



TESIS - EE185401

**RANCANG BANGUN *WIDEBAND* METAMATERIAL  
ABSORBER UNTUK APLIKASI *ANECHOIC*  
*CHAMBER* PADA PITA FREKUENSI S - C**

ARIF FAHMI  
07111750030004

DOSEN PEMBIMBING  
Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.  
Dr. Ir. Puji Handayani, M.T.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA





TESIS - EE185401

**RANCANG BANGUN *WIDEBAND* METAMATERIAL  
ABSORBER UNTUK APLIKASI *ANECHOIC*  
*CHAMBER* PADA PITA FREKUENSI S - C**

ARIF FAHMI  
07111750030004

DOSEN PEMBIMBING  
Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.  
Dr.Ir.Puji Handayani, M.T.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Arif Fahmi  
NRP. 07111750030004

Tanggal Ujian : 20 Desember 2018  
Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui oleh:

1. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP: 198210012003121002

(Pembimbing I)

2. Dr. Ir. Puji Handayani, M.T.  
NIP: 196605101992032002

(Pembimbing II)

3. Prof. Dr. Ir. Gamanfyo Hendrantoro, Ph.D.  
NIP: 197011111993031002

(Penguji)

4. Dr. Ir. Achmad Affandi, DEA  
NIP: 196510141990021001

(Penguji)

5. Dr. Istas Pratomo, ST., MT.  
NIP: 197903252003121001

(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP: 197002121995121001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

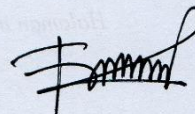


## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul "**RANCANG BANGUN *WIDEBAND* METAMATERIAL ABSORBER UNTUK APLIKASI *ANECHOIC CHAMBER* PADA PITA FREKUENSI S - C**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 20 Desember 2018



Arif Fahmi

NRP. 07111750030004

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# RANCANG BANGUN *WIDEBAND* METAMATERIAL ABSORBER UNTUK APLIKASI *ANECHOIC CHAMBER* PADA PITA FREKUENSI S - C

Nama mahasiswa : Arif Fahmi  
NRP : 07111750030004  
Pembimbing : 1. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.  
2. Dr. Ir. Puji Handayani, M.T

## ABSTRAK

Teknologi metamaterial absorber telah banyak menarik perhatian para peneliti karena memiliki sifat yang unik dalam mengurangi interferensi gelombang elektromagnetik pada instrumentasi telekomunikasi. Di lingkungan Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), pengujian parameter instrumentasi telekomunikasi baik berupa antena maupun perangkat telekomunikasi lainnya umumnya dilakukan secara *outdoor* agar didapatkan ambient *noise* dan interferensi gelombang pantul yang seminimal mungkin. Tetapi, tempat terbuka yang ideal susah ditemui dan tidak selalu ada sehingga dibutuhkan tempat pengujian *indoor* (*anechoic chamber*) dengan karakteristik *free-space loss condition* yang dapat menyerap semua gelombang datang. Dalam penelitian ini dilakukan perancangan metamaterial absorber untuk aplikasi *anechoic chamber*. Teknologi metamaterial absorber digunakan karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya *low profile* dan *low cost*. Pada proses perancangan desain metamaterial absorber penulis menggunakan dua metode berbeda yaitu *split ring slot* dan *equivalent circuit – split ring resonators*. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *Software CST Microwave Studio* diperoleh nilai rata - rata parameter  $S_{11} \leq -10$  dB, frekuensi resonan 1 GHz – 10 GHz, dan rata – rata *absorption rate* sebesar  $\geq 90\%$ . Puncak penyerapan sebesar 99.99% pada frekuensi 8.5 GHz. Dari hasil pengukuran diperoleh nilai rata – rata parameter  $S_{11} \leq -7$  dB, frekuensi resonan 1 GHz – 10 GHz, dan rata-rata *absorption rate* sebesar  $\geq 80\%$ . Puncak penyerapan sebesar 99% pada frekuensi 7.95 GHz.

**Kata kunci:** *Anechoic Chamber, Absorption rate, Bandwidth, Equivalent Circuit – Split Ring Resonators, Metamaterial Absorber, Parameter  $S_{11}$ .*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DESIGN OF WIDEBAND METAMATERIAL ABSORBER FOR ANECHOIC CHAMBER APPLICATION IN S - C BAND FREQUENCY**

By : Arif Fahmi  
Student Identity Number : 07111750030004  
Supervisor(s) : 1. Eko Setijadi,S.T.,M.T.,Ph.D.  
2. Dr.Ir.Puji Handayani,M.T

## **ABSTRACT**

*The metamaterial absorber technology has attracted the attention of many researchers because it has unique properties in reducing electromagnetic wave interference in telecommunications instrumentation. In the environment of the Ten November Institute of Technology (ITS), the testing of telecommunication instrumentation parameters in the form of antennas or other telecommunications devices is generally carried out outdoors to obtain minimum ambient noise and reflected wave interference. However, the ideal open space is difficult to find and does not always exist, so anechoic chamber is needed with the characteristics of free-space loss conditions that can absorb all incoming waves. In this study the design of metamaterial absorber was carried out for anechoic chamber applications. Metamaterial absorber technology is used because it has several advantages including low profile and low cost. In the process of designing the metamaterial absorber design the author uses two different methods, namely split ring slot and equivalent circuit - split ring resonators. Based on the simulation results using CST Microwave Studio Software, the average value of the  $S_{11} < -10$  dB parameter is obtained, the resonant frequency is 1 GHz - 10 GHz, and the average absorption rate is  $> 90\%$ . The absorption peak is 99.99% at 8.5 GHz frequency. From the measurement results, the average value of the parameters  $S_{11} < -7$  dB is obtained, the resonant frequency is 1 GHz - 10 GHz, and the average absorption rate is  $> 80\%$ . The absorption peak is 99% at 7.95 GHz.*

Key words: Anechoic Chamber, Absorption rate, Bandwidth, Equivalent Circuit - Split Ring Resonators, Metamaterial Absorber, Parameter  $S_{11}$ .

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR



Dengan memanjatkan Puji dan Syukur Kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat dan Karunianya pada penulis, akhirnya penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis yang berjudul: “ **RANCANG BANGUN *WIDEBAND* UNTUK APLIKASI *ANECHOIC CHAMBER* PADA PITA FREKUENSI S – C** ”

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Telekomunikasi Multimedia pada program studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tesis dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis berterima kasih kepada semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan kontribusi dalam menyelesaikan Tesis ini.

Selanjutnya ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Kedua Orang tua, Bapak H. Mastur dan Ibu H. Mufidah yang telah mendidik dan memberikan dukungan moral kepada penulis hingga dapat menyelesaikan pendidikan Magister Teknik (M.T.) dalam bidang Telekomunikasi Multimedia pada program studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
2. Saudari ku Mba Lailatul Maftuha, Spd. Serta keponakan ku Naura Aisyah Humaira yang telah menjadi motivasi hidup.
3. Bpk. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu. Dr. Ir. Puji Handayani, M.T. dengan segala hormat penulis mengucapkan banyak-banyak terima kasih atas bimbingan, arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi selama menjadi dosen wali, dosen pembimbing dan perkuliahan.
4. Seluruh Dosen program Pascasarjana Teknik Elektro khususnya dosen Telekomunikasi Multimedia yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk mendalami ilmu Telekomunikasi.

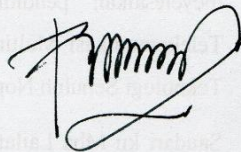
5. Rekan rekan mahasiswa S3, S2 dan S1 di lab B306, B301 dan B304, khususnya mahasiswa S2 seangkatan Mas Maulana, Mbak Fauziyah, Mbak Tiffany, Mbak Ika, Mbak Nimas.
6. Kepada semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dengan keterbatasan pengalaman, ilmu maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan dan pengembangan lanjut agar benar benar bermanfaat. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan karya ilmiah di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua terutama untuk pengembangan ilmu pengetahuan Telekomunikasi Multimedia.

Surabaya, 20 Desember 2018

Penulis



Arif Fahmi

( 07111750030004 )

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL .....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Kontribusi .....	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	5
2.2 Metamaterial.....	7
2.3 Elektromagnetik Absorber .....	8
2.3.1 Tipe Absorber .....	9
2.4 Metamaterial Absorber.....	10
2.5 Parameter Metamaterial Absorber.....	11
2.5.1 <i>Scattering Parameters</i> .....	11
2.5.2 <i>Absorption rate</i> .....	13
2.6 <i>Split Ring Slot</i> .....	14
2.7 <i>Split Ring Resonators</i> .....	16
2.7.1 <i>Equivalent Circuit – Split Ring Resonators (EC-SRR)</i> .....	16
2.8 Metode Pengukuran Metamaterial Absorber .....	20
2.8.1 <i>Near Field Test</i> .....	20

2.8.2	<i>Insertion Loss</i> .....	20
2.9	Aplikasi Metamaterial Absorber .....	22
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		25
3.1	Skema Penelitian.....	25
3.2	Diagram Alir Perancangan Metamaterial Absorber .....	26
3.3	Perancangan Metamaterial Absorber .....	28
3.4	Desain dan Simulasi Unit Sel Metamaterial Absorber .....	29
3.4.1	Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot Circular</i> .....	29
3.4.2	Unit Sel 2 <i>Split Ring Slot Square</i> .....	43
3.4.3	Unit Sel 3 Geometri <i>Circular 2 Gap</i> .....	49
3.4.4	Unit Sel 4 Geometri <i>Square 2 Gap</i> .....	51
3.4.5	Unit Sel 5 Geometri <i>Nested Circular 1 Gap</i> .....	53
3.4.6	Unit Sel 6 <i>Nested Circular 2 Gap</i> .....	56
3.4.7	Unit sel 7 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> .....	58
3.4.8	Unit Sel 8 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation</i> .....	61
3.4.9	Unit sel 9 Geometri <i>Nested Square Blend</i> .....	63
3.4.10	Unit sel 10 Geometri <i>Nested Square Blend Rotation</i> .....	67
3.4.11	Desain Unit Sel 11 .....	70
3.5	Metode Pengukuran Metamaterial Absorber .....	73
3.5.1	Skenario Pengukuran .....	74
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		77
4.1	Desain Unit Sel Terpilih .....	77
4.1.1	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 1 .....	77
4.1.2	Desain Unit sel 11 Modifikasi 2.....	82
4.1.3	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 3.....	86
4.1.4	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 4.....	90
4.1.5	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 5.....	95
4.1.6	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 6.....	99
4.1.7	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 7.....	104
4.1.8	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 8.....	108
4.1.9	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 9.....	112
4.1.10	Desain Unit Sel 11 Modifikasi 10.....	116

4.2	Desain Metamaterial Absorber Secara Priodik .....	121
4.3	Fabrikasi Metamaterial Absorber .....	124
4.4	Hasil Pengukuran Metamataterial Absorber .....	125
4.5	Analisa Hasil Pengukuran dan Simulasi .....	134
BAB 5 KESIMPULAN .....		137
5.1	Kesimpulan.....	137
5.2	Saran.....	137
DAFTAR PUSTAKA.....		139
LAMPIRAN .....		145
DAFTAR RIWAT HIDUP.....		153

\

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Material Berdasarkan dari $\mu$ dan $\epsilon$ .....	7
Gambar 2.2 Unit Sel Metamaterial Absorber .....	10
Gambar 2.3 <i>Two Port Network</i> .....	11
Gambar 2.4 Geometri <i>Split Ring Slot Circular</i> .....	14
Gambar 2.5 Geometri <i>Split Ring Slot Square</i> .....	15
Gambar 2.6 Struktur <i>Singel Ring Resonators Circular</i> .....	17
Gambar 2.7 <i>Equivalent Circuit - Split Ring Resonators Circular</i> .....	17
Gambar 2.8 Struktur <i>Single Ring Resonators Square</i> .....	19
Gambar 2.9 Ilustrasi skema <i>set-up</i> pengukuran .....	21
Gambar 3.1 Skema Penelitian .....	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Perancangan Metamaterial Absorber .....	27
Gambar 3.3 Desain Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot Circular</i> .....	30
Gambar 3.4 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot</i> .....	31
Gambar 3.5 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot Circular</i> .....	31
Gambar 3.6 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 1 dengan Teknik <i>Split Ring Slot Circular</i> ..	32
Gambar 3.7 Desain Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> .....	33
Gambar 3.8 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> .....	34
Gambar 3.9 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> .....	34
Gambar 3.10 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> Penambahan Jari-jari luar ( $R_0$ ) .....	36
Gambar 3.11 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> Penambahan Jari-jari Luar ( $R_0$ ) .....	37
Gambar 3.12 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> Pengurangan Jari-jari luar ( $R_0$ ) .....	38
Gambar 3.13 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 1 Geometri <i>Circular EC-SRR</i> Pengurangan Jari-jari Luar ( $R_0$ ) .....	38
Gambar 3.14 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 1 <i>Circular EC-SRR</i> Lebar <i>Gap</i> .....	39
Gambar 3.15 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 1 <i>Circular EC-SRR</i> Lebar <i>Gap</i> .....	40
Gambar 3.16 Desain Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot Square</i> .....	43
Gambar 3.17 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit Sel 2 <i>Split Ring Slot</i> .....	44
Gambar 3.18 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 1 <i>Split Ring Slot Square</i> .....	44
Gambar 3.19 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 2 <i>Split Ring Slot Square</i> .....	45
Gambar 3.20 Desain Unit Sel 1 Geometri <i>Square EC-SRR</i> .....	46
Gambar 3.21 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 2 Geometri <i>Square EC-SRR</i> .....	47
Gambar 3.22 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 2 Geometri <i>Square EC-SRR</i> .....	48
Gambar 3.23 Desain Unit Sel 3 Geometri <i>Circular 2 Gap</i> .....	49
Gambar 3.24 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 3 Geometri <i>Circular 2 Gap</i> .....	50
Gambar 3.25 <i>Absorption rate</i> unit sel 3 Geometri <i>Circular 2 Gap</i> .....	50

Gambar 3.26 Desain Unit Sel 4 Geometri <i>Square Gap 2</i> .....	51
Gambar 3.27 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 4 Geometri <i>Square Gap 2</i> .....	52
Gambar 3.28 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 4 Geometri <i>Square Gap 2</i> .....	52
Gambar 3.29 Desain Unit Sel 5 Geometri <i>Nested Circular 1 Gap</i> .....	53
Gambar 3.30 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit Sel 5 .....	54
Gambar 3.31 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 5 Geometri <i>Nested Circular 1 Gap</i> 54	
Gambar 3.32 <i>Absorption rate</i> Unit sel 5 Geometri <i>Nested Circular 1 Gap</i> .....	55
Gambar 3.33 Desain unit sel 6 Geometri <i>Nested Circular 2 Gap</i> .....	56
Gambar 3.34 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 6 Geometri <i>Nested Circular 2 Gap</i> 57	
Gambar 3.35 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 6 Geometri <i>Nested Circular 2 Gap</i> .....	58
Gambar 3.36 Desain Unit sel 7 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> .....	58
Gambar 3.37 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit Sel 7 .....	59
Gambar 3.38 Parameter $S_{11}$ Unit Sel 7 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> ....	60
Gambar 3.39 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 7 <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> .....	61
Gambar 3.40 Desain Unit Sel 8 <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation</i> .....	61
Gambar 3.41 Parameter $S_{11}$ Unit Sel 8 <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation</i> ....	62
Gambar 3.42 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 8 <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation</i> ..	63
Gambar 3.43 Desain Unit Sel 9 Geometri <i>Nested Square Blend</i> .....	63
Gambar 3.44 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit sel 9 .....	64
Gambar 3.45 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 9 <i>Nested Square Blend</i> .....	65
Gambar 3.46 <i>Absorption rate</i> Unit sel 9 <i>Nested Square Blend</i> .....	66
Gambar 3.47 Desain Unit Sel 10 Geometri <i>Nested Square Blend</i> .....	67
Gambar 3.48 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 10 <i>Nested Square Blend</i> .....	68
Gambar 3.49 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 10 Geometri <i>Nested Square Blend</i> .....	69
Gambar 3.50 Desain Unit Sel 11.....	70
Gambar 3.51 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit sel 11 .....	71
Gambar 3.52 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 .....	71
Gambar 3.53 <i>Absorption rate</i> Unit sel 11 .....	72
Gambar 3.54 Diagram Alir Pengukuran Parameter Metamaterial Absorber .....	73
Gambar 3.55 Skenario Pengukuran Metamaterial Absorber .....	74
Gambar 4.1 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 1 .....	77
Gambar 4.2 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 1.....	78
Gambar 4.3 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 1 .....	79
Gambar 4.4 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1 .....	79
Gambar 4.5 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1 Susunan Paralel .....	80
Gambar 4.6 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1 Susunan Seri.....	81
Gambar 4.7 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 2 .....	82
Gambar 4.8 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 2.....	83
Gambar 4.9 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 2.....	83
Gambar 4.10 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2.....	84
Gambar 4.11 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2 Susunan Paralel .....	85

Gambar 4.12 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2 Susunan Seri .....	85
Gambar 4.13 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 3 .....	86
Gambar 4.14 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 3 .....	87
Gambar 4.15 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 3 .....	88
Gambar 4.16 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3 .....	88
Gambar 4.17 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3 Susunan Paralel.....	89
Gambar 4.18 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3 Susunan Seri .....	89
Gambar 4.19 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 4 .....	90
Gambar 4.20 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 4 .....	91
Gambar 4.21 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 4 .....	92
Gambar 4.22 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4 .....	92
Gambar 4.23 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4 Susunan Paralel.....	93
Gambar 4.24 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4 Susunan Seri .....	94
Gambar 4.25 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 5 .....	95
Gambar 4.26 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 5 .....	96
Gambar 4.27 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 5 .....	96
Gambar 4.28 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5 .....	97
Gambar 4.29 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5 Susunan Paralel.....	98
Gambar 4.30 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5 Susunan Seri .....	98
Gambar 4.31 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 6 .....	99
Gambar 4.32 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 6 .....	100
Gambar 4.33 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 6 .....	101
Gambar 4.34 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6 .....	101
Gambar 4.35 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6 Susunan Paralel....	102
Gambar 4.36 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6 Susunan Seri .....	103
Gambar 4.37 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 7 .....	104
Gambar 4.38 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 7 .....	105
Gambar 4.39 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 7 .....	105
Gambar 4.40 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7 .....	106
Gambar 4.41 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7 Susunan Paralel....	107
Gambar 4.42 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7 Susunan Seri .....	107
Gambar 4.43 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 8 .....	108
Gambar 4.44 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 8 .....	109
Gambar 4.45 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 8 .....	110
Gambar 4.46 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8 .....	110
Gambar 4.47 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8 Susunan Paralel....	111
Gambar 4.48 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8 Susunan Seri .....	111
Gambar 4.49 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 9 .....	112
Gambar 4.50 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 9 .....	113
Gambar 4.51 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 9 .....	114
Gambar 4.52 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9 .....	114



Gambar 4.53 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9 Susunan Paralel ...	115
Gambar 4.54 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9 Susunan Seri.....	115
Gambar 4.55 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 10.....	116
Gambar 4.56 Grafik Parameter $S_{11}$ Unit Sel 11 Modifikasi 10.....	117
Gambar 4.57 <i>Absorption rate</i> Unit Sel 11 Modifikasi 10.....	118
Gambar 4.58 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10.....	118
Gambar 4.59 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10 Susunan Paralel .	119
Gambar 4.60 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10 Susunan Seri.....	120
Gambar 4.61 Penyusunan Unit Sel Secara Periodik .....	121
Gambar 4.62 <i>Set-up Periodic boundary condition</i> Unit Sel Periodik.....	122
Gambar 4.63 Desain Unit sel Priodik Metamaterial Absorber .....	122
Gambar 4.64 Grafik Parameter $S_{11}$ Metamaterial Absorber Unit sel Periodik ...	123
Gambar 4.65 <i>Absorption rate</i> Metamaterial Absorber Unit sel Periodik .....	123
Gambar 4.66 Desain Priodik Metamaterial Absorber Hasil Fabrikasi .....	124
Gambar 4.67 Hasil Pengukuran Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 1 GHz - 3 GHz menggunakan <i>Vector Network Analyzer</i> (VNA).....	125
Gambar 4.68 Grafik Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 1 GHz - 3 GHz.....	126
Gambar 4.69 <i>Absorption rate Range</i> frekuensi 1 GHz - 3 GHz .....	126
Gambar 4.70 Hasil Pengukuran Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 3 GHz - 5 GHz menggunakan <i>Vector Network Analyzer</i> (VNA).....	127
Gambar 4.71 Grafik Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 3 GHz - 5 GHz.....	127
Gambar 4.72 <i>Absorption rate Range</i> frekuensi 3 GHz - 5 GHz .....	128
Gambar 4.73 Hasil Pengukuran Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 5 GHz - 7 GHz menggunakan <i>Vector Network Analyzer</i> (VNA).....	129
Gambar 4.74 Grafik Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 5 GHz - 7 GHz.....	129
Gambar 4.75 <i>Absorption rate Range</i> frekuensi 5 GHz - 7 GHz .....	130
Gambar 4.76 Hasil Pengukuran Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 7 GHz - 12 GHz menggunakan <i>Vector Network Analyzer</i> (VNA).....	131
Gambar 4.77 Grafik Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 7 GHz - 12 GHz.....	132
Gambar 4.78 <i>Absorption rate Range</i> frekuensi 7 GHz - 12 GHz .....	132
Gambar 4.79 Grafik Parameter $S_{11}$ <i>Range</i> frekuensi 1 GHz - 12 GHz.....	133
Gambar 4.80 <i>Absorption rate Range</i> frekuensi 1 GHz - 12 GHz .....	133
Gambar 4.81 Perbandingan Parameter $S_{11}$ Hasil Pengukuran dan Simulasi .....	134
Gambar 4.82 Perbandingan <i>Absorption rate</i> Hasil Pengukuran dan Simulasi ...	134

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kajian Penelitian Terkait .....	5
Tabel 2.2 Aplikasi Teknologi Metamaterial Absorber .....	22
Tabel 3.1 Spesifikasi Perancangan Metamaterial Absorber .....	28
Tabel 3.2 Spesifikasi Bahan Metamaterial Absorber.....	29
Tabel 3.3 Variabel Dimensi Unit Sel 1 dengan Metode <i>Split Ring Slot</i> .....	30
Tabel 3.4 Variabel Dimensi Unit Sel 1 dengan Metode EC-SRR .....	33
Tabel 3.5 Spesifikasi Dimensi Penambahan Jari-jari Luar Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekuivalen (LC).....	40
Tabel 3.6 Spesifikasi Dimensi Pengurangan Jari-jari Luar Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekuivalen (LC) .....	41
Tabel 3.7 Spesifikasi Dimensi Penambahan Lebar <i>Gap</i> Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekuivalen (LC).....	42
Tabel 3.8 Variabel Dimensi Unit Sel 2 dengan Teknik <i>Split Ring Slot</i> .....	43
Tabel 3.9 Variabel Dimensi Unit Sel 2 dengan Teknik EC-SRR .....	45
Tabel 3.10 Variabel Dimensi Unit Sel 3 Geometri <i>Circular 2 Gap</i> .....	49
Tabel 3.11 Variabel Dimensi Unit Sel 4 Geometri <i>Square 2 Gap</i> .....	52
Tabel 3.12 Variabel Dimensi Unit Sel 5 Geometri <i>Nested Circular 1 Gap</i> .....	53
Tabel 3.13 Variabel Dimensi Unit Sel 6 Geometri <i>Nested Circular 2 Gap</i> .....	56
Tabel 3.14 Variabel Dimensi Unit Sel 7 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> .	59
Tabel 3.15 Variabel Dimensi Unit Sel 8 Geometri <i>Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup></i> .	62
Tabel 3.16 Variabel Dimensi Unit Sel 9 <i>Nested Square Blend</i> .....	64
Tabel 3.17 Variabel Dimensi Unit Sel 10 Geometri <i>Nested Square Blend</i> .....	67
Tabel 3.18 Variabel Dimensi Unit Sel 11 .....	70
Tabel 4.1 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 1.....	78
Tabel 4.2 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 2.....	82
Tabel 4.3 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 3.....	87
Tabel 4.4 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 4.....	91
Tabel 4.5 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 5.....	95
Tabel 4.6 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 6.....	99
Tabel 4.7 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 7.....	104
Tabel 4.8 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 8.....	109
Tabel 4.9 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 9.....	113
Tabel 4.10 Variabel Unit sel 11 Modifikasi 10.....	117
Tabel 4.11 Perbandingan Parameter Metamaterial Absorber Hasil Simulasi dan Pengukuran.....	135

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi metamaterial absorber telah banyak menarik perhatian para insiyur khususnya dibidang instrumen telekomunikasi dan *electromagnetic device* [1-4], salah satunya teknologi elektromagnetik absorber konvensional yang sering diterapkan adalah *microwave pyramid absorber* [5]. Di lingkungan Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), pengujian parameter instrumentasi telekomunikasi baik berupa antena maupun perangkat telekomunikasi lainnya umumnya dilakukan secara *outdoor* agar didapatkan *ambient noise* dan interferensi gelombang pantul yang seminimal mungkin. Tetapi, tempat terbuka yang ideal susah ditemui dan tidak selalu ada sehingga dibutuhkan tempat pengujian *indoor (anechoic chamber)* dengan karakteristik *free-space loss condition* yang dapat menyerap semua gelombang datang [6].

Teknologi elektromagnetik absorber telah mengalami beberapa kemajuan diantaranya dengan penggunaan metamaterial absorber (MMA) terstruktur untuk menciptakan *absorption rate* yang optimal pada skala frekuensi *Gigahertz* maupun *Terahertz* [7-9]. MMA merupakan suatu struktur buatan yang dirancang untuk memiliki sifat yang tidak tersedia di alam dan dapat menyerap gelombang elektromagnetik secara sempurna. Secara umum metamaterial absorber memiliki tiga struktur *layer*, terdiri dari dua *layer* metal berupa *layer ground* dan *layer resonator* yang dipisahkan oleh satu *layer dielectric (substrate)* [10].

Teknologi metamaterial absorber digunakan untuk aplikasi *anechoic chamber* karena memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah ketebalan yang tipis, *absorption rate* yang optimal, dan fabrikasi yang efisien. Dibandingkan dengan absorber konvensional, struktur metamaterial dapat memberikan beberapa solusi untuk memperbaiki absorber konvensional. Akan tetapi terdapat kelemahan yang sering dialami dalam perancangan metamaterial absorber ialah *bandwidth* yang cukup sempit, sehingga diperlukan suatu teknik untuk meningkatkan *bandwidth* dan *absorbption rate* dari metamaterial absorber perancangan.

Pada penelitian thesis ini, dibuat suatu rancang bangun metamaterial absorber untuk aplikasi *anechoic chamber* yang memiliki kinerja di frekuensi *wideband* dengan tingkat absorpsi yang optimal menggunakan metode *Split ring slot* (SRR) dan *equivalent circuit – Split ring resonators* (EC-SRR) [11-12]. Sehingga dari latar belakang tersebut diusulkan sebuah perancangan metamaterial absorber yang berjudul “Rancang Bangun *Wideband* Metamaterial Absorber Untuk Aplikasi *Anechoic Chamber* pada Pita Frekuensi S - C”.

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian pada thesis ini dilakukan melalui perumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana metode perancangan struktur dimensi metamaterial absorber untuk pita frekuensi S – C ?
2. Bagaimana teknik penyusunan unit sel metamaterial absorber secara periodik untuk memperoleh tingkat *absorption rate* maksimal dan *bandwidth* yang lebar ?
3. Bagaimana perbandingan kinerja parameter metamaterial absorber hasil simulasi dengan hasil pengukuran ?

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mampu merancang bahan penyerap gelombang elektromagnetik (EM) yang *low profile*, *low cost*, serta kompatibel sebagai bahan dalam pembuatan *anechoic chamber*.
2. Mampu merancang desain elektromagnetik absorber berbasis metamaterial yang memiliki pita frekuensi operasi S - C dengan *absorption rate* yang optimal.

#### 1.4 Batasan Masalah

1. Rentang frekuensi operasi yang digunakan menggunakan spektrum pita frekuensi S – C.
2. Bahan yang digunakan dalam fabrikasi menggunakan substrat FR-4, dengan ketebalan (1,6 – 3,3 mm) dan tebal konduktor *copper* sebesar 0.035 mm.
3. Parameter yang digunakan dalam simulasi ialah nilai parameter  $S_{11}$  dan *absorption rate* dalam rancangan unit sel.
4. Parameter *absorption rate* dihitung dari  $S_{11}$  yang bernilai  $\leq -7$  dB (dengan asumsi tidak ada daya transmisi yang tembus) karena nilai *absorption rate*  $\geq 80\%$ .

#### 1.5 Kontribusi

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi dunia pendidikan khususnya institusi pendidikan tinggi yang sering membuat penelitian tentang bidang telekomunikasi yang membutuhkan pengukuran performa rancangan peralatan telekomunikasi misal pengukuran performansi antena yang membutuhkan pengukuran dalam suatu ruangan *anechoic chamber*. Pembuatan ruangan *anechoic chamber* seringkali terhambat masalah biaya yang mahal, dengan adanya metamaterial absorber sebagai alternatif bahan penyerap di dinding ruangan diharapkan mampu menggantikan fungsi bahan penyerap konvensional yang *low profile*, *low cost* serta kompatibel namun memiliki performa *absorption rate* optimal.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Kajian Penelitian Terkait

Kajian penelitian terkait menjadi salah satu bahan rujukan penulis dalam membuat rancang bangun metamaterial absorber. Untuk mengetahui deskripsi dari nama, sumber, judul, dan hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Kajian Penelitian Terkait

No	Nama	Judul	Sumber
1	Wang Xin, Zhang Binzhen, Wang Wanjun	<i>Design and Characteristic of an Ultrabroadband Metamaterial Microwave Absorber [13]</i>	W. Xin, Z. Binzhen, W. Wanjun, W. Junlin and D. Junping, "Design and Characterization of an Ultrabroadband Metamaterial Microwave Absorber," in IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 3, pp. 113, June 2017, Art no. 4600213.
2	S. Bhattacharyya, S. Ghosh and K. V. Srivastva	<i>A microwave metamaterial absorber with wide bandwidth [14]</i>	S. Bhattacharyya, S. Ghosh and K. V. Srivastva, "A microwave metamaterial absorber with wide bandwidth," 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), Seoul, 2016, pp. 1215-1218.
3	S. Ma, X. Hou, Q. Zhang, Y. Yang and Y. Tang	<i>Ultra-wideband metamaterial absorber using three-layer ring and patch resonators [15]</i>	S. Ma, X. Hou, Q. Zhang, Y. Yang and Y. Tang, "Ultra-wideband metamaterial absorber using three-layer ring and patch resonators," 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Chengdu, 2018, pp. 1-3
4	B. Xue, Y. Hu, B. Wu, L. Chen and W. Zhang	<i>A Wideband Transparent Absorber for Microwave</i>	B. Xue, Y. Hu, B. Wu, L. Chen and W. Zhang, "A Wideband Transparent Absorber for Microwave and Millimeter Wave

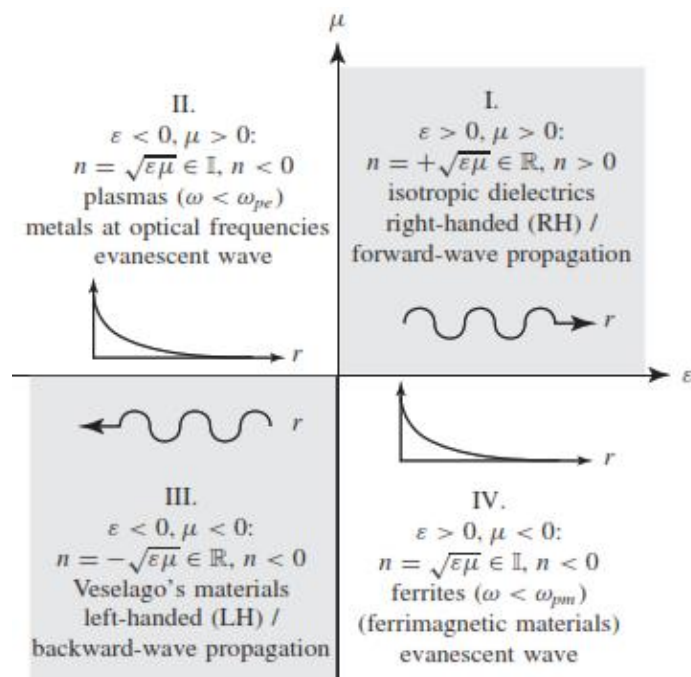
		<i>and Millimeter Wave Application [16]</i>	<i>Application," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 2017, pp. 1-3</i>
5	H. S. Lee and H. M. Lee	<i>Metamaterial absorber with extended bandwidth configuration [17]</i>	H. S. Lee and H. M. Lee, " <i>Metamaterial absorber with extended bandwidth configuration</i> ," 2013 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Karlsruhe, 2013, pp. 295-297
6	T. T. Nguyen and S. Lim	<i>Bandwidth enhancement of metamaterial absorber using double resonance [18]</i>	T. T. Nguyen and S. Lim, " <i>Bandwidth enhancement of metamaterial absorber using double resonance</i> ," 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpur, 2017, pp. 380-382.

Referensi [13] meneliti tentang desain *ultrabroadband* metamaterial absorber (MMA) pada frekuensi gelombang mikro. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh nilai rata-rata parameter *absorption rate* sebesar 83% dengan rentang frekuensi resonan 20,59 GHz - 43,74 GHz. Referensi [14] meneliti tentang perancangan *microwave wideband* metamaterial absorber. Berdasarkan penelitian tersebut diperoleh *width half maxima bandwidth* sebesar 10.90 GHz dari 5.94 GHz - 16.84 GHz. Referensi [15] meneliti tentang *ultra-wideband* metamaterial absorber menggunakan tiga *layer patch ring resonators*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh parameter *absorption bandwidth* sebesar 22.39 GHz dengan *range* frekuensi 6.37 GHz sampai 28.76 GHz. Referensi [16] meneliti tentang *wideband* metamaterial absorber untuk aplikasi gelombang mikro dan gelombang milimeter, berdasarkan hasil simulasi diperoleh *range* frekuensi resonan dari 10 GHz sampai 18 GHz. Referensi [17] meneliti tentang metode konfigurasi peningkatan *bandwidth* pada metamaterial absorber. Hasil simulasi menunjukkan parameter *peak absorption rate* sebesar 93% pada frekuensi resonan 10 GHz dengan *full width at half maximum (FWHM) bandwidth* sebesar 940 MHz. Referensi [18] meneliti

tentang peningkatan *bandwidth* metamaterial absorber dengan *double resonance*, berdasarkan penelitian tersebut untuk meningkatkan sebuah *bandwidth* metamaterial absorber dilakukan suatu teknik penyusunan unit sel periodik secara *cross*, hasil simulasi menunjukkan parameter rata-rata *absorption rate* sebesar 90% dengan lebar *bandwidth* 0.5 GHz dari *range* 10.15 GHz sampai 10.65 GHz.

## 2.2 Metamaterial

Metamaterial merupakan struktur buatan yang dirancang untuk memiliki sifat yang tidak tersedia di alam. Parameter konstitusi adalah parameter yang tergantung dengan karakteristik suatu bahan. Parameter konstitusi pada metamaterial adalah permitivitas ( $\epsilon$ ) dan permeabilitas ( $\mu$ ), dimana kedua variabel tersebut berhubungan erat dengan index bias [19]. Sifat metamaterial dapat dikarakterisasi menggunakan persamaan *Maxwell* berdasarkan literatur [20]. Transformasi dari persamaan *Maxwell* mempunyai aturan yang jelas dalam mendiskripsikan sifat metamaterial. Adapun sifat metamaterial dapat diklasifikasikan berdasarkan nilai  $\epsilon$  dan  $\mu$  pada empat kuadran yang tertera pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi Material Berdasarkan dari  $\mu$  dan  $\epsilon$  [20]

### 1. Kuadran Pertama

Kondisi ( $\epsilon > 0, \mu > 0$ ) merepresentasikan *right handed material* (RHM). Propagasi yang diteruskan dari gelombang, dapat ditempatkan pada kuadran pertama dan biasanya menggunakan material, juga mengikuti aturan *right hand thumb* untuk arah propagasi gelombang

### 2. Kuadran kedua

Kondisi ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ) mendeskripsikan plasma elektrik, dimana mendukung gelombang yang hilang dan disebut sebagai material ENG (*Epsilon Negative*).

### 3. Kuadran ketiga

Kondisi ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ) merepresentasikan metamaterial dan juga disebut sebagai *left handed material* atau *double negative material* (DNG), dimana mengikuti aturan *left handed* karena propagasi gelombang mengambil tempat pada arah terbalik dalam medium ini.

### 4. Kuadran keempat

Kondisi ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ) juga mendukung *evanescent* dan menyesuaikan dengan MNG (*miu negative material*)  $\mu$ .

## 2.3 Elektromagnetik Absorber

Absorber merupakan suatu bahan yang berfungsi untuk menyerap energi gelombang elektromagnetik. Absorber dapat digunakan secara eksternal untuk mengurangi refleksi dari transmisi menuju objek tertentu atau juga dapat digunakan secara internal untuk mengurangi osilasi yang disebabkan oleh rongga resonansi.

Absorber dikarakterisasi dari permitivitas elektrik dan permeabilitas magnetik. Permitivitas timbul dari polarisasi dielektrik dalam material. Permitivitas secara umum ditulis dengan persamaan 2.1 berikut.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

Permeabilitas merupakan suatu ukuran dari efek material pada medan magnetik. Permeabilitas secara umum ditulis dengan persamaan 2.2 berikut.

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (2.2)$$

### 2.3.1 Tipe Absorber

Berikut merupakan beberapa tipe absorber yang dirujuk dari referensi [21].

#### A. *Free Space*

Absorber ruang bebas terdiri dalam dua tipe yaitu absorber reflektif dan absorber *insertion loss*. Absorber reflektif dapat mengurangi tingkat refleksi jika dibandingkan dengan suatu reflektor yang sempurna (*metal plate*).

#### B. *Reflectivity-narrowband*

Satu dari tipe absorber yang paling awal ialah *narrowband* yang tak terpisahkan, dimana diketahui sebagai *salisbury screen*. Impedansi pada permukaan metal sama dengan  $0 \Omega$ . Hal tersebut hanya bekerja dalam material substrat  $\frac{1}{4} \lambda$ . *salisbury screen* merupakan *narrowband* yang tak terpisahkan (*inherently narrowband*).

#### C. *Reflectivity-Broadband*

- *Multilayer*

Beberapa tipe absorber menunjukkan hasil *reflectivity – broadband*. Banyak layer diskrit dapat menjadi stack, dimana akan diperbolehkan pada  $377 \Omega$  ketika kondisi impedansi input diatas sebuah *range* yang lebih luas dari frekuensi.

- Gradien Impedansi

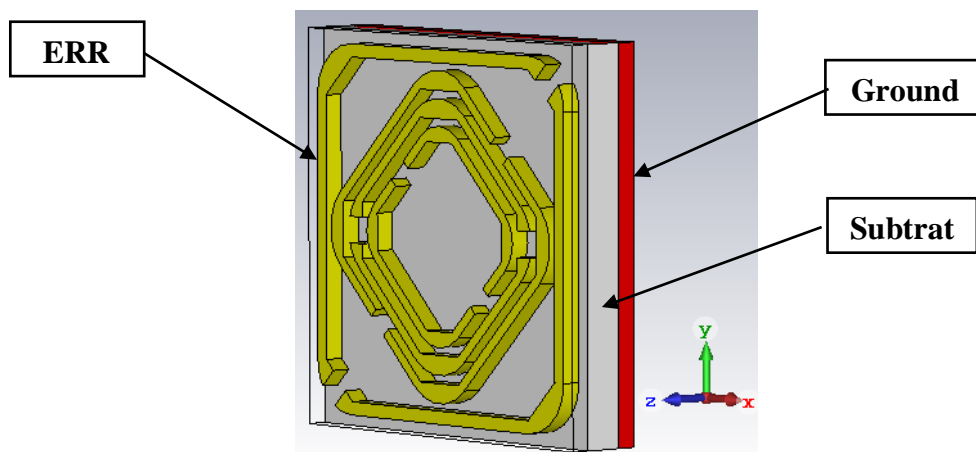
Kelas kedua dari absorber *broadband* menggunakan sebuah gradien impedansi. Impedansi pada permukaan depan sangat tertutup pada  $377 \Omega$ , tetapi secara berangsur terjadi pengurangan ke  $0 \Omega$  pada permukaan belakang.

- Absorber Jaumann

Absorber Jaumann memperluas konsep *salisbury screen* untuk *multiple layer*. Sheet resistivitas dipisahkan oleh *low loss dielectric*, dimana dapat berfungsi pada hasil *broadband* sehingga dapat tercapai.

## 2.4 Metamaterial Absorber

Metamaterial absorber (MMA) merupakan suatu struktur buatan yang dirancang untuk memiliki sifat yang tidak tersedia di alam dan dapat menyerap gelombang elektromagnetik secara sempurna. Secara umum metamaterial absorber memiliki tiga struktur *layer*, terdiri dari dua *layer* metal berupa *layer ground* dan *layer resonator* yang dipisahkan oleh satu *layer dielectric (substrate)* [10].



Gambar 2.2 Unit Sel Metamaterial Absorber

Pada dasarnya lapisan dielektrik berfungsi untuk menyediakan ruang untuk gelombang elektromagnetik yang datang untuk diserap, yang mana penyediaan frekuensi bergantung pada respon elektrik  $\epsilon(\omega)$ . Medan magnet dari gelombang datang akan menembus ruang antara ERR (bagian atas) dengan bagian belakang (*ground plane*), dalam hal ini frekuensi resonan bergantung pada respon magnetik  $\mu(\omega)$ . Adapun cara untuk memperoleh efektifitas dari respon elektrik  $\epsilon(\omega)$  dan respon magnetik  $\mu(\omega)$  tidak lain adalah melalui rekayasa dan penyesuaian struktur dimensi dari ERR, *ground plane* dan ruang *gap* diantara keduanya. Dengan demikian, realisasi dari *matching* impedansi terjadi sempurna diantara absorber dan *free space* serta meminimalkan refleksi yang berdekatan dengan nol.



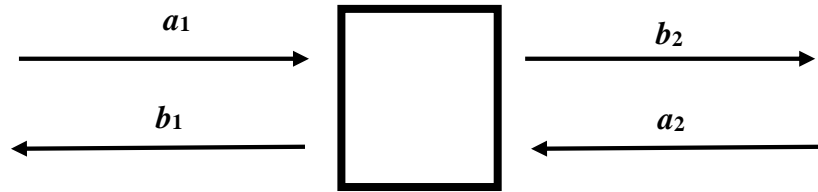
## 2.5 Parameter Metamaterial Absorber

Untuk mengetahui kemampuan atau performa dari suatu rancangan metamaterial absorber maka diperlukan pendefinisian berbagai parameter metamaterial absorber.

### 2.5.1 Scattering Parameters

*Scattering parameter* menggambarkan perilaku listrik pada linear *electrical network*. *Scattering parameter* dapat digunakan untuk menyatakan VSWR, *gain*, *return loss*, koefisien transmisi, koefisien refleksi [22].

Hubungan *scattering parameters* dengan *two port network* secara sederhana dapat dijelaskan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan S-parameter dengan *Two Port Network*

Hubungan daya gelombang yang datang, terpantul dan diteruskan dapat ditunjukkan oleh matrik berikut.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dari matrik tersebut, diperoleh persamaan 2.4 – 2.5.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2.4)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.5)$$

Masing-masing persamaan menampilkan hubungan antara daya yang dipantulkan dan daya datang pada setiap *port*, dalam hal ini parameter  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ , dan  $S_{22}$ . *Port* 1 didefinisikan sebagai *port* gelombang datang dan *port* 2 sebagai arah tujuan gelombang transmisi. Oleh karena itu, dapat didefinisikan tegangan gelombang datang sebagai  $a_1 = V_1^+$  dan  $a_2 = V_2^+$ , sedangkan tegangan gelombang pantul  $b_1 = V_1^-$  dan  $b_2 = V_2^-$ . Jadi *scattering parameters* dapat didefenisikan sebagai berikut.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (2.6)$$

Pada persamaan (2.6) didefinisikan sebagai koefisien refleksi *input* dengan *port output* diakhiri oleh *match load* ( $Z_{02} = Z_0$  dengan  $a_2 = 0$ ).

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad (2.7)$$

Pada persamaan (2.7) didefinisikan sebagai koefisien refleksi *output* dengan *port input* diakhiri oleh *match load* ( $Z_{01} = Z_0$  dengan  $a_1 = 0$ ).

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad (2.8)$$

Pada persamaan (2.8) didefinisiakn sebagai transmisi *reverse* (*insertion*) *gain* dengan *port input* diakhiri dalam *match load*.

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \quad (2.9)$$

Pada persamaan (2.9) didefinisikan sebagai transmisi *forward* (*insertion*) *gain* dengan *port output* diakhiri dalam *match load*.

Keterangan :

$S_{11}$  = koefisien pantulan tegangan input, perbandingan tegangan gelombang pantul *port* 1 dengan tegangan maju *port* 1

$S_{22}$  = koefisien pantulan tegangan *output*, perbandingan tegangan gelombang pantul *port* 1 dengan gelombang maju *port* 2

$S_{12}$  = *gain* tegangan pantul, perbandingan tegangan gelombang pantul *port* 1 dan tegangan maju *port* 2

$S_{21}$  = *gain* tegangan maju, perbandingan tegangan pantul *port* 2 dengan tegangan maju dari *port* 1

Dalam perumusannya, daya pantul maksimum *metamaterial absorber* berjumlah 20% dari daya yang ditransmisikan dengan tingkat *absortion rate*  $\geq 80\%$ . Maka dapat di simpulkan persamaan menggunakan rumus nilai daya, mengenai alasan mengapa nilai *return loss* *metamaterial absorber* minimal bernilai -7dB.

$$\begin{aligned}
RL(dB) &= 10 \log \frac{P_R}{P_T} & (2.10) \\
&= 10 \log \frac{20}{100} \\
&= 10 \log 0.2 \\
&= -7 \text{ dB}
\end{aligned}$$

Keterangan :

$RL(dB)$  = *Return Loss*

$P_T$  = *Daya Transmitter*

$P_R$  = *Daya Receive*

### 2.5.2 *Absorption rate*

*Absorption rate* merupakan parameter metamaterial absorber yang merepresentasikan kemampuannya dalam menyerap gelombang datang. Merujuk pada referensi [23] nilai *absorption rate*  $A(\omega)$  dapat diperoleh dengan persamaan 2.11-2.12:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2.11)$$

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.12)$$

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - (S_{21} = 0)$$

Keterangan:

$A(\omega)$  = *Absorption rate*

$R(\omega)$  = Koefisien refleksi

$T(\omega)$  = Koefisien Transmisi

$|S_{11}|$  = Magnitudo dari  $S_{11}$

$|S_{21}|$  = Magnitudo dari  $S_{21}$  (bernilai 0 karena tidak ada daya yang tembus)

Berdasarkan persamaan 2.13 tentang batas minimal nilai *return loss* metamaterial absorber bernilai -7dB dengan *absorption rate* 80%, untuk memperoleh nilai magnitudo parameter  $S_{11}$  dapat diketahui pada persamaan 2.13.

$$RL(dB) = 20 \log \Gamma \quad (2.13)$$

$$-7 \text{ dB} = 20 \log \Gamma$$

$$-\frac{7}{20} = \log \Gamma$$

$$\Gamma = 0.446$$

Berdasarkan hasil persamaan 2.12 diperoleh nilai *absorption rate* sebagai berikut.

$$A(\omega) = 1 - |0.446|^2 - |0|^2$$

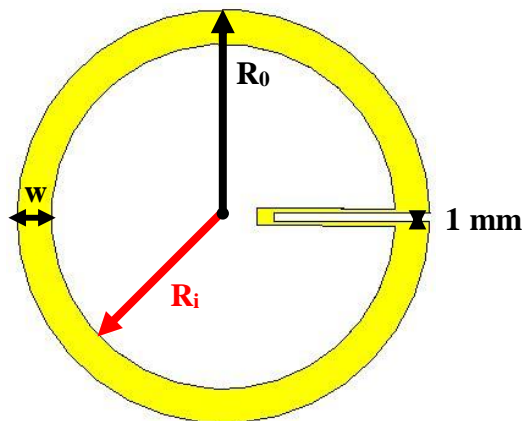
$$A(\omega) = 1 - 0.2 - 0$$

$$A(\omega) = 0.8$$

$$A(\omega) = 80\%$$

## 2.6 Split Ring Slot

*Split ring slot* (SRS) merupakan struktur metamaterial yang terdiri dari dua buah cincin logam, baik dalam bentuk lingkaran maupun persegi, yang diukir atau dibentuk pada substrat dielektrik yang memiliki celah pada sisi yang berlawanan. *Split ring slot* berfungsi untuk membuat *left hand* dengan indeks rekraktif negatif. Nilai frekuensi dipengaruhi oleh dimensi *split ring slot* dan epsilon bahan substrat yang digunakan. Merujuk pada referensi [11] oleh *Kin-Lu Wong*, salah satu jenis *single split ring slot* yaitu geometri *split ring slot circular* seperti Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Geometri *Split Ring Slot Circular*

Nilai frekuensi dipengaruhi oleh dimensi jari-jari *ring* dan epsilon bahan substrat yang digunakan. Untuk mencari frekuensi resonansi  $f_c$  dari *circular ring slot* dapat diperoleh dari persamaan 2.14.

$$f_c = \frac{c}{\pi(R_o+R_i)} \left( \frac{1+\epsilon_r}{2 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Keterangan:

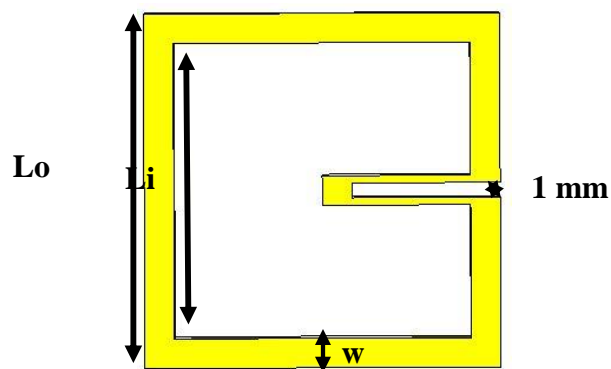
$f_c$  = Frekuensi resonan

$\epsilon_r$  = Nilai epsilon substrat

$R_o$  = Jari-jari *ring* luar

$R_i$  = Jari-jari *ring* dalam

Kedua untuk geometri *split ring slot square* yang terlihat seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Geometri *Split Ring Slot Square*

Adapun untuk mencari frekuensi resonan pada *split ring slot square* dapat diperoleh dari persamaan 2.15.

$$f_c = \frac{c}{\pi(L_o+L_i)} \left( \frac{1+\epsilon_r}{2 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$f_c$  = Frekuensi resonan

$\epsilon_r$  = Nilai epsilon substrat

$L_o$  = Panjang sisi luar

$L_i$  = Panjang sisi dalam

## 2.7 Split Ring Resonators

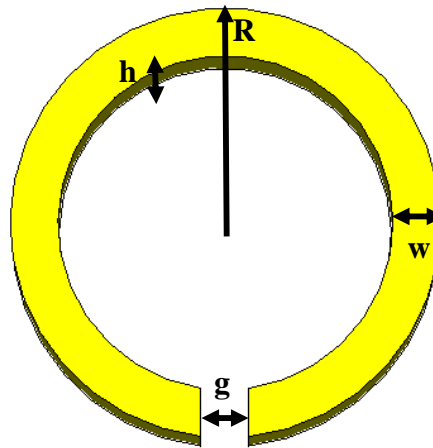
*Split-ring resonators* (SRR) adalah struktur buatan (metamaterial) yang diproduksi untuk menghasilkan *magnetic resonators* dalam beberapa tipe metamaterial sampai frekuensi 200 THz. Struktur SRR diperkenalkan oleh *John Pendry et al* [19].

Untuk memahami beberapa mekanisme fisik yang mendasari sifat metamaterial terkadang pemahaman konseptual diperlukan. Yang mana struktur metamaterial dapat dianalisis secara teoritis dengan menurunkan persamaan *Maxwell*. Meskipun kita bisa menyelesaikannya persamaan *Maxwell* secara numerik dan hasil simulasi numerik bisa memberikan informasi yang berharga, namun terkadang tidak mudah untuk kita dapat memahami hal yang mendasari mekanisme fisik perilaku metamaterial, misal geometri parameter sel satuan, seperti periodisitas, panjang *patch* dalam hal ini berupa *CW metallic*, jarak antar struktur dalam sel satuan, ketebalan substrat dielektrik pada logam.

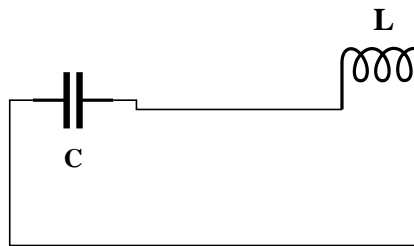
Ketika solusi analitik tidak tersedia, salah satu solusi yang kuat untuk dipahami sistematis setidaknya secara konseptual adalah dengan menggunakan apa yang disebut teori *equivalent circuit*, yang mana pola - pola logam digantikan oleh induktor dan kapasitor yang setara, dan induktansi serta kapasitansi dapat didekati secara analitis dengan menggunakan parameter geometrik pola logam untuk memperoleh frekuensi resonansi.

### 2.7.1 Equivalent Circuit – Split Ring Resonators (EC-SRR)

Pada sub bab ini penulis mencoba merepresentasikan hubungan *equivalent-circuit* dengan *split ring resonators* (SRR) yang merujuk pada literatur [12]. Dalam menentukan nilai frekuensi resonansi digunakan *split ring resonators*, dengan parameter diantaranya adalah: jari-jari luar cincin ( $R$ ), ketebalan ( $w$ ), tinggi ( $h$ ), dan lebar celah ( $g$ ), panjang gelombang *split ring resonator* dapat diasumsikan sebagai induktansi ( $L$ ), dan kapasitansi ( $C$ ).



Gambar 2.6 Struktur *Singel Ring Resonators Circular*



Gambar 2.7 *Equivalent Circuit - Split Ring Resonators Circular*

Untuk mencari frekuensi resonan pada struktur *equivalent circuit - split ring resonators circular* dapat diperoleh dari persamaan berikut.

Frekuensi resonan,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

Induktansi dapat diasumsikan sebagai cincin tertutup,

$$L = \mu_0 R_m \left( \ln \frac{8R_m}{h+w} - 0.5 \right) \quad (2.17)$$

$\mu_0$  adalah permeabilitas ruang bebas dan  $R_m$  adalah jari-jari rata-rata cincin,  $R_m = \frac{(R+w)}{2}$ . Kapasitansi dapat diasumsikan dengan kapasitansi celah (*gap*) dan kapasitansi permukaan (*surface*), adapun persamaan kapasitansi *gap* terdapat pada persamaan 2.19 – 2.21.

$$C_{mut} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right] \quad (2.19)$$

$$C_{air} = \varepsilon_0 \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right] \quad (2.20)$$

$$C_{gap} = \left[ \frac{1}{C_{mut}} + \frac{1}{C_{air}} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

maka kapasitansi total merupakan penjumlahan dari kapasitansi celah ditambah dengan kapasitansi permukaan, yang dinyatakan dengan persamaan (2.22).

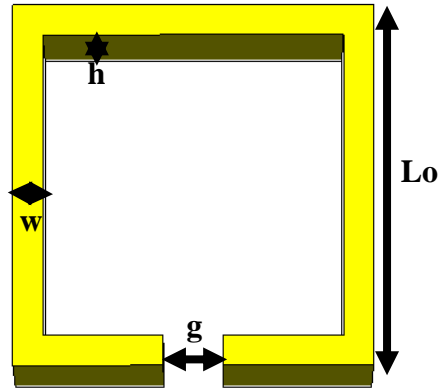
$$C = \left[ \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right]} + \frac{1}{\varepsilon_0 \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right]} \right]^{-1} + \frac{2\varepsilon_0 h}{\pi} \ln \frac{4R}{g} \quad (2.22)$$

Sehingga persamaan frekuensi reson diperoleh dengan persamaan (2.23)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_{gap} + C_{surf})}} \quad (2.23)$$

Untuk stuktur geometri *split ring resonator square* ditunjukkan pada Gambar 2.8, dengan parameter diantaranya adalah: sisi *ring* (L), ketebalan (w), tinggi (h), dan lebar celah (g), panjang gelombang *split ring resonator* dapat diasumsikan sebagai induktansi (L), dan kapasitansi (C).





Gambar 2.8 Struktur *Single Ring Resonators Square*

Adapun untuk mencari frekuensi resonan pada struktur *equivalent circuit* - *split ring resonators square* dapat diperoleh dari persamaan berikut.

Frekuensi resonan,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.24)$$

Induktansi dapat diasumsikan sebagai *ring* tertutup,

$$L = \mu_0 L_m \left( \ln \frac{4L}{h+w} - 1 \right) \quad (2.25)$$

$\mu_0$  adalah permeabilitas ruang bebas dan  $L_m$  adalah rata rata sisi *ring*,  $L_m = \frac{(L_0+w)}{2}$ . Kapasitansi total dapat diperoleh dari hasil penjumlahan kapasitansi *gap* dan permukaan yang terdapat pada persamaa 2.26 berikut,

$$C = \left[ \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right]} + \frac{1}{\varepsilon_0 \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln \frac{2.4h}{w}} \right]} \right]^{-1} + \frac{2\varepsilon_0 h}{\pi} \ln \frac{8L_0}{g} \quad (2.26)$$

Sehingga persamaan frekuensi resonan diperoleh dengan persamaan 2.27.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{gap} + C_{surf})}} \quad (2.27)$$

## 2.8 Metode Pengukuran Metamaterial Absorber

Merujuk pada referensi [21] berjudul “*Theory and Application of RF/Microwave Absorbers*” yang ditulis oleh *Arthur von hippel*. Terdapat beberapa beberapa metode yang digunakan dalam pengukuran absorber diantaranya sebagai berikut.

### 2.8.1 *Near Field Test*

*The International Electrotechnical Commission (IEC)* telah menetapkan empat desain pengukuran untuk mengukur reduksi noise pada *near field absorber* diantaranya :

a. *Intradecoupling ratio* : pengukuran ini didesain untuk mengukur keefektifan dari absorber dalam mengurangi *coupling* diantara elemen pada sisi yang sama dari *sheet* absorber. Dua antenna *loop* disembarkan sebagai ilustrasi yang benar.

b. *Transmission Attenuation Power Ratio* : pengukuran ini mengukur keefektifan dari absorber dalam penekanan arus *noise* sepanjang dari suatu PCB.

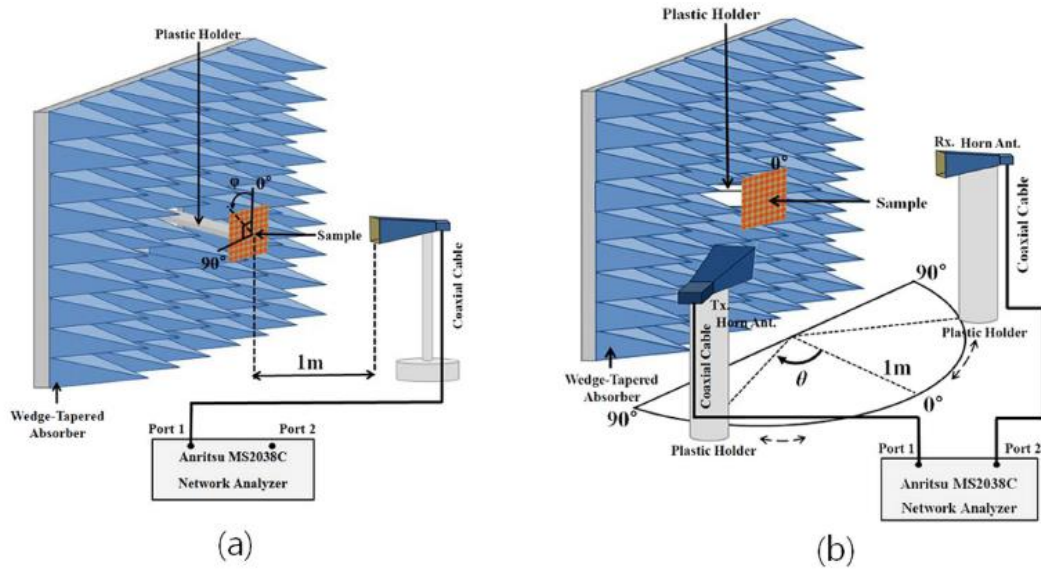
c. *Interdecoupling ratio* : pengukuran ini mengukur keefektifan ketika pengirim dan penerima berlawanan tempat dari absorber.

d. *Radiation suppression ratio* : kondisi ini memerlukan suatu *anechoic chamber*. *Line* mikrostrip digunakan sebagai sumber dan diradiasikan oleh emisi dalam jarak tetap yang jauh dari pengukuran.

### 2.8.2 *Insertion Loss*

*Insertion loss* merupakan ukuran dari berapa banyak energi *microwave* yang berjalan dari titik datang menuju titik pantul, dimana direduksi oleh *insertion* dari suatu *microwave* material absorber pada suatu lintasan. Suatu aturan desain yang baik untuk mengukur *insertion loss* yaitu dapat mencakup dua antenna yang berorientasi dan juga direktivitas maksimumnya ke arah bagian lain, yang mana akan terpisah cukup untuk memenuhi kebutuhan medan jauh melalui pemisahan yang lebih besar.

Berikut merupakan salah satu skema dalam pengukuran parameter metamaterial absorber dengan antenna referensi yang merujuk pada literatur [24].



Gambar 2.9 Ilustrasi skema *set-up* pengukuran *free-space* (a) *normal incidence* (b) *oblique incidence* [24]

Gambar 2.9 menunjukkan ilustrasi skema pengukuran medan jauh (*far-field*) parameter metamaterial absorber dengan antenna referensi, dimana jarak antara *prototype* metamaterial absorber dengan antenna referensi dirumuskan sebagai berikut.

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.28)$$

Keterangan.

$R_{ff}$  = Medan jauh (*far-field*)

$D$  = Dimensi linier maksimum antenna

$\lambda$  = Panjang gelombang

Gambar 2.9 (a) menunjukkan ilustrasi skema pengukuran parameter  $S_{11}$  dibawah sudut normal menggunakan satu antenna referensi (*horn*). Gambar 2.9 (b) menunjukkan ilustrasi skema pengukuran parameter  $S_{21}$  dibawah sudut miring menggunakan dua antenna referensi (*horn*).

## 2.9 Aplikasi Metamaterial Absorber

Pada Tabel 2.2 berikut menunjukkan beberapa penelitian terkait aplikasi teknologi metamaterial absorber dengan berbagai material berbeda.

Tabel 2.2 Aplikasi Teknologi Metamaterial Absorber

No	Judul	Berbasis Material	Hasil Parameter	Aplikasi	Referensi
1	<i>Electromagnetic Absorbers Based on Chiral Honeycomb Slab [25]</i>	<i>Dielectric a chiral honeycomb slab</i>	Frekuensi operasi 1 – 2.5 GHz, rata-rata parameter $S_{11} \leq -10$ dB, rata-rata <i>absorption rate</i> $\geq 86\%$ .	<i>Jaumann absorber</i>	<i>V. David, I. Nica and A. Salceanu, "Electromagnetic absorbers based on chiral honeycomb slab," 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, Athens, 2009, pp. 1-4</i>
2	<i>Wide-band Electromagnetic Wave Absorber of Rubber-Ferrite [26]</i>	<i>Multi-layered Rubber-Ferrite</i>	Frekuensi operasi 2 GHz – 18 GHz, rata-rata parameter $S_{11} \leq -10$ dB, rata-rata <i>absorption rate</i> $\geq 90\%$ .	<i>EMI reduction</i>	<i>Feng Zekun, Huang Aiping and He Huahui, "Wide-band electromagnetic wave absorber of rubber-ferrite," 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 2002, pp. 420-423</i>
3	<i>Oblique Incidence Performance of Microwave Absorbers Based on Magnetic Polymer Composites [27]</i>	<i>Multi-layered Magnetic Polymer Composites</i>	Frekuensi operasi 8 GHz – 12 GHz, rata-rata parameter $S_{11} \leq -10$ dB, rata-rata <i>absorption rate</i> $\geq 85\%$	<i>absorption design</i>	<i>L. Zhang, H. Lu, P. Zhou, J. Xie and L. Deng, "Oblique Incidence Performance of Microwave Absorbers Based on Magnetic Polymer Composites," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 7100604</i>

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

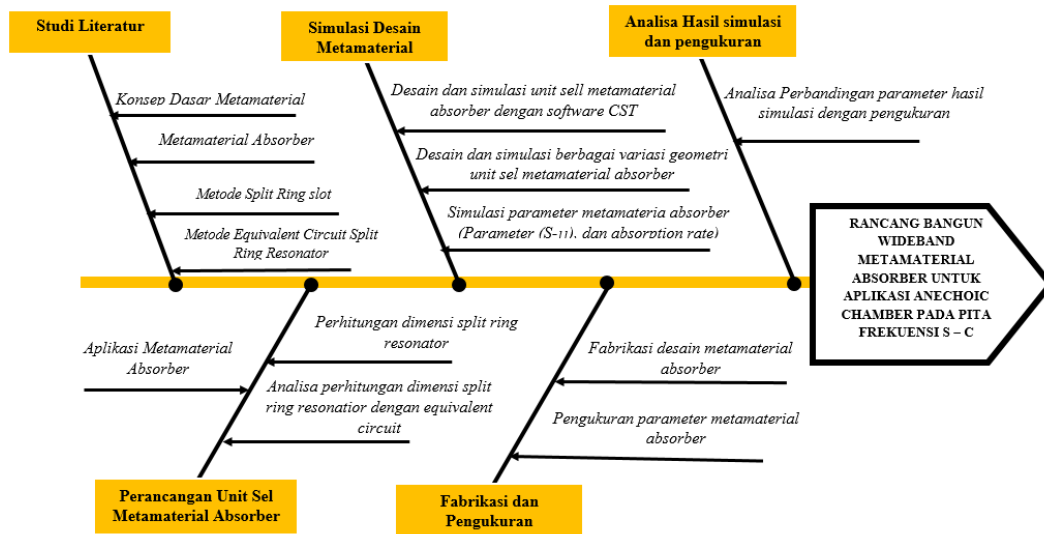


## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Skema Penelitian

Pada sub bab ini penulis memaparkan penelitian tentang rancang bangun metamaterial absorber yang telah diringkaskan dalam diagram *fishbone*. Pada diagram *fishbone* dijelaskan tahapan-tahapan secara detail dimulai dari tahap studi literatur, perancangan, simulasi, fabrikasi dan pengukuran, serta analisa hasil perbandingan simulasi dan pengukuran. Secara ringkas skema penelitian (*fishbone*) ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut.



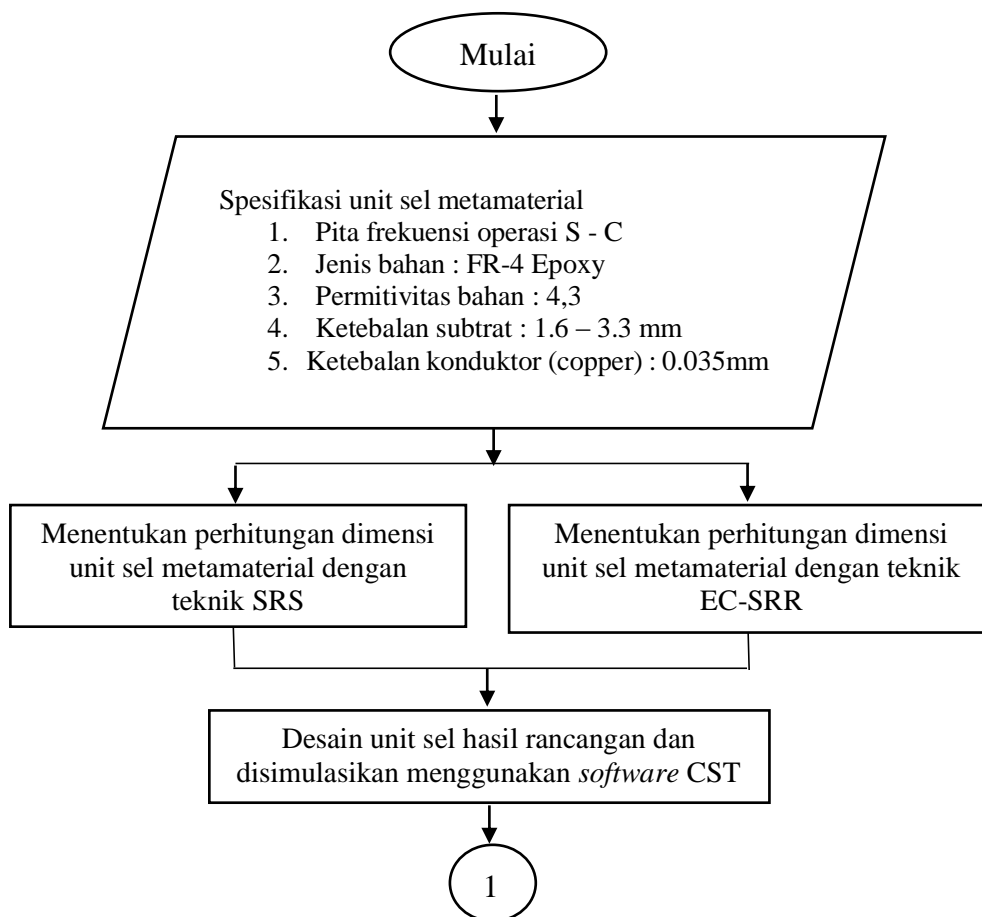
Gambar 3.1 Skema Penelitian

Pada skema penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahap pertama mencari beberapa dasar teori tentang konsep metamaterial absorber, parameter metamaterial, metode *split ring slot* dan *equivalent circuit - split ring resonators* serta metode pengukuran metamaterial hasil perancangan. Tahapan kedua yaitu melakukan perancangan metamaterial yang meliputi proses perhitungan struktur dimensi metamaterial, perhitungan dengan metode *split ring slot* dan *equivalent circuit - split ring resonators* serta pengaplikasian metamaterial absorber sebagai bahan *anechoic chamber*. Tahapan ketiga meliputi proses desain unit sel metamaterial terpilih dan simulasi untuk memperoleh parameter  $S_{11}$  dan *absorption rate*, serta proses optimasi dan modifikasi desain metamaterial.

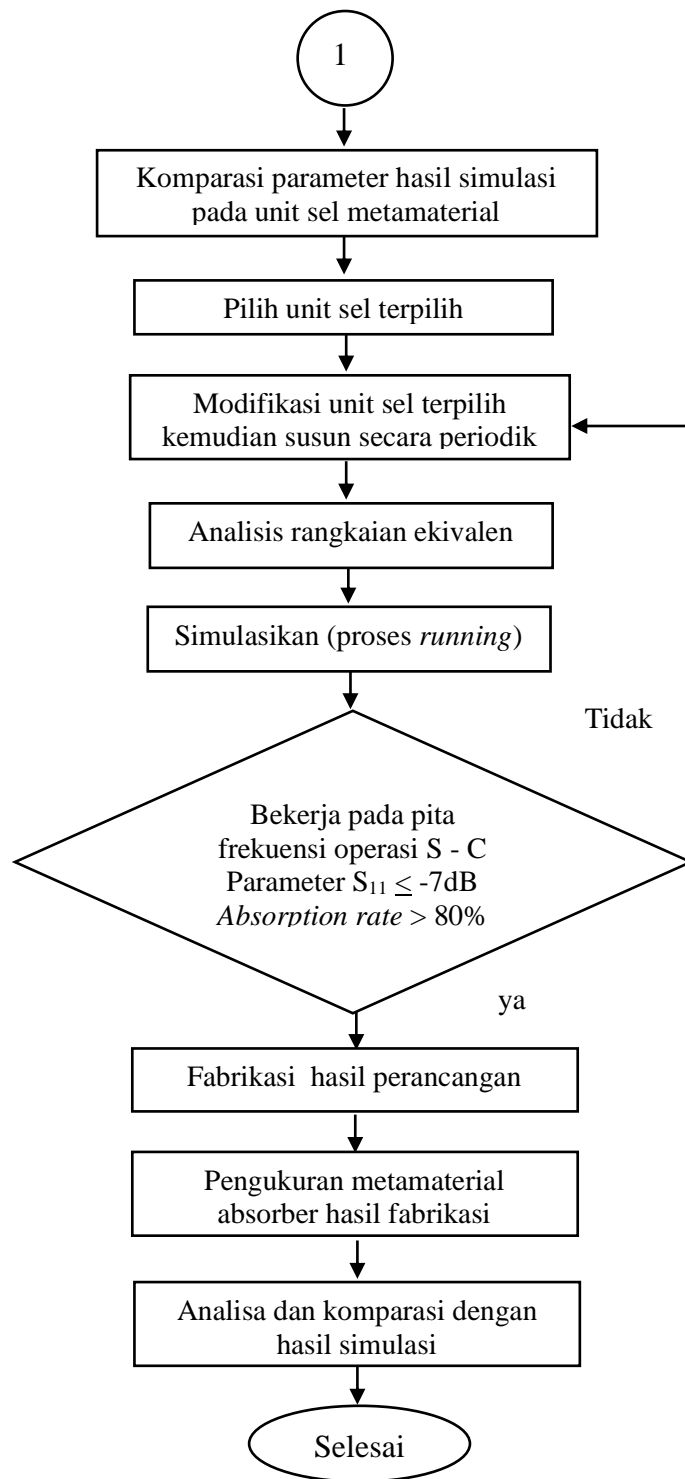
Selanjutnya tahap keempat adalah proses fabrikasi dan pengujian meliputi metode pengukuran yang digunakan untuk memperoleh parameter yang dibutuhkan. Tahapan kelima yaitu analisa perbandingan parameter metamaterial absorber hasil simulasi dan pengukuran.

### 3.2 Diagram Alir Perancangan Metamaterial Absorber

Untuk melakukan perancangan unit sel metamaterial absorber, maka dilakukan langkah - langkah yang meliputi penentuan spesifikasi, perhitungan dimensi, pemilihan bentuk dimensi unit sel, penggabungan unit sel serta substrat dari metamaterial absorber. Setelah penentuan perancangan unit sel tersebut, maka dilakukan simulasi, fabrikasi, dan pengukuran metamaterial absorber hasil fabrikasi. Secara ringkas dijelaskan pada diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.







Gambar 3.2 Diagram Alir Perancangan Metamaterial Absorber

Diagram alir penelitian dimulai dengan proses menentukan spesifikasi unit sel metamaterial absorber yang meliputi frekuensi resonan, bahan metamaterial (substrat) yang digunakan, menentukan parameter apa saja yang dibutuhkan. Selanjutnya proses perhitungan struktur unit sel metamaterial absorber dengan 2 metode pendekatan yaitu dengan teknik *spilt ring slot* (SRS) dan *equiavelent circuit – spilt ring resonators* (EC-SRR).

Proses selanjutnya desain beberapa unit sel rancangan berdasarkan kedua metode yang diajukan, kemudian simulasikan untuk dikomparasi hasil parameternya. Langkah berikutnya dilakukan proses pemilihan unit sel terpilih dan memodifikasi unit sel terpilih serta analisis perhitungan dengan rangkaian ekivalen untuk kemudian disusun secara periodik. Dari hasil simulasi apakah hasil perancangan simulasi telah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan atau tidak, bila tidak maka dilakukan proses modifikasi dan bila ya maka masuk proses fabrikasi dan pengukuran dengan metode yang telah dipilih. Untuk kemudian dilakukan proses analisa perbandingan parameter hasil simulasi dengan hasil pengukuran.

### 3.3 Perancangan Metamaterial Absorber

Perancangan metamaterial absorber disesuaikan dengan spesifikasi yang diaplikasikan untuk *anechoic chamber*. Spesifikasi absorber yang diperlukan dalam perancangan metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Spesifikasi Perancangan Metamaterial Absorber

Parameter	Spesifikasi
Jenis Band	S – C
Range Frekuensi	2 GHz – 8 GHz
Parameter $S_{11}$	$\leq -7$ dB
Parameter $S_{21}$	0 (linier)
Absorption rate	$\geq 80\%$

Pada Tabel 3.1 menunjukkan parameter perancangan metamaterial absorber, yang mana jenis *band* yang digunakan adalah *wideband* (pita lebar) hal ini karena perancangan metamaterial absorber diaplikasikan untuk *anechoic chamber*.

Dalam perancangan metamaterial absorber ini *ground plane* terletak pada bagian bawah metamaterial absorber. Oleh karena itu, diasumsikan nilai magnitude  $S_{21}$  bernilai 0 karena tidak terdapat daya yang tembus ketika melewati metamaterial absorber. Pada perancangan metamaterial absorber untuk nilai parameter  $S_{11}$  memiliki spesifikasi nilai minimal  $\leq -7$  dB, nilai tersebut diperoleh dari hubungan persamaan *return loss* dimana daya pantul maksimum metamaterial absorber berjumlah 20% dari daya yang ditransmisikan.

Adapun bahan digunakan dalam perancangan metamaterial absorber ini yaitu PCB jenis FR-4 (epoxy), dengan spesifikasi sebagai Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi Bahan Metamaterial Absorber

Parameter	Spesifikasi
Permitivitas bahan ( $\epsilon_r$ )	4.3
Tebal Substrat (FR-4 Epoxy)	1.6 mm
Tebal konduktor ( <i>copper</i> )	0.035 mm

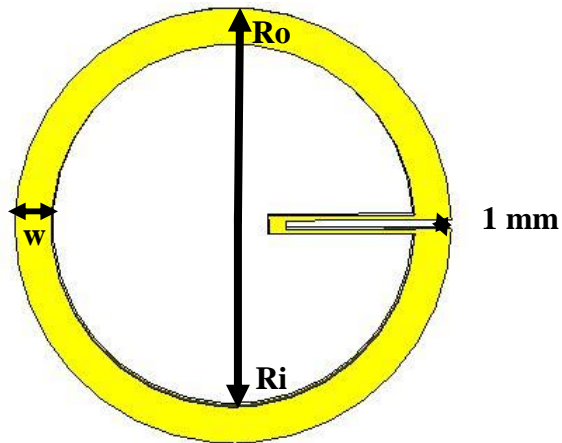
Pada Tabel 3.2 menunjukkan bahwa nilai permitivitas bahan sebesar 4.6 dan ketebalan subtrat 1.6 mm serta ketebalan serta tebal *copper* sebesar 0.035 mm. Hal ini dikarenakan pada perancangan metamaterial absorber ini menyesuaikan ketersediaan pada saat fabrikasi.

### 3.4 Desain dan Simulasi Unit Sel Metamaterial Absorber

Pada sub bab ini dirancang beberapa bentuk struktur desain berdasarkan metode *split ring slot* (SRS) dan *equivalent circuit - split ring resonators* (EC-SRR) sebagai berikut,

#### 3.4.1 Unit Sel 1 *Split Ring Slot Circular*

Desain unit sel 1 merupakan struktur geometri *circular* yang dirancang menggunakan metode *split ring slot* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Desain Unit Sel 1 *Split Ring Slot Circular*

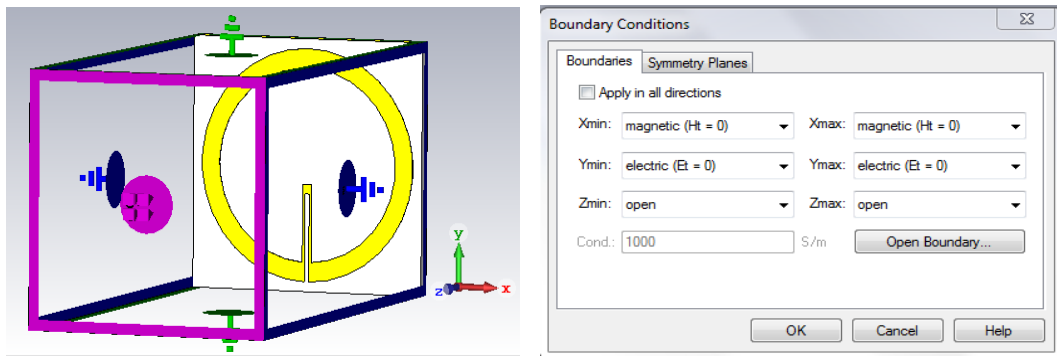
Table 3.3 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 1 *split ring slot circular*.

Tabel 3.3 Variabel Dimensi Unit Sel 1 dengan Metode *Split Ring Slot*

Variable	Keterangan	Nilai
$E_r$	Konstanta dielektrik	4.3
$R_o$	Jari-jari <i>ring</i> luar	12 mm
$R_i$	Jari-jari <i>ring</i> dalam	10 mm
$G$	<i>Gap</i>	1 mm
$H$	Tinggi substrat	1.6 mm

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far filed* sebesar 5.5 cm.

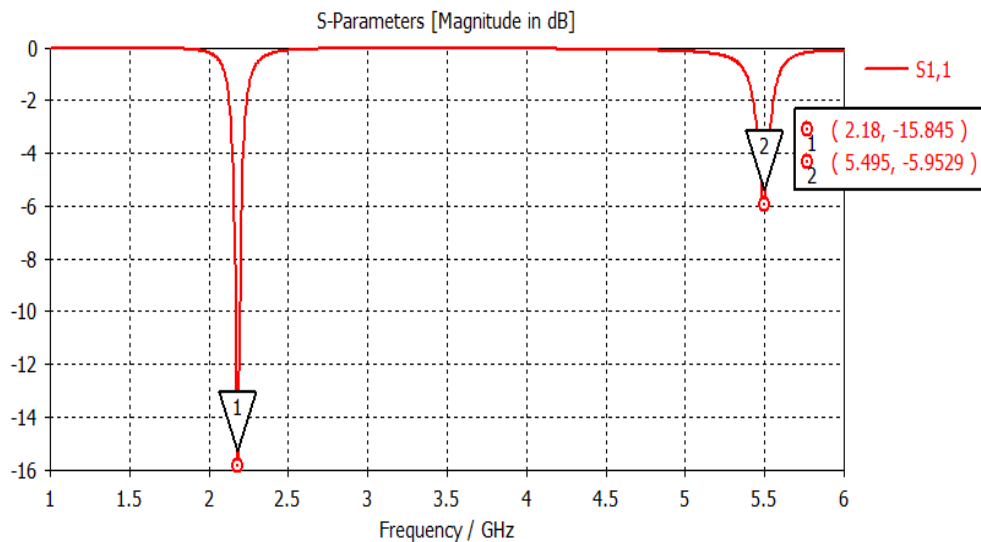
Gambar 3.4 menunjukkan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition*.



(a) (b)  
 Gambar 3.4 *Set-up Periodic boundary condition Unit Sel 1 Teknik Split Ring Slot*

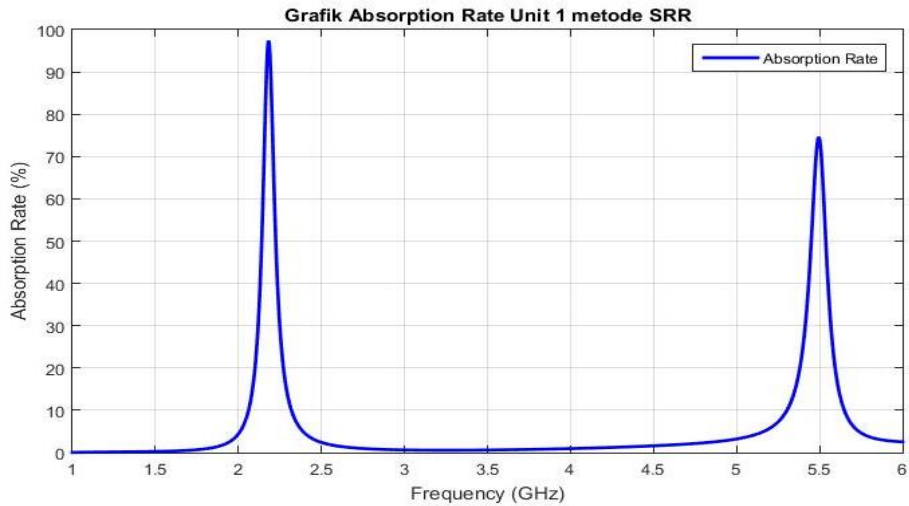
Gambar 3.4 (a) menunjukkan desain unit sel 1 *split ring slot circular* yang di *set-up* dengan prinsip *periodic boundary condition* dan Gambar 3.4 (b) menunjukkan spesifikasi *set-up* prinsip *periodic boundary condition*.

Hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 1 *split ring slot circular* menggunakan *software* CST Studio pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 6 GHz ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 1 *Split Ring Slot Circular*

Gambar 3.5 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  sebesar -15.8 dB pada frekuensi resonan 2.18 GHz. Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ . Sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Absorption rate Unit Sel 1 Split Ring Slot Circular

Gambar 3.6 menunjukkan nilai *absorption rate* pada frekuensi resonan 2.18 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 97.4%, sehingga desain unit sel 1 *split ring slot circular* memenuhi syarat minimum tingkat *absorption rate* 80%.

Selanjutnya dilakukan proses validasi frekuensi resonan menggunakan metode *split ring slot* melalui persamaan 2.14.

$$f_c \approx \frac{c}{\pi(R_o + R_i)} \left( \frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Keterangan:

$f_c$  = Frekuensi resonan

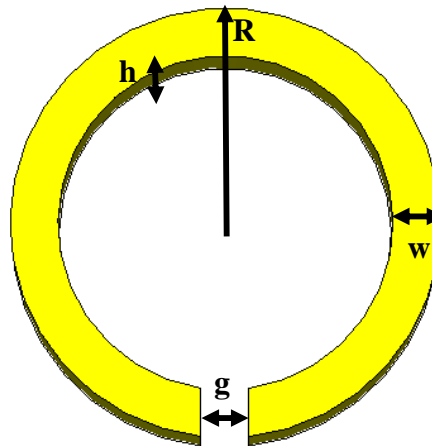
$\epsilon_r$  = Nilai epsilon substrat

$R_o$  = Jari-jari *ring* luar

$R_i$  = Jari-jari *ring* dalam

$$\begin{aligned} f_c &\approx \frac{3.10^8}{3,14(12.10^{-3} + 10.10^{-3})} \left( \frac{1 + 4,3}{2 * 4,3} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= f_c \approx 3.4GHz \end{aligned}$$

Berikut merupakan desain unit sel 1 geometri *circular* dengan metode *equivalent circuit - split ring resonators* yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Desain Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit – Split Ring Resonators*

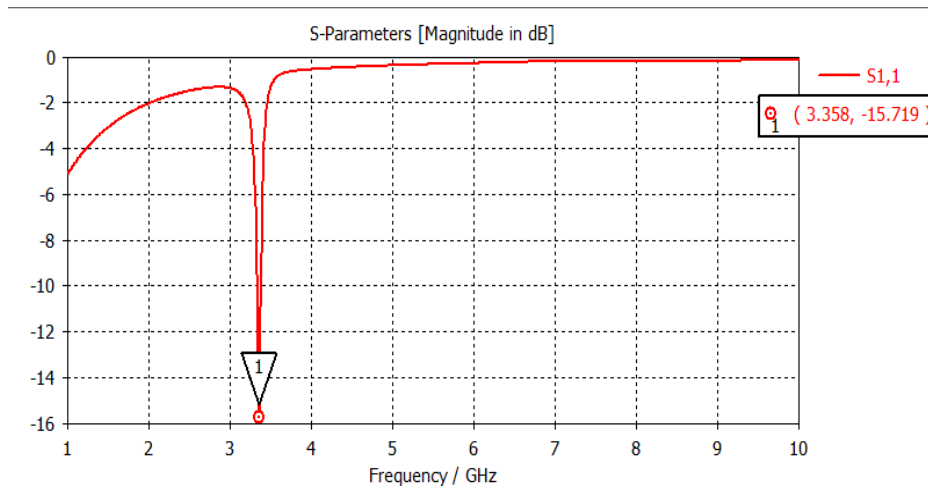
Table 3.4 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 1 geometri *circular equivalent circuit -split ring resonators*..

Tabel 3.4 Variabel Dimensi Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit – Split Ring Resonators*

Variable	Keterangan	Nilai
$E_r$	Konstanta dielektrik	4.6
R	Jari-jari <i>ring circular</i>	9 mm
W	Lebar <i>ring circular</i>	2 mm
G	<i>Gap</i>	2 mm
H	Tinggi substrat	1.6 mm

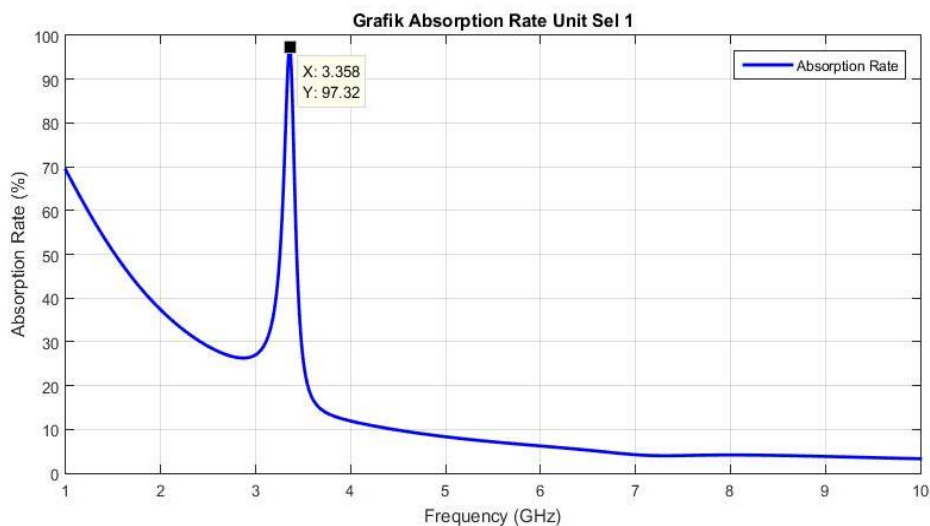
Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 9 cm.

Hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 1 geometri *circular equivalent circuit* - *split ring resonators* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit* – *Split Ring Resonators*

Gambar 3.8 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  -15.7 dB pada frekuensi resonan 3.35 GHz . Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ , sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 *Absorption rate* Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit* – *Split Ring Resonators*



Gambar 3.9 menunjukkan nilai *absorption rate* pada frekuensi resonan 3.35 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 97.3%. Sehingga memenuhi syarat minimal *absorption rate* 80%.

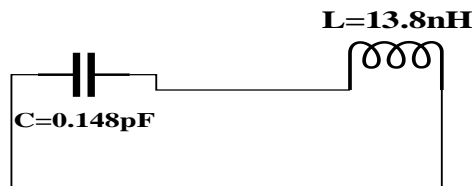
Selanjutnya dilakukan proses validasi frekuensi resonan menggunakan metode *equivalent circuit – split ring resonator* melalui persamaan 2.16-2.23, sehingga diperoleh nilai induktansi (L) dan kapasitansi (C) sebagai berikut.

$$L = 1,256 \cdot 10^{-6} \left( \frac{9 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \ln \left( \frac{8 \left( \frac{9 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)}{1,6 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}} - 0,5 \right)$$

$$L = 13.8nH$$

$$C = \left[ \frac{1}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 4,3 \left[ \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{2,314 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \right]} + \frac{1}{8,854 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{2,314 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \right]} \right]^{-1} + \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{3,14} \ln \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}$$

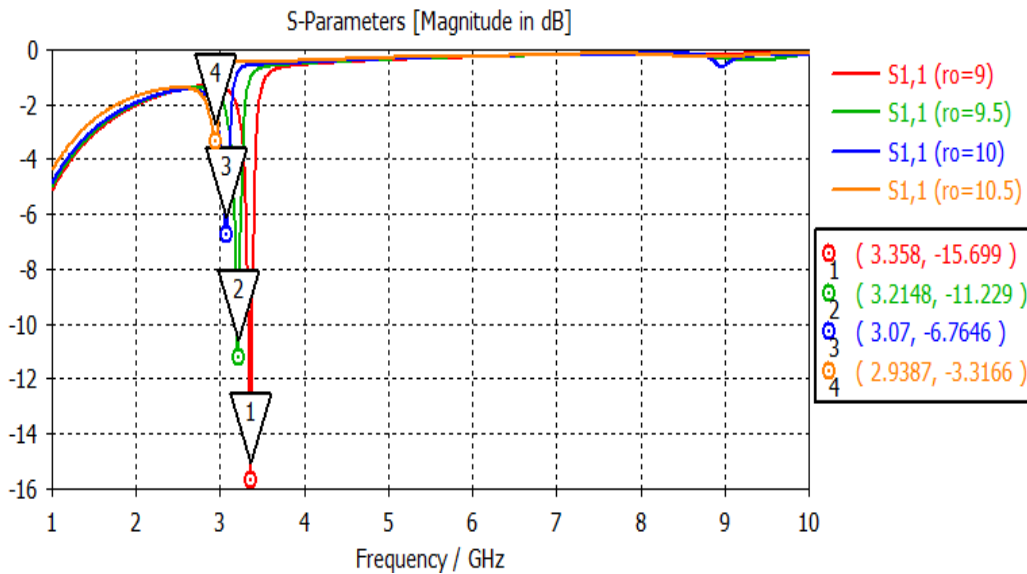
$$C = 0.148pF$$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.51 \text{ GHz}$$

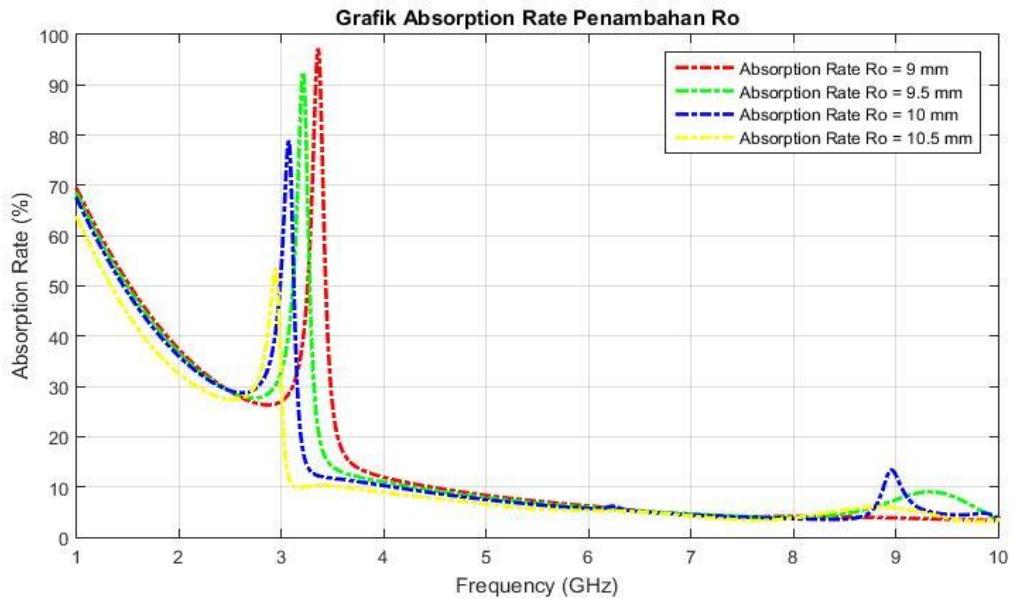
Berdasarkan hipotesa sementara, metode *equivalent circuit – split ring resonator* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode *split ring slot*, karena dapat merepresentasikan dengan baik hubungan antara hasil simulasi dengan perhitungan dimensi unit sel metamaterial absorber. Hal ini diperkuat dari data selisih frekuensi resonan pada desain unit sel 1 metode *split ring slot* dengan hasil simulasi sebesar 1.22 GHz, sedangkan selisih frekuensi resonan pada desain unit sel 1 geometri *circular equivalent circuit – split ring resonator* dengan hasil simulasi sebesar 0.15 GHz.

Selanjutnya, dilakukan proses memodifikasi pada lebar radius jari-jari luar ( $R_0$ ) untuk mengetahui pengaruh karakteristik parameter metamaterial absorber. Untuk variasi penambahan lebar radius jari-jari luar ( $R_0$ ) terdiri dari 9 mm, 9.5 mm, 10 mm, dan 10.5 mm dengan hasil simulasi  $S_{11}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit – Split Ring Resonators* Penambahan Jari-jari luar ( $R_0$ )

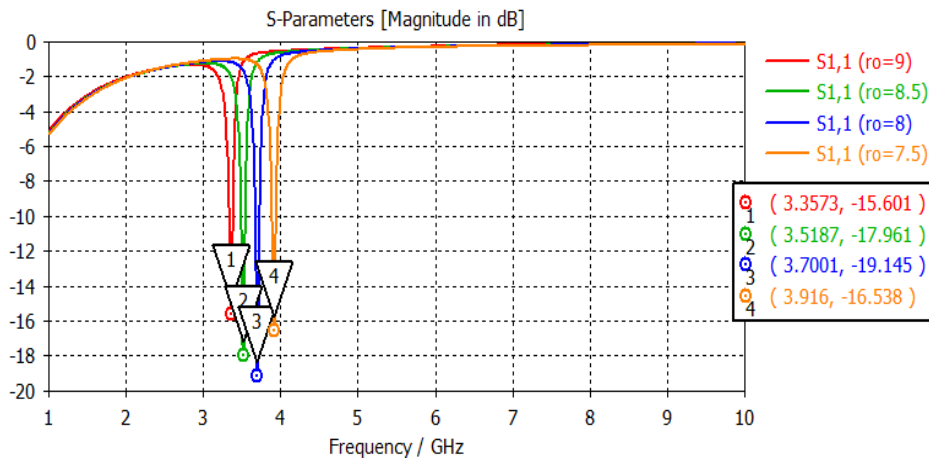
Gambar 3.10 menunjukkan grafik hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada penambahan variasi jari-jari luar ( $R_0$ ), semakin besar nilai jari-jari luar struktur *circular* maka semakin meningkat tingkat kecuraman nilai parameter  $S_{11}$ , lebar 9 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -15.6 dB dengan frekuensi resonan 3.35 GHz, lebar 9.5 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -11.2 dB dengan frekuensi resonan 3.21 GHz, lebar 10 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -6.7 dB dengan frekuensi resonan 3.07 GHz, lebar 10.5 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -3.3 dB dengan frekuensi resonan 2.9 GHz. Berdasarkan data tersebut nilai *absorption rate* semakin menurun dan frekuensi resonan bergeser menuju frekuensi yang lebih rendah, hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.11 berikut.



Gambar 3.11 *Absorption rate* Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit* – *Split Ring Resonators* Penambahan Jari-jari Luar ( $R_0$ )

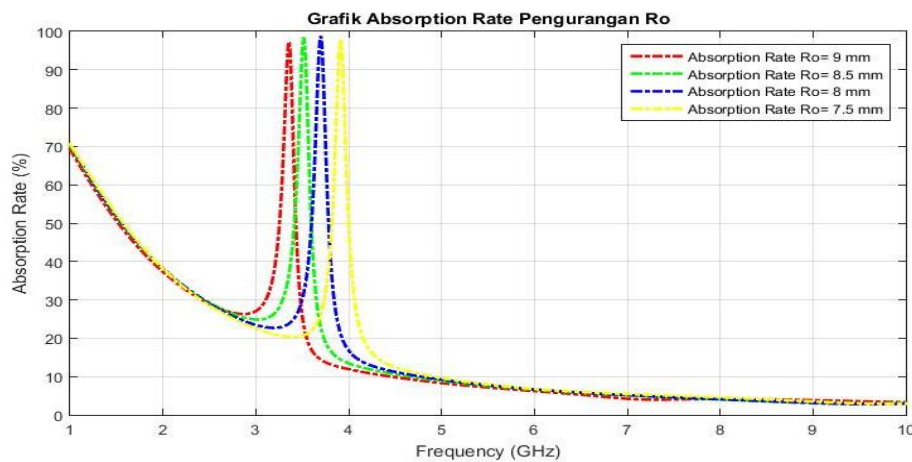
Gambar 3.11 Menunjukkan hasil grafik *absorption rate* penambahan variasi jari-jari luar, dari grafik tersebut diperoleh data bahwa semakin besar nilai yang diberikan terhadap jari-jari luarnya maka nilai *absorption ratenya* akan semakin menurun, terbukti pada jari-jari luar bernilai 9 mm memiliki *asborption rate* sebesar 97%, lebar 9.5 mm memilik *absorption rate* 92%, lebar 10 mm memiliki *absorption rate* 78.9%, dan lebar 10.5 mm memiliki *absorption rate* sebesar 53.3%.

Untuk variasi pengurangan lebar radius jari-jari luar geometri *circular* terdiri dari 9 mm, 8.5 mm, 8 mm, dan 7.5 mm dengan hasil simulasi  $S_{11}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit* – *Split Ring Resonators* Pengurangan Jari-jari luar ( $R_0$ )

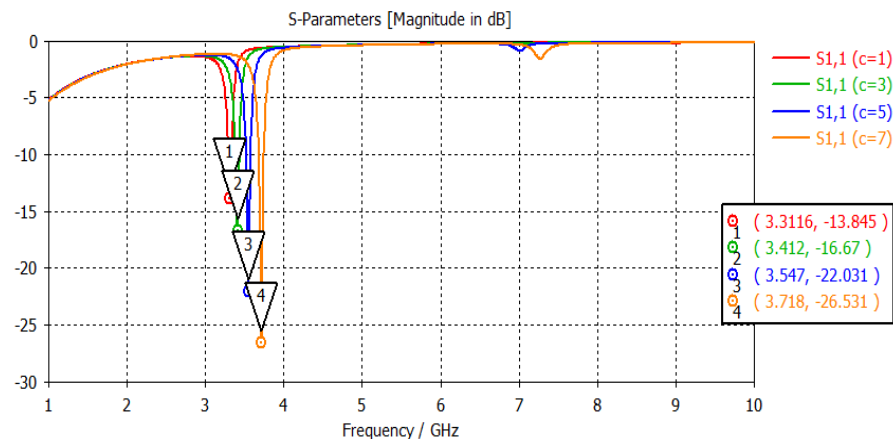
Gambar 3.12 menunjukkan grafik hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada pengurangan variasi jari-jari luar ( $R_0$ ) yang diperoleh hasil semakin kecil nilai jari-jari luar struktur *circular* maka semakin menurunkan tingkat kecuraman nilai  $S_{11}$ , yaitu pada lebar 9 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -15.6 dB dengan frekuensi resonan 3.35 GHz, lebar 8.5 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -17.9 dB dengan frekuensi resonan 3.51 GHz, lebar 8 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -19.1 dB dengan frekuensi resonan 3.7 GHz, lebar 7.5 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -16.53 dB dengan frekuensi resonan 3.9 GHz. Sehingga *absorption rate* semakin meningkat dan frekuensi resonan bergeser menuju frekuensi yang lebih tinggi, hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.13 berikut.



Gambar 3.13 *Absorption rate* Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit* – *Split Ring Resonators* Pengurangan Jari-jari Luar ( $R_0$ )

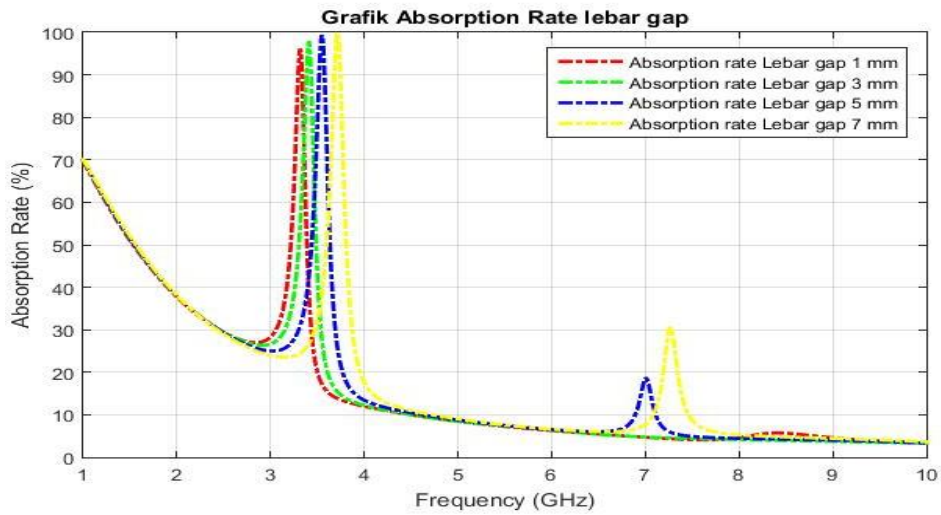
Gambar 3.13 Menunjukkan hasil *absorption rate* pengurangan variasi jari-jari luar unit sel 1, dari grafik tersebut diperoleh data bahwa semakin kecil nilai yang diberikan terhadap jari-jari luarnya maka tingkat *absorption ratenya* akan semakin meningkat, terbukti pada jari-jari luar bernilai 9 mm memiliki *asborption rate* sebesar 97%, 8.5 mm memiliki *absorption rate* 98%, 8 mm memiliki *absorption rate* 99%, dan 7.5 mm memiliki *absorption rate* sebesar 97.5%.

Selanjutnya, dilakukan proses iterasi pada lebar *gap* untuk mengetahui pengaruh pada karakteristik parameter metamaterial absorber. Untuk variasi penambahan lebar *gap* terdiri dari 1 mm, 3 mm, 5 mm, dan 7 mm dengan hasil simulasi  $S_{11}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 1 Geometri *Circular Equivalent Circuit – Split Ring Resonators* Lebar *Gap*

Gambar 3.14 menunjukkan grafik simulasi parameter  $S_{11}$ , yaitu pada lebar 1 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -13.8 dB dengan frekuensi resonan 3.31 GHz, lebar 3 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -16.6 dB dengan frekuensi resonan 3.41 GHz, lebar 5 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -22 dB dengan frekuensi resonan 3.54 GHz, lebar 7 mm diperoleh nilai  $S_{11}$  sebesar -26.53 dB dengan frekuensi resonan 3.7 GHz. Sehingga *absorption rate* semakin meningkat dan frekuensi resonan bergeser menuju frekuensi yang lebih tinggi, hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.15 berikut.



Gambar 3.15 Absorption rate Unit Sel 1 Geometri Circular Equivalentent Circui – Split Ring Resonators Lebar Gap

Berikut merupakan hubungan perbandingan pengaruh dimensi struktur unit sel metamaterial absorber secara simulasi dengan perhitungan rangkaian ekivalen (LC), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5 – Tabel 3.7 .

Tabel 3.5 Spesifikasi Dimensi Penambahan Jari-jari Luar Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekivalen (LC)

NO	Dimensi Struktur Unit Sel 1 Penambahan Jari-jari Luar		Frekuensi (Simulasi)	L (nH)	C (pF)	Frekuensi (LC)
	Variabel	Nilai				
1.	R <sub>1</sub>	9	3.35 GHz	13.83	0.1482	3.51 GHz
	w <sub>1</sub>	2				
	h	1.6				
	g	2				
2.	R <sub>2</sub>	9.5	3.21 GHz	14.78	0.1487	3.39 GHz
	w <sub>2</sub>	2				
	h <sub>2</sub>	1.6				
	g <sub>2</sub>	2				
3.	R <sub>3</sub>	10	3.07 GHz	15.75	0.1491	3.28 GHz
	w <sub>3</sub>	2				
	h <sub>3</sub>	1.6				
	g <sub>3</sub>	2				
4.	R <sub>4</sub>	10.5	2.93 GHz	16.72	0.1496	3.18 GHz
	w <sub>4</sub>	2				
	h <sub>4</sub>	1.6				
	g <sub>4</sub>	2				

Tabel 3.6 Spesifikasi Dimensi Pengurangan Jari-jari Luar Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekivalen (LC)

NO	Dimensi Struktur Unit Sel 1 Penambahan Jari-jari Luar		Frekuensi (Simulasi)	L (nH)	C (pF)	Frekuensi (LC)
	Variabel	Nilai				
1.	R <sub>1</sub>	9	3.35 GHz	13.83	0.1482	3.51 GHz
	w <sub>1</sub>	2				
	H	1.6				
	G	2				
2.	R <sub>2</sub>	8.5	3.51 GHz	12.90	0.1477	3.64 GHz
	w <sub>2</sub>	2				
	h <sub>2</sub>	1.6				
	g <sub>2</sub>	2				
3.	R <sub>3</sub>	8	3.70 GHz	11.92	0.1471	3.79 GHz
	w <sub>3</sub>	2				
	h <sub>3</sub>	1.6				
	g <sub>3</sub>	2				
4.	R <sub>4</sub>	7.5	3.9 GHz	11.07	0.1468	3.95 GHz
	w <sub>4</sub>	2				
	h <sub>4</sub>	1.6				
	g <sub>4</sub>	2				

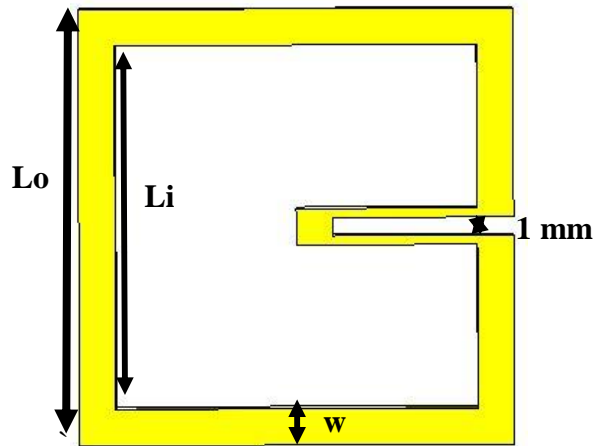
Tabel 3.7 Spesifikasi Dimensi Penambahan Lebar *Gap* Unit Sel 1 Hasil Simulasi dan Perhitungan Rangkaian Ekivalen (LC)

NO	Dimensi Struktur Unit Sel 1 Penambahan Jari-jari Luar		Frekuensi (Simulasi)	L (nH)	C (pF)	Frekuensi (LC)
	Variabel	Nilai				
1.	$R_1$	9	3.31	13.83	0.165	3.32 GHz
	$w_1$	2				
	$h$	1.6				
	$g$	1				
2.	$R_2$	9	3.41	13.83	0.140	3.60 GHz
	$w_2$	2				
	$h_2$	1.6				
	$g_2$	3				
3.	$R_3$	9	3.54	13.83	0.133	3.68 GHz
	$w_3$	2				
	$h_3$	1.6				
	$g_3$	5				
4.	$R_4$	9	3.71	13.83	0.128	3.77 GHz
	$w_4$	2				
	$h_4$	1.6				
	$g_4$	7				



### 3.4.2 Unit Sel 2 *Split Ring Slot Square*

Desain unit sel 2 merupakan struktur geometri *square* yang dirancang menggunakan metode *split ring slot* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Desain Unit Sel 1 *Split Ring Slot Square*

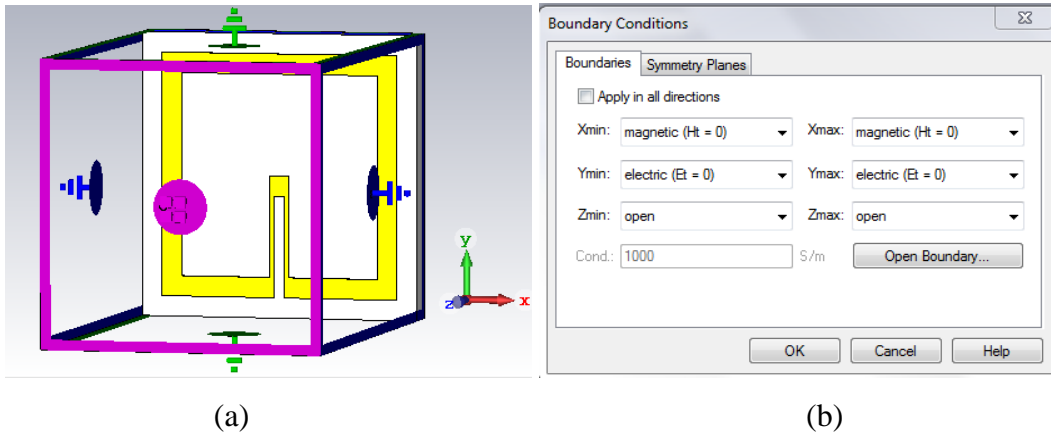
Table 3.8 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 2 *split ring slot square*

Tabel 3.8 Variabel Dimensi Unit Sel 2 dengan Teknik *Split Ring Slot*

Variable	Keterangan	Nilai
$\epsilon_r$	Konstanta dielektrik	4.3
$L_o$	Sisi luar	16 mm
$L_i$	Sisi dalam	14 mm
$G$	<i>Gap</i>	2 mm
$H$	Tinggi substrat	1.6 mm

Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 4 cm.

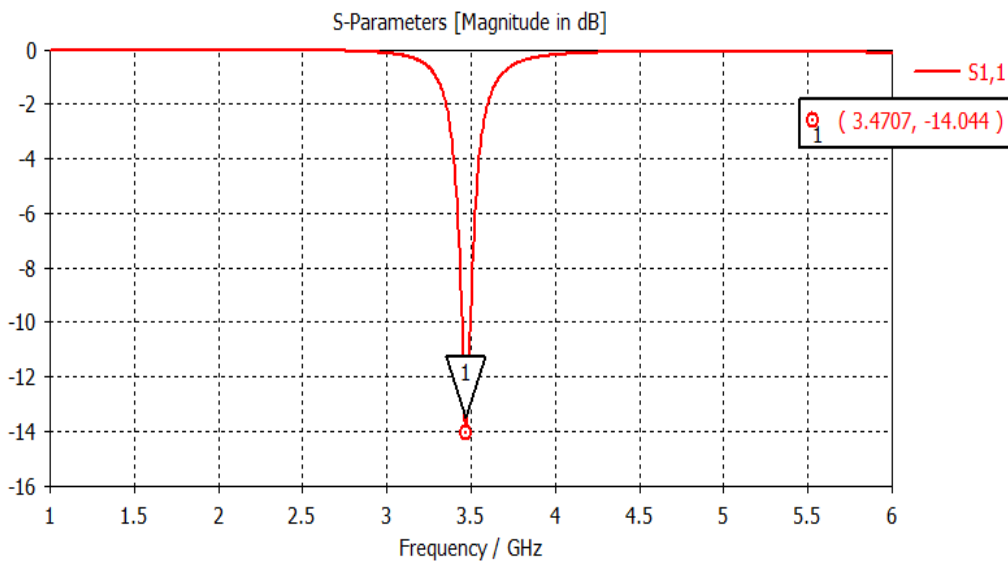
Gambar 3.17 menunjukkan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition*.



Gambar 3.17 *Set-up Periodic boundary condition Unit Sel 2 Split Ring Slot*

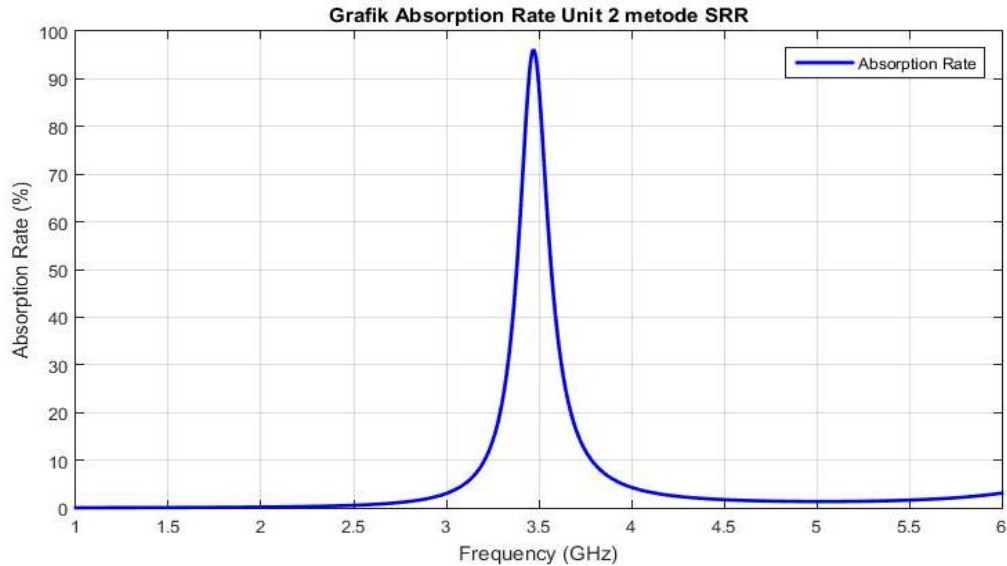
Gambar 3.17 (a) menunjukkan desain unit sel yang di *set-up* dengan prinsip *periodic boundary condition* dan Gambar 3.17 (b) menunjukkan spesifikasi *set-up* prinsip *periodic boundary condition*.

Hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 2 *split ring slot square* menggunakan software CST Studio pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 6 GHz ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 1 *Split Ring Slot Square*

Gambar 3.18 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  sebesar -14 dB pada frekuensi resonan 3.4 GHz . Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ , sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.19



Gambar 3.19 *Absorption rate* Unit Sel 2 *Split Ring Slot Square*

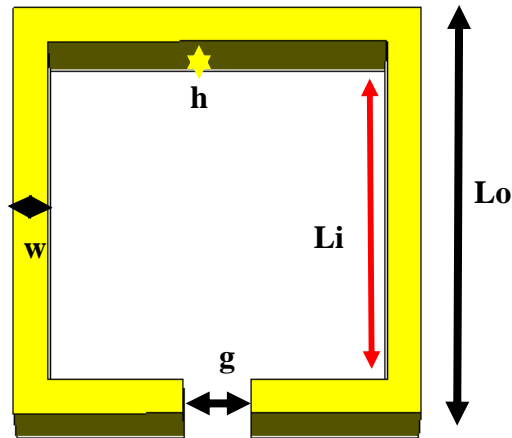
Gambar 3.19 menunjukkan nilai *absorption rate* pada frekuensi resonan 3.47 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 96.25%. Sehingga memenuhi syarat minimal *absorption rate*.

Selanjutnya dilakukan proses validasi frekuensi resonan menggunakan metode *split ring slot* melalui persamaan 2.15.

$$f_c \approx \frac{3 \cdot 10^8}{3,14(16 \cdot 10^{-3} + 14 \cdot 10^{-3}) \left( \frac{1 + 4,3}{2 * 4,3} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$f_c \approx 3.95 \text{GHz}$$

Berikut merupakan desain unit sel 2 geometri *square* dengan metode *equivalent circuit - split ring resonators* yang ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Desain Unit Sel 1 Geometri *Square Equivalent Circuit – Split Ring Resonators*

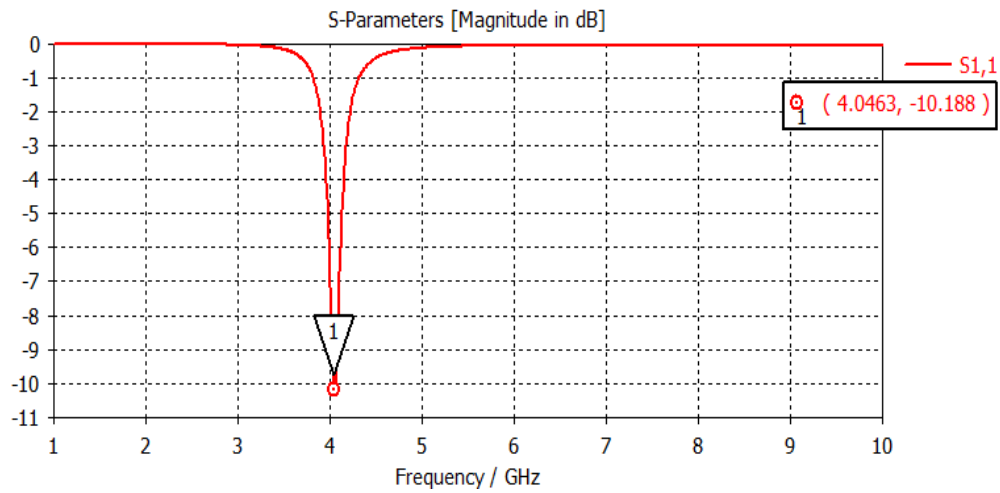
Table 3.9 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 2 geometri *square equivalent circuit -split ring resonators*

Tabel 3.9 Variabel Dimensi Unit Sel 2 dengan Teknik EC-SRR

Variable	Keterangan	Nilai
$E_r$	Konstanta dielektrik	4.6
$l$	Panjang sisi <i>square</i>	12 mm
$w$	Lebar antara panjang sisi <i>square</i>	2 mm
$g$	<i>Gap</i>	2 mm
$h$	Tinggi substrat	1.6 mm

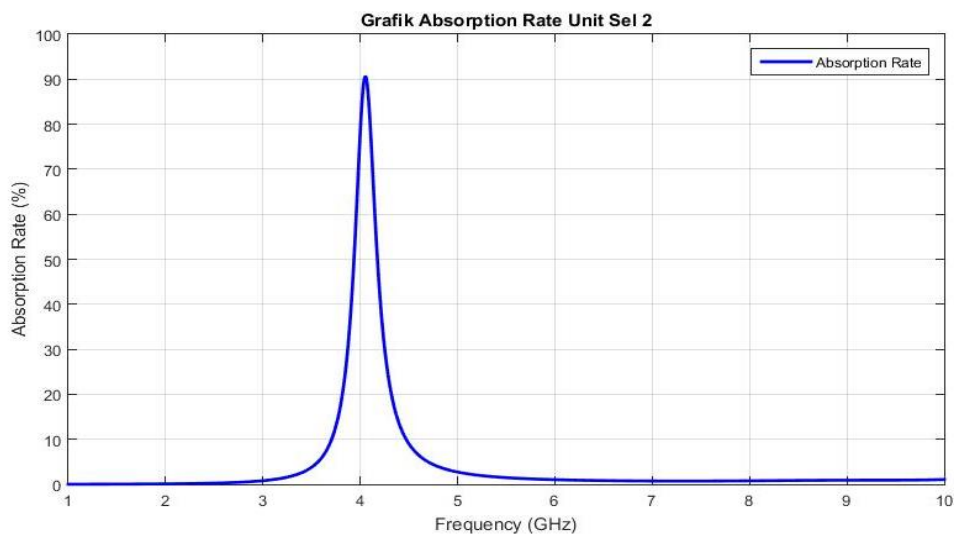
Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 3 cm.

Hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 2 teknik *equivalent circuit - split ring resonators* ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 2 Geometri *Square Equivalent Circuit – Split Ring Resonators*

Dari Gambar 3.21 diperoleh nilai parameter  $S_{11}$  -10 dB pada frekuensi resonan 4.04 GHz . Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ , sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 *Absorption rate* Unit Sel 2 Geometri *Square Equivalent Circuit – Split Ring Resonators*

Gambar 3.22 menunjukkan nilai *absorption rate* pada frekuensi resonan 4.04 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 90%.

Selanjutnya dilakukan proses validasi frekuensi resonan menggunakan metode *equivalent circuit – split ring resonator* melalui persamaan 2.16 - 2.23, sehingga diperoleh nilai induktansi (L) dan kapasitansi (C) sebagai berikut.

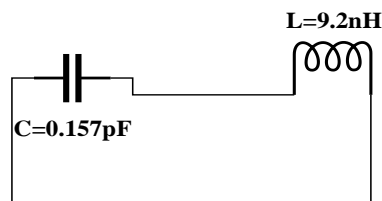
$$L = 1,256 \cdot 10^{-6} \left( \frac{12 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \left( \ln \frac{4 \left( \frac{12 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)}{1,6 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}} - 1 \right)$$

$$L = 9.2nH$$

$$C = \left[ \frac{1}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 4,3 \left[ \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{2,314 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \right]} + \frac{1}{8,854 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{2,314 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \right]} \right]^{-1} + \frac{2,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{3,14} \ln \frac{8 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}$$

$$C = 0.157pF$$

Analisa *equivalent circuit* (dengan asumsi kapasitansi dan induktansi diketahui):



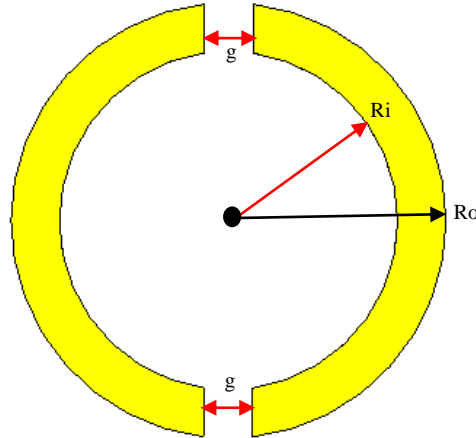
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 4.10 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hipotesa sementara, metode *equivalent circuit – split ring resonator* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode *split ring slot*, karena dapat merepresentasikan dengan baik hubungan antara hasil simulasi dengan perhitungan dimensi unit sel metamaterial absorber. Hal ini diperkuat dari data selisih frekuensi resonan pada desain unit sel 2 metode *split ring slot* dengan hasil simulasi sebesar 0.48 GHz, sedangkan selisih frekuensi resonan pada desain unit

sel 2 geometri *square equivalent circuit – split ring resonator* dengan hasil simulasi sebesar 0.05 GHz

### 3.4.3 Unit Sel 3 Geometri *Circular 2 Gap*

Desain unit sel 3 merupakan struktur geometri *circular 2 Gap* yang dirancang menggunakan metode *equivalent circuit – split ring resonators* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Desain Unit Sel 3 Geometri *Circular 2 Gap*

Tabel 3.10 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 3 geometri *circular 2 Gap*.

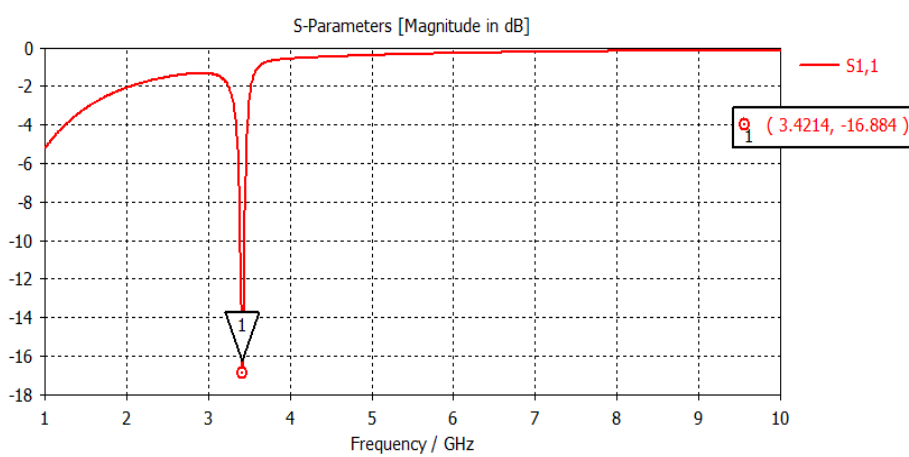
Tabel 3.10 Variabel Dimensi Unit Sel 3 Geometri *Circular 2 Gap*

No	Varibel	Keterangan	Nilai (mm)
1	$R_0$	Ring luar	9
2	$R_i$	Ring dalam	7
3	$g$	Gap	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit

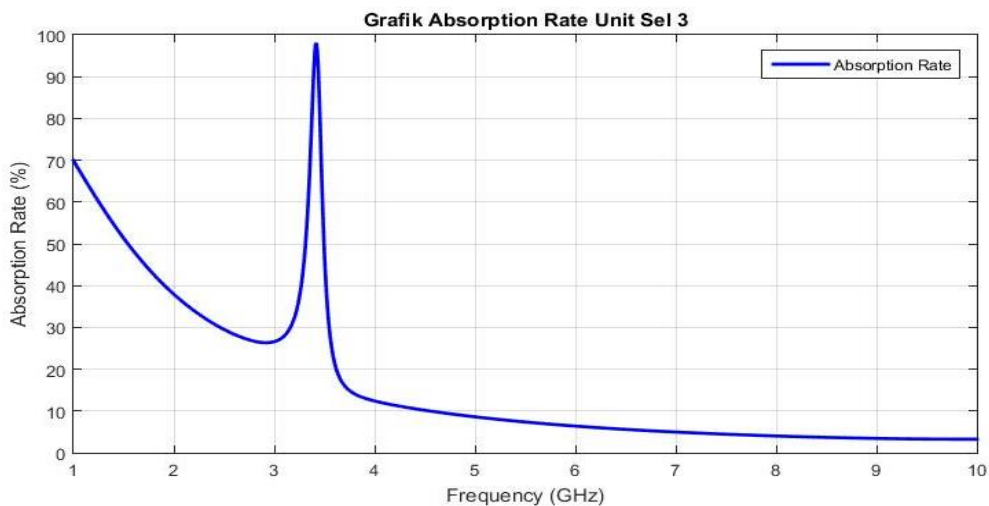
sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 9 cm.

Gambar 3.24 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 3 geometri *circular 2 Gap* pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz.



Gambar 3.24 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 3 Geometri *Circular 2 Gap*

Dari Gambar 3.24 diperoleh nilai parameter  $S_{11}$  -16.8 dB pada frekuensi resonan 3.42 GHz . Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  Sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.25.



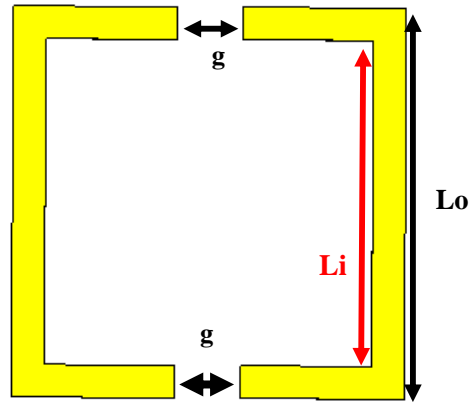
Gambar 3.25 *Absorption rate* unit sel 3 Geometri *Circular 2 Gap*

Gambar 3.25 menunjukkan nilai *absorption rate* pada frekuensi resonan 3.42 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 98.25%.



### 3.4.4 Unit Sel 4 Geometri *Square 2 Gap*

Desain unit sel 4 merupakan struktur geometri *square 2 Gap* yang dirancang menggunakan metode *equivalent circuit – split ring resonators* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.26.



Gambar 3.26 Desain Unit Sel 4 Geometri *Square Gap 2*

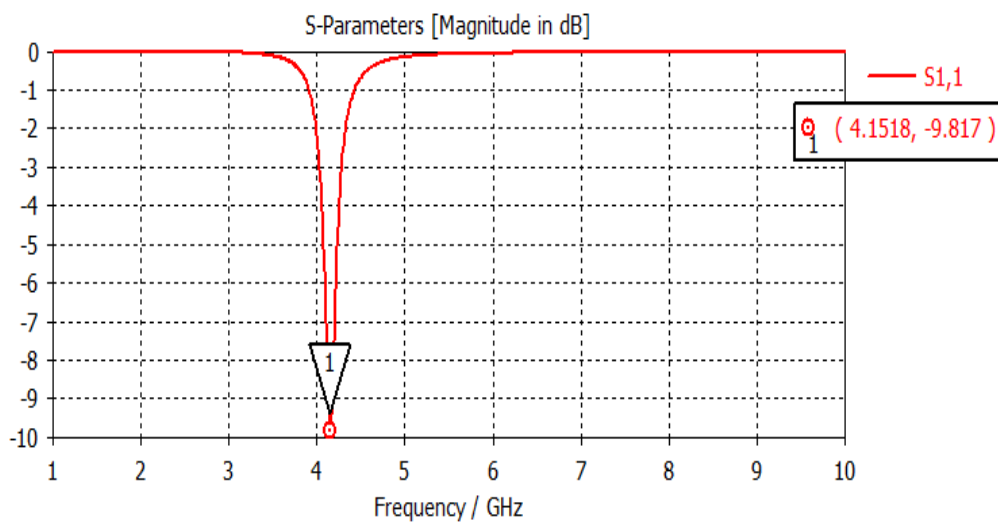
Tabel 3.11 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 4 geometri *square 2 Gap*.

Tabel 3.11 Variabel Dimensi Unit Sel 4 Geometri *Square 2 Gap*

No	Varibel	Keterangan	Nilai (mm)
1	$L_0$	Sisi luar	12
2	$L_i$	Sisi dalam	10
3	$g$	<i>Gap</i>	2
4	$h$	Tinggi subtrat	1.6

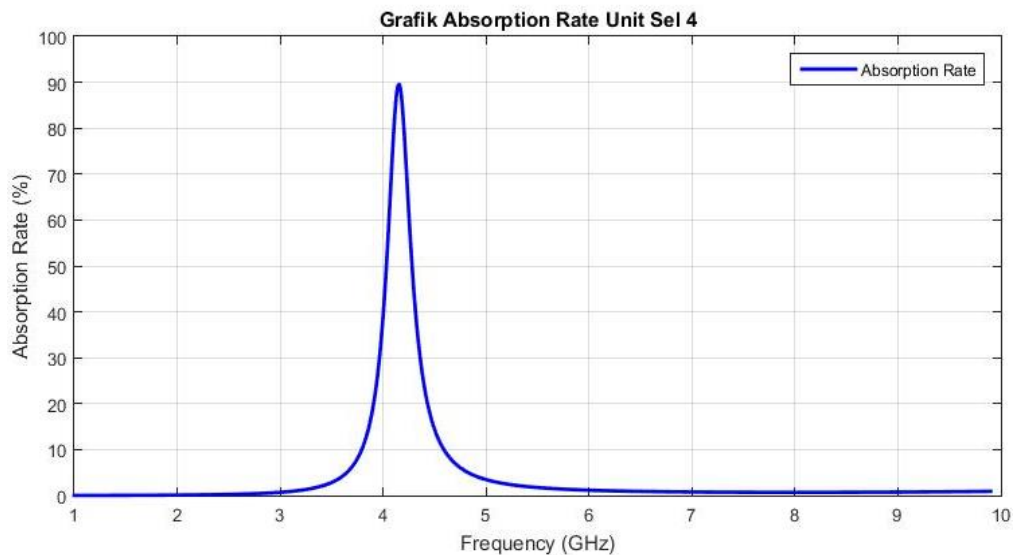
Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 3 cm.

Gambar 3.27 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 4 geometri *square 2 Gap* rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz.



Gambar 3.27 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 4 Geometri *Square Gap 2*

Berdasarkan Gambar 3.27 unit sel 4 memiliki nilai parameter  $S_{11}$  -9.8 dB pada frekuensi resonan 4.15 GHz. Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.29.

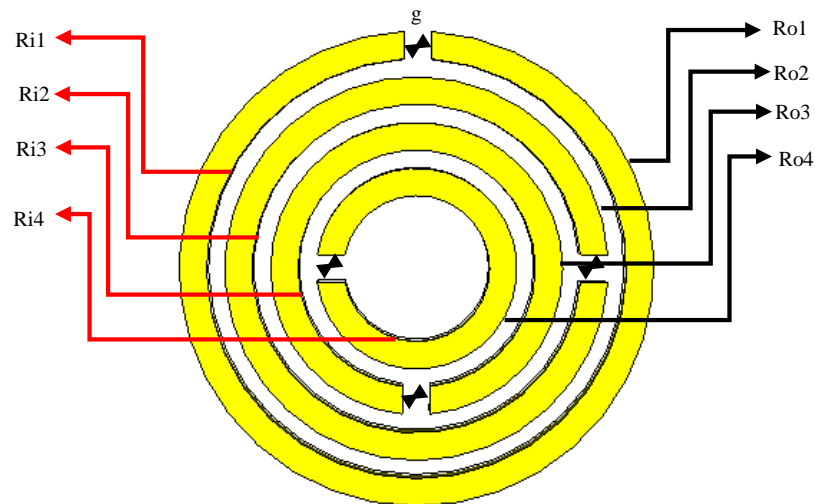


Gambar 3.28 *Absorption rate* Unit Sel 4 Geometri *Square Gap 2*

Gambar 3.28 menunjukkan grafik *absorption rate* pada frekuensi resonan 4.15 GHz dengan tingkat *absorption rate* sebesar 89.25%.

### 3.4.5 Unit Sel 5 Geometri *Nested Circular 1 Gap*

Desain unit sel 5 merupakan struktur *split ring resonators circular* bersarang dengan 1 *gap* pada setiap *ring*, seperti yang ditunjukkan pada 3.29.



Gambar 3.29 Desain Unit Sel 5 Geometri *Nested Circular 1 Gap*

Tabel 3.12 menunjukkan spesifikasi variabel unit sel 5 geometri *circular* bersarang 1 *Gap*.

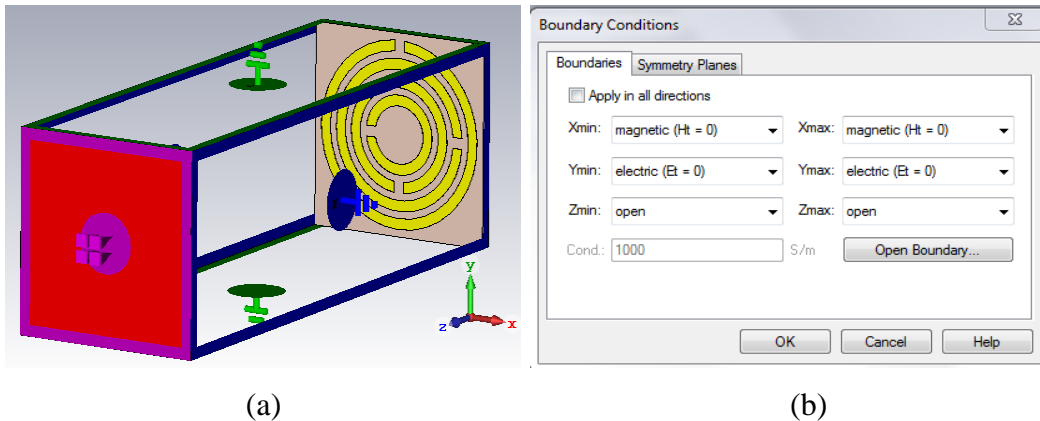
Tabel 3.12 Variabel Unit Sel 5 Geometri *Nested Circular 1 Gap*

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			<i>Ring 1</i>	<i>Ring 2</i>	<i>Ring 3</i>	<i>Ring 4</i>
1	$R_0$	<i>Ring</i> luar	13	10.5	8	5.5
2	$R_i$	<i>Ring</i> dalam	11.5	9	6.5	4
3	G	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	H	Tinggi subtrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit

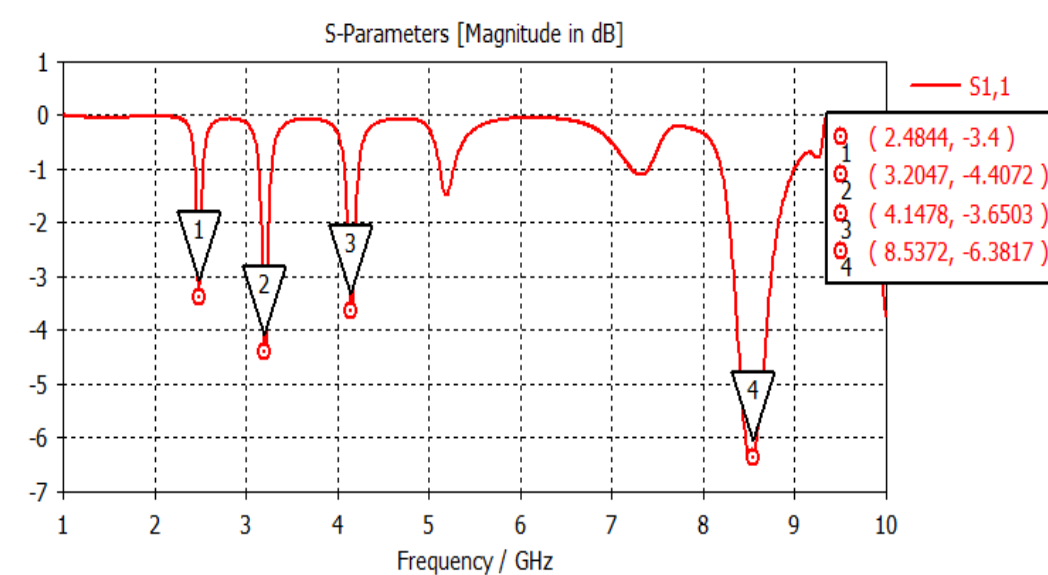
sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 11 cm.

Gambar 3.30 menunjukkan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition*.



Gambar 3.30 *Set-up Periodic boundary condition* Unit Sel 5

Gambar 3.31 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  unit sel 5 geometri *circular* bersarang 1 *gap*.

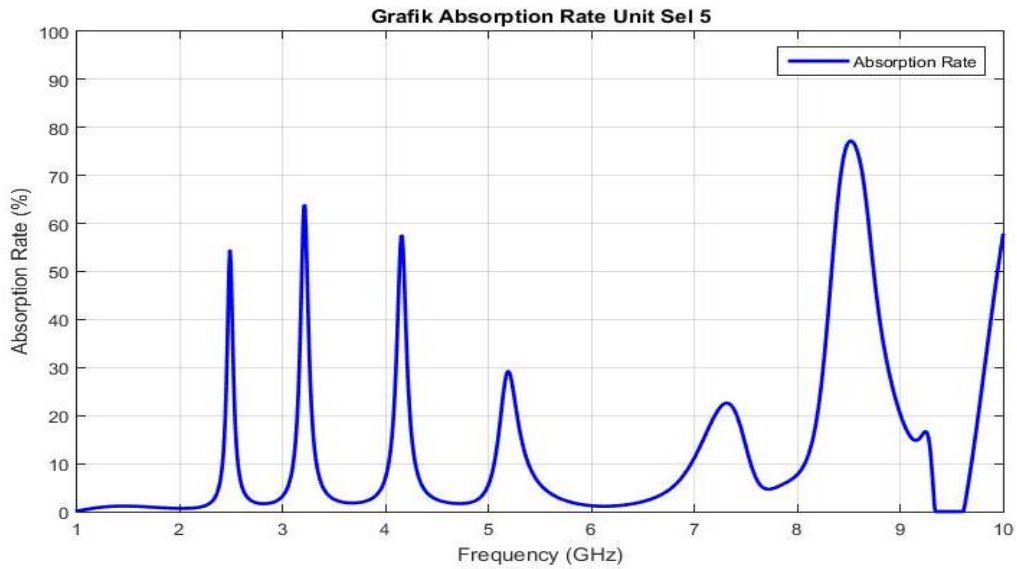


Gambar 3.31 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 5 Geometri *Nested Circular* 1 *Gap*

Gambar 3.31 menunjukkan grafik nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.48 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -3.4 dB, frekuensi 3.2 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -4.4 dB, frekuensi 4.1 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -3.6 dB, frekuensi 8.5 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -6.4 dB. Berdasarkan hasil

tersebut desain unit sel 5 memiliki frekuensi resonan *multiband*, namun parameter  $S_{11}$  belum mencapai nilai minimumnya yaitu -7 dB.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.33.



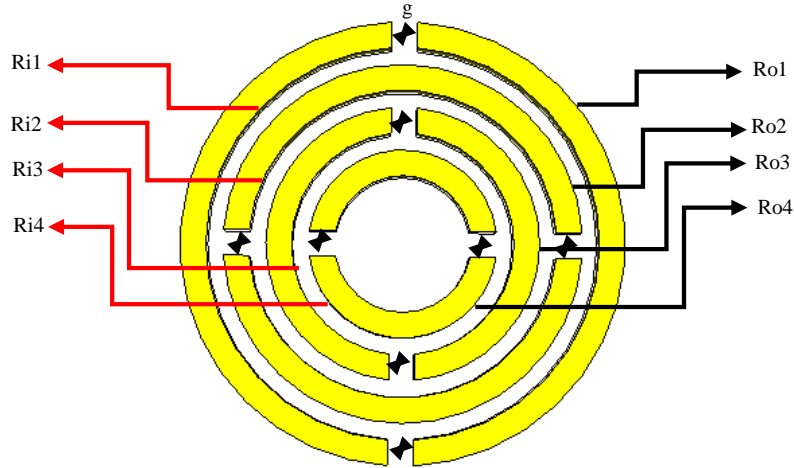
Gambar 3.32 *Absorption rate* Unit sel 5 Geometri *Nested Circular* 1 Gap

Pada Gambar 3.33 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.48 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 54%, frekuensi 3.2 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 63.7%, frekuensi 4.1 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 57.48%, frekuensi 8.5 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 77.17%.

Berdasarkan Gambar 3.32 desain unit sel 5 belum mencapai nilai minimum *absorption rate* 80%, namun grafik menunjukkan desain unit sel 5 geometri *circular* bersarang 1 gap memiliki frekuensi *multiband*.

### 3.4.6 Unit Sel 6 *Nested Circular 2 Gap*

Desain unit sel 6 merupakan struktur *split ring resonators circular* bersarang dengan 2 *gap* pada setiap *ring*, yang ditunjukkan pada Gambar 3.33.



Gambar 3.33 Desain unit sel 6 Geometri *Nested Circular 2 Gap*

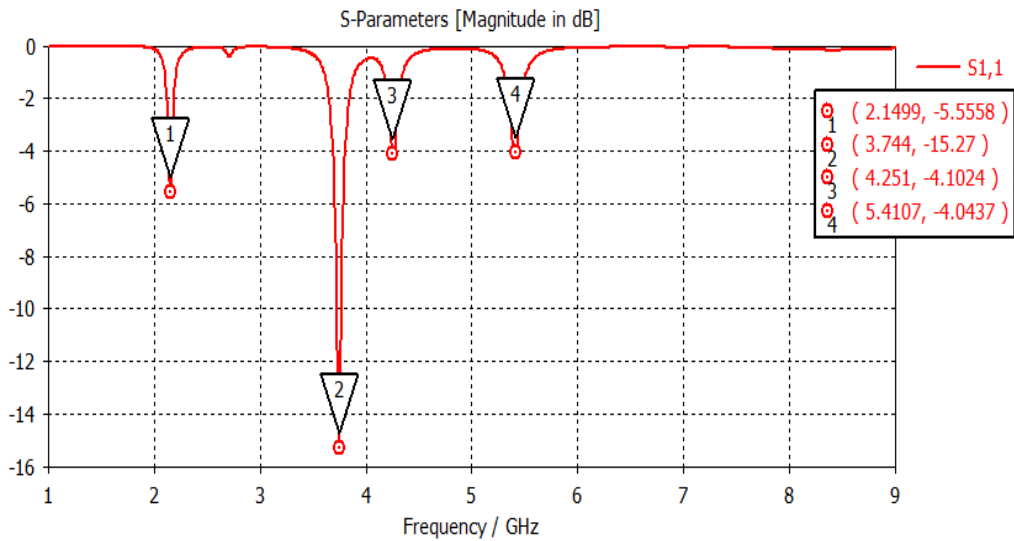
Tabel 3.13 menunjukkan spesifikasi variabel unit sel 6 geometri *circular* bersarang 2 *gap*

Tabel 3.13 Variabel Unit Sel 6 Geometri *Nested Circular 2 Gap*

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			<i>Ring 1</i>	<i>Ring 2</i>	<i>Ring 3</i>	<i>Ring 4</i>
1	$R_0$	<i>Ring</i> luar	13	10.5	8	5.5
2	$R_i$	<i>Ring</i> dalam	11.5	9	6.5	4
3	$g$	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses set-up menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di set-up *perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di set-up *perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 11 cm.

Gambar 3.34 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada unit sel 6 geometri *circular* bersarang 2 *gap* pada rentang frekuensi antara 1 GHz – 10 GHz.

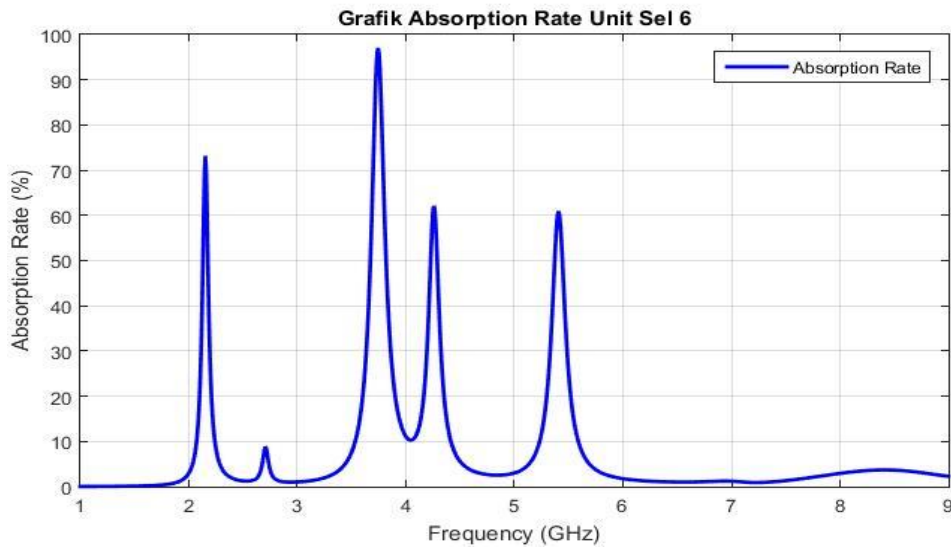


Gambar 3.34 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 6 Geometri *Nested Circular 2 Gap*

Gambar 3.34 menunjukkan grafik nilai parameter parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.1 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -5.5 dB, frekuensi 3.7 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -15.27 dB, frekuensi 4.2 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -4.1 dB, frekuensi 5.4 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -4.0 dB.

Berdasarkan Gambar 3.34 desain unit sel 6 memiliki nilai parameter  $S_{11}$  yang telah mencapai batas minimum -7 dB yaitu pada frekuensi 3.7 GHz, namun terdapat tiga frekuensi resonan yang belum mencapai batas minimumnya. Berdasarkan hipotesa sementara perbandingan struktur unit sel 5 dengan sel 6 dalam jumlah dan letak *gap* mempengaruhi kinerja parameter metamaterial absorber.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.35.

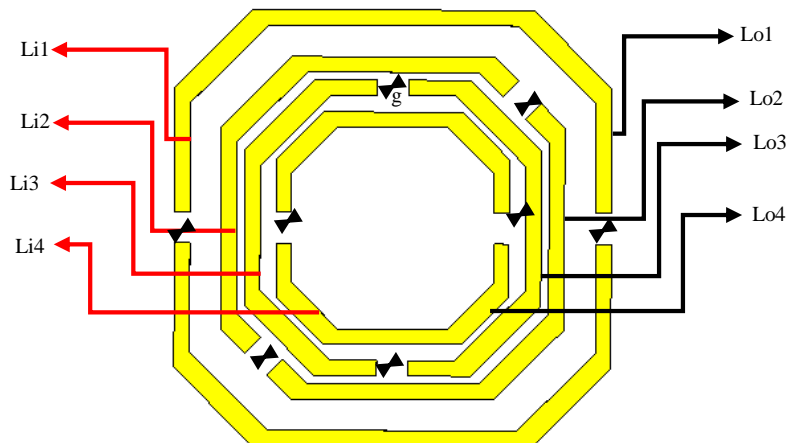


Gambar 3.35 *Absorption rate* Unit Sel 6 Geometri *Nested Circular 2 Gap*

Pada Gambar 3.35 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. pada frekuensi 2.1 GHz *absorption rate* mencapai 73%, frekuensi 3.7 GHz *absorption rate* mencapai 97%, frekuensi 4.2 GHz *absorption rate* mencapai 62.1%, frekuensi 5.4 GHz *absorption rate* mencapai 60.8%.

### 3.4.7 Unit sel 7 Geometri *Nested Square Chamfer 45°*

Desain unit sel 7 merupakan struktur *split ring resonators square* bersarang dengan ujung tiap sisi berbentuk *chamfer* sudut  $45^\circ$ , yang ditunjukkan pada Gambar 3.36.



Gambar 3.36 Desain Unit sel 7 Geometri *Nested Square Chamfer 45°*



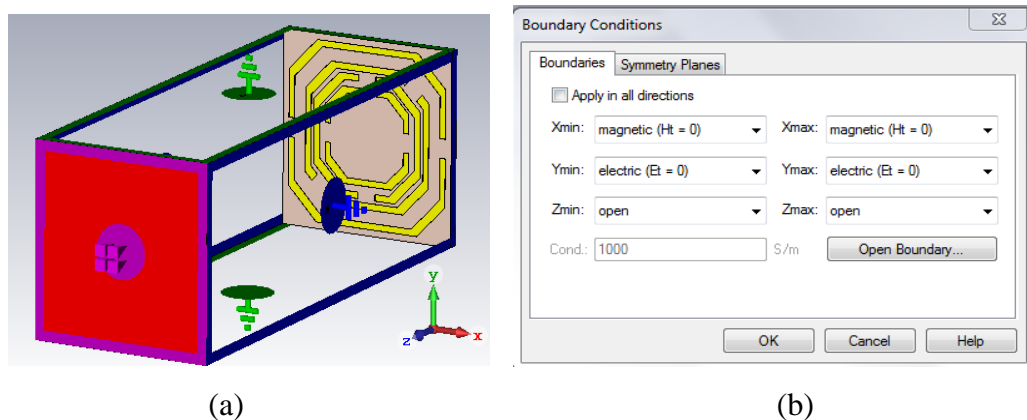
Table 3.14 menunjukkan spesifikasi variabel unit sel 7 geometri *square* bersarang dengan ujung setiap sisi berbentuk *chamfer 45°*.

Tabel 3.14 Variabel Unit sel 7 Geometri *Nested Square Chamfer 45°*

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	22	19	15
2	$L_i$	Sisi dalam	26	20	17	13
3	G	<i>Gap</i>	2	2	2	2
4	H	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses set-up menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di set-up *perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di set-up *perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 12 cm.

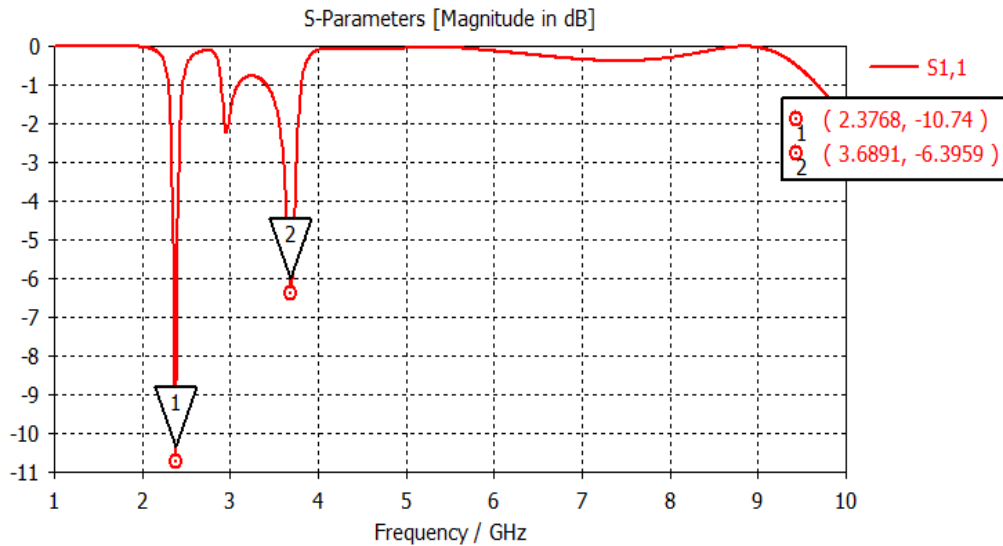
Gambar 3.37 menunjukkan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition*.



Gambar 3.37 Set-up Periodic boundary condition Unit Sel 7

Gambar 3.37 (a) menunjukkan desain unit sel yang di *set-up* dengan prinsip *periodic boundary condition* dan Gambar 3.37 (b) menunjukkan spesifikasi *set-up* prinsip *periodic boundary condition*

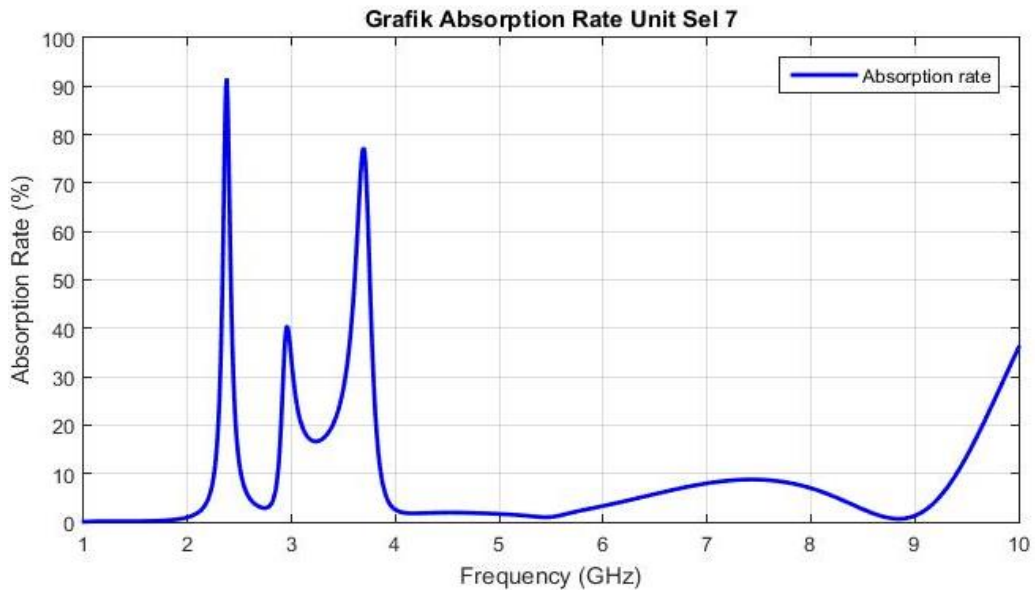
Gambar 3.38 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada unit sel 7 geometri *nested square chamfer 45°*.



Gambar 3.38 Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 7 Geometri *Nested Square Chamfer 45°*

Gambar 3.38 menunjukkan grafik nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonansi. Pada frekuensi 2.3 GHz nilai  $S_{11}$  sebesar -10.74 dB, frekuensi 3.68 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -6.39 dB. Berdasarkan grafik tersebut desain unit sel 7 geometri *nested square chamfer 45°* memiliki frekuensi *dual-band*, namun hanya terdapat satu parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas nilai minimum -7 dB yaitu pada frekuensi 2.37 GHz.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.38.

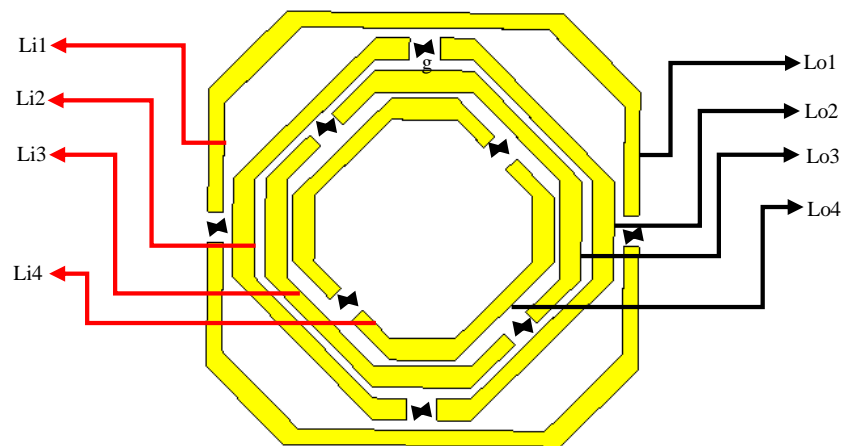


Gambar 3.39 Absorption rate Unit Sel 7 Geometri *Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup>*

Gambar 3.39 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonansi diantaranya, pada frekuensi 2.3 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 91%. frekuensi 3.6 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 77.28%.

### 3.4.8 Unit Sel 8 Geometri *Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation*

Desain unit sel 8 merupakan struktur *split ring resonators square* bersarang dengan ujung tiap sisi berbentuk *chamfer* sudut 45°, dan sebagian *ring* berotasi sebesar 45°, yang ditunjukkan pada Gambar 3.40.



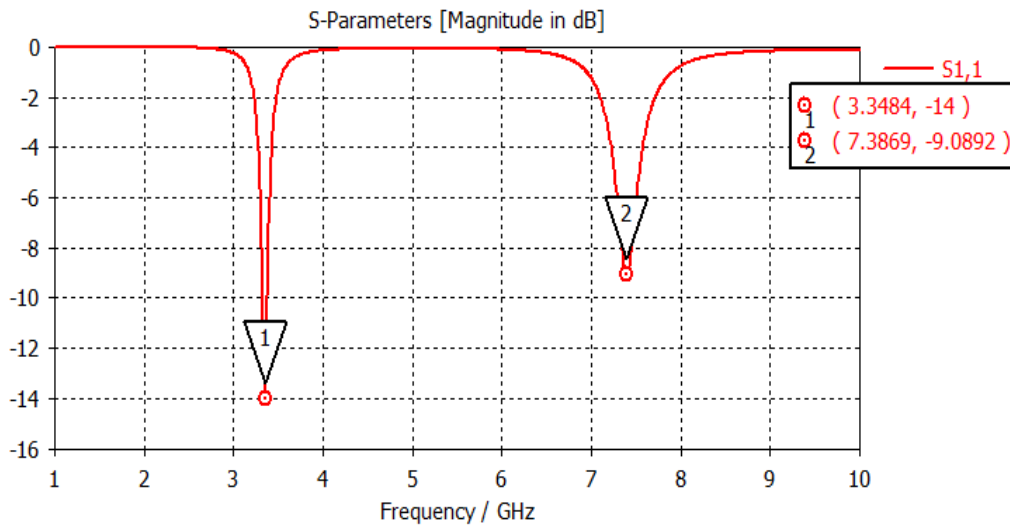
Gambar 3.40 Desain Unit Sel 8 Geometri *Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation*

Tabel 3.15 menunjukkan spesifikasi dimensi unit sel 8 geometri *square* bersarang dengan ujung setiap sisi berbentuk *chamfer*  $45^\circ$ .

Tabel 3.15 Variabel Unit Sel 8 Geometri *Nested Square Chamfer*  $45^\circ$

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	22	19	15
2	$L_i$	Sisi dalam	26	20	17	13
3	$g$	<i>Gap</i>	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

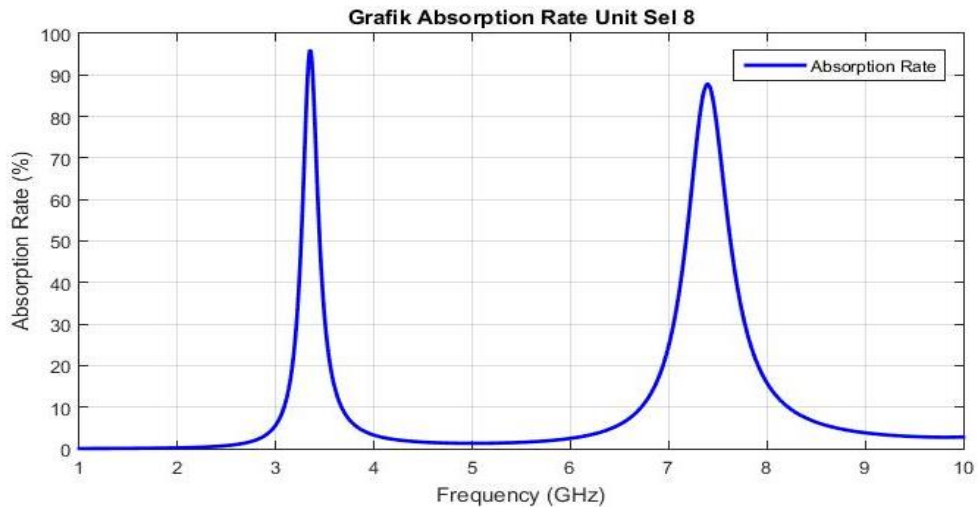
Berikut hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada unit sel 8 geometri *nested square chamfer rotation* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.41.



Gambar 3.41 Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 8 *Nested Square Chamfer*  $45^\circ$  *Rotation*

Gambar 3.41 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonansi. Pada frekuensi resonansi 3.3 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -14 dB, frekuensi 7.3 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.0 dB. Pada perancangan unit sel 8 ini dilakukan beberapa modifikasi struktur yaitu dengan merotasi tiga sisi ring dalam, berdasarkan hipotesa sementara dengan merotasi beberapa struktur sisi *ring* dalam diperoleh dua parameter  $S_{11}$  yang mencapai batas minimal -7 dB yaitu pada frekuensi 3.3 GHz dan 7.3 GHz.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.42.

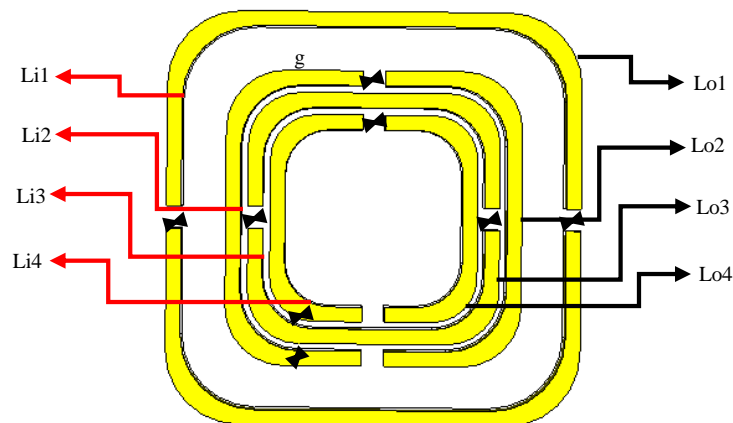


Gambar 3.42 *Absorption rate Unit Sel 8 Nested Square Chamfer 45<sup>0</sup> Rotation*

Gambar 3.42 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. pada frekuensi 3.3 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 96%, frekuensi 7.3 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 87.7%.

### 3.4.9 Unit sel 9 Geometri *Nested Square Blend*

Desain unit sel 9 merupakan struktur *split ring resonators square* bersarang dengan ujung tiap sisi berbentuk *blend* diskontinuitas, yang ditunjukkan pada Gambar 3.43.



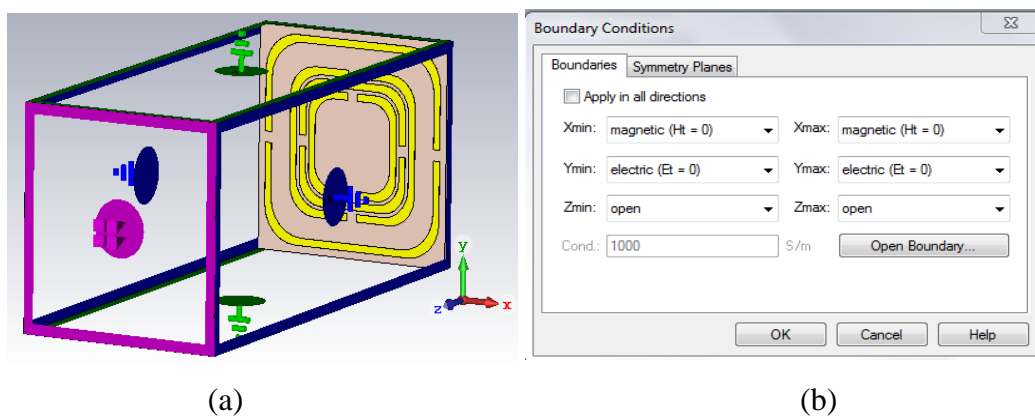
Gambar 3.43 *Desain Unit Sel 9 Geometri Nested Square Blend*

Adapun spesifikasi variabel unit sel 9 *nested square blend* ditunjukkan pada Tabel 3.16.

Tabel 3.16 Variabel Unit Sel 9 *Nested Square Blend*

No	Varibel	Keterangan	Nilai (mm)			
			sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	17	14
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18	15	12
3	$g$	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

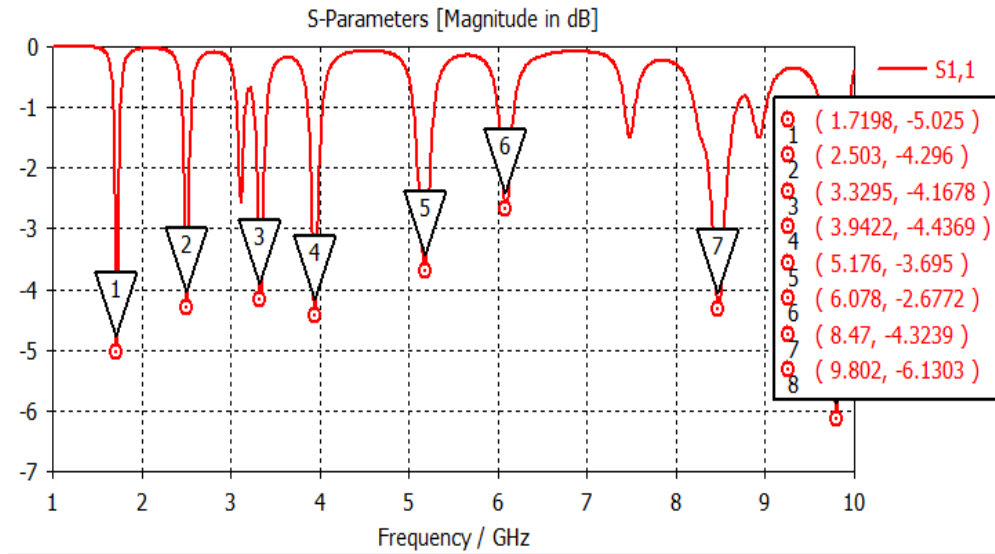
Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far filed* sebesar 12 cm.



Gambar 3.44 *Set-up Periodic boundary condition Unit sel 9*

Gambar 3.44 (a) menunjukkan desain unit sel 1 *split ring slot circular* yang di *set-up* dengan prinsip *periodic boundary condition* dan Gambar 3.44 (b) menunjukkan spesifikasi *set-up* prinsip *periodic boundary condition*.

Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 9 dengan CST Studio 2017 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 1 GHz -10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.45.

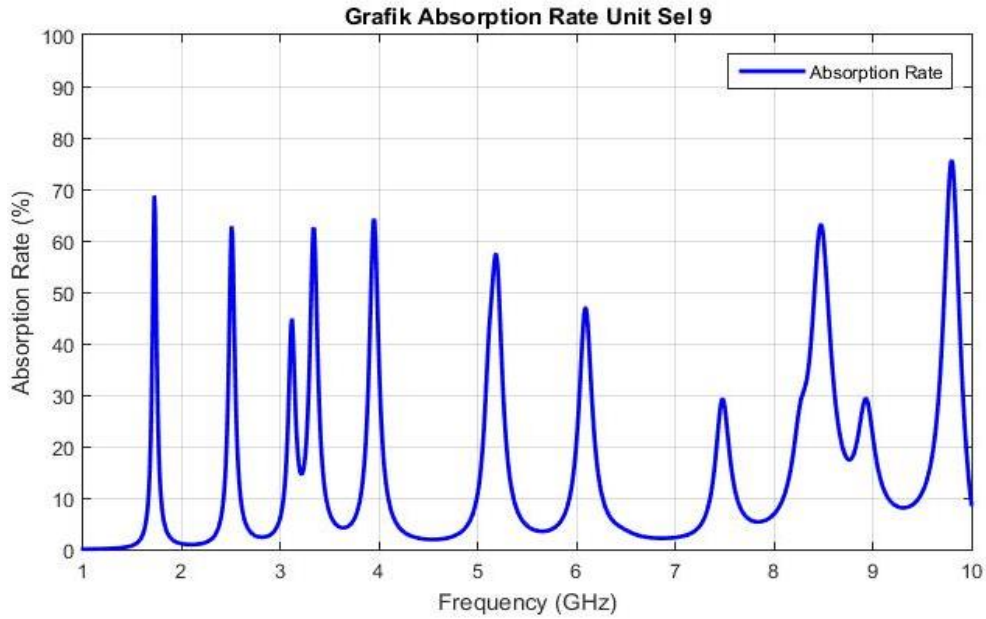


Gambar 3.45 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 9 *Nested Square Blend*

Gambar 3.45 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 1.7 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -5 dB, frekuensi 2.5 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -4.2 dB, frekuensi 3.3 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -4.1 dB, frekuensi 3.9 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -4.4 dB, frekuensi 5.1 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -3.6 dB, frekuensi 6 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -2.6 dB, frekuensi 8.4 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -4.3 dB, frekuensi 9 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6 dB.

Berdasarkan Gambar 3.44 desain unit sel 9 memiliki frekuensi resonan *multiband* dengan jumlah *peak* sebanyak delapan frekuensi resonan, namun semua parameter  $S_{11}$  belum mencapai batas nilai minimalnya yaitu -7 dB. Sehingga pada desain unit selanjutnya akan dirancang modifikasi dengan merotasi sebagian sisi *ring*.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.46.



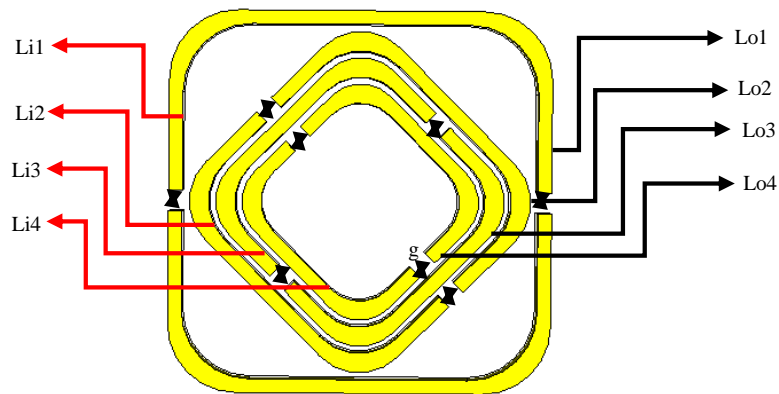
Gambar 3.46 *Absorption rate* Unit sel 9 *Nested Square Blend*

Gambar 3.46 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 1.7 GHz memiliki nilai *absorption rate* sebesar 68.7%, frekuensi 2.5 GHz *absorption rate* sebesar 61.7% dB, frekuensi 3.3 GHz *absorption rate* sebesar 62.4% dB, frekuensi 3.9 GHz *absorption rate* sebesar 63.7%, frekuensi 5.1 GHz *absorption rate* sebesar 57.4%, frekuensi 6 GHz *absorption rate* sebesar 46.8%, frekuensi 8.4 GHz *absorption rate* sebesar 62.3%, frekuensi 9 GHz *absorption rate* sebesar 75.6% dB.



### 3.4.10 Unit sel 10 Geometri *Nested Square Blend Rotation*

Desain unit sel 10 merupakan struktur *split ring resonators square* bersarang dengan ujung tiap sisi berbentuk *blend* diskontinuitas dan sebagian sisi *ring* dirotasi sebesar  $45^0$ , yang ditunjukkan pada Gambar 3.47.



Gambar 3.47 Desain Unit Sel 10 Geometri *Nested Square Blend*

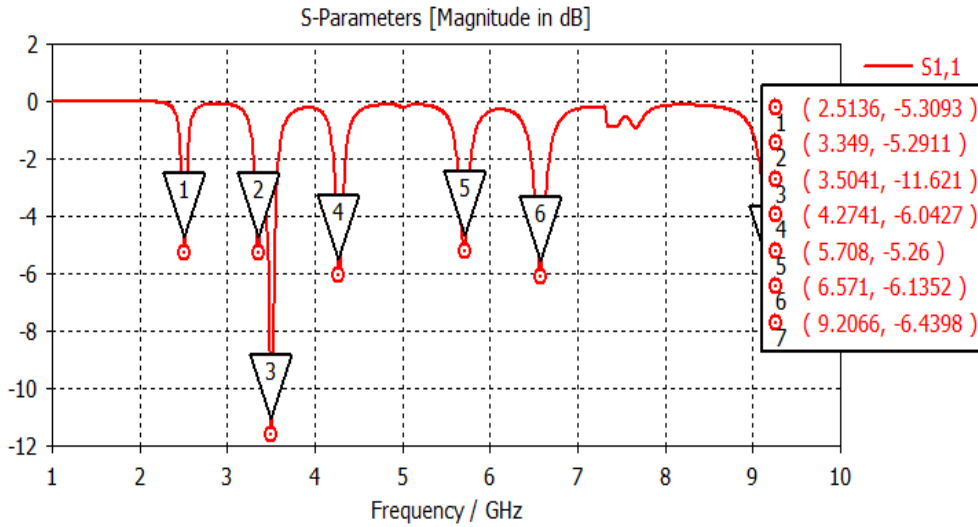
Adapun spesifikasi variabel unit sel 10 geometri *nested square blend* ditunjukkan pada Tabel 3.17.

Tabel 3.17 Variabel Unit Sel 10 Geometri *Nested Square Blend*

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	17	14
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18	15	12
3	$G$	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	$H$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far filed* sebesar 12 cm.

Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 10 geometri *nested square blend* dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz ditunjukkan pada Gambar 3.47.

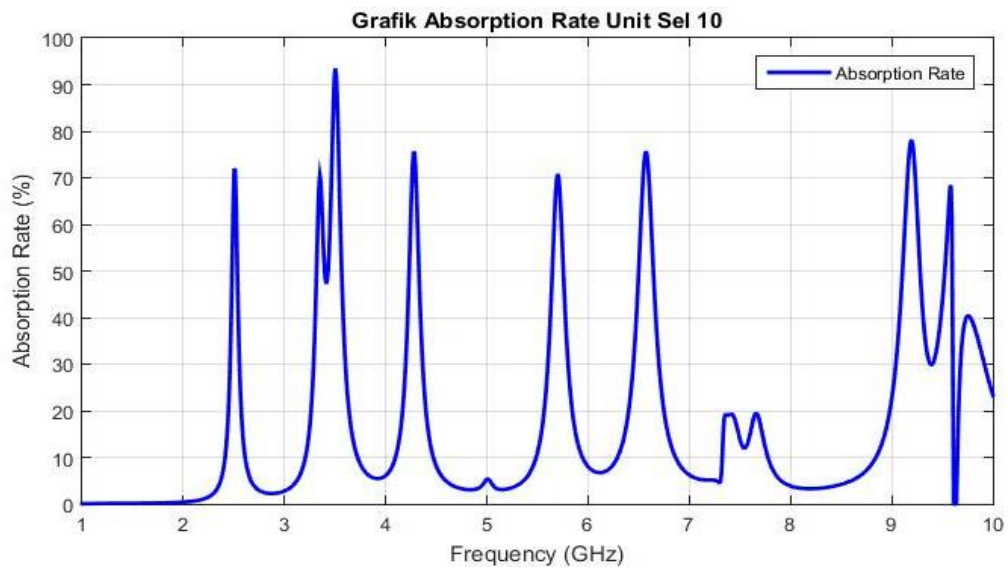


Gambar 3.48 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 10 Geometri *Nested Square Blend*

Gambar 3.48 menunjukkan nilai Parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.5 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -5.3 dB, frekuensi 3.3 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -5.2 dB, frekuensi 3.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -11.6 dB, frekuensi 4.2 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6 dB, frekuensi 5.7 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -5.2 dB, frekuensi 6.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -5.26 dB, frekuensi 9.2 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6.4 dB.

Berdasarkan Gambar 3.47 pada desain unit sel 10 diperoleh parameter frekuensi resonan *multiband* dengan jumlah *peak* sebanyak tujuh frekuensi resonan, serta terdapat salah satu parameter  $S_{11}$  yang telah mencapai batas minimum -7 dB pada frekuensi 3.5 GHz.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.49.

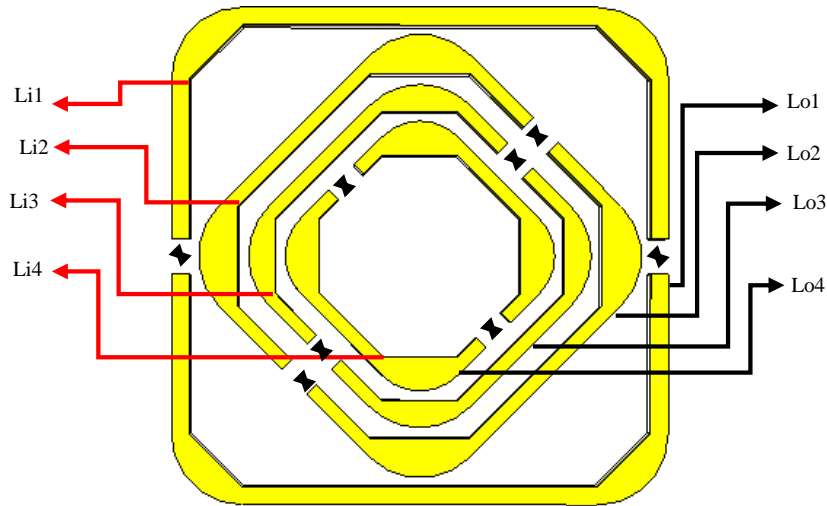


Gambar 3.49 *Absorption rate* Unit Sel 10 Geometri *Nested Square Blend*

Berdasarkan Gambar 3.49 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.5 GHz memiliki nilai *absorption rate* sebesar 71.9%, frekuensi 3.3 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 70.4%, frekuensi 3.5 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 93.4%. frekuensi 4.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 75.35%, pada frekuensi 5.7 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 70.75%, frekuensi 6.5 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 75%, frekuensi 9.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 77.85%.

### 3.4.11 Desain Unit Sel 11

Berdasarkan hasil komparasi dari beberapa desain unit sel metamaterial absorber diperoleh dua desain yang telah memenuhi spesifikasi yaitu desain unit sel 8 dan 10. Desain unit sel 11 merupakan kombinasi desain unit sel 8 dan unit sel 10, yang ditunjukkan pada Gambar 3.50.



Gambar 3.50 Desain Unit Sel 11

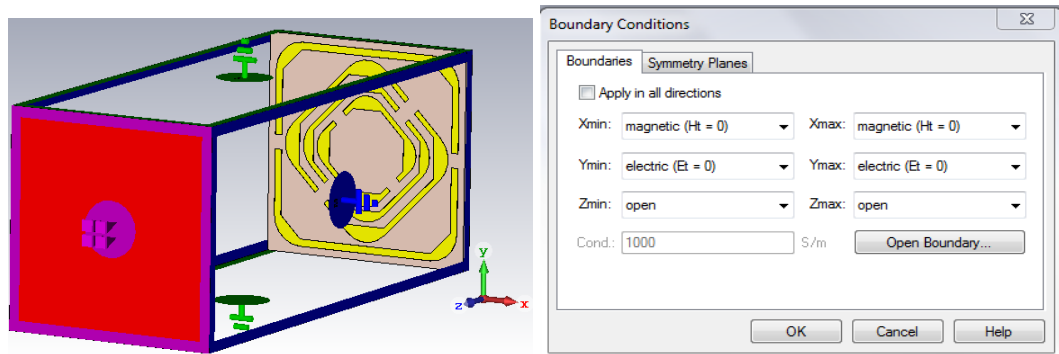
Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 ditunjukkan pada Tabel 3.18.

Tabel 3.18 Variabel Unit Sel 11

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	16	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18.5	14.5	11
3	$g$	Gap	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [29], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit

sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far filed* sebesar 12 cm.

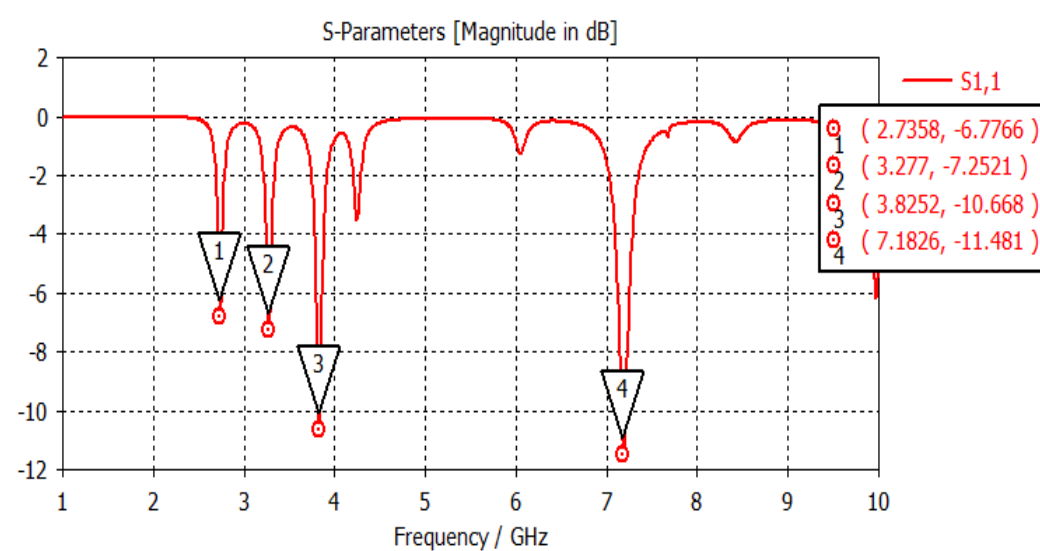


(b)

(b)

Gambar 3.51 Set-up Periodic boundary condition Unit sel 11

Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz ditunjukkan pada Gambar 3.52.

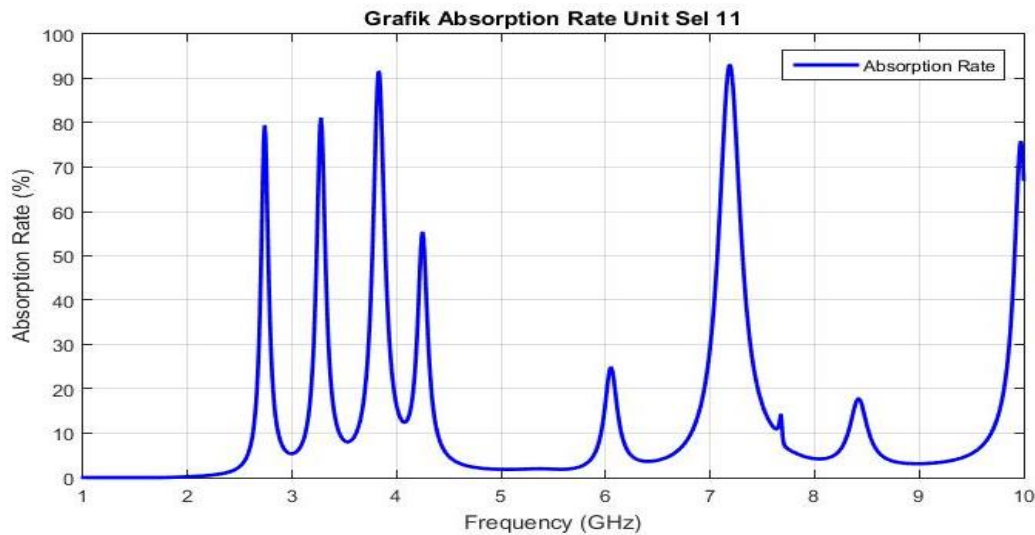


Gambar 3.52 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11

Gambar 3.52 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.73 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6.77 dB, frekuensi 3.2 GHz memiliki  $S_{11}$  -7.25 dB, frekuensi 3.82 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -10.6 dB, frekuensi 7.1 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -11.4 dB.

Berdasarkan Gambar 3.52, desain unit sel 11 mempunyai karakteristik sebagai unit sel terpilih, hal ini didasarkan pada data nilai parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas minimum  $-7$  dB dengan frekuensi resonan *multiband*.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.53.



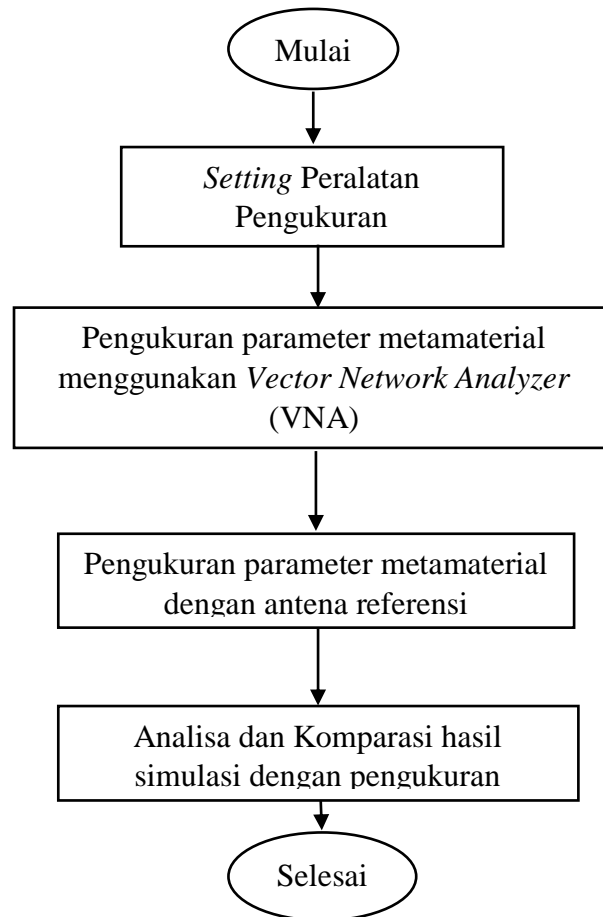
Gambar 3.53 *Absorption rate* Unit sel 11

Gambar 3.53 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.73 GHz memiliki nilai *absorption rate* sebesar 79.4%, frekuensi 3.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 81.1%, pada frekuensi 3.82 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 91.2%, frekuensi 7.1 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 92.2%.

Berdasarkan pada Gambar 3.53 nilai *absorption rate* desain unit sel 11 memiliki tingkat *absorption rate* yang optimal dibandingkan dengan desain unit sel lainnya, sehingga desain unit sel 11 dipilih sebagai unit sel terpilih yang kemudian dimodifikasi untuk memperoleh karakteristik parameter yang diinginkan.

### 3.5 Metode Pengukuran Metamaterial Absorber

Pengujian terhadap karakteristik parameter metamaterial absorber dilakukan untuk mengetahui kinerja dari metamaterial absorber. Pengujian dilakukan di ruang *anechoic chamber*. Dalam pengujian ini digunakan peralatan yaitu VNA (*Vector Network Analyzer*) dan antena *horn* sebagai antena referensi. Secara ringkas dijelaskan pada diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 3.54.



Gambar 3.54 Diagram Alir Pengukuran Parameter Metamaterial Absorber

Berikut Proses pengukuran parameter metamaterial absorber meliputi :

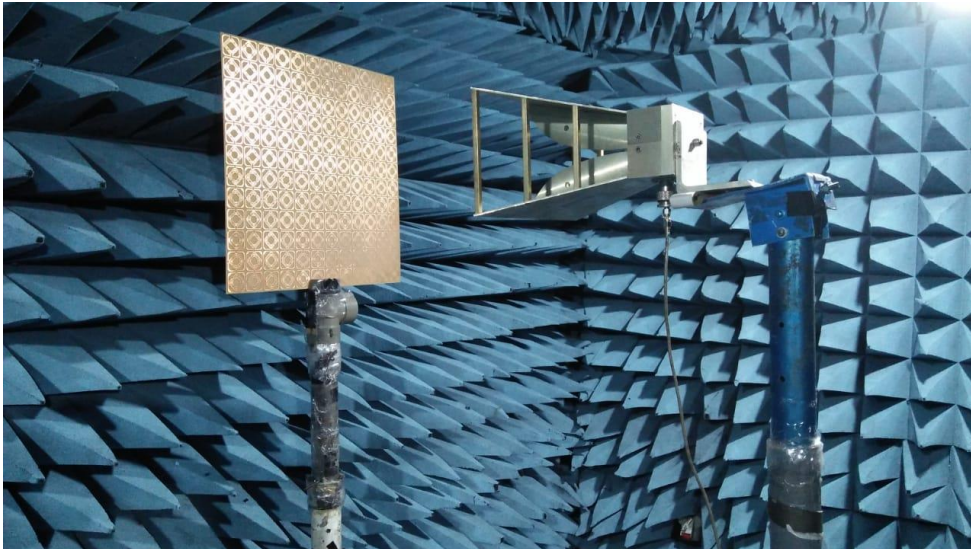
1. Proses pertama sebelum pengukuran ialah mempersiapkan terlebih dahulu perangkat pengukuran diantaranya *Vector Network Analyzer (VNA)*, antena referensi dan N-connector, dan beberapa perangkat lainnya. Selanjutnya melakukan setting perangkat VNA serta menyiapkan metamaterial absorber yang akan diukur.

2. Proses selanjutnya ialah melakukan proses pengukuran karakteristik S-parameter metamaterial absorber dengan antenna referensi untuk mengetahui nilai koefisien refleksi berupa parameter  $S_{11}$  dan *absorption rate*, serta analisa hasil perbandingan parameter metamaterial absorber

### 3.5.1 Skenario Pengukuran

Pengukuran dengan menggunakan beberapa *tool (hardware)* terdapat beberapa langkah yang harus diperhatikan, terutama dalam membuat skenario pengukuran dan pemilihan alat yang digunakan.

Langkah pertama membuat skenario pengukuran yang dimulai dengan menyusun beberapa perangkat pengukuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.55.



Gambar 3.55 Skenario Pengukuran Metamaterial Absorber

Selanjutnya, dilakukan perhitungan jarak antara antenna *horn (transmitter)* dengan metamaterial absorber (*receiver*) dengan teknik mengitung *farfield* (jarak medan jauh) dari antenna referensi menggunakan persamaan 2.28.

Dari persamaan 2.28 nilai *farfield* dapat diketahui perbandingan dua kali dimensi antenna referensi kuadratnya dengan panjang gelombang frekuensi kerja metamaterial absorber, yang mana frekuensi kerja metamaterial absorber untuk digunakan dalam pengukuran yaitu antara 1 GHz - 12 GHz sehingga dapat dihitung dari  $\lambda_{min}$  dan  $\lambda_{max}$  sebagai berikut.



$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{upper}} = \frac{3 \times 10^8}{12 \times 10^9} = 2.5 \text{ cm}$$

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{bottom}} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^9} = 30 \text{ cm}$$

Adapun untuk menentukan nilai dimensi antenna referensi yang dalam hal ini ialah antenna *horn*, ialah dengan memanfaatkan ukuran panjang dan lebar antenna *horn* dengan perhitungan teorema pythagoras sebagai berikut.

$$D = \sqrt{12.5^2 + 16.5^2} = 20.7 \text{ cm}$$

Maka, nilai *farfield* (jarak medan jauh) dapat dihitung sebagai berikut.

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda_{min}} = \frac{2 \times (20.7)^2}{2.5} = 3.4 \text{ m}$$

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda_{max}} = \frac{2 \times (20.7)^2}{30} = 0.28 \text{ m}$$

Dari perhitungan *farfield* diatas, dapat ditentukan jarak antenna *horn* dengan metamaterial absorber dengan posisi yang saling berhadapan yaitu dengan jarak 3.4 meter.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

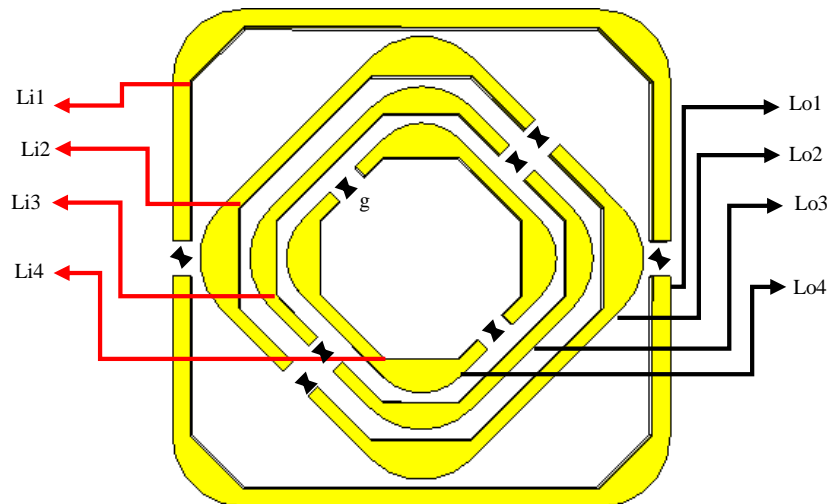
Pada hasil dan pembahasan ini, terdapat tiga tahapan pokok yaitu modifikasi desain terpilih dan pengujian parameter metamaterial absorber serta analisa data. Pada tahap modifikasi desain terpilih dilakukan proses pengabungan unit sel secara periodik. Selanjutnya tahap pengujian parameter metamaterial absorber untuk mengetahui kinerja dari metamaterial absorber, dan selanjutnya dilakukan proses analisis data dengan analisis perbandingan parameter metamaterial absorber hasil simulasi dengan hasil pengujian.

#### 4.1 Desain Unit Sel Terpilih

Desain unit sel terpilih merupakan desain unit sel metamaterial yang telah memenuhi karakteristik parameter metamaterial absorber yang diinginkan, dalam hal ini desain unit sel 11 telah memenuhi spesifikasi unit sel terpilih, untuk selanjutnya dilakukan proses modifikasi dan proses pengabungan unit sel 11 modifikasi 1 – 10 secara periodik.

##### 4.1.1 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 1

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 1, yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



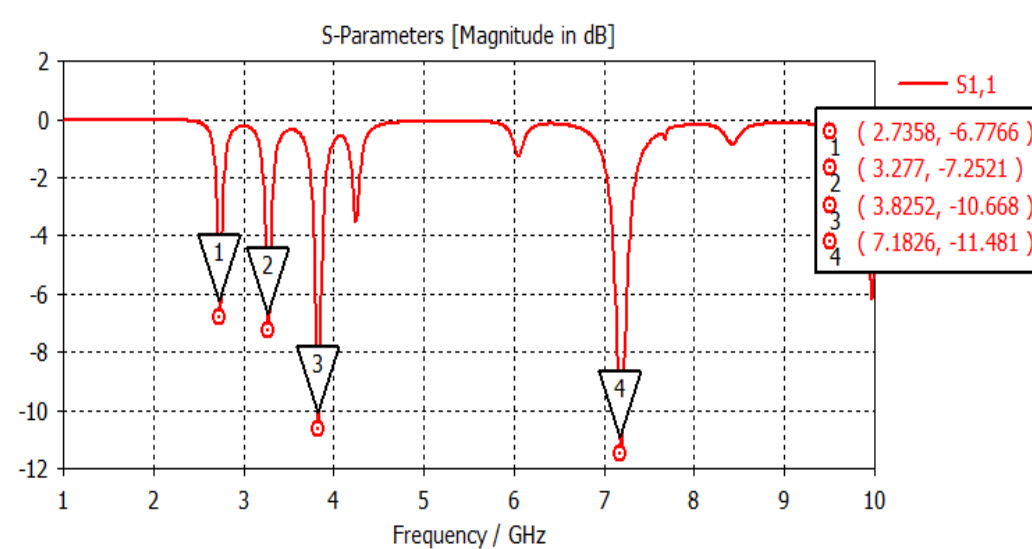
Gambar 4.1 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 1

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 1 ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 1

No	Varibel	Keterangan	Nilai (mm)			
			sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	20	16	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18.5	14.5	11
3	$g$	Gap	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

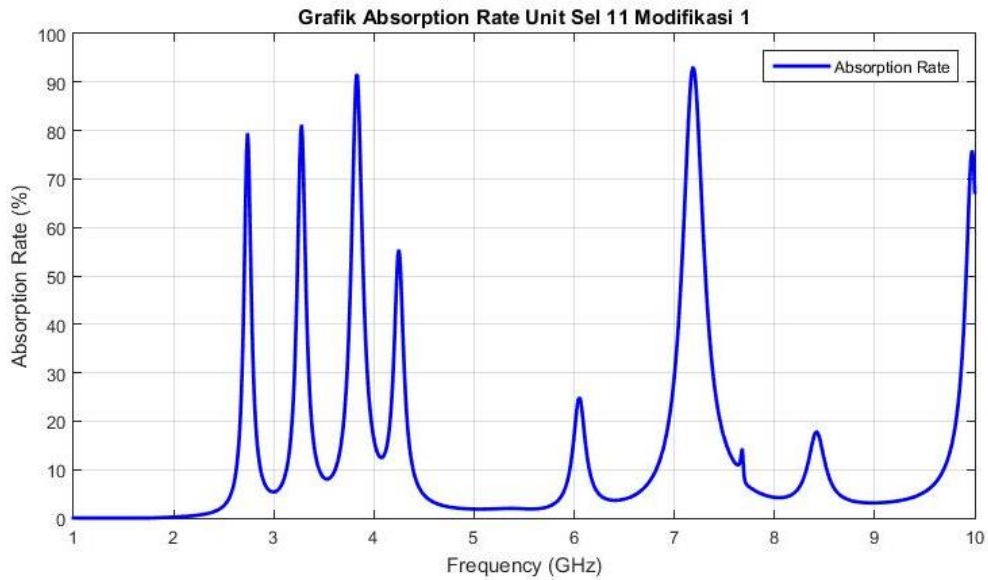
Gambar 4.2 menunjukkan hasil simulasi parameter  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 1.



Gambar 4.2 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 1

Gambar 4.2 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.73 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -6.77 dB, frekuensi 3.2 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -7.25 dB, frekuensi 3.82 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -10.6 dB, frekuensi 7.1 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -11.4 dB.

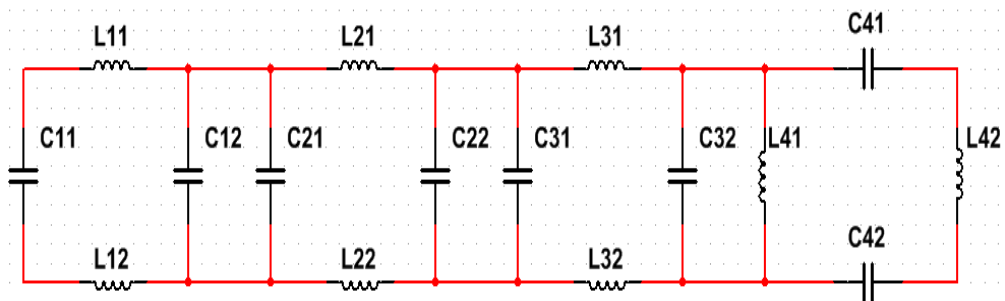
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Absorption rate Unit Sel 11 Modifikasi 1

Gambar 4.3 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.73 GHz memiliki nilai *absorption rate* sebesar 79.4%, frekuensi 3.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 81.1%, pada frekuensi 3.82 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 91.2%, frekuensi 7.1 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 92.2%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 1 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.1. Selanjutnya rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 1 ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1

→ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.164 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 22 \text{ nH}$$

$$C = 0.125 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 15.6 \text{ nH}$$

$$C = 0.122 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

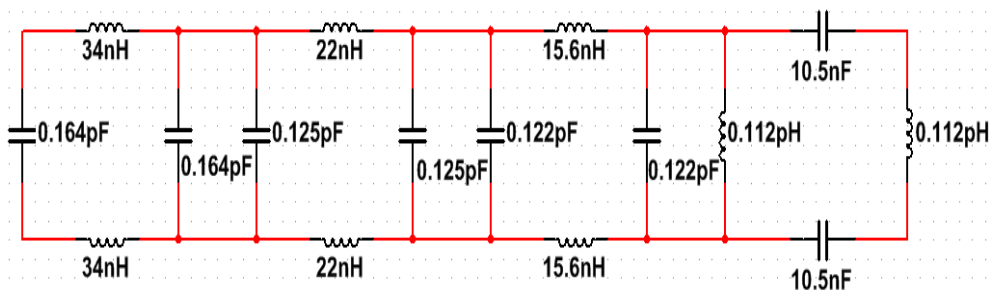
$$L = 10.5 \text{ nH}$$

$$C = 0.120 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 1 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

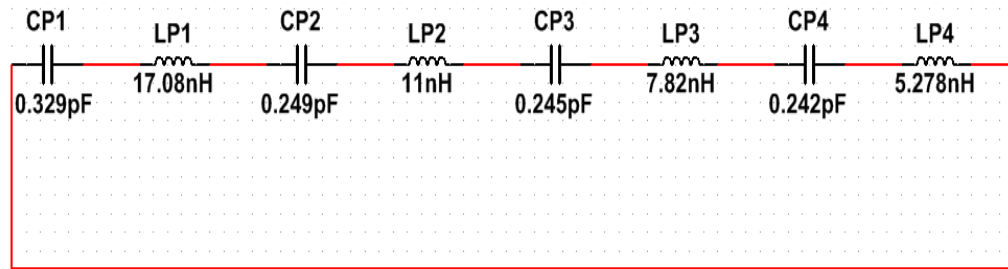
Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1	Rangkaian 2	Rangkaian 3	Rangkaian 4
$C_{p1} = 0.329pF$	$C_{p2} = 0.249pF$	$C_{p3} = 0.245pF$	$C_{p4} = 0.242pF$
$L_{p1} = 17.08 nH$	$L_{p2} = 11.0 nH$	$L_{p3} = 7.824 nH$	$L_{p4} = 5.278 nH$

Gambar 4.6 menunjukkan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 1 susunan seri.



Gambar 4.6 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 1 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{p1} + L_{p2} + L_{p3} + L_{p4}$$

$$L_{Stot} = 41.18 nH$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0655pF$$

Menentukan frekuensi resonan

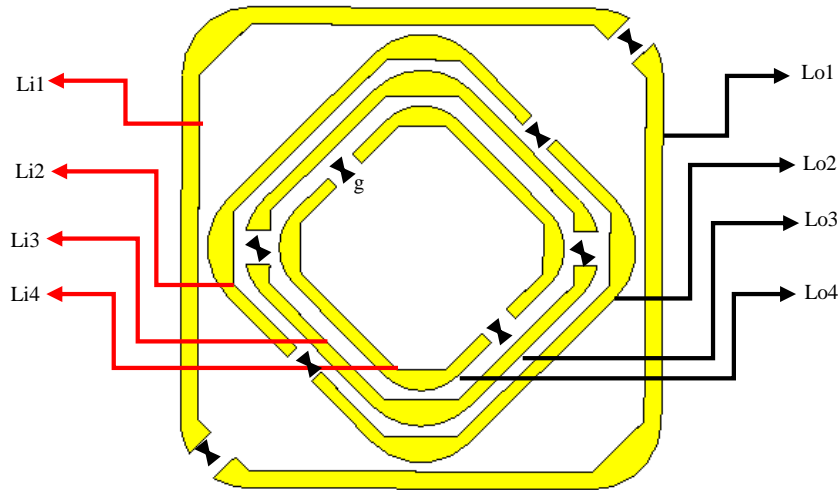
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.06 GHz$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 1 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.06 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.2 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.27 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.21 GHz. Merujuk dari data tersebut, bahwa metode rangkain ekuivalen mampu merepresentasikan dengan baik hubungan antara perhitungan dimensi unit sel metamaterial absorber dengan hasil simulasi khususnya pada unit sel 11 modifikasi 1.

#### 4.1.2 Desain Unit sel 11 Modifikasi 2

Berikut desain unit sel 11 modifikasi 2 yang ditunjukkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 2

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 2 ditunjukkan pada Tabel 4.2.

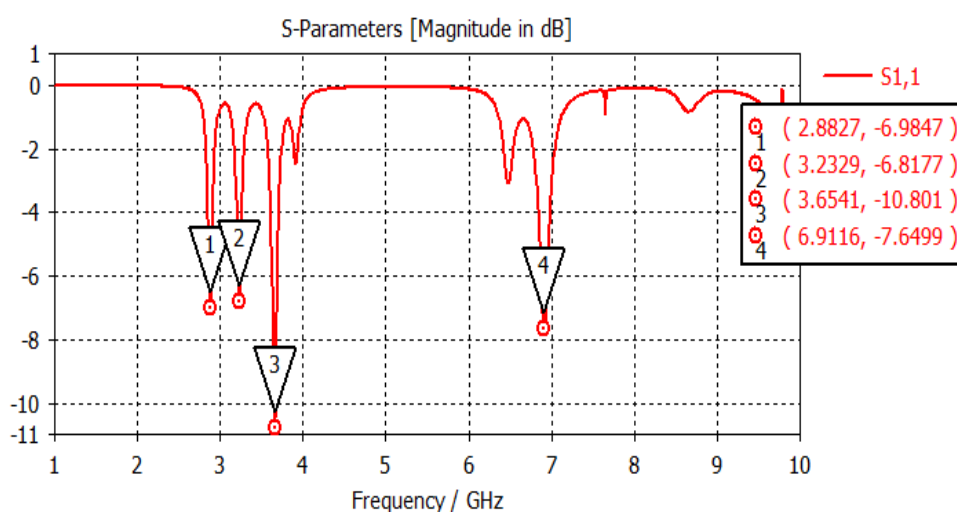
Tabel 4.2 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 2

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	17	13.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18.5	15.5	12
3	$g$	Gap	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses set-up menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di set-up *perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di set-up *perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 12 cm.



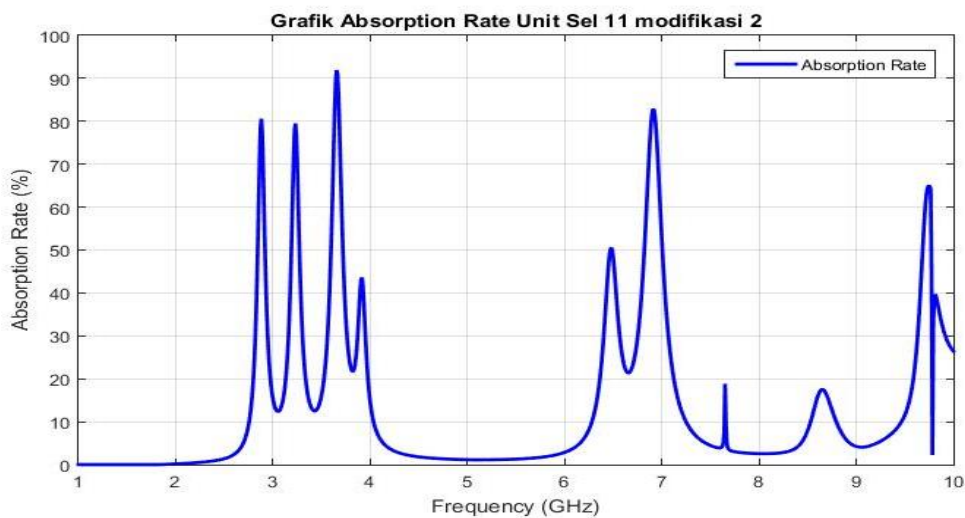
Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi  $S_{11}$  unit sel 11 modifikasi 2 pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz.



Gambar 4.8 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 2

Gambar 4.8 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.88 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -6.9 dB, frekuensi 3.2 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6.8 dB, frekuensi 3.6 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -10.8 dB, frekuensi 6.9 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -7.6 dB.

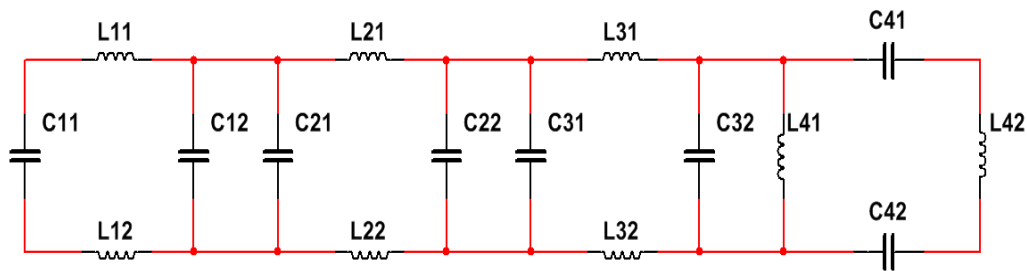
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Absorption rate Unit Sel 11 Modifikasi 2

Gambar 4.9 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.88 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 80.6%. frekuensi 3.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 79.4%. frekuensi 3.6 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 91.2%, frekuensi 6.9 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 82.3%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 2 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.2. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 2 ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2

→ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.164 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12}; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 22 \text{ nH}$$

$$C = 0.125 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22}; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 17.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.123 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32}; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

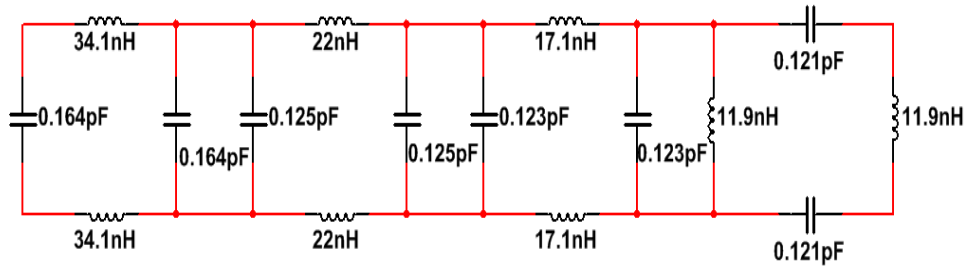
$$L = 11.9 \text{ nH}$$

$$C = 0.121 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42}; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 2 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.329 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 11.0 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.249 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 8.594 \text{ nH}$$

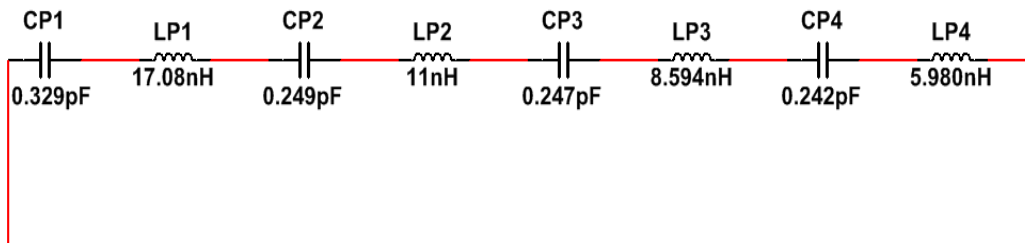
$$C_{p3} = 0.247 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.980 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.242 \text{ pF}$$

Gambar 4.12 menunjukkan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 2 susunan seri.



Gambar 4.12 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 2 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 42.66 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0657 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

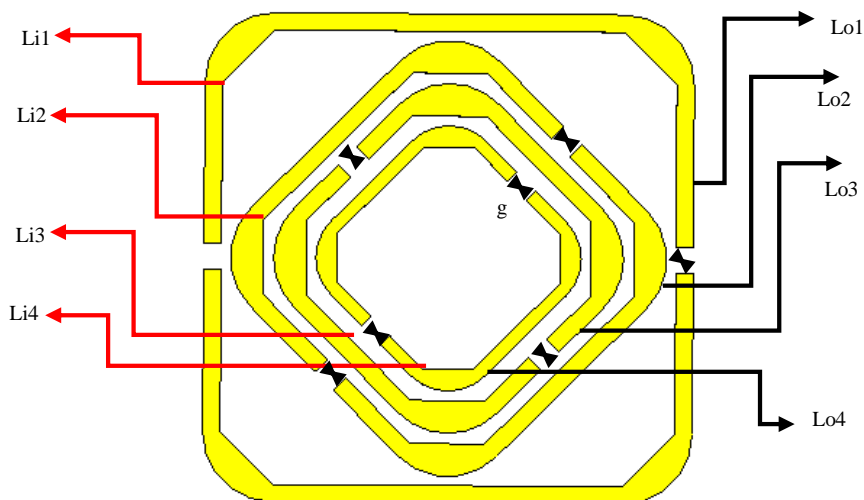
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.8 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.23 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.23 GHz.

#### 4.1.3 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 3

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 3, yang ditunjukkan pada Gambar 4.13



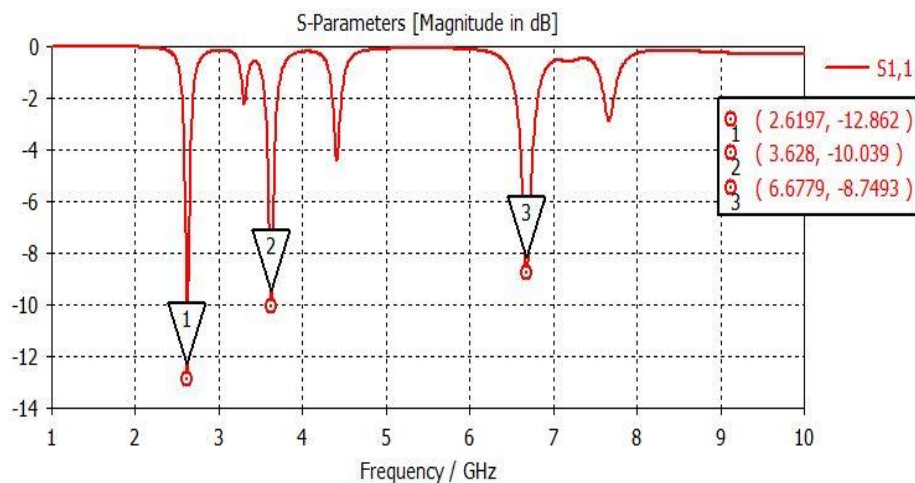
Gambar 4.13 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 3

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 3 ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 3

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	20	16.5	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18	14.5	11
3	$g$	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	$h$	Tinggi subtrat	1.6	1.6	1.6	1.6

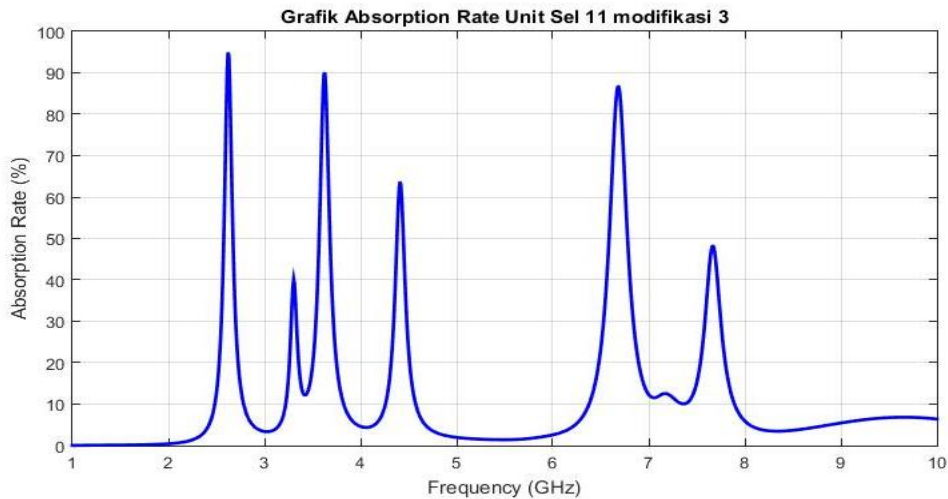
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 3 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Garfik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 3

Gambar 4.14 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.6 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -12.8 dB, frekuensi 3.6 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -10 dB, frekuensi 6.6 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -8.72 dB.

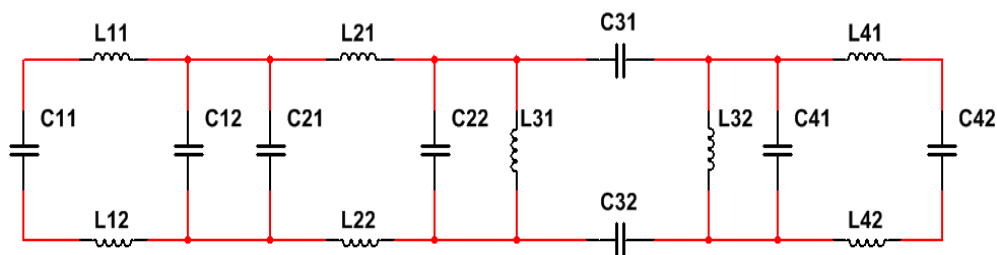
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Absorption rate Unit Sel 11 Modifikasi 3

Gambar 4.15 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.6 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 94%, frekuensi 3.6 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 90%, frekuensi 6.6 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 86.5%

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 3 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.3. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 2 ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3

→ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.171 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 20.7 \text{ nH}$$

$$C = 0.168 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 15.45 \text{ nH}$$

$$C = 0.166 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32}; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

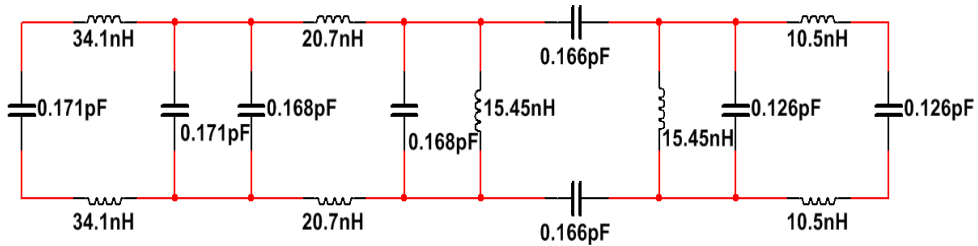
$$L = 10.5 \text{ nH}$$

$$C = 0.126 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42}; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 3 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32};$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.342 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 10.3 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.336 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.725 \text{ nH}$$

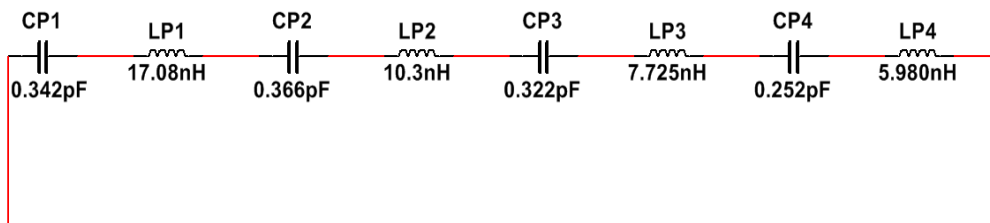
$$C_{p3} = 0.332 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.252 \text{ pF}$$

Gambar 4.18 menunjukkan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 3 susunan seri.



Gambar 4.18 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 3 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$
$$L_{Stot} = 40.47 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$
$$C_{Stot} = 0.0773 \text{ pF}$$

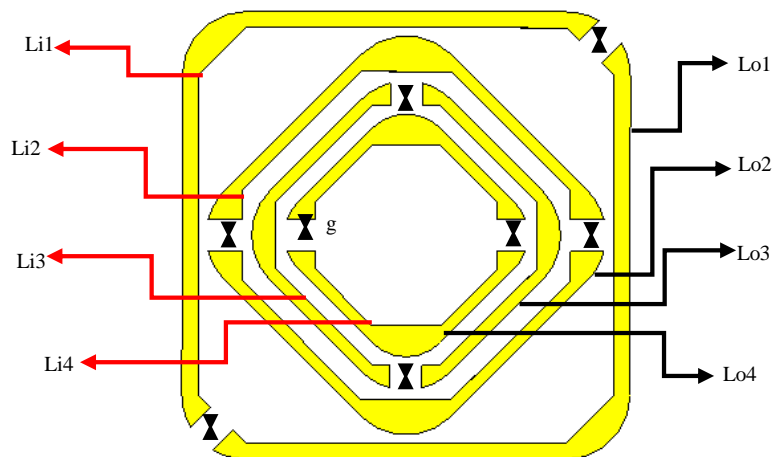
Menentukan frekuensi resonan

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$
$$f_0 = 2.8 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 3 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 2.8 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.14 poin 1 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 2.619 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.181 GHz.

#### 4.1.4 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 4

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 4, yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 4

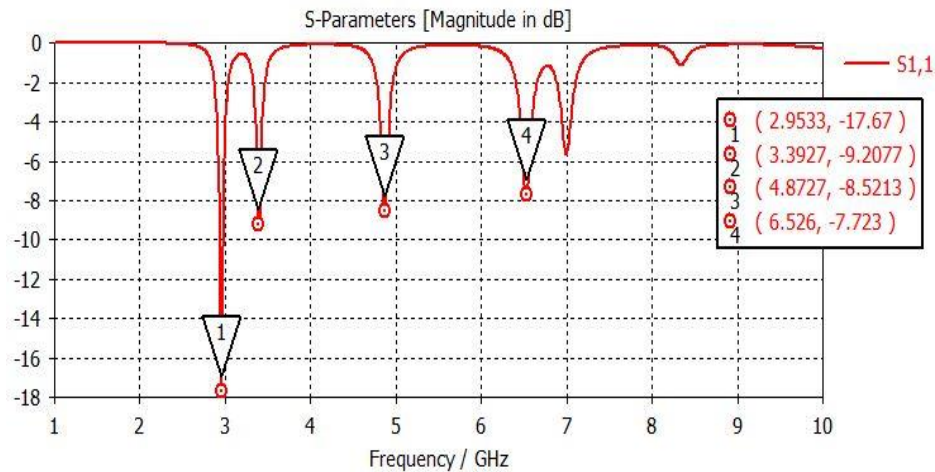


Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 4 ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 4

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	20	16	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18.5	14.5	11
3	$g$	<i>Gap</i>	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi subtrat	1.6	1.6	1.6	1.6

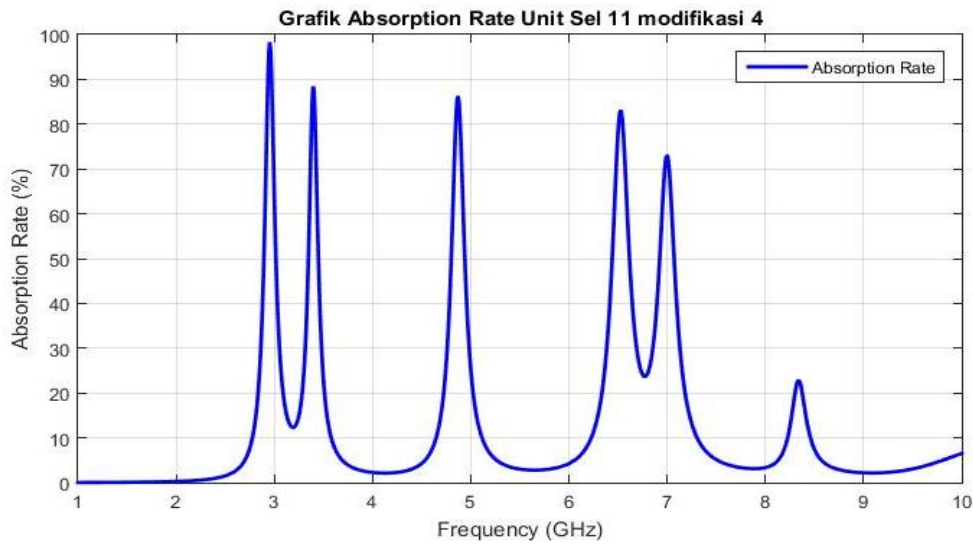
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 4 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 4

Gambar 4.20 diperoleh nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.95 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -17.67 dB, frekuensi 3.3 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.2 dB, frekuensi 4.8 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -8.5 dB, frekuensi 6.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -7.7 dB.

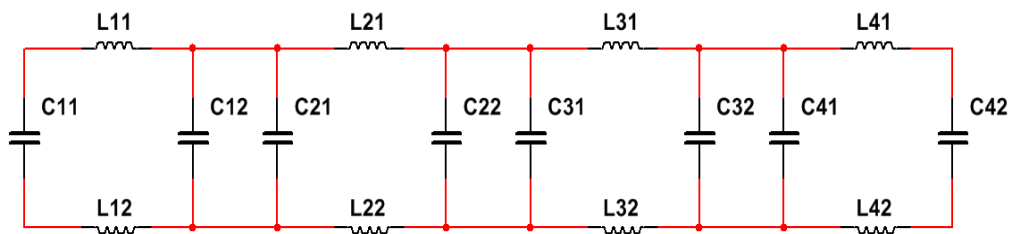
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 *Absorption rate* Unit Sel 11 Modifikasi 4

Gambar 4.21 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.95 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 98.3%, frekuensi 3.3 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 87%, frekuensi 4.8 GHz memiliki *absorption rate* mencapai 86%, frekuensi 6.5 GHz memiliki *absorption rate* mencapai 83%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 4 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.4. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 4 ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4

➔ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.164 \text{ pF}$$

➔ Untuk Sisi 2

$$L = 22 \text{ nH}$$

$$C = 0.124 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

➔ Untuk Sisi 3

$$L = 15.64 \text{ nH}$$

$$C = 0.122 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

➔ Untuk Sisi 4

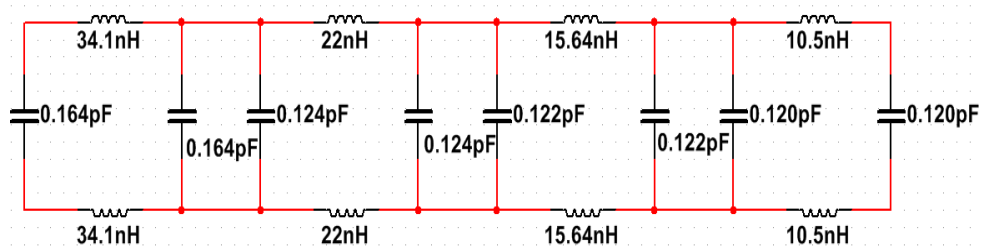
$$L = 10.5 \text{ nH}$$

$$C = 0.120 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 4 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.329 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 11.0 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.249 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.824 \text{ nH}$$

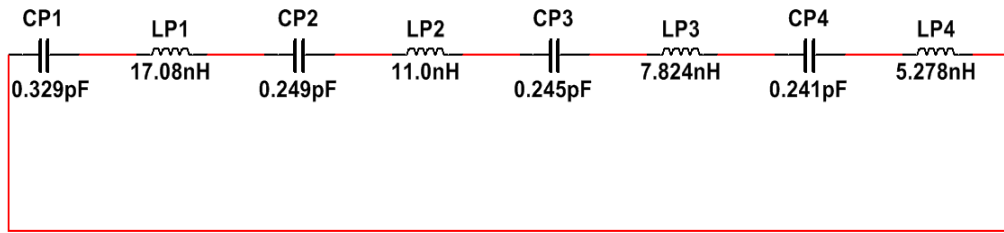
$$C_{p3} = 0.245 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.241 \text{ pF}$$

Gambar 4.24 menunjukkan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 4 susunan seri.



Gambar 4.24 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 4 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 41.18 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0655 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

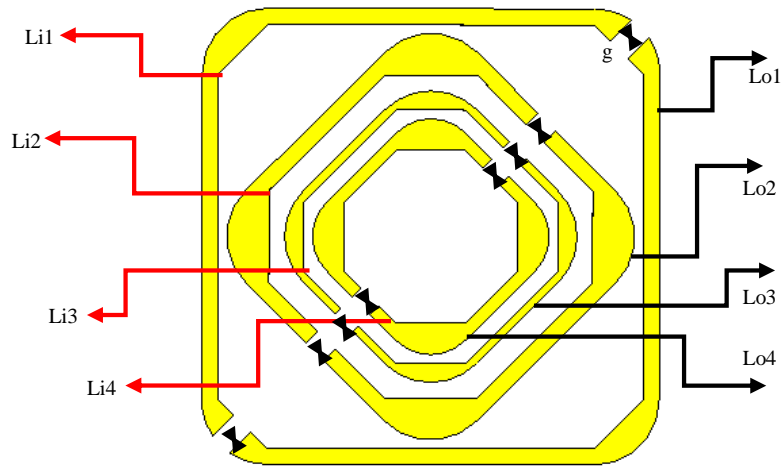
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} \cdot C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.01 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 4 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.01 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.20 poin 1 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 2.95 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.06 GHz. Merujuk dari data tersebut, bahwa metode rangkain ekivalen mampu merepresentasikan dengan baik hubungan antara perhitungan dimensi unit sel metamaterial absorber dengan hasil simulasi khususnya pada unit sel 11 modifikasi 4.

#### 4.1.5 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 5

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 5, yang ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 5

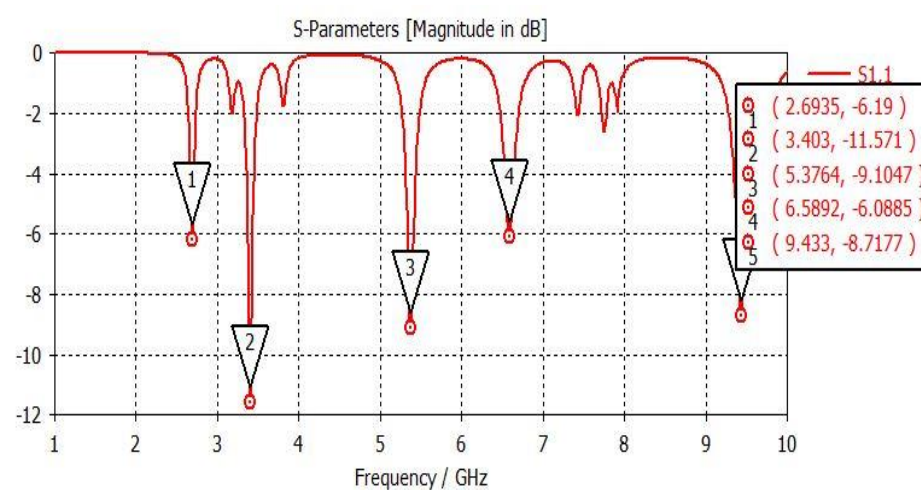
Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 5 ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 5

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	15	12
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18	14	10.5
3	$g$	<i>Gap</i>	1.5	1.5	1.5	1.5
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 12 cm.

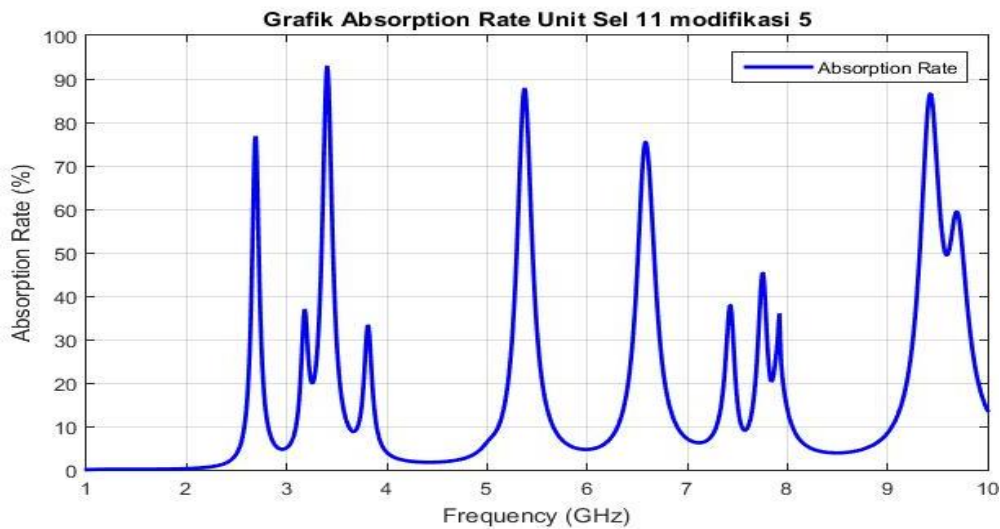
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 5 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz ditunjukkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 modifikasi 5

Gambar 4.26 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.69 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -6 dB, frekuensi 3.4 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -11.5 dB, frekuensi 5.3 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.1 dB, frekuensi 6.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -6 dB, frekuensi 9.4 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -8.7 dB.

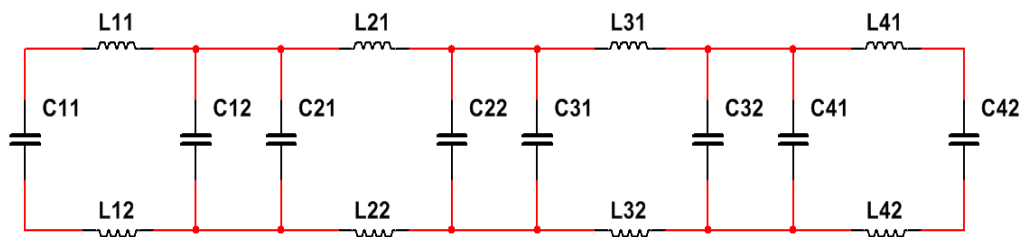
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  Sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 *Absorption rate* Unit sel 11 Modifikasi 5

Gambar 4.27 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.69 GHz tingkat *absorption rate* sebesar 76.7%, frekuensi 3.4 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 93%, frekuensi 5.3 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 99.99%, frekuensi 6.5 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 75.4%, frekuensi 9.4 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 86.5%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 5 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.5. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 5 ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5

➔ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.171 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

➔ Untuk Sisi 2

$$L = 20.7 \text{ nH}$$

$$C = 0.168 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

➔ Untuk Sisi 3

$$L = 15.17 \text{ nH}$$

$$C = 0.100 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

➔ Untuk Sisi 4

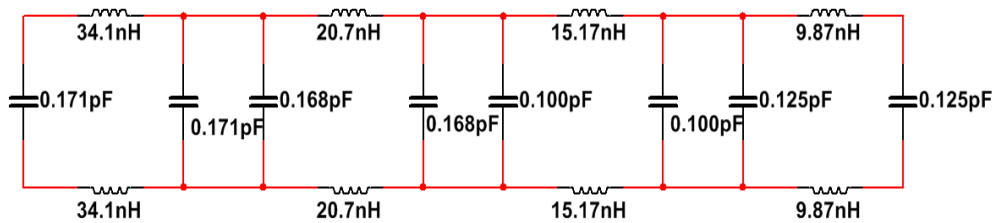
$$L = 9.87 \text{ nH}$$

$$C = 0.125 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 5 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.342 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 10.3 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.336 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.587 \text{ nH}$$

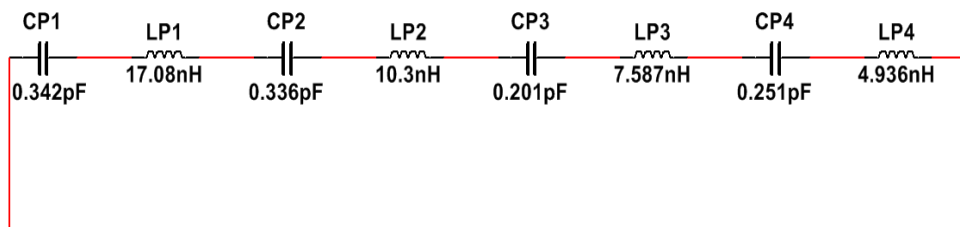
$$C_{p3} = 0.201 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 4.936 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.251 \text{ pF}$$

Gambar 4.30 menunjukkan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 5 susunan seri.



Gambar 4.30 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 5 Susunan Seri



Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 39.99 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0674 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

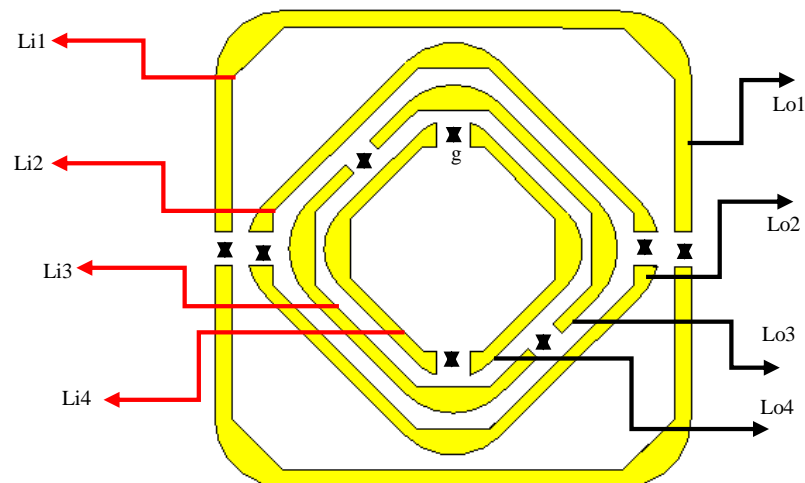
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.07 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 5 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.07 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.26 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.4 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.33 GHz.

#### 4.1.6 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 6

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 6, yang ditunjukkan pada Gambar 4.31.



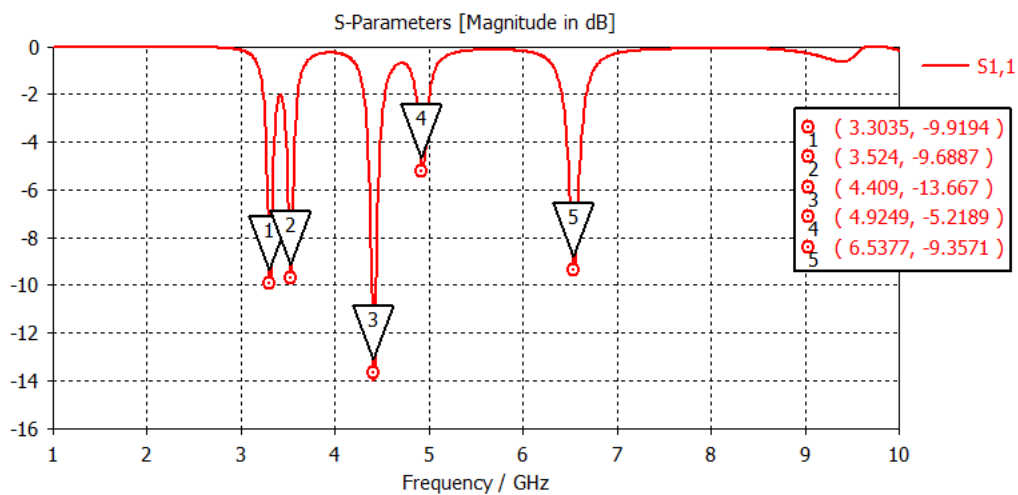
Gambar 4.31 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 6

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 6 ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 6

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	19.5	16	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18	14.5	11
3	$g$	Gap	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

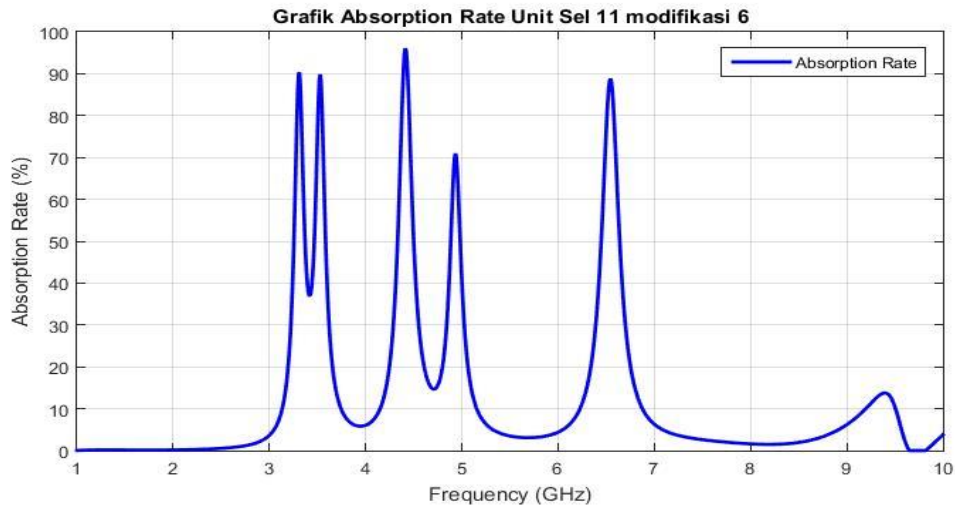
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 6 dengan CST Studio 2017 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 6

Gambar 4.32 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 3.3 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -9.9 dB, frekuensi 3.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.6 dB, frekuensi 4.4 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -13.6 dB, frekuensi 4.9 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -5.2 dB, frekuensi 6.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.3 dB.

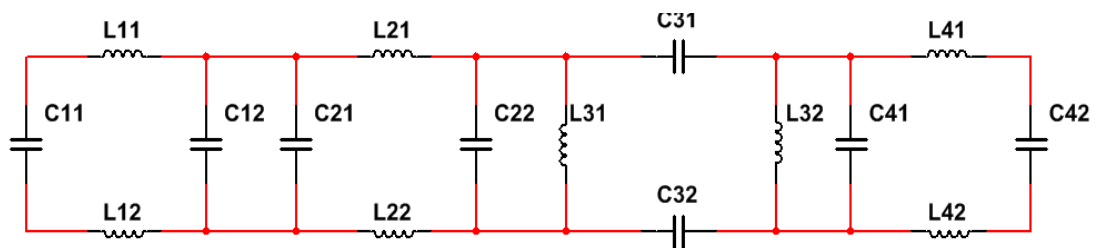
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33 Absorption rate Unit sel 11 modifikasi 6

Gambar 4.33 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan, frekuensi 3.3 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 89%, frekuensi 3.52 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 89%, frekuensi 4.4 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 95.6%, frekuensi 4.9 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 70%, frekuensi 6.5 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 87.5%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 6 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.6. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 6 ditunjukkan pada Gambar 4.34.



Gambar 4.34 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6

➔ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.164 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

➔ Untuk Sisi 2

$$L = 21.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.124 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 15.64 \text{ nH}$$

$$C = 0.122 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

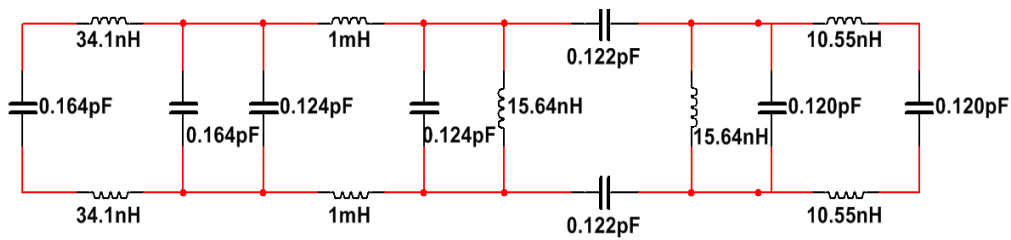
$$L = 10.55 \text{ nH}$$

$$C = 0.120 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 6 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.35



Gambar 4.35 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.329 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 10.5 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.249 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.824 \text{ nH}$$

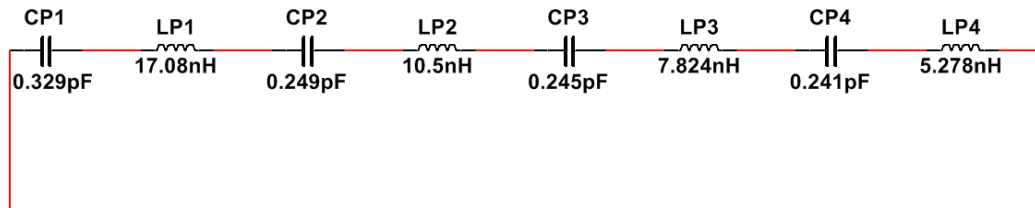
$$C_{p3} = 0.245 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.241 \text{ pF}$$

Gambar 4.36 menunjukkan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 6 susunan seri.



Gambar 4.36 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 6 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 40.77 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0655 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

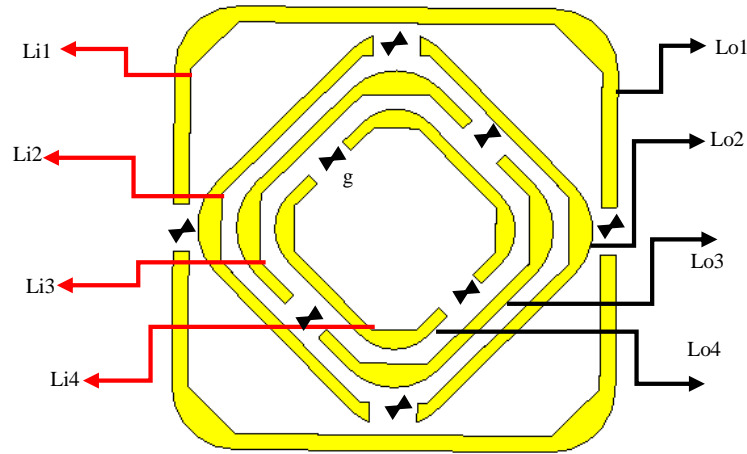
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.08 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 6 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.08 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.32 poin 1 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.3 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.22 GHz.

#### 4.1.7 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 7

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 7, yang ditunjukkan pada Gambar 4.37.



Gambar 4.37 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 7

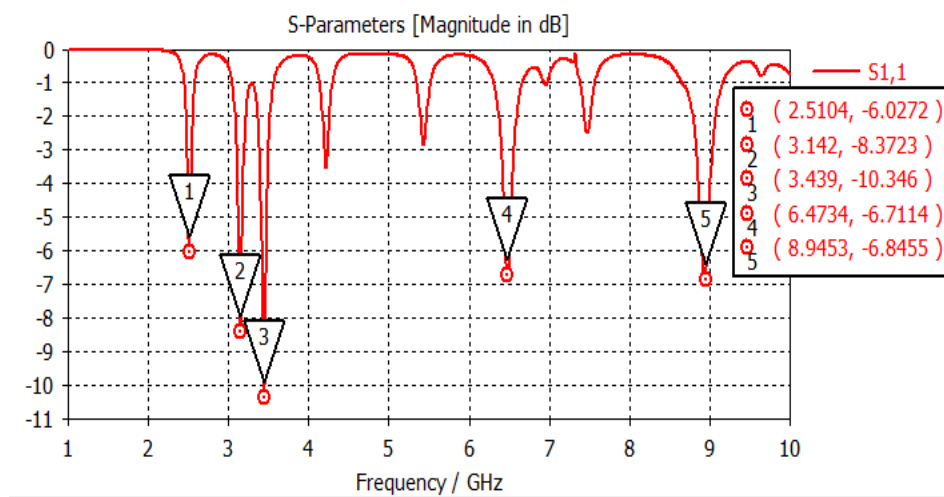
Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 7 ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 7

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_0$	Sisi luar	28	20	16.5	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26	18.5	15	11
3	$g$	Gap	3	3	3	3
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 12 cm.

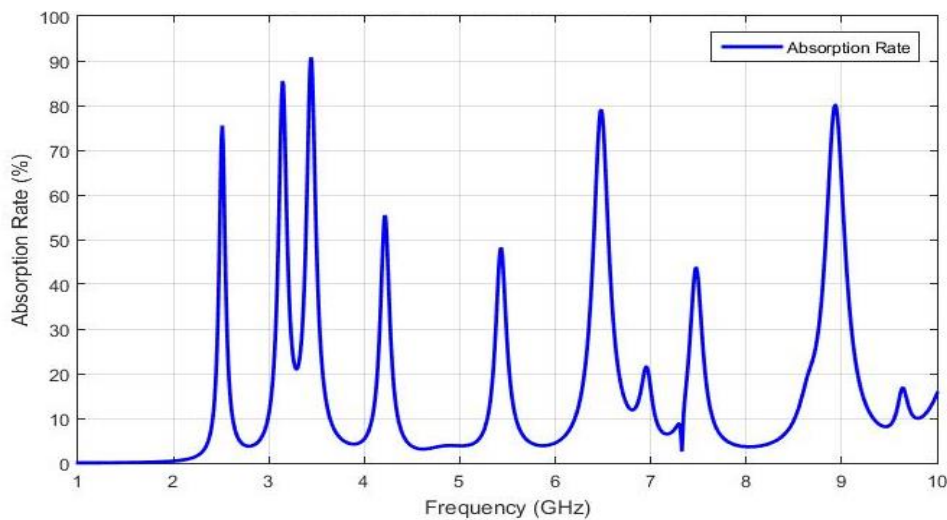
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 7 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz ditunjukkan pada Gambar 4.38.



Gambar 4.38 Hasil Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 7

Gambar 4.38 menunjuk nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.51 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -6.0 dB, frekuensi 3.14 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -8.37 dB, pada frekuensi 3.4 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -10.3 dB, pada frekuensi 6.4 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -6.7 dB. pada frekuensi 8.9 GHz dengan  $S_{11}$  sebesar -6.8 dB.

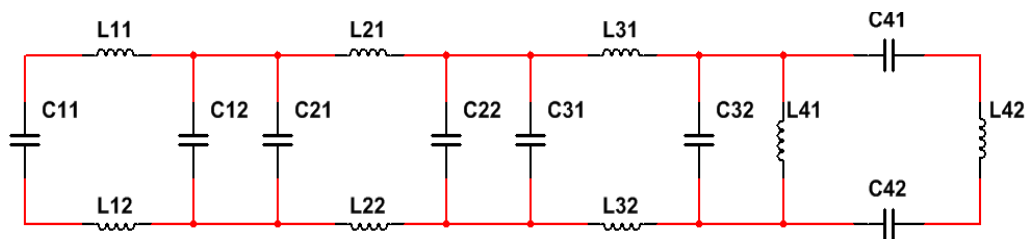
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.39.



Gambar 4.39 *Absorption rate* Unit Sel 11 Modifikasi 7

Gambar 4.39 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.51 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 75.5%, frekuensi 3.14 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 85.5%, frekuensi 3.4 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 90.7%, frekuensi 6.48 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 79.1%, frekuensi 8.9 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 80%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 7 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.7. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 7 ditunjukkan pada Gambar 4.40.



Gambar 4.40 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7

→ Untuk Sisi 1

$$L = 34.1 \text{ nH}$$

$$C = 0.157 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12}; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 22.0 \text{ nH}$$

$$C = 0.118 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22}; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 16.41 \text{ nH}$$

$$C = 0.116 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32}; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

$$L = 10.55 \text{ nH}$$

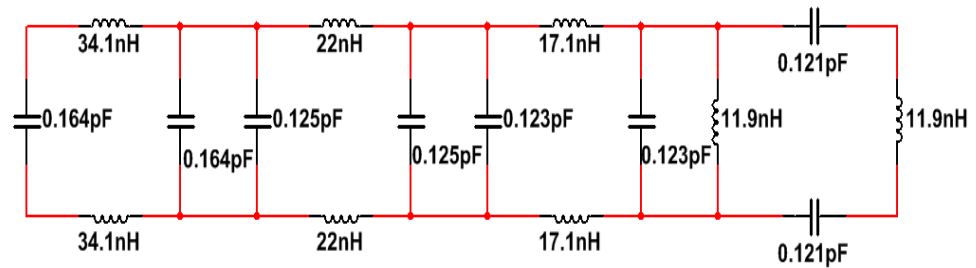
$$C = 0.114 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42}; C = C_{41} = C_{42}$$



Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 7 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.41.



Gambar 4.41 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 17.08 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.314 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 11.0 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.236 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 8.207 \text{ nH}$$

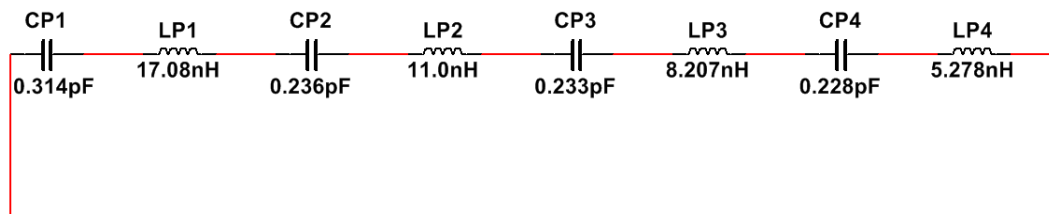
$$C_{p3} = 0.233 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.228 \text{ pF}$$

Gambar 4.42 menunjukkan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 7 susunan seri.



Gambar 4.42 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 7 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 40.15 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0622 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

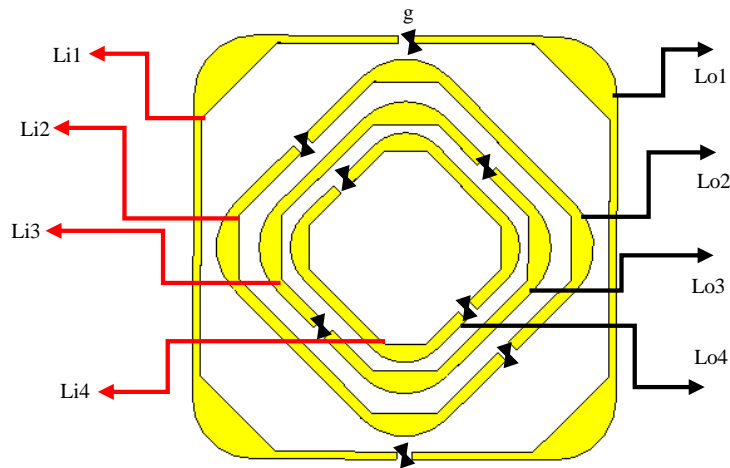
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.13 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 7 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.13 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.38 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.14 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.01 GHz.

#### 4.1.8 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 8

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 8, yang ditunjukkan pada Gambar 4.43.



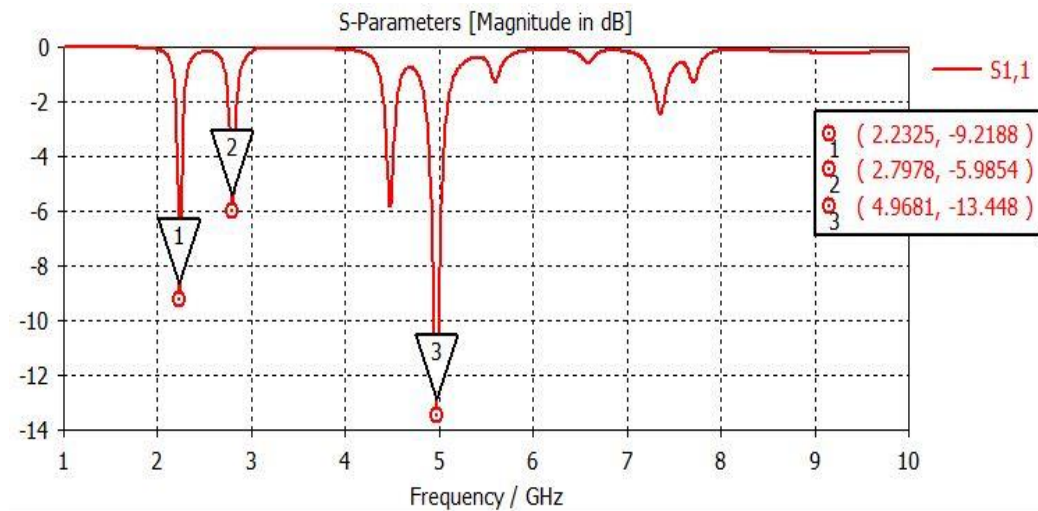
Gambar 4.43 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 8

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 8 ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 8

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	20	16	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	27	18.5	14.5	11
3	$g$	<i>Gap</i>	1	1	1	1
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

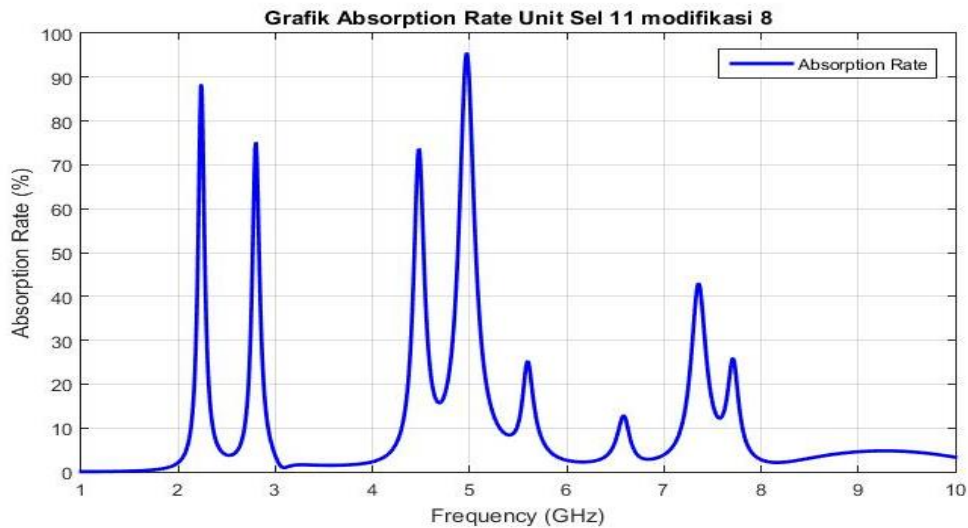
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 8 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.44.



Gambar 4.44 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 8

Gambar 4.44 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 2.2 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -9.2 dB, frekuensi 2.7 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -5.9 dB, frekuensi 4.9 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -13.4 dB.

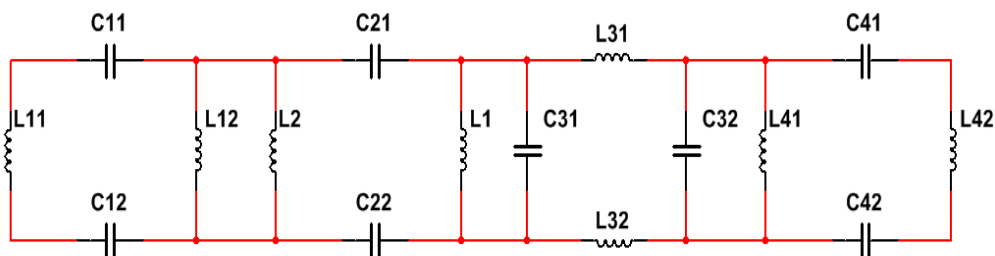
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Absorption rate Unit Sel 11 Modifikasi 8

Gambar 4.45 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 88.3%, frekuensi 2.7 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 75.1%, frekuensi 4.9 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 95.5%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 8 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.8. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 8 ditunjukkan pada Gambar 4.46.



Gambar 4.46 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8

→ Untuk Sisi 1

$$L = 38.3 \text{ nH}$$

$$C = 0.114 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12}; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 22.0 \text{ nH}$$

$$C = 0.139 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22}; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 15.46 \text{ nH}$$

$$C = 0.137 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32}; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

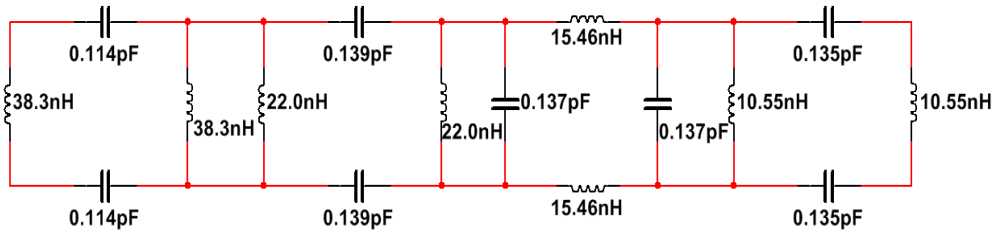
$$L = 10.55 \text{ nH}$$

$$C = 0.135 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42}; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 8 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.47.



Gambar 4.47 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32};$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 19.16 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.227 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 11.0 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.279 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.824 \text{ nH}$$

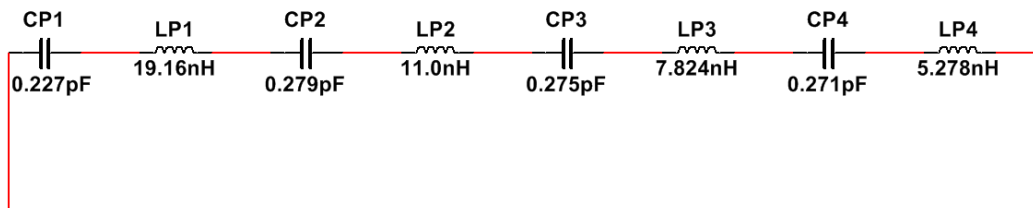
$$C_{p3} = 0.275 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.271 \text{ pF}$$

Gambar 4.48 menunjukkan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 8 susunan seri.



Gambar 4.48 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 8 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 40.32 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0654 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

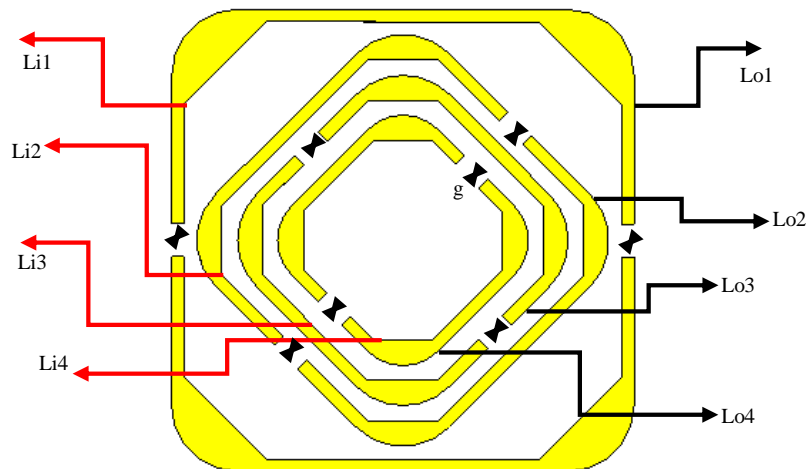
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 2.9 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 8 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 2.9 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.44 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 2.79 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.11 GHz.

#### 4.1.9 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 9

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 9, yang ditunjukkan pada Gambar 4.49.



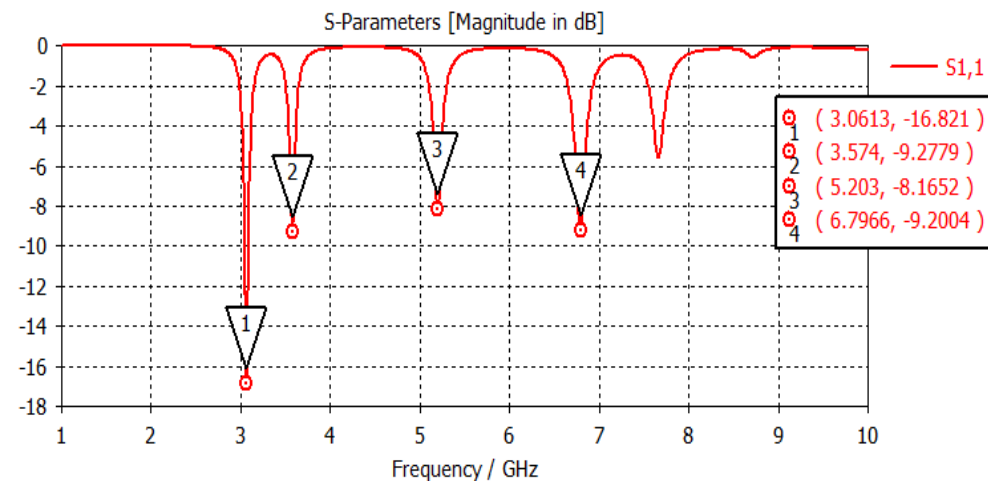
Gambar 4.49 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 9

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 9 ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 9

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	20	16.5	12.5
2	$L_i$	Sisi dalam	26.5	18.5	15	11
3	$g$	<i>Gap</i>	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

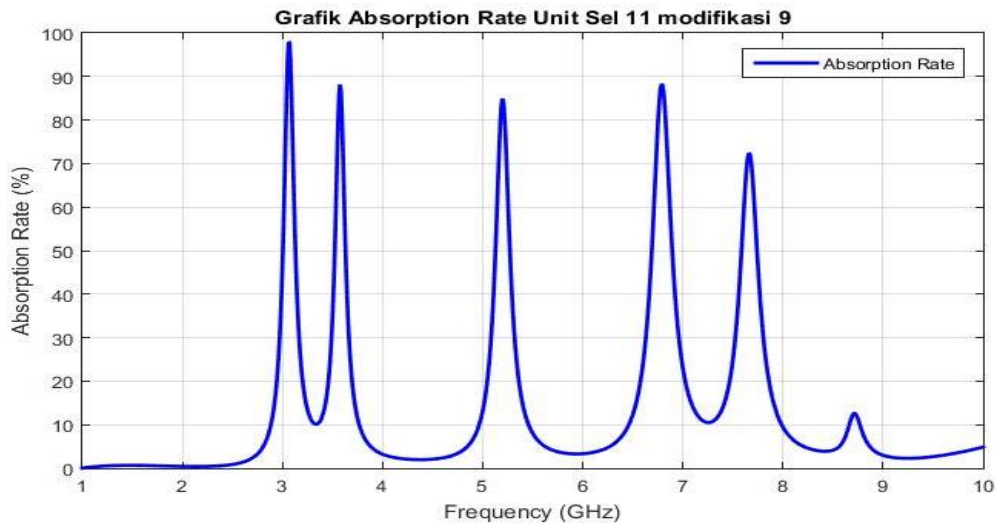
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 9 dengan CST Studio 2017 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.50.



Gambar 4.50 Hasil Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 9

Gambar 4.50 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi resonan 3 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -16.8 dB, frekuensi 3.5 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.2 dB, frekuensi 5.2 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -8.1 dB, frekuensi 6.79 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.2 dB.

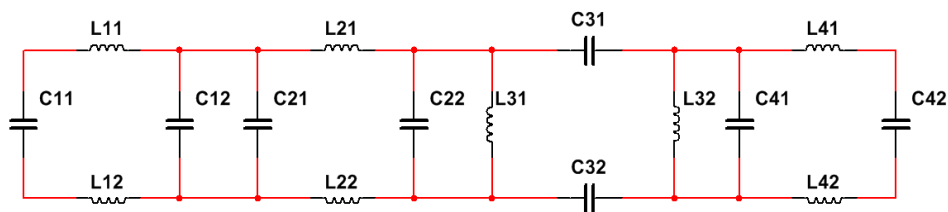
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.51.



Gambar 4.51 Absorption rate Unit Sel 11 Modifikasi 9

Gambar 4.51 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 3 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 97.9%, frekuensi 3.5 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 88.1%, frekuensi 5.2 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 84.7%. pada frekuensi 6.79 GHz tingkat *absorption rate* mencapai 84.6%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 9 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.9. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 9 ditunjukkan pada Gambar 4.52



Gambar 4.52 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9

→ Untuk Sisi 1

$$L = 36.0 \text{ nH}$$

$$C = 0.127 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 22.0 \text{ nH}$$

$$C = 0.124 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$



→ Untuk Sisi 3

$$L = 16.41 \text{ nH}$$

$$C = 0.123 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

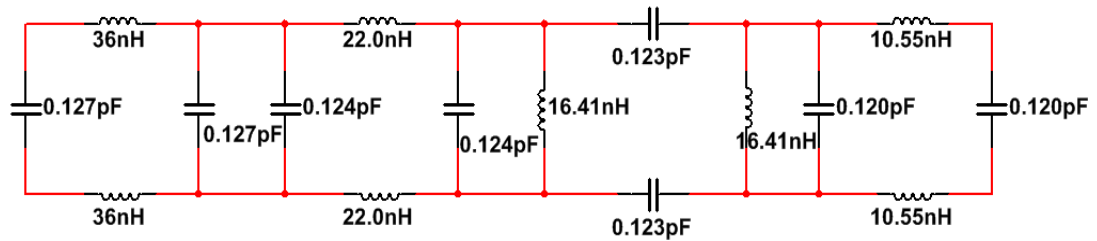
$$L = 10.55 \text{ nH}$$

$$C = 0.120 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 9 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.53.



Gambar 4.53 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 18.02 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.255 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 11.0 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.249 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 8.207 \text{ nH}$$

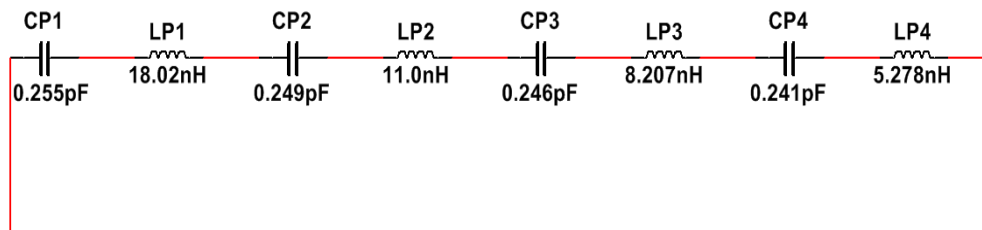
$$C_{p3} = 0.246 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 5.278 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.241 \text{ pF}$$

Gambar 4.54 menunjukkan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 9 susunan seri.



Gambar 4.54 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 9 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{p1} + L_{p2} + L_{p3} + L_{p4}$$

$$L_{Stot} = 42.51 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0620 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

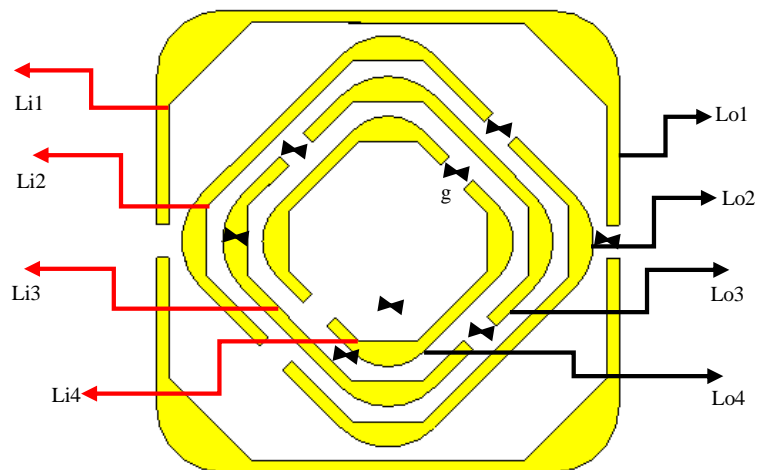
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.09 \text{ GHz}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 9 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.0 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.50 poin 1 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.06 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.06 GHz.

#### 4.1.10 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 10

Berikut merupakan desain unit sel 11 modifikasi 10, yang ditunjukkan pada Gambar 4.55.



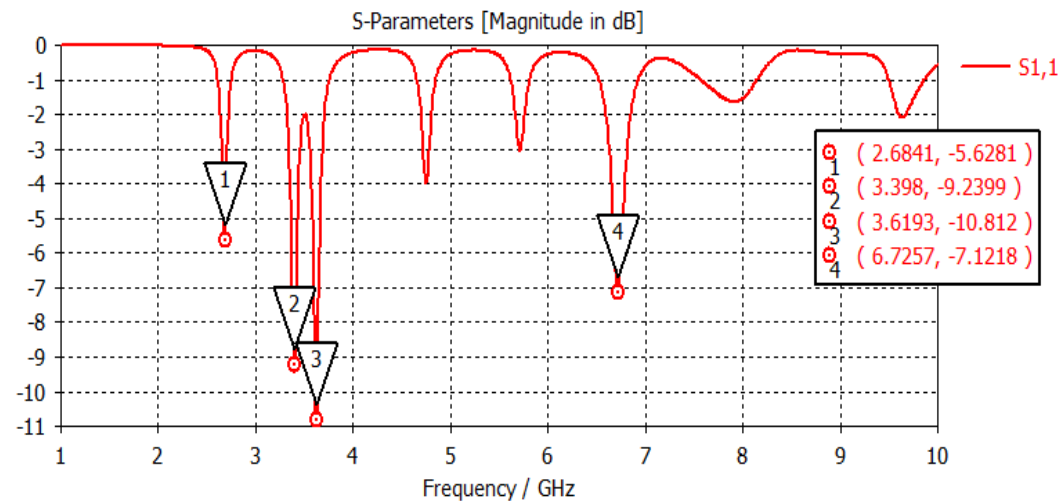
Gambar 4.55 Desain Unit Sel 11 Modifikasi 10

Adapun spesifikasi variabel unit sel 11 modifikasi 10 ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Variabel Unit Sel 11 Modifikasi 10

No	Variabel	Keterangan	Nilai (mm)			
			Sisi 1	Sisi 2	Sisi 3	Sisi 4
1	$L_o$	Sisi luar	28	19	15.5	11.5
2	$L_i$	Sisi dalam	25.5	17.5	14	10
3	$g$	<i>Gap</i>	2	2	2	2
4	$h$	Tinggi substrat	1.6	1.6	1.6	1.6

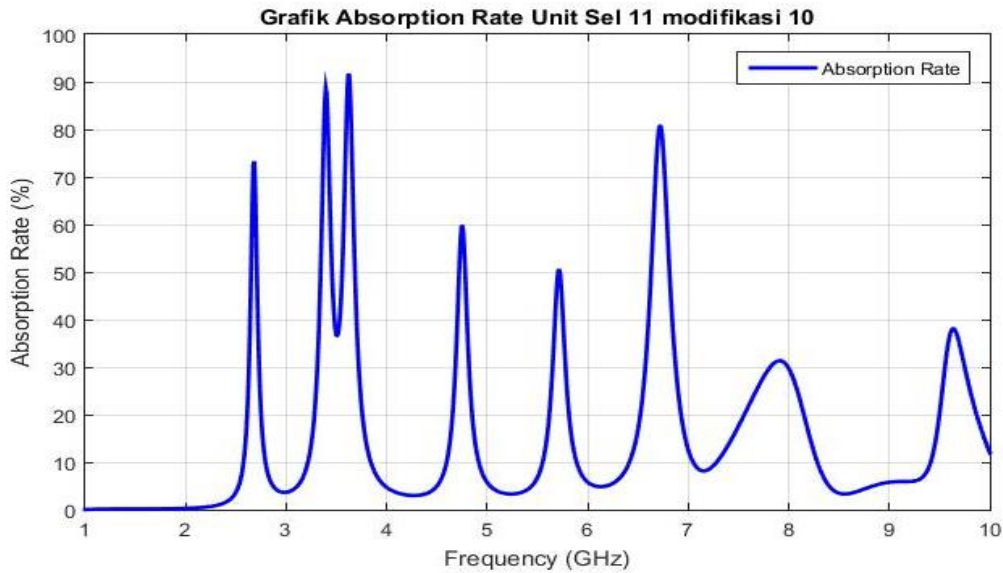
Hasil simulasi  $S_{11}$  pada unit sel 11 modifikasi 10 dengan rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.56.



Gambar 4.56 Grafik Parameter  $S_{11}$  Unit Sel 11 Modifikasi 10

Gambar 4.56 menunjukkan nilai parameter  $S_{11}$  dari beberapa frekuensi resonansi. Pada frekuensi resonansi 2.68 GHz memiliki nilai  $S_{11}$  sebesar -5.6 dB, frekuensi 3.39 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -9.23 dB, frekuensi 3.61 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -10.8 dB, frekuensi 6.7 GHz memiliki  $S_{11}$  sebesar -7.1 dB.

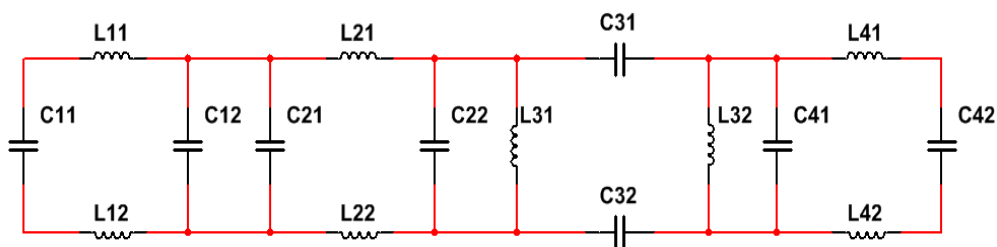
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.57.



Gambar 4.57 Absorption rate Unit sel 11 Modifikasi 10

Gambar 4.57 menunjukkan nilai *absorption rate* dari beberapa frekuensi resonan. Pada frekuensi 2.68 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 72%, frekuensi 3.39 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 89.5%, frekuensi 3.61 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 91.5%, frekuensi 6.7 GHz memiliki *absorption rate* sebesar 80.5%.

Berikut merupakan perhitungan analisis rangkaian ekuivalen pada desain unit sel 11 modifikasi 10 yang merujuk pada persamaan 2.24 – 2.27 dengan spesifikasi variabel yang merujuk pada Tabel 4.10. Selanjutnya rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 2 ditunjukkan pada Gambar 4.58.



Gambar 4.58 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10

→ Untuk Sisi 1

$$L = 32.5 \text{ nH}$$

$$C = 0.225 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{11} = L_{12} ; C = C_{11} = C_{12}$$

→ Untuk Sisi 2

$$L = 20.3 \text{ nH}$$

$$C = 0.124 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{21} = L_{22} ; C = C_{21} = C_{22}$$

→ Untuk Sisi 3

$$L = 14.89 \text{ nH}$$

$$C = 0.122 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{31} = L_{32} ; C = C_{31} = C_{32}$$

→ Untuk Sisi 4

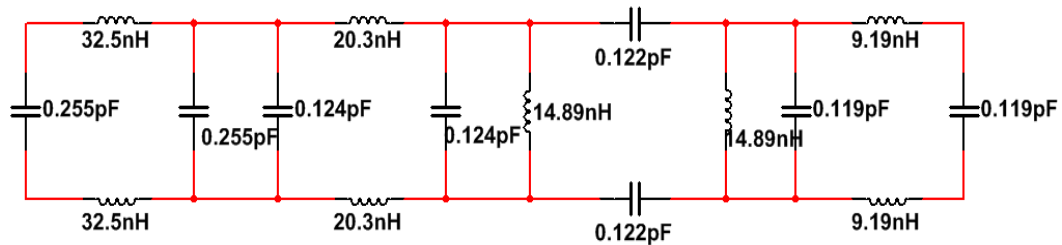
$$L = 9.19 \text{ nH}$$

$$C = 0.119 \text{ pF}$$

Dimana,

$$L = L_{41} = L_{42} ; C = C_{41} = C_{42}$$

Berikut merupakan rangkaian ekuivalen unit sel 11 modifikasi 10 susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 4.59.



Gambar 4.59 Rangkaian Ekuivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10 Susunan Paralel

Rangkaian 1

$$C_{p1} = C_{11} + C_{12}$$

$$\frac{1}{L_{p1}} = \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{12}}$$

Rangkaian 3

$$C_{p3} = C_{31} + C_{32} ;$$

$$\frac{1}{L_{p3}} = \frac{1}{L_{31}} + \frac{1}{L_{32}}$$

Rangkaian 2

$$C_{p2} = C_{21} + C_{22}$$

$$\frac{1}{L_{p2}} = \frac{1}{L_{21}} + \frac{1}{L_{22}}$$

Rangkaian 4

$$C_{p4} = C_{41} + C_{42}$$

$$\frac{1}{L_{p4}} = \frac{1}{L_{41}} + \frac{1}{L_{42}}$$

Rangkaian 1

$$L_{p1} = 16.28 \text{ nH}$$

$$C_{p1} = 0.450 \text{ pF}$$

Rangkaian 2

$$L_{p2} = 10.8 \text{ nH}$$

$$C_{p2} = 0.248 \text{ pF}$$

Rangkaian 3

$$L_{p3} = 7.446 \text{ nH}$$

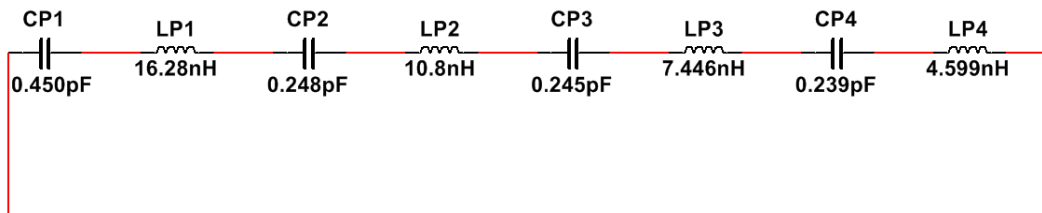
$$C_{p3} = 0.245 \text{ pF}$$

Rangkaian 4

$$L_{p4} = 4.599 \text{ nH}$$

$$C_{p4} = 0.239 \text{ pF}$$

Gambar 4.60 menunjukkan rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 10 susunan seri.



Gambar 4.60 Rangkaian Ekivalen Unit Sel 11 Modifikasi 10 Susunan Seri

Menentukan nilai induktansi seri total,

$$L_{Stot} = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4}$$

$$L_{Stot} = 38.51 \text{ nH}$$

Menentukan nilai kapasitansi seri total

$$\frac{1}{C_{Stot}} = \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p3}} + \frac{1}{C_{p4}}$$

$$C_{Stot} = 0.0690 \text{ pF}$$

Menentukan frekuensi resonan

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Stot} * C_{Stot}}}$$

$$f_0 = 3.08 \text{ GHz}$$

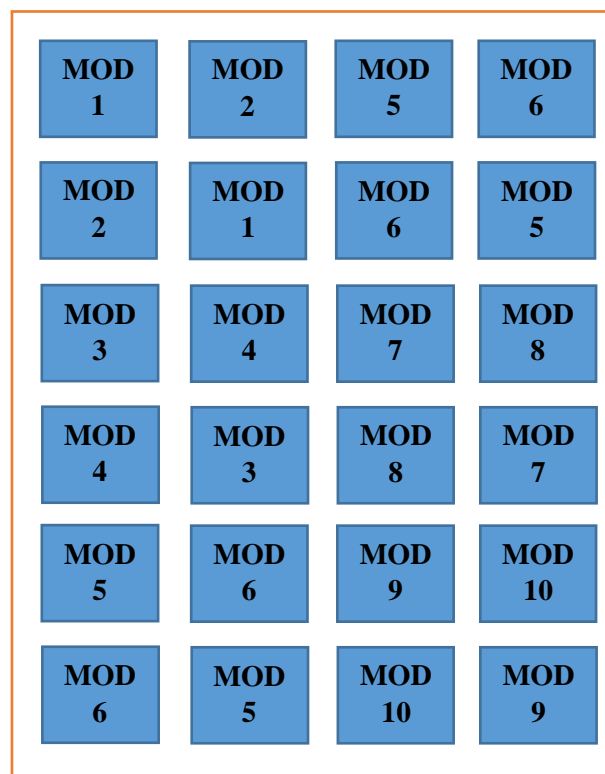
Berdasarkan hasil perhitungan analisis rangkaian ekivalen unit sel 11 modifikasi 10 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.08 GHz, sedangkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.56 poin 2 diperoleh nilai frekuensi resonan sebesar 3.39 GHz dengan selisih frekuensi sebesar 0.31 GHz.

Merujuk dari data unit sel 11 modifikasi 1 sampai dengan unit sel 11 modifikasi 10 diperoleh rata – rata selisih perbandingan frekuensi resonan dari simulasi dengan analisis rangkaian ekivalen sebesar 0.17 GHz, sehingga metode rangkain ekivalen dapat diterapkan dengan baik dalam proses perancangan desain unit sel metamaterial absorber, karena mampu merepresentasikan hubungan antara perhitungan dimensi unit sel metamaterial absorber dengan hasil simulasi.

## 4.2 Desain Metamaterial Absorber Secara Periodik

Pada tahap ini dilakukan proses pengabungan unit sel terpilih untuk kemudian disusun secara periodik. Pada proses penyusunan unit sel secara periodik dilakukan teknik *cross vertical* dengan jarak antar MOD sebesar 2 mm yang mengaju pada referensi [17-18].

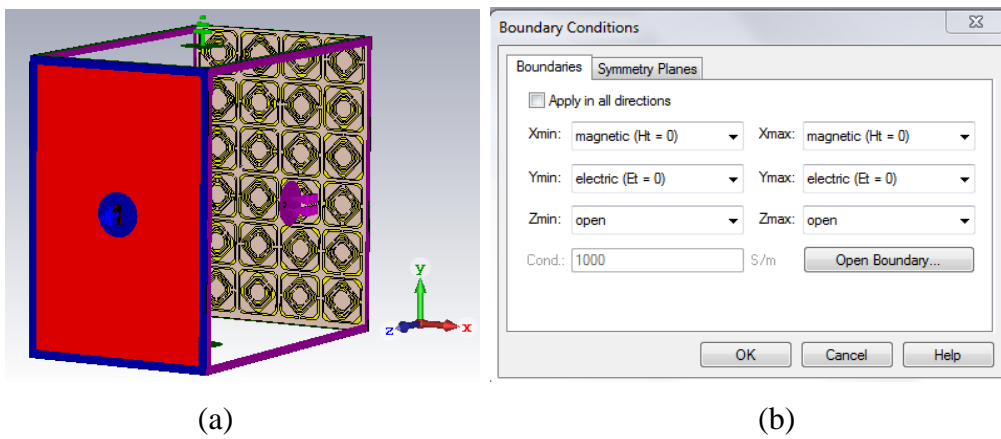
Berikut ditunjukkan rancangan unit sel terpilih secara periodik dengan teknik *cross vertical* pada Gambar 4.31. pada perancangan struktur pengabungan unit sel terpilih memiliki ukuran panjang subtrat (Ps) sebesar 18.4 cm dan lebar subtrat (Ls) 12.4 cm dengan tinggi subtrat (ts) sebesar 1.6 mm dengan ketebalan copper sebesar 0.035 mm. Dengan menggunakan dimensi sel yang telah dirancang, terdapat 12 unit sel pada posisi vertikal dan 12 unit sel pada posisi horizontal. Berikut gambaran pengabungan unit sel terpilih seperti Gambar 4.61 – Gambar 4.63.



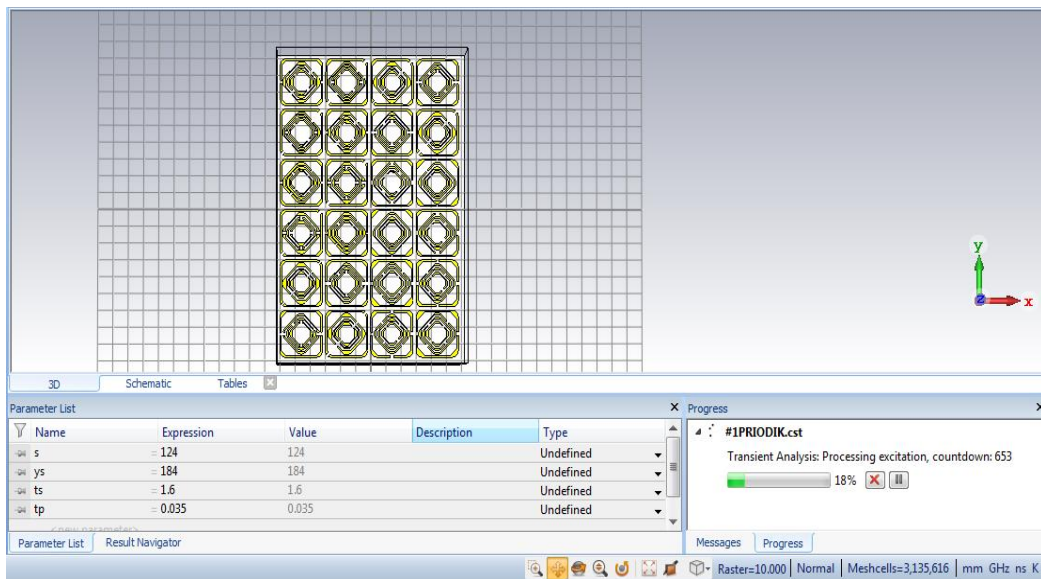
Gambar 4.61 Penyusunan Unit Sel Secara Periodik

Selanjutnya untuk memperoleh nilai parameter metamaterial absorber dilakukan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition* [25], dimana unit sel untuk bagian bawah dan atas (sumbu Y) di *set-up perfect electric conductor* ( $E_t=0$ ), sedangkan unit sel untuk bagian samping kiri dan kanan (sumbu X) di *set-up perfect magnetic conductor* ( $H_t=0$ ), dan pada bagian depan dan belakang unit sel (sumbu Z) di set up dengan keadaan *free space (open)* sebagai arah datang gelombang dan pemasangan *port* dengan jarak *far-field* sebesar 1.5 meter.

Gambar 4.62 menunjukkan proses *set-up* menggunakan prinsip *periodic boundary condition*.



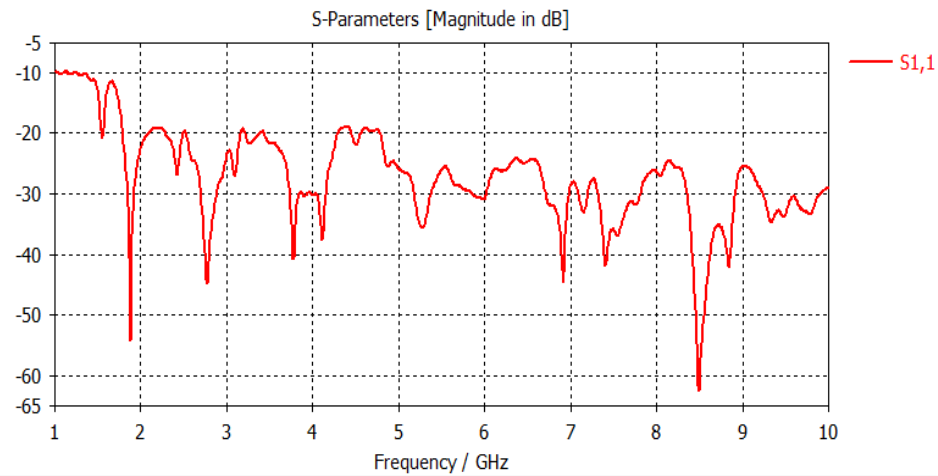
Gambar 4.62 *Set-up Periodic boundary condition* Unit Sel Periodik



Gambar 4.63 Desain Unit sel Priodik Metamaterial Absorber

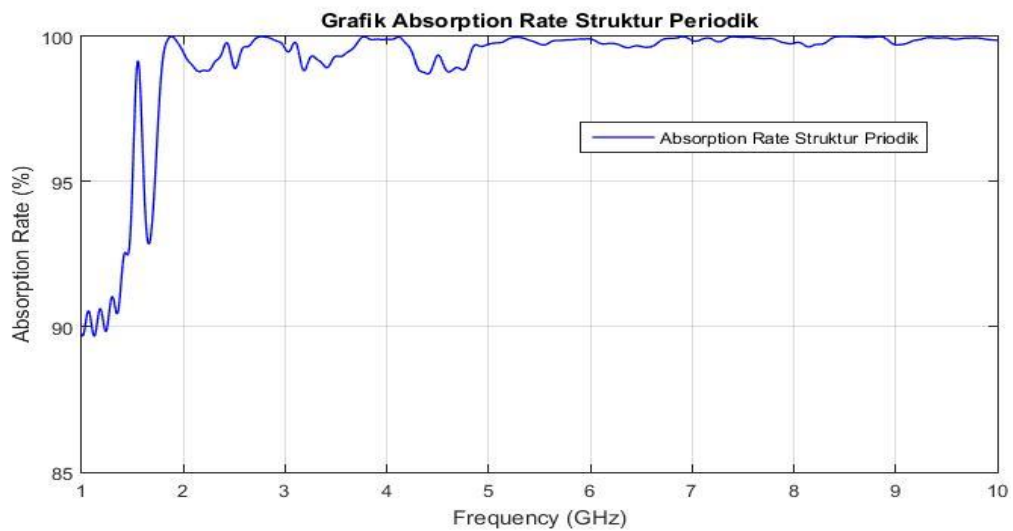


Berikut grafik simulasi parameter  $S_{11}$  pada desain unit sel periodik metamaterial absorber pada rentang frekuensi antara 1 GHz - 10 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.64.



Gambar 4.64 Grafik Parameter  $S_{11}$  Metamaterial Absorber Unit sel Periodik

Gambar 4.64 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  susunan periodik yang memiliki nilai rata rata  $\leq -10$  dB pada rentang frekuensi 2 - 10 GHz. Artinya pada perancangan desain unit sel periodik metamaterial absorber memiliki frekuensi operasi pita lebar (*wideband*). Adapun untuk mengetahui nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.65.

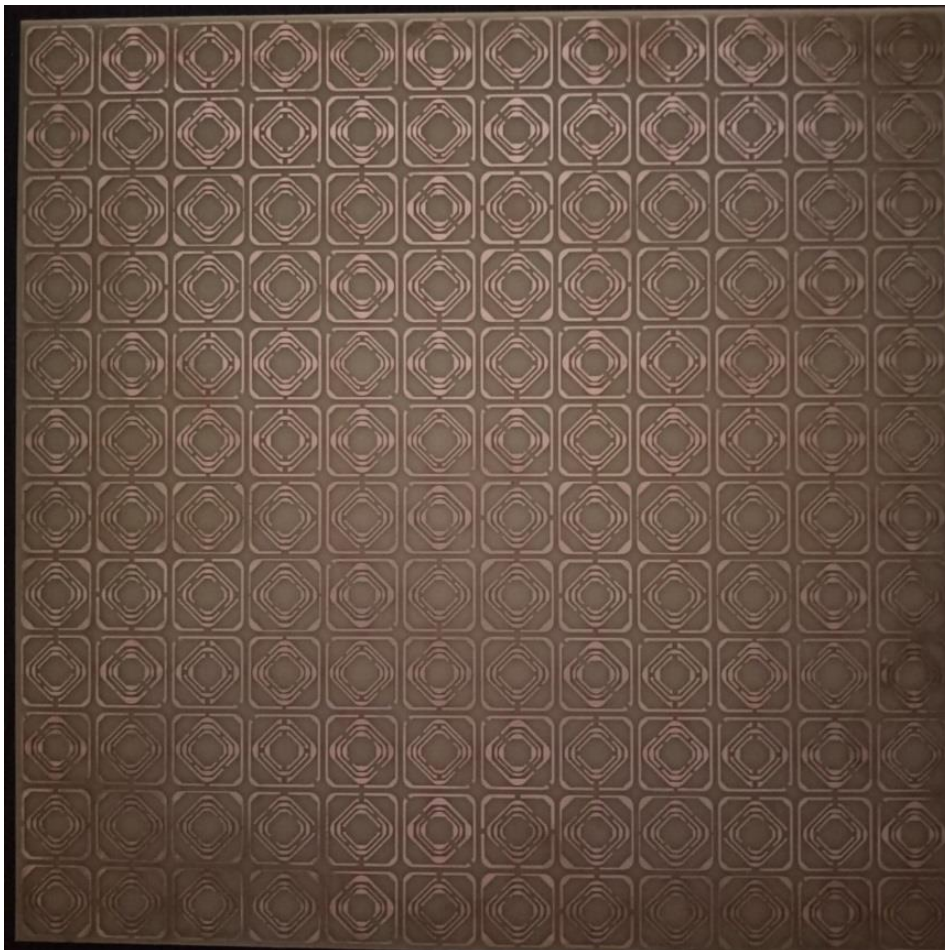


Gambar 4.65 *Absorption rate* Metamaterial Absorber Unit sel Periodik

Berdasarkan Gambar 4.65 desain unit sel periodik metamaterial absorber memiliki rata – rata *absorption rate*  $\geq 90\%$ , sehingga perancangan metamaterial absorber telah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.

### 4.3 Fabrikasi Metamaterial Absorber

Pada tahap fabrikasi desain metamaterial absorber dilakukan proses penyusunan struktur periodik dari pengabungan unit sel terpilih. Pada proses fabrikasi ini diajukan menggunakan bahan FR-4 Epoxy dengan spesifikasi ukuran 36 cm x 36 cm x 1.6 mm. Berikut desain metamaterial absorber hasil fabrikasi unit sel terpilih pada Gambar 4.66.

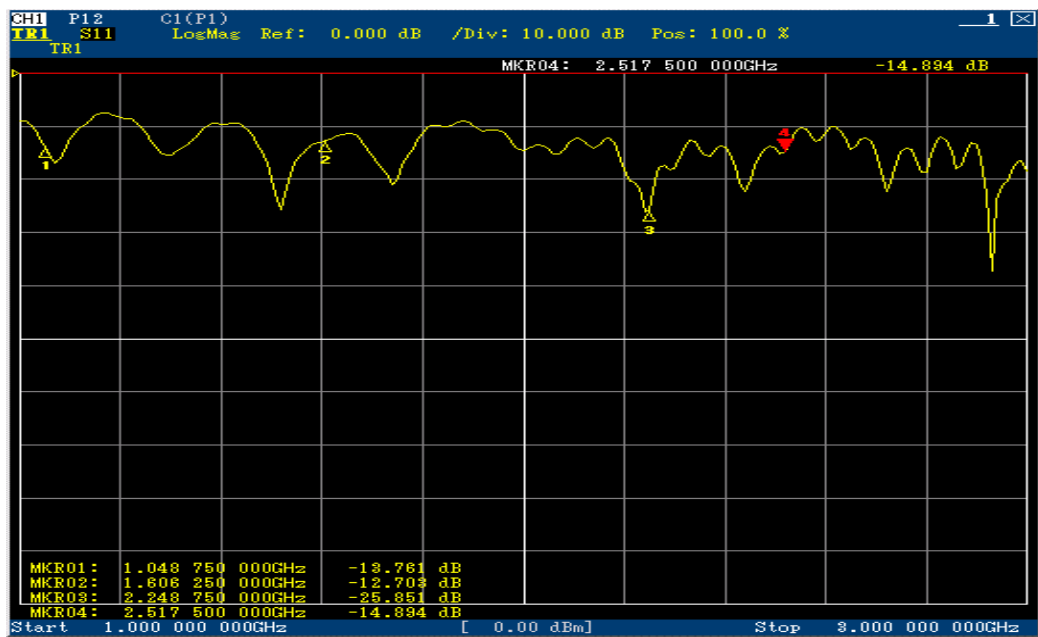


Gambar 4.66 Desain Periodik Metamaterial Absorber Hasil Fabrikasi

#### 4.4 Hasil Pengukuran Metamataterial Absorber

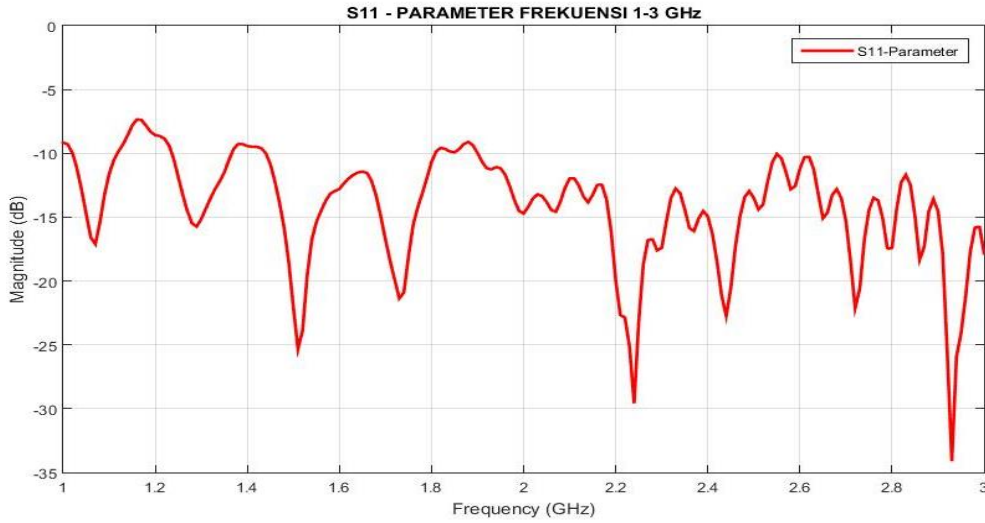
Pada tahap ini dilakukan proses pengukuran parameter metamaterial absorber dengan menggunakan perangkat *Vector Network Analyzer* (VNA), terdapat beberapa parameter metamaterial absorber yang akan diuji diantaranya frekuensi kerja, parameter  $S_{11}$ , dan *absorption rate*. Selanjutnya adalah pengujian parameter metamaterial absorber dengan frekuensi test yang telah terkalibrasi menjadi beberapa set pada rentang frekuensi 1 GHz - 3 GHz, 3 GHz - 5 GHz, 5 GHz - 7 GHz, dan 7 GHz - 12 GHz.

Berikut beberapa hasil pengujian parameter metamaterial absorber dengan *Vector Network Analyzer* (VNA) untuk *range* frekuensi 1 GHz - 3 GHz pada Gambar 4.67 - Gambar 4.69.



Gambar 4.67 Hasil Pengukuran Parameter  $S_{11}$  *Range* frekuensi 1 GHz - 3 GHz menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA)

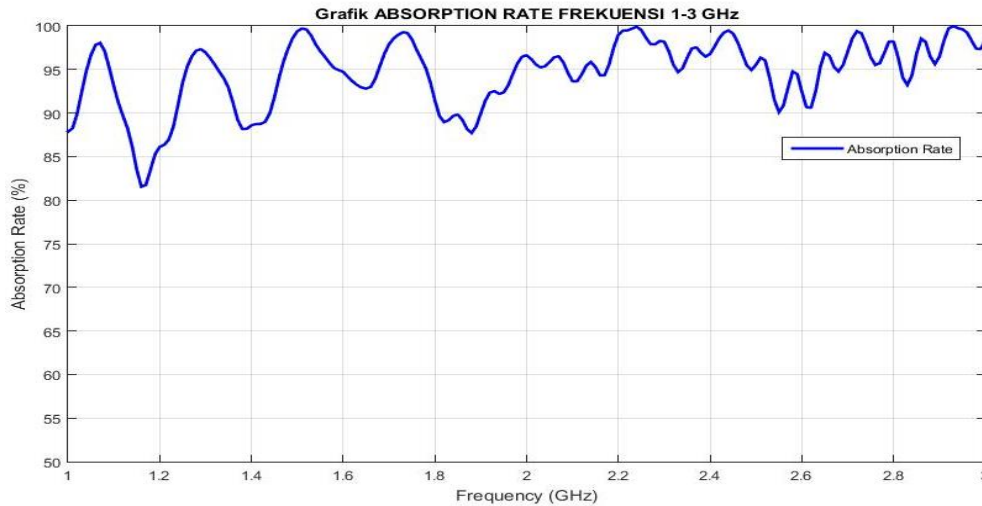
Gambar 4.68 menunjukkan hasil pengukuran parameter  $S_{11}$  range frekuensi 1 GHz – 3 GHz.



Gambar 4.68 Grafik Parameter  $S_{11}$  Range frekuensi 1 GHz - 3 GHz

Gambar 4.68 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  hasil pengukuran range frekuensi 1 GHz - 3 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas minimum -7 dB dengan frekuensi resonan 1 GHz – 3 GHz. Adapun *peak* parameter  $S_{11}$  sebesar -34.13dB pada frekuensi resonan 2.93 GHz.

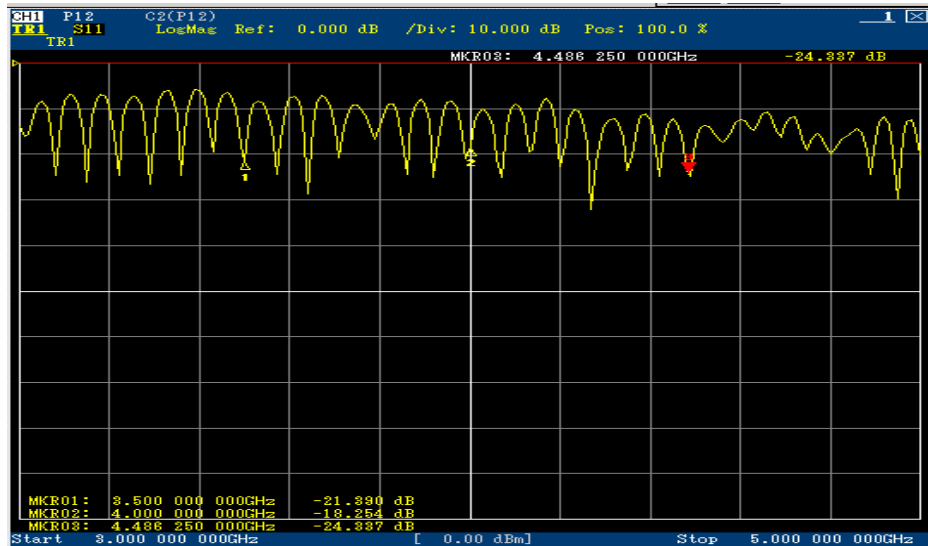
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.69.



Gambar 4.69 Absorption rate Range frekuensi 1 GHz - 3 GHz

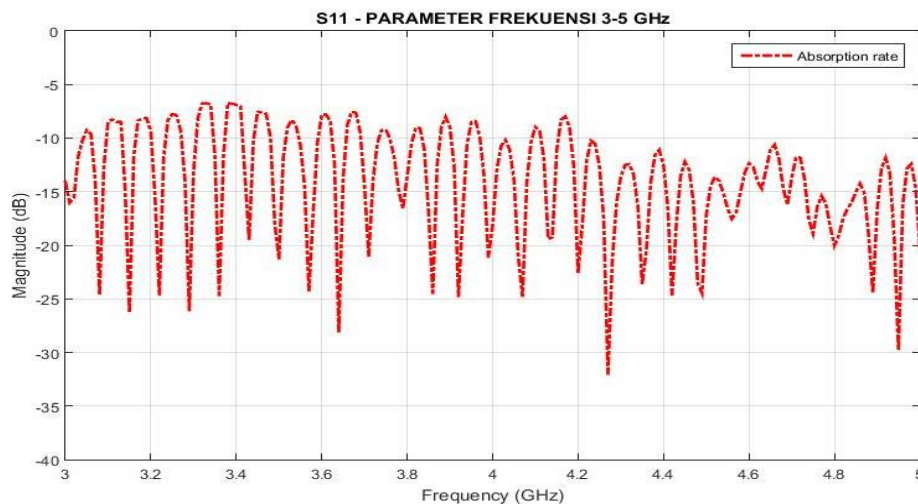
Gambar 4.69 menunjukkan grafik *absorption rate* metamaterial absorber hasil pengukuran pada *range* frekuensi 1 GHz - 3 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh grafik *absorption rate* yang memenuhi batas minimum  $\geq 80\%$ .

Berikut merupakan hasil pengujian parameter metamaterial absorber pada *range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz, yang ditunjukkan pada Gambar 4.70 - Gambar 4.72.



Gambar 4.70 Hasil Pengukuran Parameter  $S_{11}$  *Range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA)

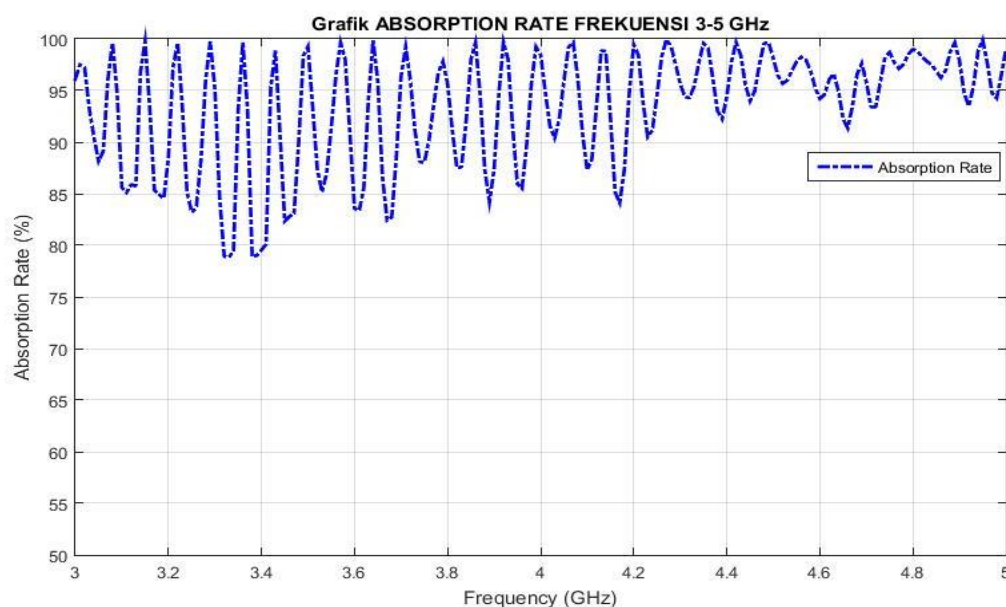
Gambar 4.71 menunjukkan hasil pengukuran parameter  $S_{11}$  *range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz.



Gambar 4.71 Grafik Parameter  $S_{11}$  *Range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz

Gambar 4.71 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  hasil pengukuran *range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas minimum -7 dB dengan frekuensi resonan 3 GHz – 5 GHz. Adapun *peak* parameter  $S_{11}$  sebesar -32.1 dB pada frekuensi resonan 4.27 GHz.

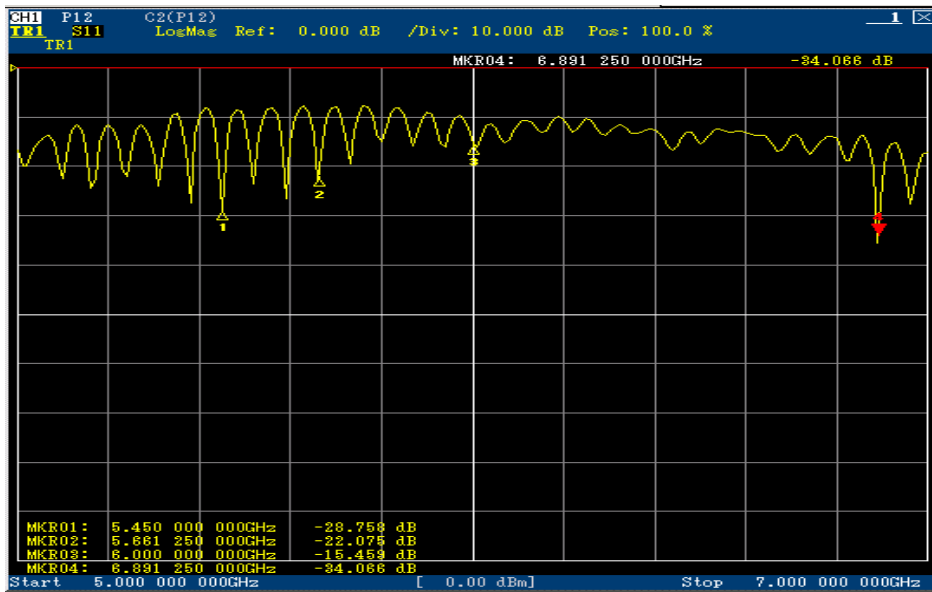
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.72.



Gambar 4.72 *Absorption rate Range* frekuensi 3 GHz - 5 GHz

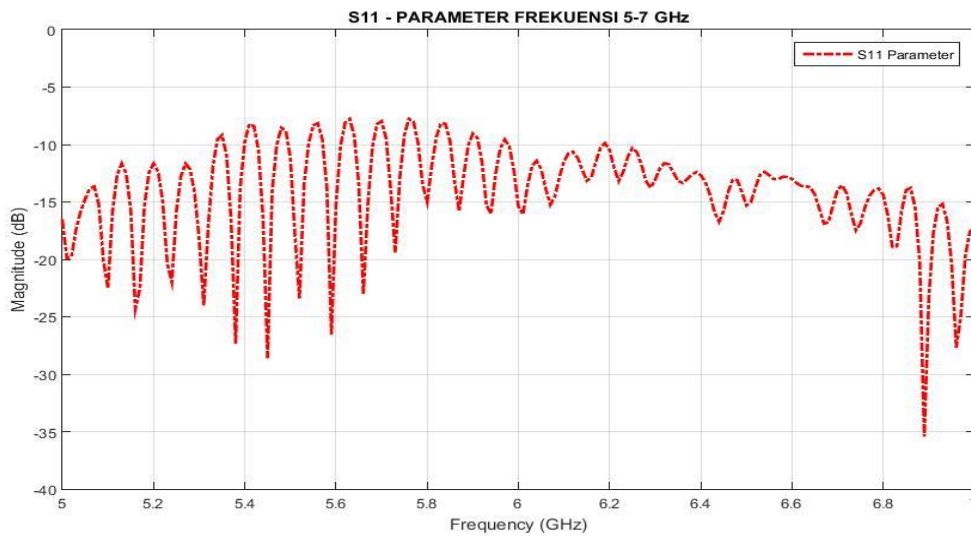
Gambar 4.72 menunjukkan grafik *absorption rate* metamaterial absorber pada *range* frekuensi 3 GHz -5 GHz yang telah memenuhi spesifikasi tingkat *absorption rate* yaitu  $\geq 80\%$ , namun terdapat beberapa frekuensi yang memiliki tingkat *absorption rate*  $\leq 80\%$  diantaranya pada frekuensi 3.33 GHz dan 3.39 GHz dengan masing - masing *absorption rate* sebesar 78.9% dan 79.1%, dalam hal ini kedua frekuensi tersebut masih dalam batas toleransi minimal tingkat *absorption rate*. Sehingga pada rentang frekuensi 3 GHz - 5 GHz metamaterial absorber hasil pengujian memiliki *absorption rate* yang baik.

Berikut merupakan hasil pengujian parameter metamaterial absorber pada *range* frekuensi 5 GHz - 7 GHz, yang ditunjukkan pada Gambar 4.73 - Gambar 4.75.



Gambar 4.73 Hasil Pengukuran Parameter  $S_{11}$  *Range* frekuensi 5 GHz - 7 GHz menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA)

Gambar 4.74 menunjukkan hasil pengukuran parameter  $S_{11}$  *range* frekuensi 5 GHz – 7 GHz

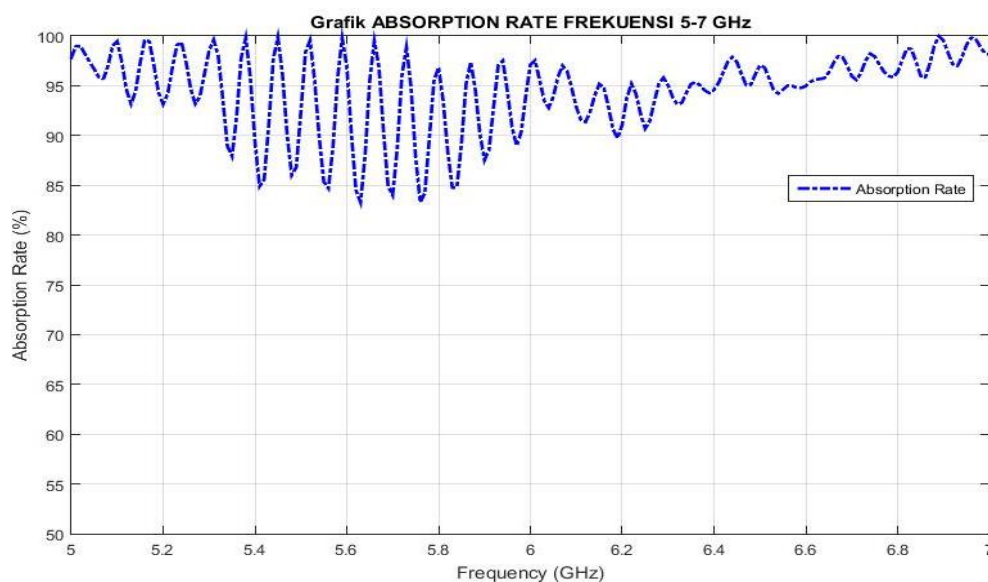


Gambar 4.74 Grafik Parameter  $S_{11}$  *Range* frekuensi 5 GHz sampai 7 GHz



Gambar 4.74 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  hasil pengukuran *range* frekuensi 5 GHz - 7 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas minimum -7 dB dengan frekuensi resonan 5 GHz – 7 GHz. Adapun *peak* parameter  $S_{11}$  sebesar -35.4 dB pada frekuensi resonan 6.89 GHz.

Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.75.

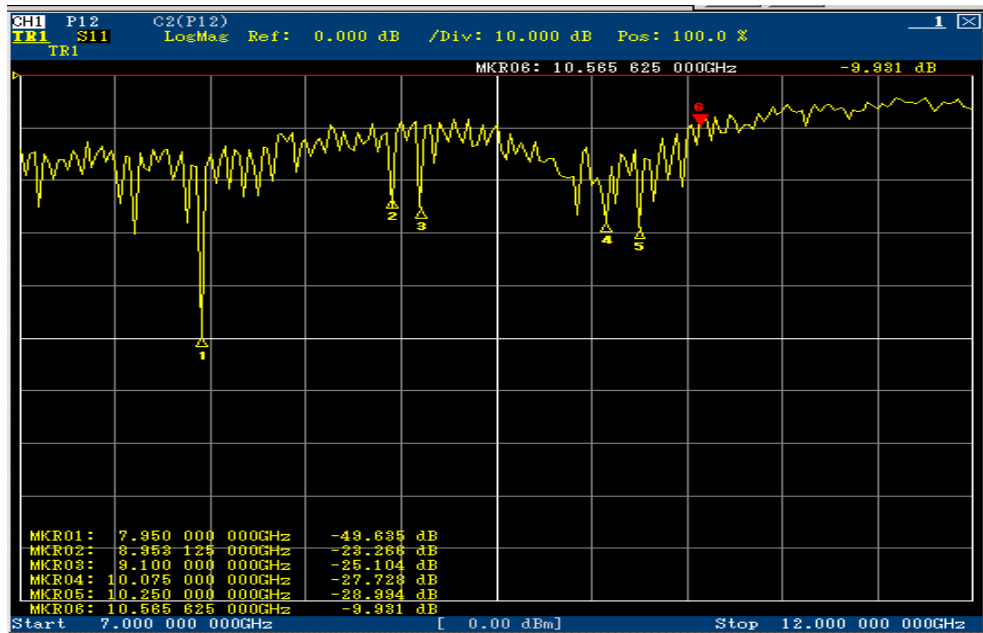


Gambar 4.75 *Absorption rate Range* frekuensi 5 GHz sampai 7 GHz

Gambar 4.75 menunjukkan grafik *absorption rate* metamaterial absorber hasil pengukuran pada *range* frekuensi 5 GHz - 7 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh grafik *absorption rate* yang memenuhi batas minimum  $\geq 80\%$ . Sehingga metamaterial absorber *range* frekuensi 1 GHz – 3 GHz hasil pengukuran memiliki tingkat *absorption rate* yang baik

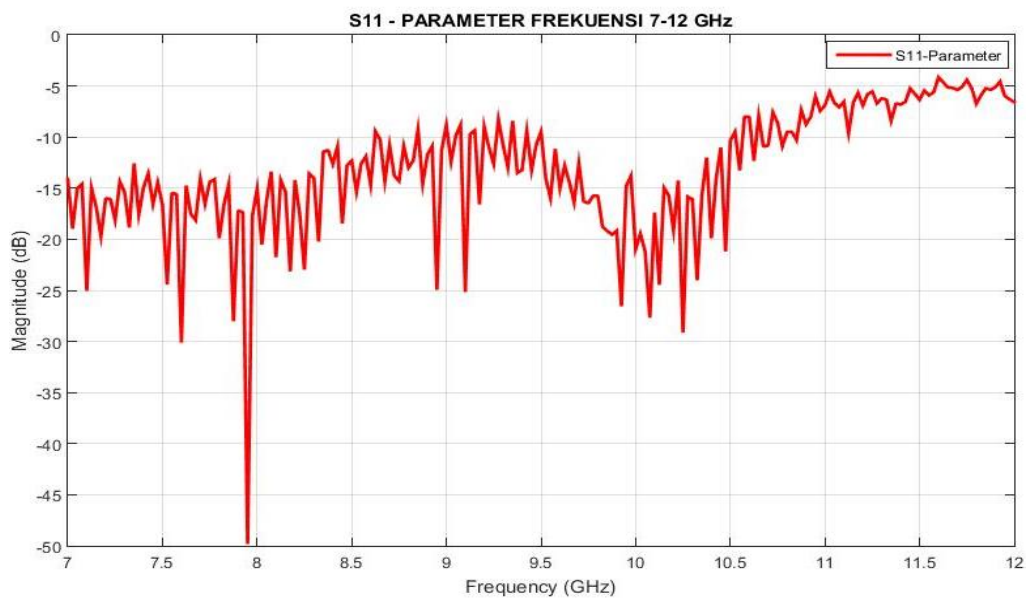
Selanjutnya hasil pengujian parameter metamaterial absorber pada set *range* frekuensi 7 GHz - 12 GHz pada Gambar 4.76 - Gambar 4.78.





Gambar 4.76 Hasil Pengukuran Parameter  $S_{11}$  Range frekuensi 7 GHz - 12 GHz menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA)

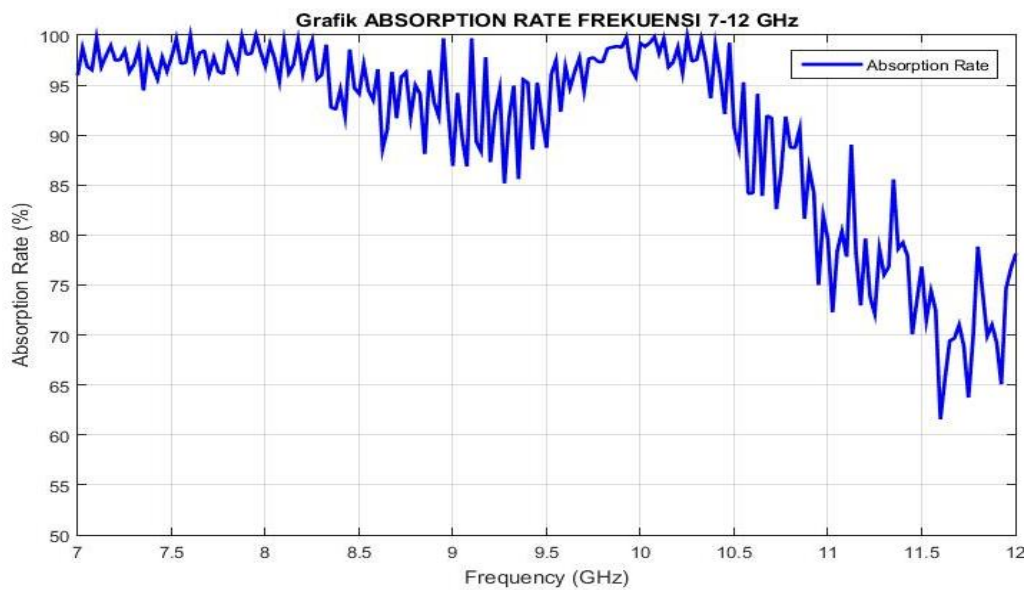
Gambar 4.77 menunjukkan hasil pengukuran parameter  $S_{11}$  range frekuensi 7 GHz – 12 GHz.



Gambar 4.77 Grafik Parameter  $S_{11}$  Range frekuensi 7 GHz - 12 GHz

Gambar 4.78 menunjukkan grafik parameter  $S_{11}$  hasil pengukuran *range* frekuensi 7 GHz - 12 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh parameter  $S_{11}$  yang memenuhi batas minimum -7 dB dengan frekuensi resonan 7 GHz – 12 GHz. Adapun *peak* parameter  $S_{11}$  sebesar -49.82dB pada frekuensi resonan 7.95 GHz

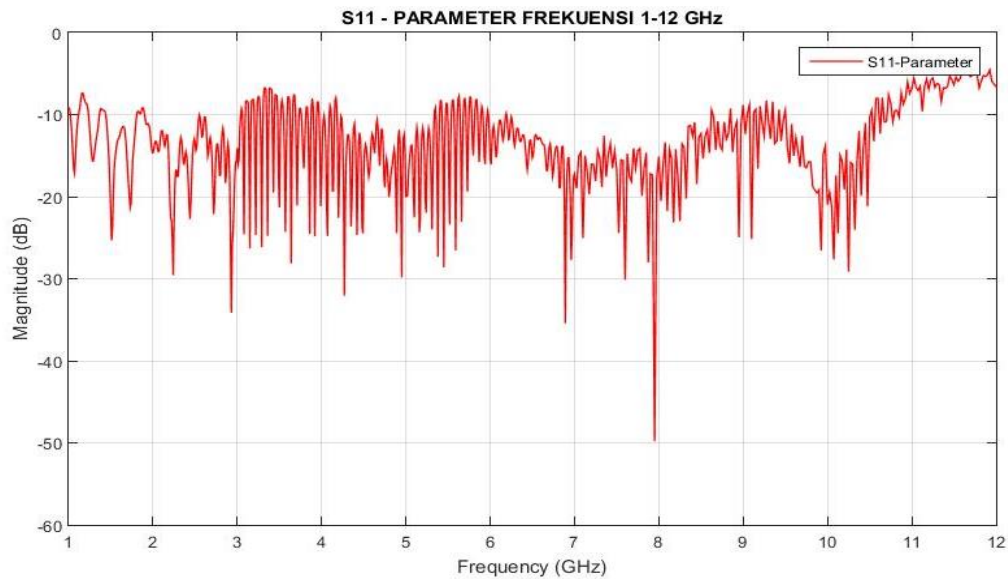
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil parameter  $S_{11}$  dengan persamaan  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.78.



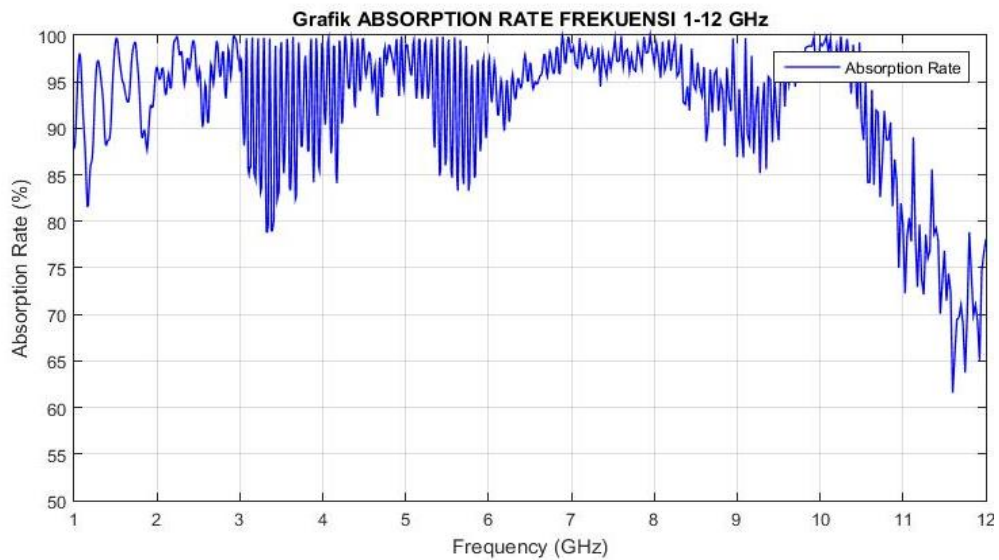
Gambar 4.78 *Absorption rate Range* frekuensi 7 GHz - 12 GHz

Gambar 4.78 menunjukkan grafik *absorption rate* metamaterial absorber hasil pengukuran pada *range* frekuensi 7 GHz - 12 GHz, berdasarkan grafik tersebut diperoleh grafik *absorption rate* yang memenuhi batas minimum  $\geq 80\%$ . Sehingga metamaterial absorber *range* frekuensi 7 GHz – 12 GHz hasil pengukuran memiliki tingkat *absorption rate* yang baik.

Selanjutnya adalah proses pengabungan parameter metamaterial absorber hasil pengujian dari *range* frekuensi 1 GHz - 12 GHz pada Gambar 4.79 sampai Gambar 4.80.



Gambar 4.79 Grafik Parameter  $S_{11}$  Range frekuensi 1 GHz - 12 GHz

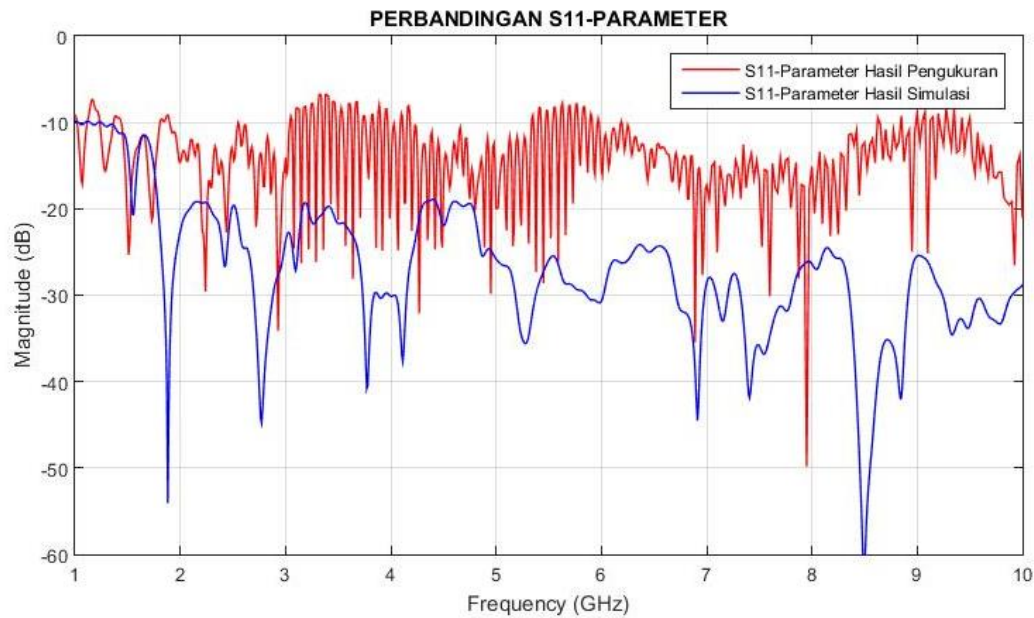


Gambar 4.80 Absorption rate Range frekuensi 1 GHz - 12 GHz

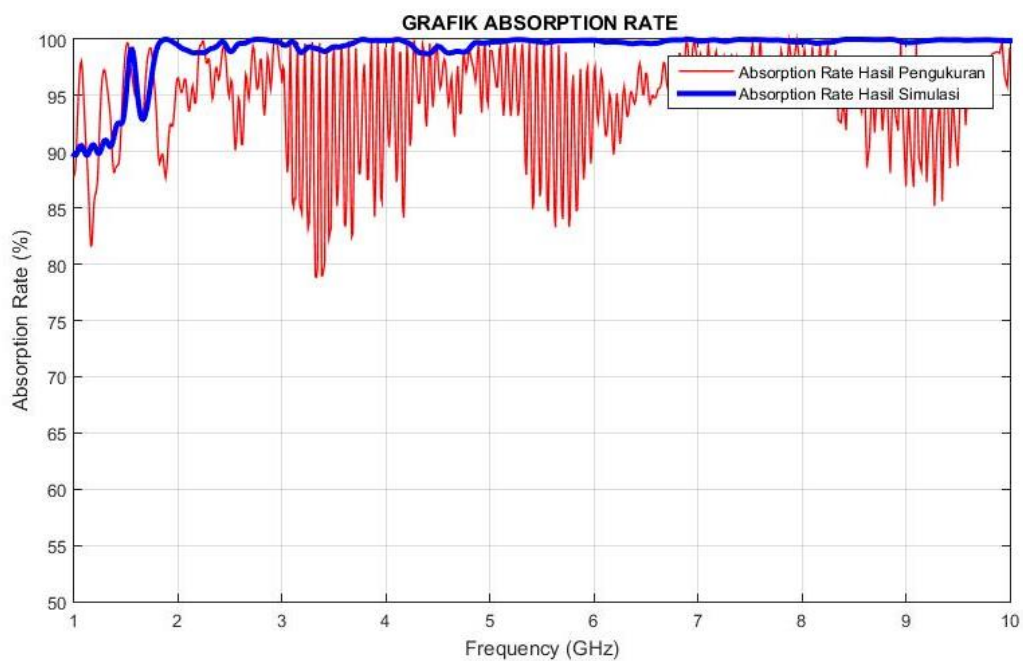
Berdasarkan Gambar 4.80 menunjukkan *absorption rate* metamaterial absorber hasil pengujian memiliki frekuensi operasi *wideband*, dengan frekuensi operasi optimal sebesar 1 GHz sampai 10.85 GHz.

#### 4.5 Analisa Hasil Pengukuran dan Simulasi

Pada sub bab analisa hasil pengukuran dan simulasi metamaterial absorber ditampilkan perbandingan grafik parameter metamaterial absorber hasil simulasi dengan pengukuran yang meliputi parameter  $S_{11}$  dan *absorption rate*, seperti pada Gambar 4.81 - Gambar 4.82.



Gambar 4.81 Perbandingan Parameter  $S_{11}$  Hasil Pengukuran dan Simulasi



Gambar 4.82 Perbandingan *Absorption rate* Hasil Pengukuran dan Simulasi

Berdasarkan hasil grafik perbandingan parameter metamaterial absorber hasil simulasi dan pengukuran dapat dipetakan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perbandingan Parameter Metamaterial Absorber Hasil Simulasi dan Pengukuran

No	Parameter	Hasil Simulasi	Hasil Pengukuran
1	Frekuensi Kerja	1 GHz - 10 GHz	1 GHz – 10 GHz
2	<i>Bandwidth</i>	10 GHz	10 GHz
3	<i>Peak Parameter S11</i>	-54 dB pada 1.8 GHz ; - 44.7 dB pada 2.7 GHz ; -60 dB pada 8.5 GHz	-34 dB pada 2.93 GHz ; -35 dB pada 6.89 GHz ; -50 dB pada 7.95 GHz
4	<i>Absorption rate</i>	$\geq 90\%$	$\geq 80\%$
5	<i>Peak Absorption rate</i>	99.99 %	99%

Berdasarkan Tabel 4.11 menunjukkan bahwa parameter metamaterial absorber hasil simulasi dan pengukuran sama-sama memiliki frekuensi *wideband* yaitu 1 GHz sampai 10 GHz dengan *bandwidth* 10 GHz, namun untuk rata-rata tingkat *absorption rate* pada hasil simulasi lebih baik dibandingkan dengan hasil pengukuran yaitu pada hasil simulasi diperoleh rata-rata *absorption rate* sebesar  $\geq 90\%$  sedangkan hasil pengukuran sebesar  $\geq 80\%$ , akan tetapi metamaterial hasil simulasi dan pengukuran telah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pembahasan penelitian dalam tesis ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan metode *equivalent circuit – split ring resonator* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode *split ring slot* karena dapat merepresentasikan dengan baik hubungan antara hasil simulasi desain metamaterial absorber dengan perhitungan rangkaian ekuivalen.
2. Untuk memperoleh tingkat *absortion rate* optimal dan *bandwidth* yang lebar, dilakukan penyusunan unit sel secara priodik dengan teknik *cross vertical* serta penempatan jarak antar unit sel sekurang-kurangnya dari panjang gelombang.
3. Perbandingan parameter metamaterial absorber hasil simulasi dengan pengukuran sama sama memiliki frekuensi resonan *wideband* yaitu 1 GHz sampai 10 GHz dengan perbandingan rata - rata tingkat *absortion rate* hasil simulasi  $\geq 90\%$  sedangkan rata-rata tingkat *absorption rate* hasil pengukuran  $\geq 80\%$ .
4. Berdasarkan data unit sel 11 modifikasi 1-10 diperoleh rata – rata selisih perbandingan frekuensi resonan hasil simulasi dengan rangkaian ekuivalen sebesar 0.17 GHz.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan dalam perancangan dan pembuatan metamaterial absorber ini yaitu.

1. Untuk melakukan perancangan metamaterial absorber perlu diperhatikan bahan (material) yang digunakan misal Roger RO3003, karena pada perancangan metamaterial absorber sangat terpengaruh dengan nilai epsilon (konstanta dielektrik) pada bahan (material).
2. Disarankan untuk melakukan perancangan metamaterial absorber pada pita frekuensi X – Ku *band* untuk aplikasi dibidang satelit dan militer.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cui, T. J., Smith, D. R., & Liu, R. (2010). *Metamaterials Theory, Design, and Applications*. New York: Springer.
- [2] Tak, J., Lee, Y., & Choi, J. (2013). Design of a Metamaterial Absorber for ISM Applications. *JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE*, 1-7.
- [3] P. Munaga, S. Ghosh, S. Bhattacharyya, D. Chaurasiya and K. V. Srivastava, "An ultra-thin dual-band polarization-independent metamaterial absorber for EMI/EMC applications," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, 2015, pp. 1-4.
- [4] K. I. Maniotis and G. S. Kliros, "Design of an ultra-thin *bandwidth*-optimized metamaterial absorber for EMC applications," 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, 2015, pp. 583-586.
- [5] Nornikman, H., Malek, F., Ahmed, M., Wee, F. H., Soh, P. J., & Azremi, A. A. (2011). SETUP AND RESULTS OF PYRAMIDAL MICROWAVE ABSORBERS USING RICE HUSKS. *Progress In Electromagnetics Research*, 141-161.
- [6] Cottard, G., & Arien, Y. (2006). *ANECHOIC CHAMBER MEASUREMENT*. *Microwave Journal*, 1-6.
- [7] O. Ayop, M. K. A. Rahim, N. A. Murad and N. A. Samsuri, "Polarization insensitive and wide operating angle metamaterial absorber at X-band," 2014 *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Johor Bahru, 2014, pp. 245-249.
- [8] W. Pan, X. Yu, J. Zhang and W. Zeng, "A Novel Design of Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Nested Circle *Rings*," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 21, pp. 2335-2338, 1 Nov.1, 2016.

- [9] B. Wang, G. Wang, L. Wang and X. Zhai, "Design of a Five-Band Terahertz Absorber Based on Three Nested *Split-Ring* Resonators," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 3, pp. 307-310, 1 Feb.1, 2016.
- [10] Lee, Y. P., Rhee, J. Y., Yoo, Y. J., & Kim, K. W. (2016). *Metamaterials for Perfect Absorption*. SinGapore: Springer Series in Materials Science.
- [11] K.-L. Wong, C.-C. Huang and W.-S. Chen, "Printed *ring* slot antenna for circular polarization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, pp. 75-77, 2002.
- [12] A. Jabita, Design of Singly *Split* Single *Ring* Resonator for Measurement of Dielectric Constant of Materials using Resonant Method, Swedia: Gävle University College, 2013.
- [13] W. Xin, Z. Binzhen, W. Wanjun, W. Junlin and D. Junping, "Design and Characterization of an Ultrabroadband Metamaterial Microwave Absorber," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1-13, June 2017, Art no. 4600213.
- [14] S. Bhattacharyya, S. Ghosh and K. V. Srivastva, "A microwave metamaterial absorber with wide bandwidth," 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), Seoul, 2016, pp. 1215-1218.
- [15] S. Ma, X. Hou, Q. Zhang, Y. Yang and Y. Tang, "Ultra-wideband metamaterial absorber using three-layer ring and patch resonators," 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Chengdu, 2018, pp. 1-3.
- [16] B. Xue, Y. Hu, B. Wu, L. Chen and W. Zhang, "A Wideband Transparent Absorber for Microwave and Millimeter Wave Application," 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 2017, pp. 1-3.

- [17] H. S. Lee and H. M. Lee, "Metamaterial absorber with extended bandwidth configuration," 2013 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Karlsruhe, 2013, pp. 295-297.
- [18] T. T. Nguyen and S. Lim, "Bandwidth enhancement of metamaterial absorber using double resonance," 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Kuala Lumpur, 2017, pp. 380-382.
- [19] Boardman, A. (2010). Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago. JOURNAL OF OPTICS, 1-6.
- [20] C. CALOZ and A. ITOH, ELECTROMAGNETIC METAMATERIALS: TRANSMISSION LINE THEORY AND MICROWAVE APPLICATIONS, Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey., 2006.
- [21] A. v. Hippel, "THEORY AND APPLICATION OF RF/MICROWAVE ABSORBERS," Emerson & Cuming Microwave Products, Inc.
- [22] J.-S. HONG and M. J. LANCASTER, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, NEW YORK: JOHN WILEY & SONS, INC., 2001.
- [23] H. A. Susanto, E. Setijadi and P. Handayani, "Simulation design of triple band metamaterial absorber for radar cross section reduction," 2016 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), Surabaya, 2016, pp. 34-37.
- [24] Lim, D., Le, D., & Lim, S. (2016). *Angle- and Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber using Via Array*. Scientific Reports.
- [25] V. David, I. Nica and A. Salceanu, "Electromagnetic absorbers based on chiral honeycomb slab," 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, Athens, 2009, pp. 1-4.

- [26] Feng Zekun, Huang Aiping and He Huahui, "Wide-band electromagnetic wave absorber of rubber-ferrite," *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, China, 2002, pp. 420-423.
- [27] L. Zhang, H. Lu, P. Zhou, J. Xie and L. Deng, "Oblique Incidence Performance of Microwave Absorbers Based on Magnetic Polymer Composites," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 7100604.
- [28] Laukaitisa, A., Sinicaa, M., & Balevi-cius, S. (2008). Investigation of Electromagnetic Wave Absorber Based on Carbon Fiber Reinforced Aerated Concrete Using Time-Domain Method. *Proceedings of the 13th International Symposium UFPS* (pp. 1047-1050). Vilnius: ACTA PHYSICA POLONICA A
- [29] Zhang, Y., Zhao, J., Cao, J., & Mao, B. (2018). Microwave Metamaterial Absorber for Non-Destructive Sensing Applications of Grain. *Sensors*, 1-10.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN

### Listing Program Matlab

#### Menentukan Nilai Parameter $S_{11}$ dan *Absorption rate*

```
filename = 's11.xlsx';
sheet = 1;
RangeS11 = 'B3:B1003';
RangeFreq = 'A3:A1003';
S11 = xlsread(filename,sheet,RangeS11);
Freq = xlsread(filename,sheet,RangeFreq);
Absorp=1-(S11.^2);
Aborp_persen=Absorp*100;

figure(1)
plot(Freq,Aborp_persen, '-b','linewidth',1,'markeredgecolor','r')
grid on
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('Absorption rate (%)')
axis([1 10 85 100])
title('Grafik Absorption rate Struktur Periodik')
```

#### Menentukan Nilai Parameter $S_{11}$ dan *Absorption rate* dengan Perbedaan Lebar

##### Gap

```
filename = 'Gap.xlsx';

%1
sheetA = 1;
RangeS11A = 'B3:B1005';
RangeFreqA = 'A3:A1005';
S11A = xlsread(filename,sheetA,RangeS11A);
FreqA = xlsread(filename,sheetA,RangeFreqA);
AbsorpA=1-(S11A.^2);
Aborp_persenA=AbsorpA*100;

%2
sheetB = 2;
RangeS11B = 'B3:B1005';
RangeFreqB = 'A3:A1005';
S11B = xlsread(filename,sheetB,RangeS11B);
FreqB = xlsread(filename,sheetB,RangeFreqB);
AbsorpB=1-(S11B.^2);
Aborp_persenB=AbsorpB*100;
```

```

%3
sheetC = 3;
RangeS11C = 'B3:B1005';
RangeFreqC = 'A3:A1005';
S11C = xlsread(filename, sheetC, RangeS11C);
FreqC = xlsread(filename, sheetC, RangeFreqC);
AbsorpC=1-(S11C.^2);
Aborp_persenC=AbsorpC*100;

%4
sheetD = 4;
RangeS11D = 'B3:B1005';
RangeFreqD = 'A3:A1005';
S11D = xlsread(filename, sheetD, RangeS11D);
FreqD = xlsread(filename, sheetD, RangeFreqD);
AbsorpD=1-(S11D.^2);
Aborp_persenD=AbsorpD*100;

figure(1)
plot(FreqA,Aborp_persenA, '-.r', 'linewidth', 2)
hold on
plot(FreqB,Aborp_persenB, '-.g', 'linewidth', 2)
hold on
plot(FreqC,Aborp_persenC, '-.b', 'linewidth', 2)
hold on
plot(FreqD,Aborp_persenD, '-.y', 'linewidth', 2)
grid on
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('Absorption rate (%)')
axis([1 10 0 100])
title('Grafik Absorption rate lebar Gap')

```

### Menentukan Nilai Frekuensi Resonan Metamaterial Absorber Struktur *Split Ring Slot Circular*

```

%inialisasi variabel c,phi,er
c=3e8;
phi=3.14;
er=4.3;
ro=12e-3;
ri=10e-3;
gab=((1+er)/(2*er));
f0=(c/(phi*(ro+ri)))*(sqrt(gab));

```



Menentukan Nilai Frekuensi Resonan Metamaterial Absorber Struktur *Split Ring Slot Square*

```
%inialisasi variabel c,phi,er
c=3e8;
er=4.3;
Lo=16e-3;
Li=14e-3;
gab=((1+er)/(2*er));
f0=(c/(2*(Lo+Li)))*(sqrt(gab));
```

Menentukan Nilai Frekuensi Resonan Metamaterial Absorber Struktur *Equivalent Circuit - Split Ring Resonators Circular*

```
%inilaisasi variabel
U0=1.256e-6;
E0=8.854e-12;
ER=4.3;
phi=3.14;
R=9e-3;
w=2e-3;
h=1.6e-3;
g=2e-3;
%menentukan nilai indukatsi
Rm=(R+w)/2;
L=U0*Rm*(log((8.*Rm)/(h+w))-0.5);
%menentukan nilai kapasitansi
Cmut=E0*ER*((w*h/g)+((2*phi*h)/log(2.4*h/w)));
Cair=E0*((w*h/g)+((2*phi*h)/log(2.4*h/w)));
Cg=(Cmut*Cair)/(Cmut+Cair);
Cs=((2*E0*h)/phi)*log(4*R/g);
C=Cg+Cs;
%menentukan nilai frekuensi resonan
LC=L*C;
f0=1/(2*phi*sqrt(LC));
```

## Menentukan Nilai Frekuensi Resonan Metamaterial Absorber Struktur *Equivalent*

### *Circuit - Split Ring Resonators Square*

```
%menentukan inialisasi variabel
U0=1.256e-6;
E0=8.854e-12;
ER=4.3;
phi=3.14;
Lo=12e-3;
w=3e-3;
h=1.6e-3;
g=2e-3;
%menentukan nilai induktansi
Lm=(Lo+w)/2;
Lin=(U0*Lm)*(log((4*Lm)/(h+w))-1);
%menentukan nilai kapasitansi
Cmut=E0*ER*((w*h/g)+((2*phi*h)/log(2.4*h/w)));
Cair=E0*((w*h/g)+((2*phi*h)/log(2.4*h/w)));
Cg=(Cmut*Cair)/(Cmut+Cair);
Cs=((2*E0*h)/phi)*log(8*Lo/g);
C=Cg+Cs;
%menentukan
LC=Lin*C;
f0=1/(2*phi*sqrt(LC));
```

## Menentukan Analisa Rangkaian Ekuivalen Unit Sel Tepilih

```
%Analisa Rangkaian Ekuivalen Unit Sel Tepilih
```

```
%inialisasi variabel
```

```
U0=1.256e-6;
E0=8.854e-12;
ER=4.3;
phi=3.14;
```

```
%inialisasi variabel rangkaian 1
```

```
L1=28e-3;
w1=2.5e-3;
h1=1.6e-3;
g1=2e-3;
```

```
%inialisasi variabel rangkaian 2
```

```
L2=19e-3;
w2=1.5e-3;
```

```

h2=1.6e-3;
g2=2e-3;

%inialisasi variabel rangkaian 3
L3=15.5e-3;
w3=1.5e-3;
h3=1.6e-3;
g3=2e-3;

%inialisasi variabel rangkaian 4
L4=11.5e-3;
w4=1.5e-3;
h4=1.6e-3;
g4=2e-3;

%menentukan nilai INDUKTANSI rangkaian 1
Lm1=(L1+w1)/2;
Lin1=(U0*Lm1)*(log((4*Lm1)/(h1+w1))-1);
%menentukan nilai INDUKTANSI rangkaian 2
Lm2=(L2+w2)/2;
Lin2=(U0*Lm2)*(log((4*Lm2)/(h2+w2))-1);
%menentukan nilai INDUKTANSI rangkaian 3
Lm3=(L3+w3)/2;
Lin3=(U0*Lm3)*(log((4*Lm3)/(h3+w3))-1);
%menentukan nilai INDUKTANSI rangkaian 4
Lm4=(L4+w4)/2;
Lin4=(U0*Lm4)*(log((4*Lm4)/(h4+w4))-1);
%menentukan nilai KAPASITANSI rangkaian 1
Cmut1=E0*ER*((w1*h1/g1)+((2*phi*h1)/log(2.4*h1/w1)));
Cair1=E0*((w1*h1/g1)+((2*phi*h1)/log(2.4*h1/w1)));
Cg1=(Cmut1*Cair1)/(Cmut1+Cair1);
Cs1=((2*E0*h1)/phi)*log(8*L1/g1);
Ct1=Cg1+Cs1;
%menentukan nilai KAPASITANSI rangkaian 2
Cmut2=E0*ER*((w2*h2/g2)+((2*phi*h2)/log(2.4*h2/w2)));
Cair2=E0*((w2*h2/g2)+((2*phi*h2)/log(2.4*h2/w2)));
Cg2=(Cmut2*Cair2)/(Cmut2+Cair2);
Cs2=((2*E0*h2)/phi)*log(8*L2/g2);
Ct2=Cg2+Cs2;
%menentukan nilai KAPASITANSI rangkaian 3
Cmut3=E0*ER*((w3*h3/g3)+((2*phi*h3)/log(2.4*h3/w3)));
Cair3=E0*((w3*h3/g3)+((2*phi*h3)/log(2.4*h3/w3)));
Cg3=(Cmut3*Cair3)/(Cmut3+Cair3);
Cs3=((2*E0*h3)/phi)*log(8*L3/g3);
Ct3=Cg3+Cs3;
%menentukan nilai KAPASITANSI rangkaian 4
Cmut4=E0*ER*((w4*h4/g4)+((2*phi*h4)/log(2.4*h4/w4)));
Cair4=E0*((w4*h4/g4)+((2*phi*h4)/log(2.4*h4/w4)));
Cg4=(Cmut4*Cair4)/(Cmut4+Cair4);
Cs4=((2*E0*h4)/phi)*log(8*L4/g4);
Ct4=Cg4+Cs4;

```

```

%menentukan perhitungan LC rangkaian 1
LA1= Lin1+Lin1;
LA2= Lin1*Lin1;
LPA= LA2./LA1;
CPA=Ct1+Ct1;
LCrangakain1=LPA*CPA;
f0orde1=1/(2*phi*sqrt(LCrangkaian1));
%menentukan perhitungan LC rangkaian 2
LB1= Lin2+Lin2;
LB2= Lin2*Lin2;
LPB= LB2./LB1;
CPB=Ct2+Ct2;
LCrangkaian2=LPB*CPB;
f0orde2=1/(2*phi*sqrt(LCrangkaian2));
%menentukan perhitungan LC rangkaian 3
LC1= Lin3+Lin3;
LC2= Lin3*Lin3;
LPC= LC2./LC1;
CPC=Ct3+Ct3;
LCrangkaian3=LPC*CPC;
f0orde3=1/(2*phi*sqrt(LCrangkaian3));
%menentukan perhitungan LC rangkaian 4
LD1= Lin4+Lin4;
LD2= Lin4*Lin4;
LPD= LD2./LD1;
CPD=Ct4+Ct4;
LCrangkaian4=LPD*CPD;
f0orde4=1/(2*phi*sqrt(LCrangkaian4));
% menentukan proses seri pada rangkaian LCtot
%INDUKTANSI TOTAL
Lseri=LPA+LPB+LPC+LPD;
%KAPASITANSI TOTAL
CSA= ((CPB*CPC*CPD) + (CPA*CPC*CPD) + (CPA*CPB*CPD) + (CPA*CPB*CPC) );
CSB=(CPA*CPB*CPC*CPD);
Cseri=CSB./CSA;
%menentukan frekuensi resonan
f0=1/(2*phi*sqrt(Lseri*Cseri));

```



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR RIWAT HIDUP

Penulis telah menyelesaikan pendidikan jenjang Sarjana (S1) di Universitas Jember (UNEJ) pada jurusan Teknik Elektro, lulus pada bulan Mei 2017 dan terdaftar sebagai mahasiswa Program Pasca Sarjana (S2) bulan September tahun 2017 pada bidang studi Telekomunikasi Multimedia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).



Penulis telah mengikuti Seminar Tesis dengan judul “**RANCANG BANGUN WIDEBAND METAMATERIAL ABSORBER UNTUK APLIKASI ANECHOIC CHAMBER PADA PITA FREKUENSI S – C**” pada tanggal 5 Juni 2018 dan Ujian Tesis pada 20 Desember 2018 sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar **Magister Teknik (M.T)**.

Nama : Arif Fahmi  
Alamat : Dsn.Cangkring Rt/Rw 3/1 Ds.Pengatigan Kec.Rogojampi  
Tempat, Tgl Lahir : Banyuwangi , 03 Maret 1995  
Agama : Islam  
No.Telepon / (WA) : 081217945658  
Email : [fahmi03031995@gmail.com](mailto:fahmi03031995@gmail.com)

Riwayat Pendidikan :

MI ISLAMIAH PENGATIGAN	(2001-2007)
MTS N ROGOJAMPI	(2007-2010)
SMA N 1 ROGOJAMPI	(2010-2013)
UNIVERSITAS JEMBER (UNEJ)	(2013-2017)
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOVEMBER (ITS)	(2017-2018)