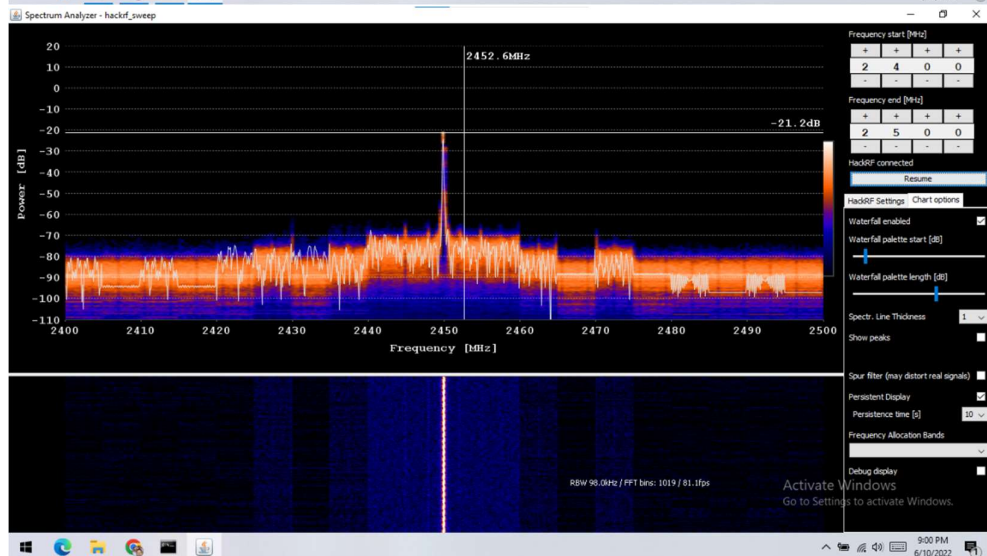
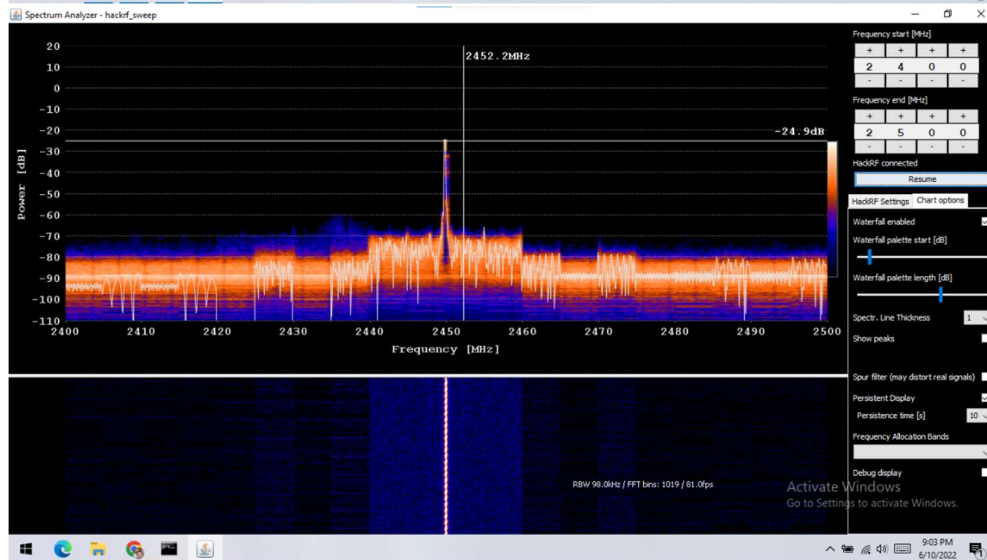
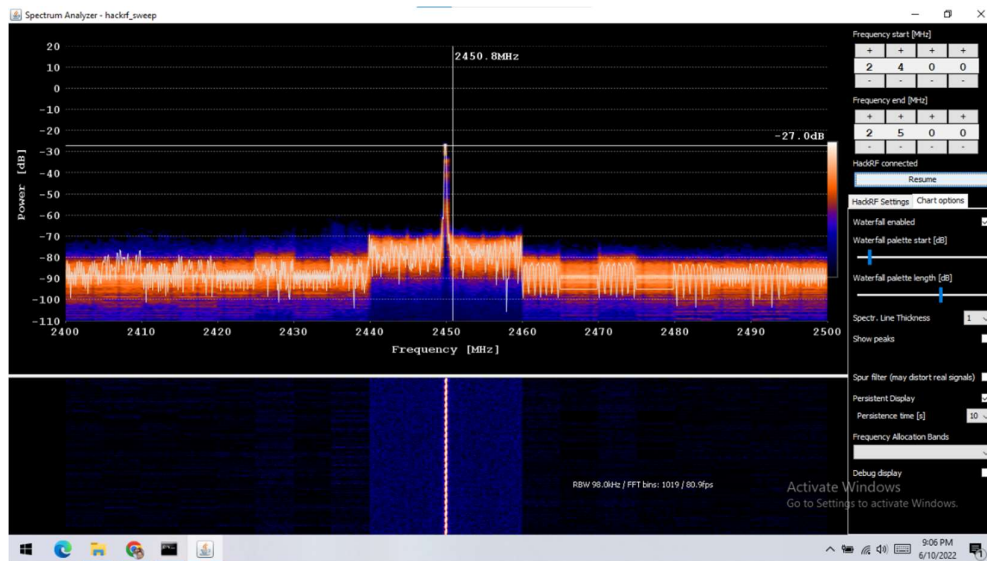
1. Hasil verifikasi sinyal AM pada jarak (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm, (e) 50 cm.

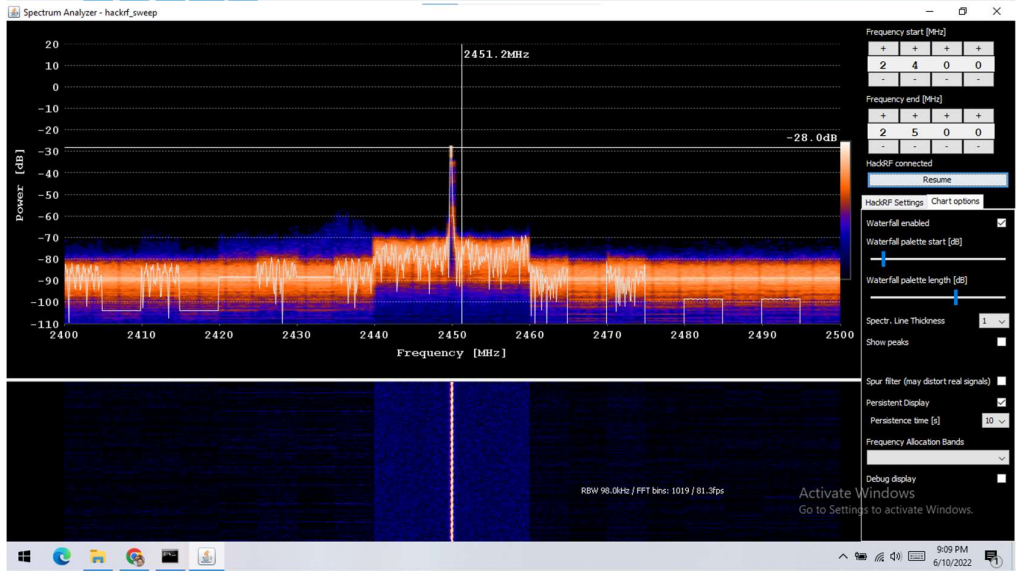
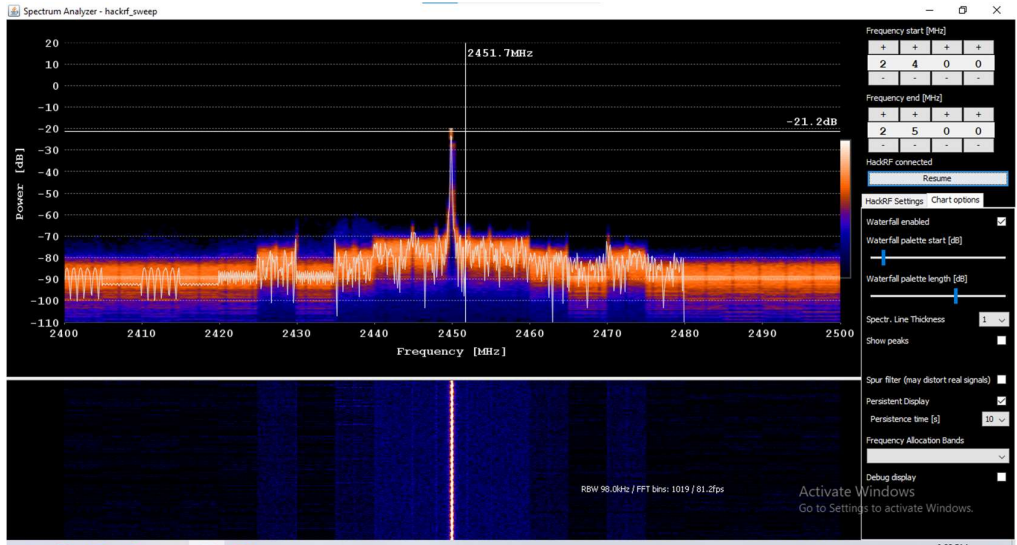






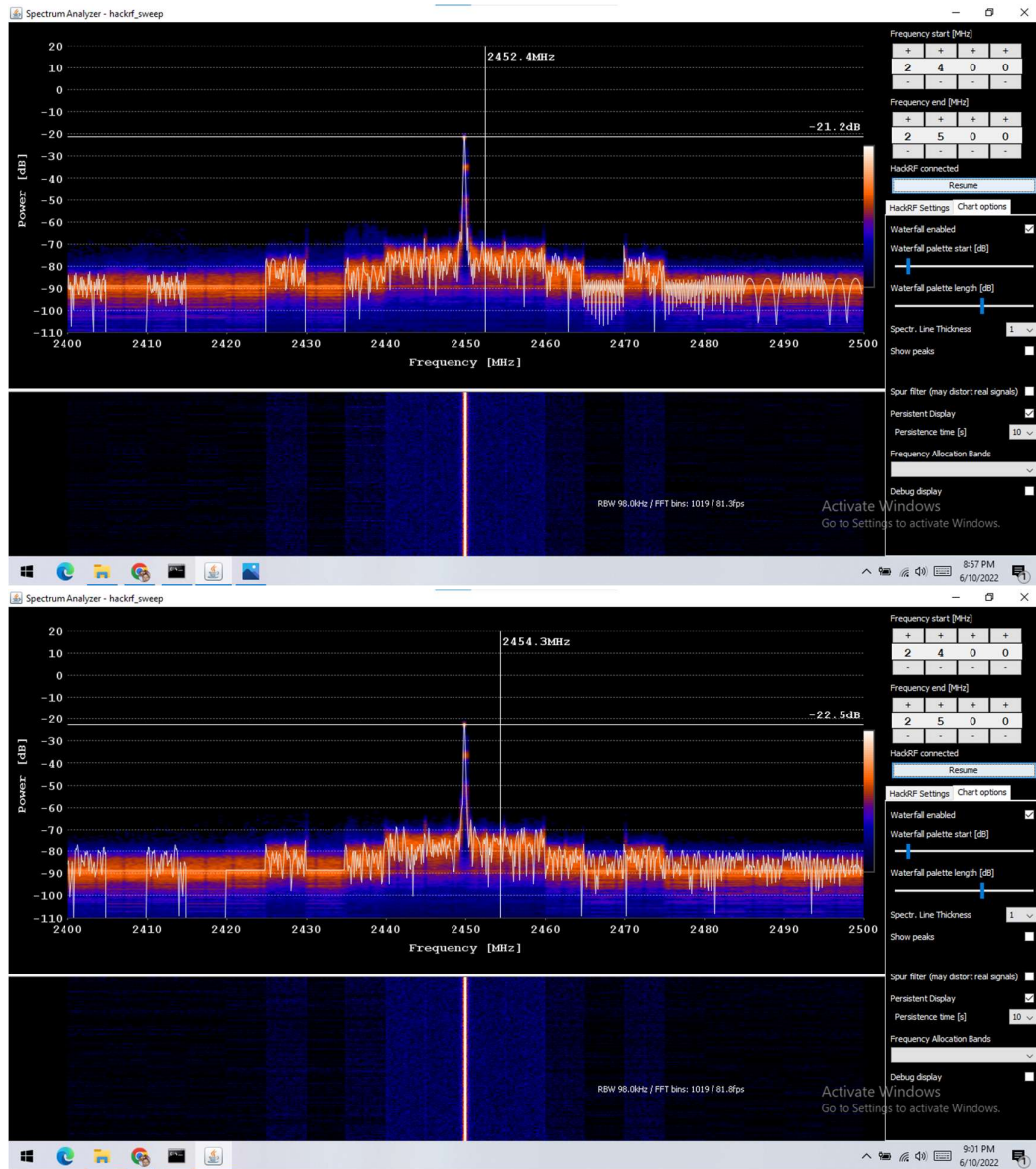
2. Hasil verifikasi sinyal FM pada jarak (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm, (e) 50 cm.

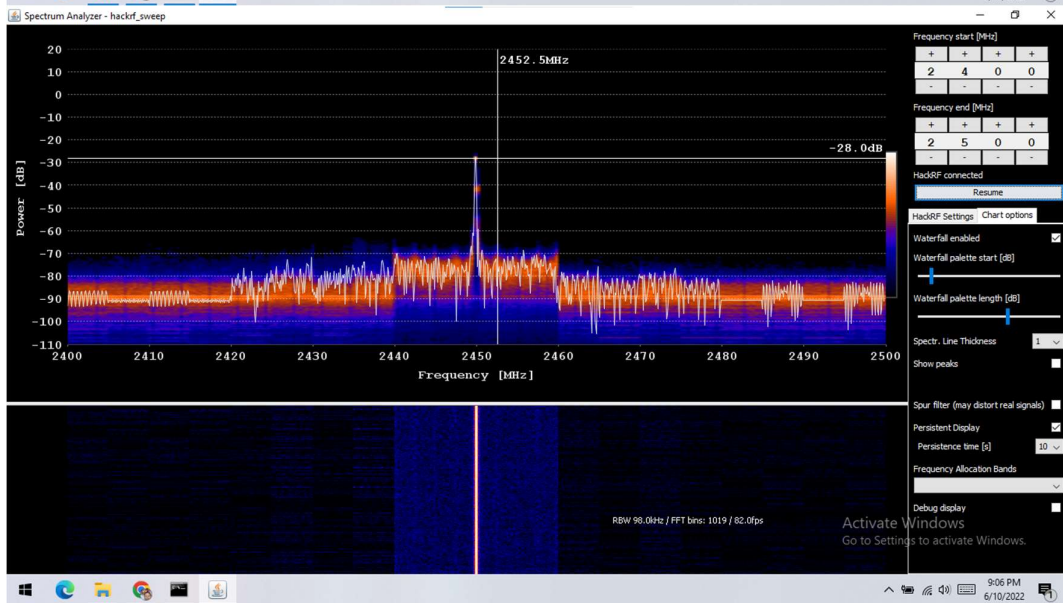
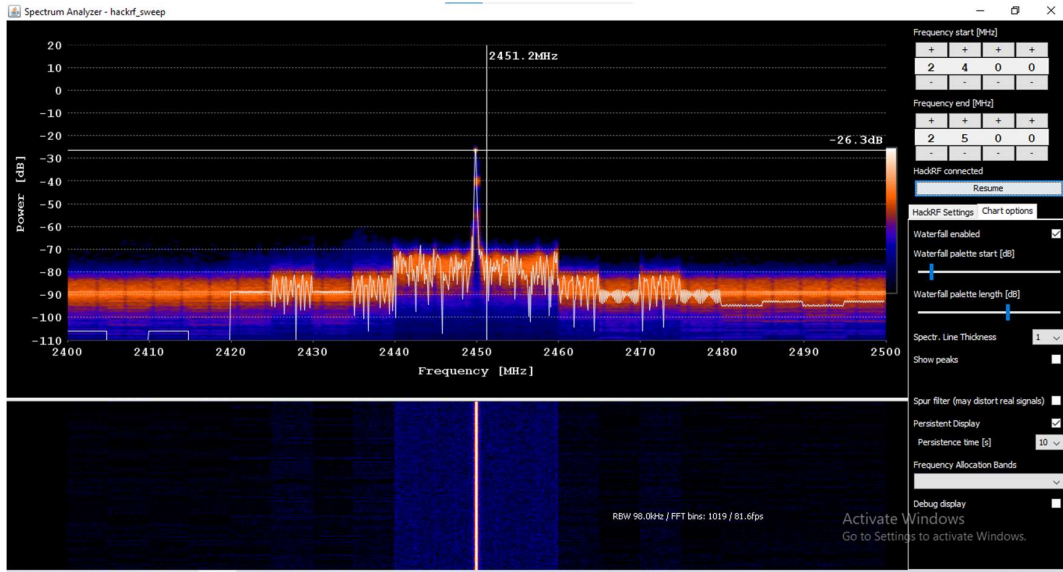


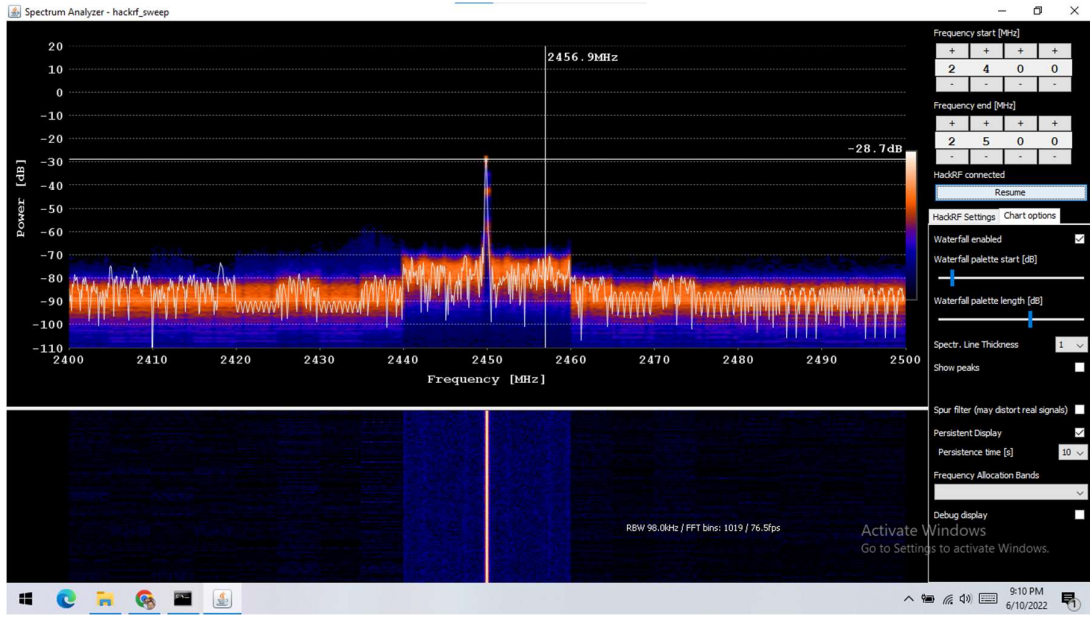




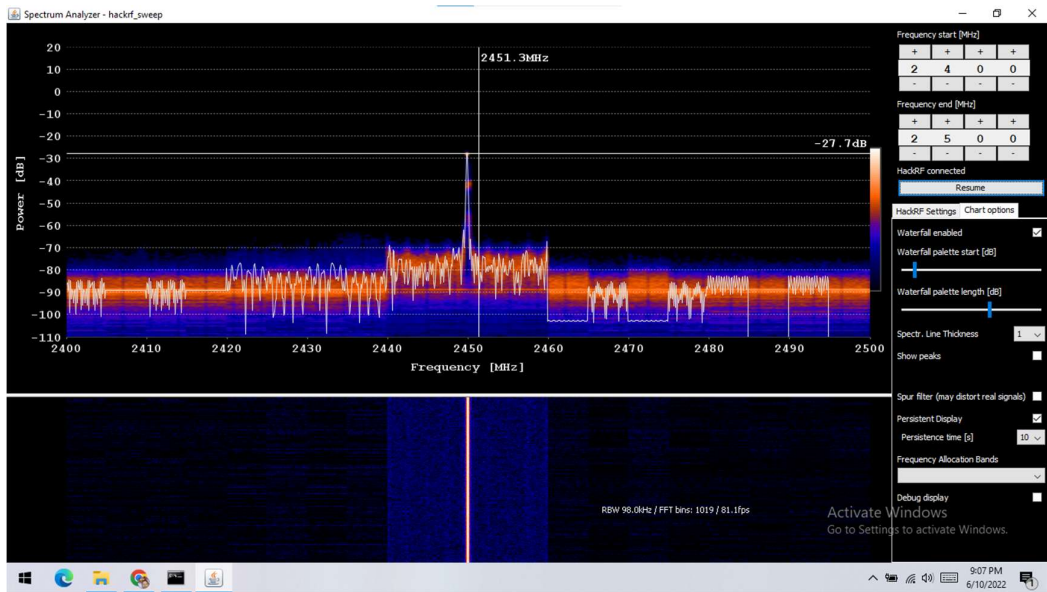
3. Hasil verifikasi sinyal 2-tone pada jarak (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm, (e) 50 cm.

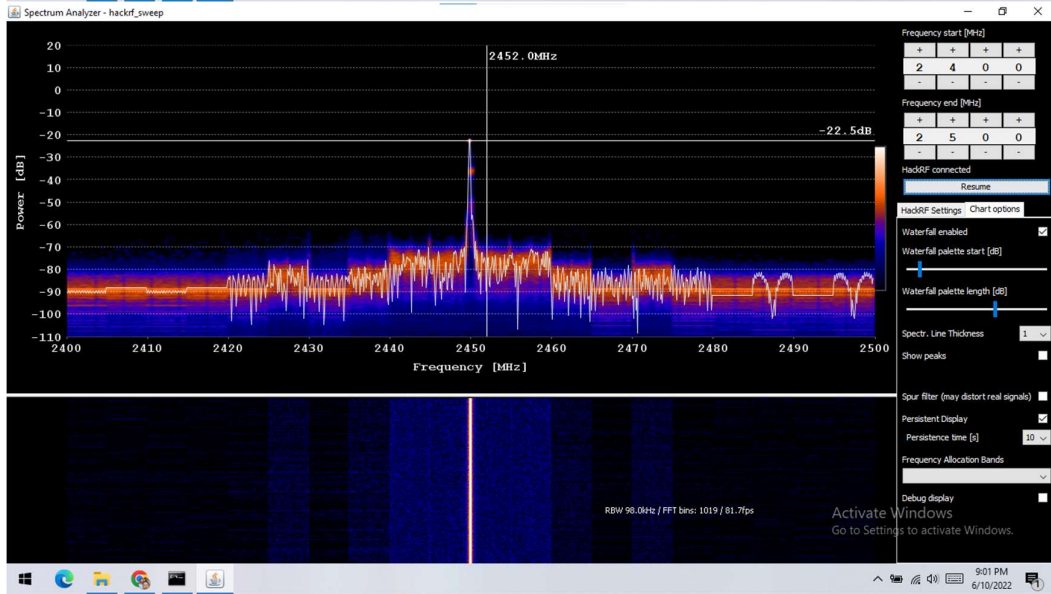
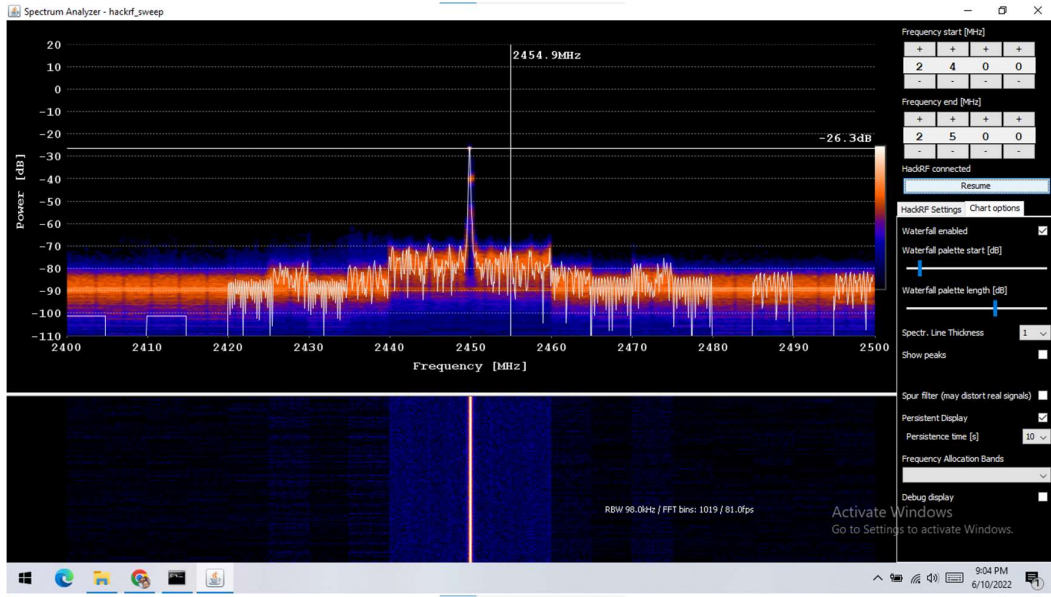




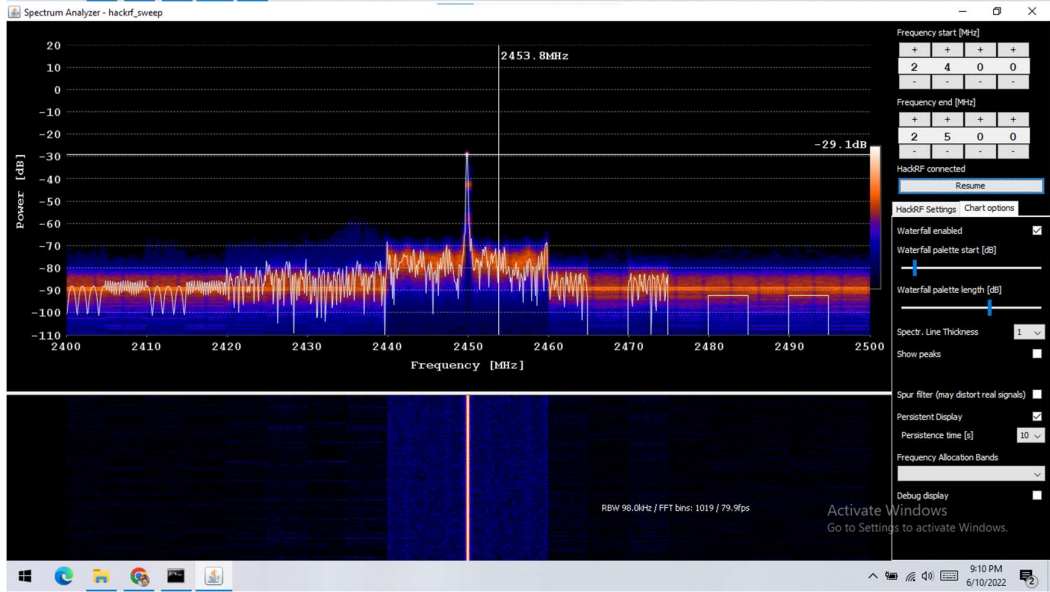
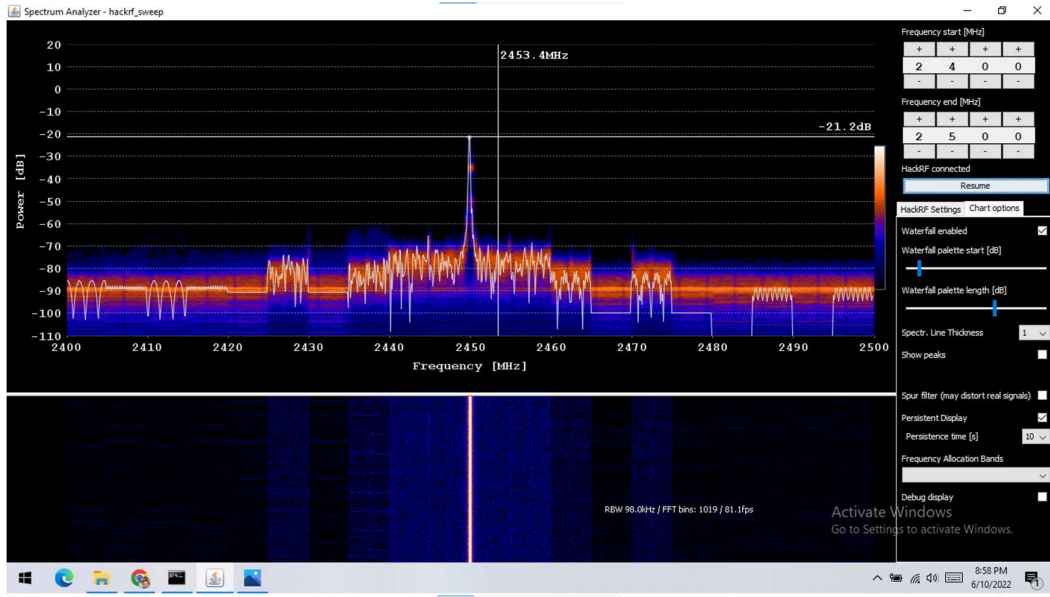


4. Hasil verifikasi sinyal 4-tone pada jarak (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm, (e) 50 cm.

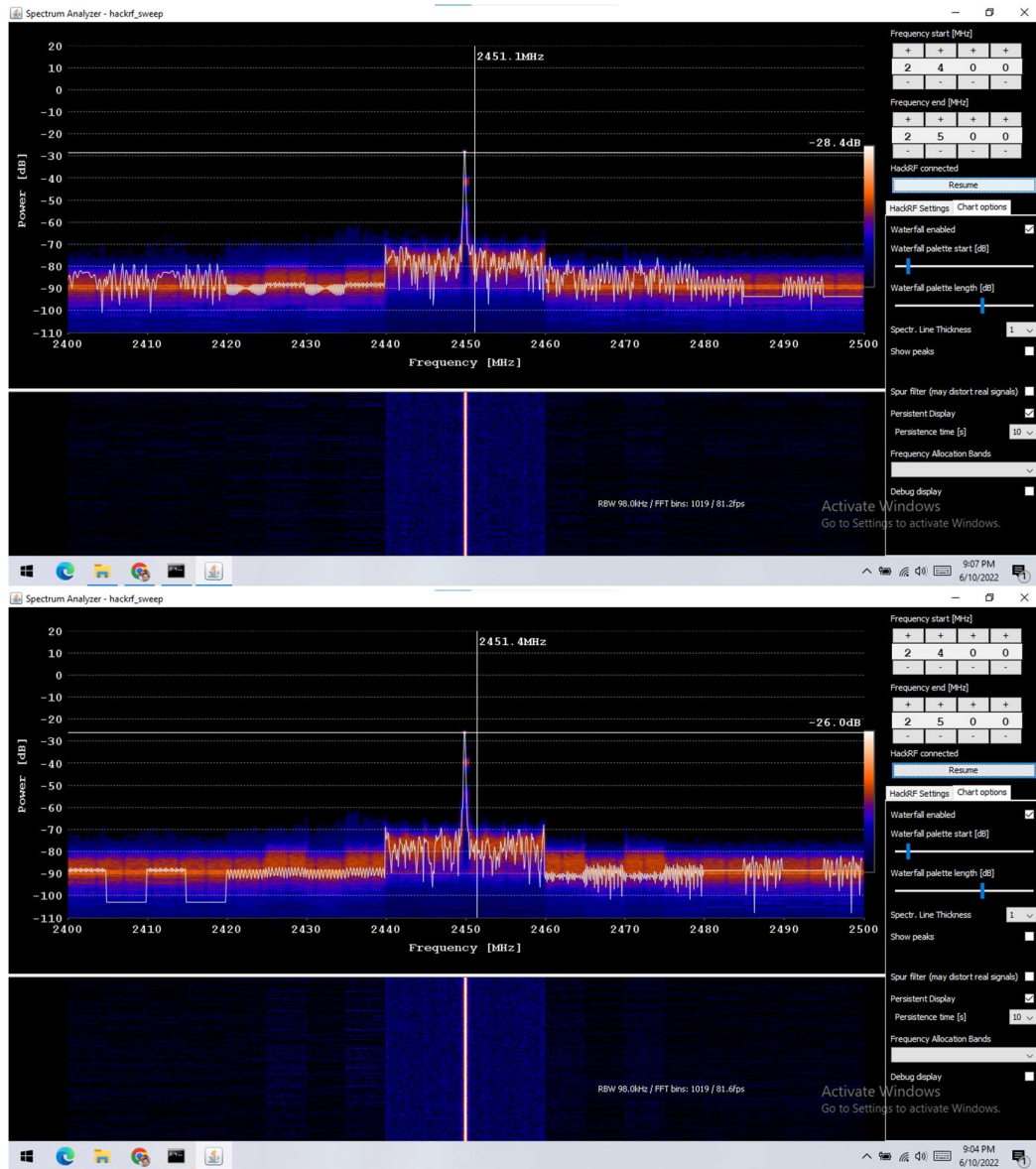


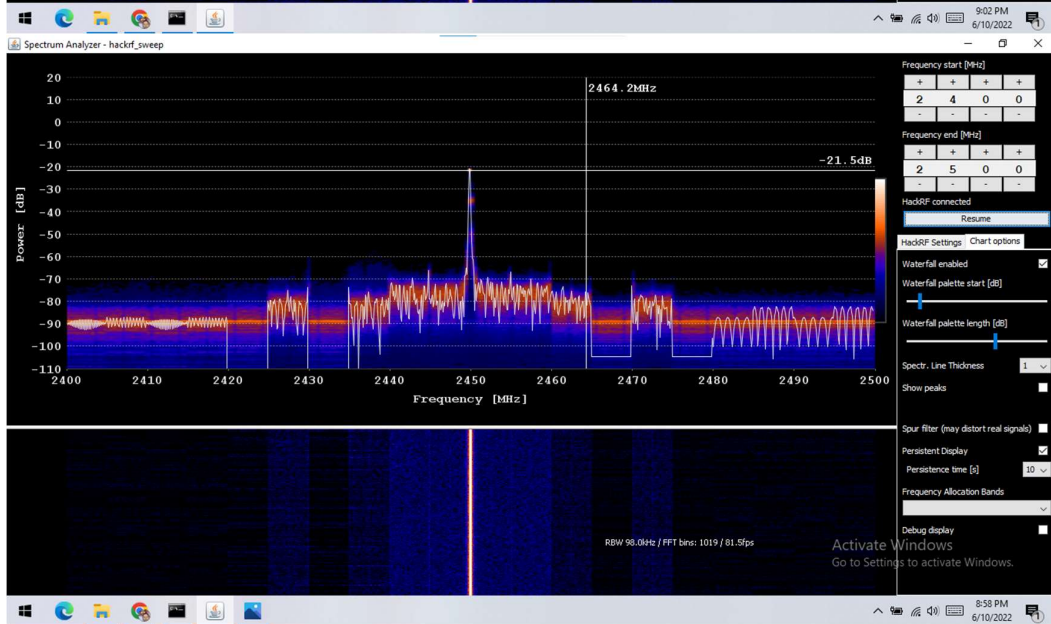
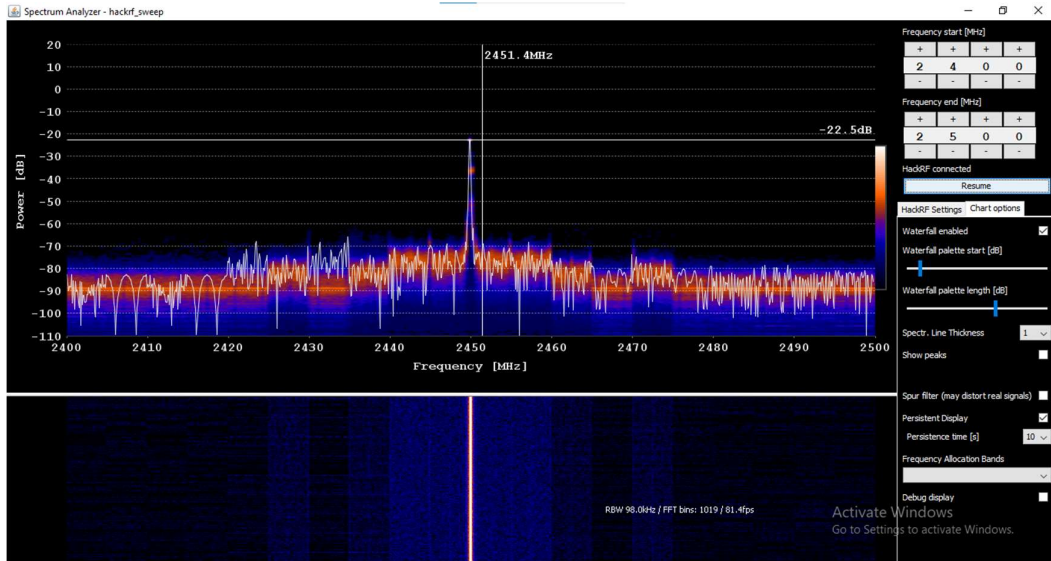


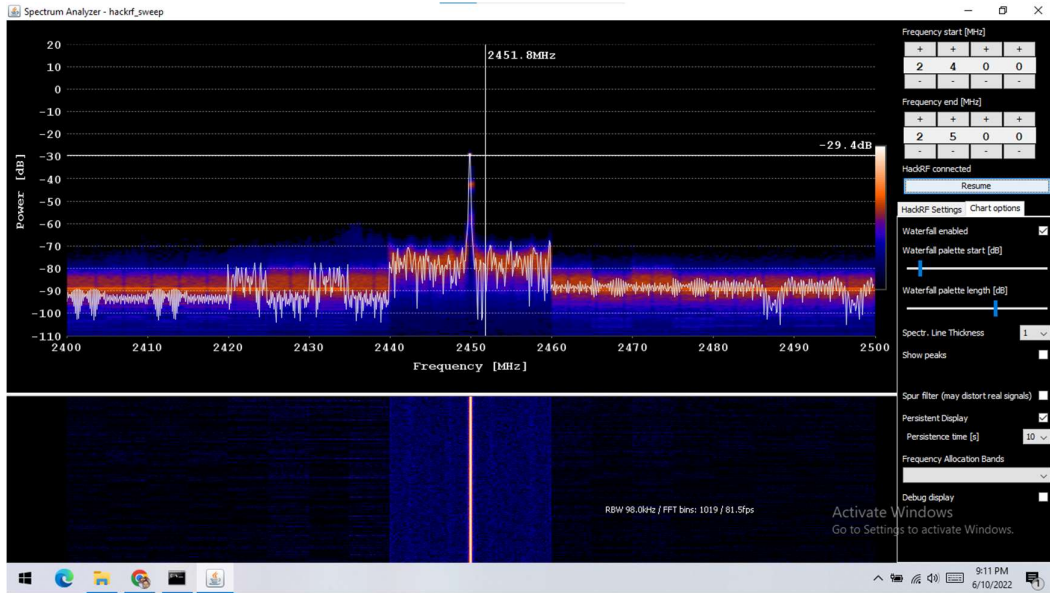




5. Hasil verifikasi sinyal Tanpa Modulasi pada jarak (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm, (e) 50 cm.









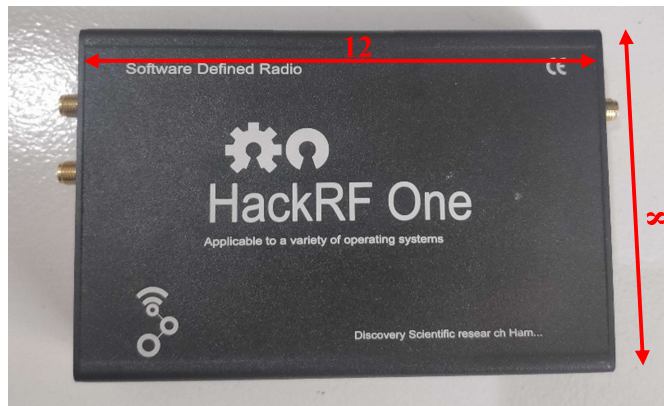
## LAMPIRAN B:

### Dokumentasi Perangkat Tx dan RX

1. Satu set SDR HackRF One, Beserta kelengkapannya



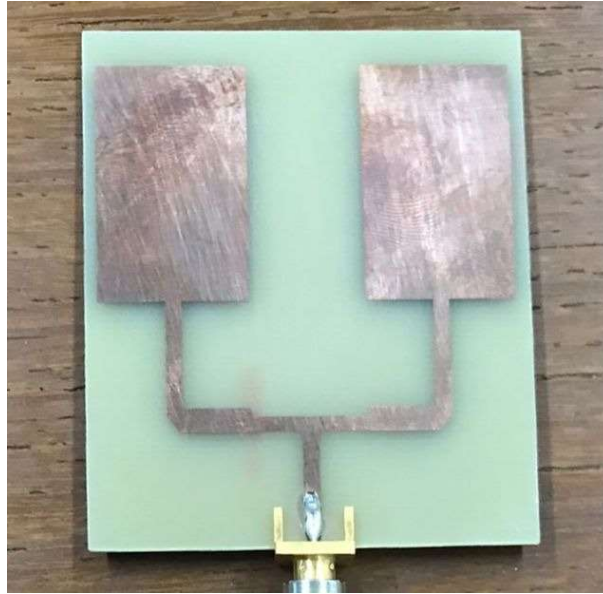
2. SDR tampak atas beserta ukuran fisik.



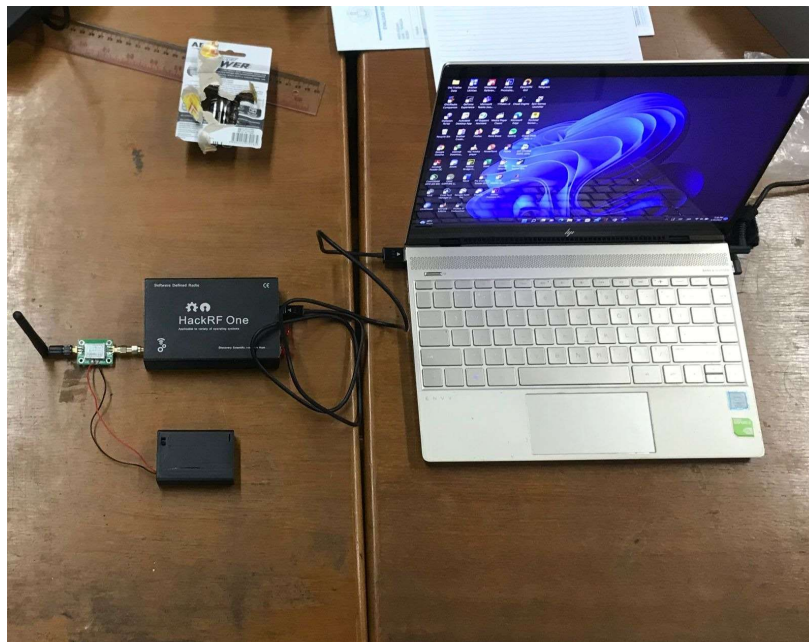
3. Antena yang digunakan sebagai pemancar (dipole 3 dBi)



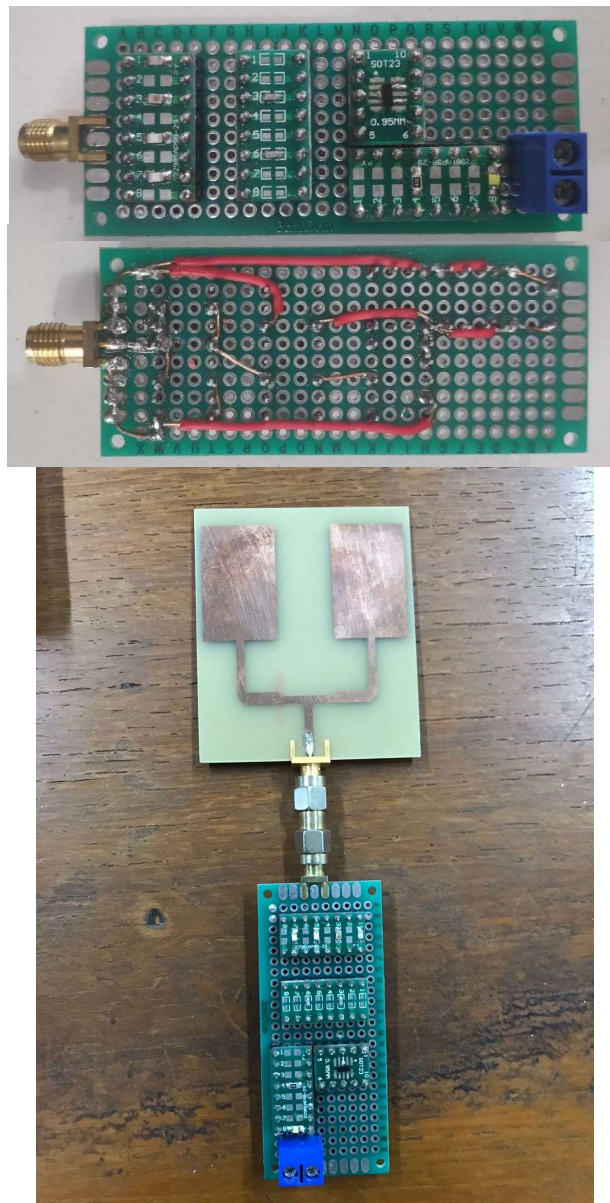
4. Antena Mikrostrip yang sudah di fabrikasi sebagai penerima



5. SDR yang sudah terkoneksi dengan antena, RF Amplifier, dan laptop



6. Rectenna dan saat sudah terpasang antenna



7. RF Amplifier 20 dB, terhubung dengan Supply tegangan 3 baterai AA





## LAMPIRAN C:

### Dokumentasi Kegiatan Pengukuran

#### 1. Pengukuran $P_{in RF}$



#### 2. Pengukuran $V_{out DC}$



## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Padang, 27 Juni 2001, merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Ulul Albab Pekalongan, SDN Kauman 1 Malang, SMP Sabilillah Malang dan SMAN 9 Malang. Setelah lulus dari SMAN tahun 2018, Penulis diterima di Departemen Teknik Elektro FTEIC - ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 07111840000172.

Di Departemen Teknik Elektro Penulis menjabat sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar pada Departemen, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS (HIMATEKTRO ITS) dan aktif sebagai Asisten Praktikum Dasar Sistem Jaringan Telekomunikasi.

Penulis juga mengikuti pelatihan yang diselenggarakan oleh PT.

Indosat Ooredoo Hutchinson yaitu Indosat Ooredoo *Innovation & Digital Excellence Academy* sebagai *talent* dan membuat *prototype* aplikasi “THE CITIZEN – 5G Smart City Monitoring System”.