



TESIS - TE142599

RANCANG BANGUN METAMATERIAL ABSORBER PITA LEBAR UNTUK APLIKASI RADAR CROSS SECTION REDUCTION

HERI AGUS SUSANTO
2215203003

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

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



TESIS - TE142599

**RANCANG BANGUN METAMATERIAL ABSORBER
PITA LEBAR UNTUK APLIKASI RADAR CROSS
SECTION REDUCTION**

HERI AGUS SUSANTO
2215203003

DOSEN PEMBIMBING

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

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

LEMBAR PENGESAHAN

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

oleh:

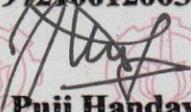
Heri Agus Susanto
NRP. 2215203003

Tanggal Ujian : 5 Januari 2017
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh:


1. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197210012003121002

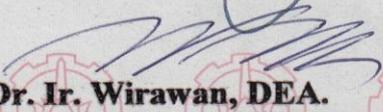
(Pembimbing I)


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

(Pembimbing II)


3. Prof. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng, Ph.D.
NIP. 197011111993031002

(Penguji)


4. Dr. Ir. Wirawan, DEA.
NIP. 196311091989031011

(Penguji)


5. Dr. Istas Pratomo, S.T., M.T.
NIP. 197903252003121001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana

an. Direktur Program Pascasarjana
Asisten Direktur


Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.
NIP. 196110211986031001

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D.
NIP. 196012021987011001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**RANCANG BANGUN METAMATERIAL ABSORBER PITA LEBAR UNTUK APLIKASI RADAR CROSS SECTION REDUCTION**” 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, 16 Januari 2017

Heri Agus Susanto

NRP. 2215203003

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN METAMATERIAL ABSORBER PITA LEBAR UNTUK APLIKASI RADAR CROSS SECTION REDUCTION

Nama Mahasiswa : Heri Agus Susanto
NRP : 2215203003
Pembimbing : 1. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.
2. Dr. Ir. Puji Handayani, M.T.

ABSTRAK

Adanya suatu permasalahan pada kendaraan militer seperti yang dialami oleh kapal maritim, dimana kapal tersebut terdeteksi oleh mesin radar dari suatu pesawat tempur. Hal ini disebabkan oleh adanya suatu refleksi gelombang elektromagnetik, yang mana refleksi tersebut mengenai konduktor kapal ketika melakukan *tracking* radar oleh pesawat. Sehingga, kapal maritim dapat diserang dengan mudah oleh pesawat tersebut karena adanya refleksi yang terdeteksi oleh mesin radar pesawat. Untuk mengatasi masalah tersebut dapat dilakukan dengan cara mengelabui pendeteksian oleh radar pesawat tempur agar tidak dapat melakukan penyerangan ke kapal yaitu menggunakan *Radar Absorbing Material* (RAM) berupa metamaterial absorber yang diimplementasikan dengan cara melapisi bagian dari body kapal tersebut dengan metamaterial absorber

Metamaterial absorber didesain menggunakan perancangan optimum berdasarkan spesifikasi yang telah ditetapkan dan dilakukan simulasi metamaterial absorber menggunakan *software* CST Microwave Studio 2012. Hasil simulasi metamaterial absorber menunjukkan range frekuensi antara 8.492 GHz hingga 10.538 GHz dengan *bandwidth* 2.046 GHz, sehingga *absorption rate* lebih besar dari 80 %, dengan *peak absorption* yaitu 99.06 % 96.002 % dan 98.22 %. Hasil realisasi metamaterial absorber menunjukkan range frekuensi antara 8 GHz hingga 10.5 GHz dengan *bandwidth* 2.5 GHz, sehingga nilai *absorption rate* lebih besar dari 80 %, dengan *peak absorption* yaitu 99.99 %. Metamaterial absorber pada simulasi dapat ditentukan nilai RCS, dimana pada sudut 0° menghasilkan nilai RCS sebesar $1.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, sedangkan ketika tanpa menggunakan metamaterial absorber dihasilkan nilai RCS sebesar $1.93 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Sehingga, bisa dikatakan nilai RCS dengan menggunakan metamaterial absorber lebih kecil dibandingkan nilai RCS tanpa menggunakan metamaterial absorber dengan persentase penurunan nilai RCS sebesar 58.22 %. Hasil pengujian nilai RCS dari fabrikasi metamaterial absorber pada sudut 0° yaitu 0.088 m^2 dan nilai RCS pada sudut $\pm 30^\circ$ sebesar 0.085 m^2 . Sedangkan nilai RCS pada sudut $\pm 68^\circ$ sebesar 0.119 m^2 dan nilai RCS pada sudut $\pm 83^\circ$ sebesar 0.126 m^2 .

Kata Kunci : Metamaterial Absorber, Pita Lebar, *absorption rate*, RCS

DESIGN AND MANUFACTURE OF BROADBAND METAMATERIAL ABSORBER FOR APPLICATION OF THE RADAR CROSS SECTION REDUCTION

By : Heri Agus Susanto
Student Identity Number : 2215203003
Supervisors : 1. Eko Setijadi, S.T., M.T., Ph.D.
2. Dr. Ir. Puji Handayani, M.T.

ABSTRACT

The existence of a problem on a military vehicle as experienced by maritime ships, where the ship was detected by radar engine of a fighter plane. This is caused by the presence of a reflection of electromagnetic waves, which are a reflection of the conductor ship when tracking radar by airplane. Thus, maritime ships can be easily attacked by the airplane because of the reflection detected by machine radar airplane. To solve that problems can be done in a way to fool detection by radar fighter that can not be find to the ship which uses radar absorbing material (RAM) such as metamaterial absorber which it was implemented by body of the ship with metamaterial absorber.

Metamaterial absorber is designed using optimum design based on specifications set and metamaterial absorber simulation using CST Microwave Studio software 2012. The simulation results show the metamaterial absorber frequency range between 8.492 GHz until 10.538 GHz with a bandwidth of 2.046 GHz, so the absorption rate is greater than 80%, with peak absorption is 99.06% 96 002% and 98.22%. Metamaterial absorber results fabrication showed a frequency range between 8 GHz to 10.5 GHz with a bandwidth of 2.5 GHz, so the absorption rate value greater than 80%, with peak absorption is 99.99%. Metamaterial absorber on the simulation can be determined the value of RCS, where the angle of 0° produce RCS value of $1.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, whereas when produced without using metamaterial absorber RCS value of $1.93 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. So, it can be said the value of RCS using metamaterial absorber is smaller than the value of RCS without using metamaterial absorber with the percentage reduction in RCS value of 58.22%. The Measurement results RCS value of fabricating metamaterial absorber at an angle of 0° is 0.088 m^2 and the value of RCS at an angle of $\pm 30^\circ$ is 0.085 m^2 . While the value of RCS at an angle of $\pm 68^\circ$ is 0.119 m^2 and RCS value at an angle of $\pm 83^\circ$ is 0.126 m^2 .

Keywords : Metamaterial Absorber, absorption rate, Broadband, RCS

KATA PENGANTAR

Dengan Nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puja dan puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan kepada penulis, sehingga penulisan Tesis dengan judul :

RANCANG BANGUN METAMATERIAL ABSORBER PITA LEBAR UNTUK APLIKASI RADAR CROSS SECTION REDUCTION

Dapat diselesaikan dengan baik. Buku tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister pada Jurusan Teknik Elektro dengan bidang keahlian Telekomunikasi Multimedia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sedalam-dalamnya kepada :

1. Kedua Orangtuaku dan Saudaraku tercinta yang telah mendidik dan merawat penulis sampai bisa berada pada posisi ini.
2. Bapak Eko Setijadi dan Ibu Puji Handayani atas bimbingan serta kesabarannya terhadap penulis sehingga bisa menyelesaikan tesis ini tepat pada waktunya.
3. Bapak Wirawan selaku dosen wali yang telah membimbing dan mengarahkan dengan baik selama perkuliahan.
4. Bapak Prof. Gamantyo Hendrantoro atas motivasi dan saran yang diberikan, sehingga bisa menyelesaikan tesis tepat pada waktunya.
5. Bapak dan Ibu Dosen Telekomunikasi Multimedia yang telah memberi banyak pengetahuan baru bagi penulis selama masa perkuliahan.
6. Rekan-rekan S3, S2 dan S1 di lab B306, B301 dan B304, khususnya Bu Rini, Pak Dwi Edi, Bu Nurhayati, Hilman, Rendy, dan lainnya atas kebaikan serta kerjasamanya selama penulis menempuh studi Pascasarjana di Jurusan Teknik Elektro.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu demi perbaikan dan penyempurnaan tesis ini, maka saran dan

kritik membangun sangat diharapkan. Besar harapan penulis bahwa buku tesis ini dapat memberi informasi dan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro pada khususnya.

Surabaya, 16 Januari 2017

Penulis

Heri Agus Susanto

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Relevansi	4
1.6 Metodologi Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 ELEKTROMAGNETIK ABSORBER	7
2.1.1 Pengertian Absorber.....	7
2.1.2 Parameter Elektromagnetik Anisotropis	8
2.1.3 Tipe Absorber.....	9
2.2 Metamaterial.....	11
2.3 Metamaterial Absorber	13
2.3.1 Parameter Metamaterial Absorber	15
2.3.1.1 Two port network	17
2.3.1.2 S-parameter	18
2.4 Penelitian Sebelumnya	21

2.5	Metode Pengukuran Metamaterial Absorber.....	22
2.5.1	Insertion Loss	22
2.5.2	Attenuasi	24
2.5.3	Pengukuran medan dekat	24
2.6	Aplikasi Metamaterial Absorber	25
2.6.1	Reduksi lubang resonansi.....	25
2.6.2	Absorber medan dekat.....	26
2.6.3	Absorber Load Material	27
2.6.4	Absorber Gelombang Milimeter	27
2.6.5	Reduksi Refleksi	28
2.6.6	Radar Cross Section Reduction.....	28
2.6.7	Penggunaan pada Anechoic Chamber.....	28
2.7	Split Ring Resonator (SRR)	28
2.8	Radar Cross Section (RCS)	30
BAB III PERANCANGAN DAN SIMULASI		35
3.1	Diagram Alir Perancangan	35
3.2	Perancangan Metamaterial Absorber	36
3.3	Desain dan Simulasi Unit Sel.....	37
3.3.1	Unit Sel 1	37
3.3.2	Unit Sel 2	44
3.3.3	Unit Sel 3	48
3.3.4	Unit Sel 4	53
3.3.5	Unit Sel 5	54
3.3.6	Unit Sel 6	56
3.3.7	Unit Sel 7	60
3.3.8	Unit Sel 8	62
3.3.9	Unit Sel 9	67
3.3.10	Unit Sel 10	75
3.4	Radar Cross Section (RCS)	79

3.4.1	Hasil Simulasi RCS.....	79
3.4.2	Perhitungan RCS secara teori.....	80
3.4.3	Perbandingan RCS simulasi dan teori.....	80
3.5	Penggabungan Unit Sel dan Fabrikasi.....	81
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA DATA.....		83
4.1	Metode Pengukuran.....	83
4.2	Pengujian Metamaterial Absorber.....	86
4.2.1	Pengujian Metamaterial Absorber dengan 1 antena horn	88
4.2.2	Pengujian Metamaterial Absorber (MMA) dengan 2 antena horn..	90
4.2.2.1	Pengujian MMA dengan 2 antena horn berjarak 24.5 cm.....	91
4.2.2.2	Pengujian MMA dengan 2 antena horn berjarak 80 cm.....	93
4.2.2.3	Hasil Pengujian MMA pada sudut 30°	95
4.2.2.4	Hasil Pengujian MMA pada sudut 68°	96
4.2.2.5	Hasil Pengujian MMA pada sudut 83°	98
4.2.2.6	Pengujian S11 rata-rata terhadap sudut	99
4.2.2.7	Pengujian S21 rata-rata terhadap sudut	100
4.3	Analisa Hasil Pengukuran dan Simulasi.....	101
4.4	Pengujian dengan software LTSpice XVII.....	102
4.5	Radar Cross Section (RCS)	104
4.5.1	Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap frekuensi.....	105
4.5.2	Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap sudut	106
4.5.3	Perbandingan RCS hasil pengujian dan teori.....	107
BAB V PENUTUP.....		109
5.1	Kesimpulan.....	109
5.2	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA		111
LAMPIRAN.....		113
DAFTAR RIWAYAT HIDUP		117

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip dari $\frac{1}{4} \lambda$ absorber	10
Gambar 2.2 Pyramidal absorber	11
Gambar 2.3 Klasifikasi material berdasar dari μ dan ϵ	13
Gambar 2.4 Alat ukur <i>Vector Network Analyzer</i>	15
Gambar 2.5 Hubungan S-parameter	16
Gambar 2.6 Two port network secara umum	17
Gambar 2.7. Two port network menunjukkan gelombang insiden (a_1, a_2)	19
Gambar 2.8 Prinsip dari <i>insertion loss</i>	23
Gambar 2.9 Aturan dari pengukuran <i>insertion loss</i>	23
Gambar 2.10 Lubang resonansi dalam bentuk <i>rectangular</i>	26
Gambar 2.11 Model medan dekat dengan coupling antena loop	27
Gambar 2.12 Load absorber	27
Gambar 2.13. Bentuk <i>Rectangular Ring Resonator</i>	29
Gambar 2.14. Bentuk <i>Circular Ring Resonator</i>	30
Gambar 2.15. Perhitungan maksimum RCS sesuai bentuknya	32
Gambar 3.1 Diagram alir perancangan Metamaterial Absorber	35
Gambar 3.2 Unit sel 1 Tampak depan	37
Gambar 3.3 Hasil S11-parameter Unit sel 1	39
Gambar 3.4 Hasil S21-parameter Unit sel 1	39
Gambar 3.5 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 1	40
Gambar 3.6 Hasil S11-parameter Unit sel 1 dengan variasi tebal substrat	40
Gambar 3.7 Hasil S11-parameter variasi lebar <i>copper</i> bentuk <i>rectangular</i>	41
Gambar 3.8 Hasil S11-parameter dengan variasi lebar <i>copper</i> bentuk <i>circular</i> ..	42
Gambar 3.9 Hasil S11-parameter dengan variasi lebar gap	42
Gambar 3.10 Desain Unit sel 1 modifikasi Tampak depan	43
Gambar 3.11 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 1	43
Gambar 3.12 Grafik <i>absorption rate</i> modifikasi Unit sel 1	44
Gambar 3.13 Unit sel 2 Tampak depan	44

Gambar 3.14 Hasil S11-parameter Unit sel 2	45
Gambar 3.15 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 2	45
Gambar 3.16 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi tebal substrat	46
Gambar 3.17 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi lebar <i>copper</i>	47
Gambar 3.18 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi lebar gap	47
Gambar 3.19 Unit sel 3 Tampak depan.....	48
Gambar 3.20 Hasil S11-parameter Unit sel 3	49
Gambar 3.21 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 3	49
Gambar 3.22 Modifikasi Unit sel 3 Tampak depan	50
Gambar 3.23 Hasil S11-parameter Modifikasi Unit sel 3.....	50
Gambar 3.24 Grafik <i>absorption rate</i> modifikasi Unit sel 3	51
Gambar 3.25 Modifikasi Unit sel 3 Tampak depan	51
Gambar 3.26 Hasil S11-parameter Modifikasi Unit sel 3.....	52
Gambar 3.27 Grafik <i>absorption rate</i> modifikasi Unit sel 3	52
Gambar 3.28 Unit sel 4 Tampak depan.....	53
Gambar 3.29 Hasil S11-parameter Unit sel 4	53
Gambar 3.30 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 4	54
Gambar 3.31 Unit sel 5 Tampak depan.....	55
Gambar 3.32 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 5	55
Gambar 3.33 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 5	56
Gambar 3.34 Unit sel 6 Tampak depan.....	56
Gambar 3.35 Hasil S11-parameter Unit sel 6	57
Gambar 3.36 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 6	58
Gambar 3.37 Modifikasi Unit sel 6 Tampak depan	58
Gambar 3.38 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 6	59
Gambar 3.39 Grafik <i>absorption rate</i> modifikasi Unit sel 6	59
Gambar 3.40 Unit sel 7 Tampak depan.....	60
Gambar 3.41 Hasil S11-parameter Unit sel 7	61
Gambar 3.42 Grafik <i>absorption rate</i> Unit sel 7	61
Gambar 3.43 Unit sel 8 Tampak depan.....	62
Gambar 3.44 Hasil S11-parameter Unit sel 8	63
Gambar 3.45 Unit sel 8 modifikasi Tampak depan.....	63

Gambar 3.46 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 8	64
Gambar 3.47 Grafik <i>absorption rate</i> modifikasi unit sel 8.....	65
Gambar 3.48 Hasil S11-parameter variasi lebar gap bentuk <i>rectangular</i>	66
Gambar 3.49 Hasil S11-parameter variasi lebar gap bentuk belah ketupat	66
Gambar 3.50 Unit sel 9 Tampak depan.....	67
Gambar 3.51 Hasil S11-parameter Unit sel 9	68
Gambar 3.52 Hasil S11-parameter unit sel 9 variasi lebar gap belah ketupat	68
Gambar 3.53 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi lebar gap <i>rectangular</i>	69
Gambar 3.54 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi lebar <i>copper</i> belah ketupat	69
Gambar 3.55 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi panjang strip <i>copper</i>	70
Gambar 3.56 Unit sel 9 Tampak depan.....	71
Gambar 3.57 Hasil S11-parameter unit sel 9	71
Gambar 3.58 Grafik <i>absorption rate</i> unit sel 9.....	72
Gambar 3.59 Hasil S11-parameter unit sel 9 variasi lebar gap <i>rectangular</i>	73
Gambar 3.60 Hasil S11 unit sel 9 variasi panjang strip <i>copper rectangular</i>	74
Gambar 3.61 Hasil S11 unit sel 9 variasi lebar <i>copper</i> belah ketupat	74
Gambar 3.62 Hasil S11 unit sel 9 variasi lebar <i>gap</i> bentuk belah ketupat.....	75
Gambar 3.63 Unit sel 10 Tampak depan.....	76
Gambar 3.64 Hasil S11-parameter unit sel 10	76
Gambar 3.65 Grafik <i>absorption rate</i> unit sel 10.....	77
Gambar 3.66 Desain Unit sel 10 hasil modifikasi Tampak depan.....	77
Gambar 3.67 Hasil S11-parameter unit sel 10 hasil modifikasi.....	78
Gambar 3.68 Grafik <i>absorption rate</i> unit sel 10 hasil modifikasi	78
Gambar 3.69 Grafik RCS unit sel 10 hasil modifikasi	79
Gambar 3.70 Sampel Gabungan Unit sel 10 hasil modifikasi Tampak Depan....	81
Gambar 3.71 Hasil Fabrikasi gabungan unit sel 10 hasil modifikasi.....	82
Gambar 4.1 Diagram alir pengukuran Metamaterial Absorber	83
Gambar 4.2 Skenario Pengukuran	84
Gambar 4.3 Hasil Pengukuran Karakteristik Antena Horn.....	85
Gambar 4.4 Skenario pengukuran antenna horn tertutup oleh ground full copper	86
Gambar 4.5 Hasil Pengukuran S21-parameter.....	87

Gambar 4.6	Posisi pengukuran Metamaterial Absorber	87
Gambar 4.7	Metamaterial Absorber Hasil Fabrikasi	88
Gambar 4.8	Hasil Pengukuran S11-parameter.....	89
Gambar 4.9	Hasil Pengukuran S21-parameter.....	89
Gambar 4.10	Grafik <i>absorption rate</i> hasil pengukuran	90
Gambar 4.11	Skenario posisi pengukuran dengan dua antena horn	91
Gambar 4.12	Hasil Pengukuran S11-parameter dengan dua antena horn.....	91
Gambar 4.13	Hasil Pengukuran S21-parameter dengan dua antena horn.....	92
Gambar 4.14	Grafik <i>absorption rate</i> hasil pengukuran dengan dua antena horn	92
Gambar 4.15	Skenario posisi pengukuran dengan dua antena horn	93
Gambar 4.16	Hasil Pengukuran S11-parameter dengan dua antena horn.....	93
Gambar 4.17	Hasil Pengukuran S21-parameter dengan dua antena horn.....	94
Gambar 4.18	Grafik <i>absorption rate</i> hasil pengukuran dengan dua antena horn	95
Gambar 4.19	Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 30°.....	95
Gambar 4.20	Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 30°.....	96
Gambar 4.21	Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 68°.....	97
Gambar 4.22	Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 68°.....	97
Gambar 4.23	Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 83°.....	98
Gambar 4.24	Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 83°.....	99
Gambar 4.25	Grafik Hasil Pengujian S11 rata-rata terhadap sudut.....	99
Gambar 4.26	Grafik Hasil Pengujian S21 rata-rata terhadap sudut.....	100
Gambar 4.27	Rangkaian ekuivalen unit sel 10 hasil modifikasi dengan LTSpice	103
Gambar 4.28	Hasil pengujian S11 unit sel 10 hasil modifikasi pada LTSpice..	103
Gambar 4.29	Hasil pengujian <i>absorption rate</i> unit sel 10 hasil modifikasi	104
Gambar 4.30	Grafik Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap frekuensi.....	105
Gambar 4.31	Grafik Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap sudut.....	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Deskripsi Penelitian sebelumnya	22
Tabel 3.1 Parameter Perancangan Metamaterial Absorber	36
Tabel 3.2 Spesifikasi PCB	37
Tabel 3.3 Perbandingan RCS simulasi dengan Teori	81
Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Hasil Simulasi	101
Tabel 4.2 Perbandingan RCS Pengujian dengan Teori	107

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Adanya suatu permasalahan pada kendaraan militer seperti yang dialami oleh kapal maritim, dimana kapal tersebut terdeteksi oleh mesin radar dari suatu pesawat tempur. Hal ini disebabkan oleh adanya suatu refleksi gelombang elektromagnetik, yang mana refleksi tersebut mengenai konduktor kapal ketika melakukan *tracking* radar oleh pesawat. Sehingga, kapal maritim dapat diserang dengan mudah oleh pesawat tersebut karena adanya refleksi yang terdeteksi oleh mesin radar pesawat [1]. Untuk mengatasi masalah tersebut, dapat dilakukan dengan cara mengelabui mesin radar pesawat agar tidak dapat menemukan posisi kapal, sehingga pesawat tidak dapat melakukan serangan ke kapal yaitu menggunakan *Radar Absorbing Material* (RAM) berupa metamaterial absorber. Untuk implementasi metamaterial absorber pada kapal dapat dilakukan dengan cara melapisi bagian dari *body* kapal tersebut dengan metamaterial absorber [2].

Metamaterial absorber tersebut merupakan suatu konstruksi buatan oleh atom yang tersusun dari lapisan *multilayer*, dimana lapisan atas merupakan resonator metalik terpisah dari metalik bawah *ground plane* oleh *dielektrik interlayer*. Metamaterial absorber adalah suatu tipe metamaterial yang dapat digunakan untuk menyerap radiasi gelombang elektromagnetik secara efisien [3].

Alasan penggunaan metamaterial absorber ini karena memiliki kelebihan diantaranya memiliki ketebalan yang tipis, mempunyai tingkat penyerapan (absorpsi) yang tinggi, ukuran bentuk yang kecil dan bersifat *low cost* karena fabrikasi yang efisien. Banyak peneliti yang mempelajari prinsip operasi dari absorber dan meningkatkan hasil implementasi pada *microwave*, optik, dan bagian *spectral infrared* [4].

Metamaterial absorber mempunyai *bandwidth* dengan jenis *broadband* karena karakteristik dari elektrik dan resonansi magnetiknya, sehingga metamaterial absorber dapat digunakan pada pita lebar. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan diusulkan suatu perancangan dan pembuatan metamaterial

absorber pita lebar untuk aplikasi *Radar Cross Section Reduction* (RCSR). Metamaterial absorber dalam aplikasi RCSR ini bertujuan untuk meminimalisir besarnya *radar cross section* (RCS) pada *body* kapal, sehingga dapat meminimalisir besarnya daya refleksi dan daya transmisi ketika melakukan *tracking* radar pesawat pada kapal tersebut [5]. Oleh karena itu, metamaterial absorber pada *body* kapal dapat digunakan sebagai peredam besarnya daya refleksi maupun daya transmisi saat melakukan *scanning* radar pesawat dalam *body* kapal tersebut, sehingga bagian *body* kapal yang dilapisi oleh metamaterial absorber supaya dapat terlindungi dari serangan pesawat tempur. Hal ini dikarenakan radar dari pesawat tidak dapat mendeteksi lokasi suatu kapal.

Pada penelitian ini, metamaterial absorber menggunakan pita lebar karena frekuensi yang digunakan antara 8.5 GHz hingga 10.5 GHz. Hal ini berdasarkan *range* frekuensi band radar yang digunakan dalam pengawasan dan navigasi kapal maupun pesawat terbang [6]. Tujuannya yaitu untuk meminimalkan deteksi lokasi kapal dari radar pesawat. Oleh karena itu, metamaterial absorber dapat diimplementasikan pada *body* kapal, dimana digunakan sebagai peredam kapal agar tidak terdeteksi keberadaannya ketika pesawat melakukan *tracking* radar, sehingga kapal tempur dapat terlindungi dari adanya serangan oleh suatu pesawat tempur.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil simulasi metamaterial absorber pita lebar untuk aplikasi *radar cross section reduction* dengan *software* CST Studio 2012.
2. Bagaimana analisis nilai S_{11} parameter dari hasil perancangan simulasi dan pengukuran metamaterial absorber.
3. Bagaimana hasil pengukuran metamaterial absorber hasil fabrikasi yang dilakukan pada ruang *anechoic chamber*.
4. Bagaimana analisis perbandingan dari *absorption rate* antara simulasi metamaterial absorber dan pengukuran metamaterial absorber fabrikasi.
5. Bagaimana perbandingan hasil pengukuran rangkaian ekuivalen dari metamaterial absorber menggunakan *software* LTSpice dengan hasil simulasi dan pengujian metamaterial absorber hasil fabrikasi.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi perancangan dilakukan dengan menggunakan *software* CST Microwave Studio 2012.
2. Parameter yang digunakan dalam simulasi ini adalah nilai dari S-parameter (S11 dan S21) dan *absorption rate* serta *absorption bandwidth* dalam rancangan unit sel.
3. Nilai *scattering parameter* (S11 dan S21) berpengaruh pada nilai *absorption rate*.
4. Parameter *absorption bandwidth* dihitung dari S11 yang bernilai ≤ -3.5 dB dan S21 yang bernilai -200 dB (tidak ada daya transmisi yang tembus) karena nilai *absorption rate* ≥ 80 %.
5. Range frekuensi yang digunakan antara frekuensi X-Band (8.5 - 10.5 GHz)
6. Bahan yang digunakan dalam fabrikasi yaitu substrat FR-4, tebal substrat sebesar 1.6 mm dan tebal *copper* sebesar 0.035 mm.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Untuk mendapatkan perancangan dan pembuatan metamaterial absorber dengan *bandwidth* lebar untuk aplikasi *radar cross section reduction*.
2. Untuk mengetahui dan menganalisis nilai S11-parameter dari hasil perancangan simulasi dan pengukuran metamaterial absorber.
3. Untuk menguji metamaterial absorber hasil fabrikasi pada suatu ruang *anechoic chamber* agar mengetahui hasil yang *real* dari metamaterial absorber.
4. Untuk menganalisa perbandingan dari hasil *absorption rate* antara simulasi metamaterial absorber dan pengukuran metamaterial absorber hasil fabrikasi.
5. Sebagai pelapis *body* kapal untuk mengurangi RCS agar tidak dapat terdeteksi keberadaanya dari radar pesawat tempur.

1.5 Relevansi

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa perancangan dan pembuatan sebuah metamaterial absorber sebagai pelapis dan peredam kapal dengan mengurangi besarnya daya refleksi dan daya transmisi serta mengurangi besarnya nilai RCS pada kapal agar tidak terdeteksi keberadaannya dari radar suatu pesawat.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian mengenai metamaterial absorber ini melalui tahap-tahap sebagai berikut.

1.6.1 Studi Literatur

Mencari dan mempelajari teori-teori dari referensi dan literatur yang berkaitan dengan metamaterial absorber. Referensi dapat diperoleh dari internet, paper, dan buku. Pada langkah ini perlu dipahami bagaimana perancangan dan realisasi serta sifat-sifat dari metamaterial absorber.

1.6.2 Perancangan Metamaterial Absorber

Perancangan metamaterial absorber dilakukan berdasarkan referensi yang didapat dari studi literatur. Dalam perancangan akan diperoleh ukuran dan bentuk metamaterial absorber pada frekuensi kerja yang telah ditentukan.

1.6.3 Simulasi Metamaterial Absorber Unit Cell

Simulasi dilakukan menggunakan software CST Microwave Studio 2012. Metamaterial absorber akan dibuat dalam software CST Microwave Studio dengan bahan dan dimensi menyesuaikan dengan standar fabrikasi elektronika. Dalam simulasi diambil beberapa parameter metamaterial absorber diantaranya adalah nilai dari S-parameter (S_{11} dan S_{21}) dan *absorption rate*.

1.6.4 Fabrikasi Metamaterial Absorber

Pada tahap ini akan dibuat metamaterial absorber menggunakan bahan FR4 sebagai bahan utama dan *copper* (tembaga) sebagai pelapis FR4 dengan dimensi sesuai hasil perancangan simulasi.

1.6.5 Pengukuran Metamaterial Absorber

Pada tahap ini akan dilakukan pengukuran parameter-parameter antena yang telah dibuat. Parameter-parameter yang diukur meliputi nilai dari S-parameter (S_{11} dan S_{21}) dan *absorption rate*.

1.6.6 Analisa dan Evaluasi

Tahap terakhir yang dilakukan adalah menganalisa hasil pengukuran parameter metamaterial absorber. Analisa dilakukan terhadap parameter-parameter hasil pengukuran dan membandingkannya dengan hasil simulasi.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam Tesis ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini mengandung hal-hal berikut diantaranya latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, relevansi, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tinjauan pustaka yang akan menunjang perancangan dan pembuatan pada bab selanjutnya. Tinjauan pustaka yang digunakan meliputi : metamaterial absorber, penelitian sebelumnya, aplikasi absorber, metode pengukuran absorber dan parameter absorber, *two port network*, S-parameter dan *radar cross section*.

BAB 3 : PERANCANGAN DAN SIMULASI

Bab ini membahas mengenai perancangan simulasi metamaterial absorber dengan software CST Microwave Studio 2012 dan pemilihan unit sel metamaterial absorber.

BAB 4 : PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai pengukuran hasil fabrikasi metamaterial absorber dan pengujian rangkaian ekuivalen dengan *software* LTSpice serta dilakukan analisa data hasil simulasi dan pengukuran secara keseluruhan.

BAB 5 : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil simulasi dan pembuatan metamaterial absorber, serta saran untuk pengembangan lebih lanjut.

<Halaman ini sengaja dikosongkan>

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 ELEKTROMAGNETIK ABSORBER

2.1.1 Pengertian Absorber

Absorber secara umum terdiri dari suatu pengisi material yang didalamnya terdapat kandungan material. Pengisi material terdiri dari satu atau lebih unsur pokok yang melakukan banyak serapan. Kandungan material dipilih dari sifat fisiknya seperti ketahanan suhu, cuaca dan sebagainya [7].

Absorber dikarakterisasi dari permitivitas elektrik dan permeabilitas magnetik. Permitivitas merupakan suatu ukuran dari efek material pada medan elektrik dalam gelombang elektromagnetik dan permeabilitas merupakan suatu ukuran dari efek material pada komponen magnetik dari gelombang. Permitivitas secara umum ditulis dengan persamaan 2.1 berikut.

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

Permitivitas timbul dari polarisasi dielektrik dalam material. Kuantitas ε' terkadang disebut sebagai konstanta dielektrik, yang mana merupakan sesuatu dari ketidakcocokan ketika digunakan untuk absorber sebagai ε' yang dapat berubah secara signifikan dengan frekuensi. Kuantitas ε'' merupakan suatu ukuran dari attenuasi pada medan listrik yang disebabkan oleh material. *Tangen loss* elektrik dari material didefinisikan sebagai :

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.2)$$

Hubungan antara *tangen loss* dengan atenuasi yaitu semakin besar *tangen loss* dari material, maka lebih besar pula attenuasi sebagai gelombang berjalan yang melalui material. Untuk permitivitas elektrik dapat dianalogikan dengan permeabilitas magnetik, yang mana ditulis pada persamaan 2.3.

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (2.3)$$

Untuk *tangen loss* magnetik didefinisikan dengan persamaan 2.4 berikut.

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2.4)$$

Permeabilitas merupakan suatu ukuran dari efek material pada medan magnetik. Keduanya merupakan komponen yang berkontribusi untuk kompresi panjang gelombang dalam suatu material. Untuk penambahannya, menyesuaikan dari penggabungan gelombang elektromagnetik, serta loss pada magnetik atau medan listrik yang akan berattenuasi energinya dalam gelombang.

Pada beberapa absorber, permitivitas dan permeabilitas merupakan fungsi dari frekuensi dan dapat berubah secara signifikan diatas rata-rata dari suatu range frekuensi yang kecil. Jika permitivitas kompleks dan permeabilitas diketahui diatas range frekuensi, maka efek material pada gelombang merupakan hasil yang lengkap.

Satuan dari permitivitas ialah farad/meter, sedangkan satuan permeabilitas ialah henry/meter. Nilai yang sebenarnya dari beberapa material berakibat tidak praktis dalam perhitungan. Untuk alasan ini, biasanya dilakukan perbandingan antara permitivitas dan permeabilitas dari suatu ruang hampa udara. Nilai permitivitas dan permeabilitas sebagai berikut.

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ farad / meter} \text{ dan } \mu_p = 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry / meter}$$

Nilai ϵ^* dan μ^* kemudian menjadi berdimensi. Sejak ϵ bergantung pada polarisasi dielektrik, dimana selalu berlawanan dengan medan elektrik, nilai ϵ untuk semua material lebih besar jika dibandingkan pada ruang bebas (*free space*) dan karenanya nilai selalu lebih besar dari 1 [7].

2.1.2 Parameter Elektromagnetik Anisotropis

Banyak pengisi absorber material berbentuk bola dalam bentuk pertama untuk parameter elektromagnetik *isotropis* seperti propagasi dan attenuasi dalam material, yang mana independen dari arah. Ketika bentuknya bukan bola, pengisi parameter boleh dengan *anistropis*, dimana kejadian nilai single permitivitas dan permeabilitas harus diganti dengan 3x3 tensor.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Secara umum, sistem koordinat dapat dirotasikan ketika membuat semuanya, tetapi komponen diagonal sama dengan nol.

2.1.3 Tipe Absorber

a. Ruang bebas (*Free Space*)

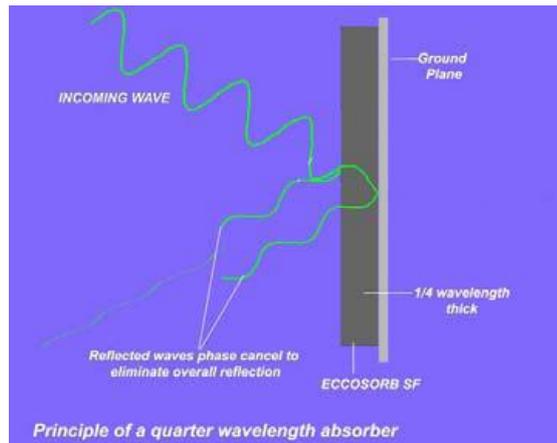
Absorber ruang bebas terdiri dalam dua tipe yang luas yaitu absorber reflektif dan absorber insertion loss. Dimana, absorber reflektif dapat mengurangi tingkat refleksi jika dibandingkan dengan suatu reflektor yang sempurna (*metal plate*). Untuk absorber *insertion loss* dapat mengurangi sinyal yang berjalan dari titik A menuju titik B.

b. Reflectivity – narrowband

Banyak lapisan dari single material sama akan beresonansi ketika ketebalannya sama dengan $\frac{1}{4} \lambda$. Penggunaan visualisasinya yaitu suatu gelombang datang akan secara parsial dipantulkan oleh permukaan depan dari material yaitu bagian yang ditransmisikan. Selanjutnya, gelombang transmisi ini melakukan propagasi melalui bagian belakang dari absorber, dimana mengalami total refleksi dan dipropagasikan kembali melalui permukaan depan dari absorber. Jika gelombang dipantulkan pada permukaan depan, maka sama dengan magnitudenya dan 180° keluar dari fase dengan gelombang dipantulkan pada permukaan belakang, lalu gelombang akan batal dan tidak mengalami refleksi total. Fenomena ini akan terjadi ketika berpindah jarak pada gelombang melalui material yaitu 180° . Sejak gelombang berpindah material dua kali, maka akan terjadi ketika material mempunyai ketebalan $\frac{1}{4} \lambda$. Dimana, hal tersebut merupakan suatu penggunaan visualisasi yang tidak seluruhnya akurat serta tidak memisahkan refleksi off pada permukaan depan dan belakang. Seperti pada *Microwave Engineering World*, desain absorber mempunyai permasalahan pada matching impedansinya. Pada kasus ini matching impedansi dari permukaan metal ($Z=0$) ke impedansi dari ruang bebas (*free space*) yaitu ($Z=377 \Omega$). Jika impedansi terlihat oleh gelombang pada permukaan dari material sama dengan 377Ω , maka gelombang akan diabsorbsi secara sempurna oleh material [7].

Satu dari tipe absorber yang paling awal ialah narrowband yang tak terpisahkan, dimana diketahui sebagai *Salisbury screen*. Impedansi pada

permukaan metal sama dengan nol. Pada kuartar 1 panjang gelombang dalam permukaan depan, suatu impedansi akan menjadi tak terbatas dan admitansi akan bernilai nol. Jika suatu sheet resistif dengan permukaan *resistivity* yang sama dengan 377Ω , maka impedansi akan bernilai sama dengan 377Ω . Hal tersebut hanya bekerja dalam material substrat yaitu $\frac{1}{4} \lambda$. *Salisbury screen* merupakan narrowband yang tak terpisahkan (*inherently narrowband*).



Gambar 2.1 Prinsip dari $\frac{1}{4} \lambda$ absorber [7]

c. *Reflectivity – Broadband*

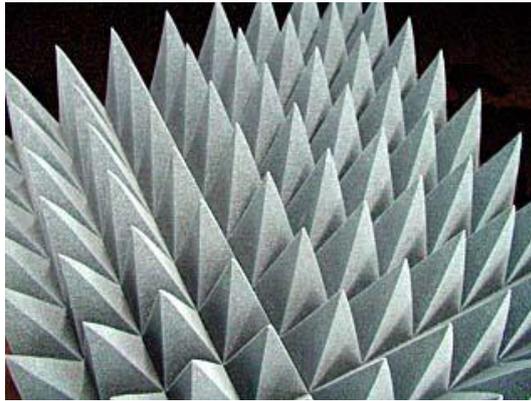
- *Multilayer*

Beberapa tipe absorber menunjukkan hasil *reflectivity – broadband*. Banyak layer diskrit dapat menjadi stack, dimana akan diperbolehkan pada 377Ω ketika kondisi impedansi input diatas sebuah range yang lebih luas dari frekuensi. Desain dari kelas ini pada material sama dengan desain dari seperempat gelombang trafo.

- Gradien impedansi

Kelas kedua dari *absorber broadband* menggunakan sebuah gradien impedansi. Impedansi pada permukaan depan sangat tertutup pada 377Ω , tetapi secara berangsur terjadi pengurangan ke 0Ω pada permukaan belakang. Ketika layer transisi tidak curam, maka tidak ada titik yang akan menyebabkan suatu refleksi yang besar. Gradien impedansi ini dapat diambil pada masing-masing dari dua bentuk. Pertama yaitu gradient fisik dimana material sama, tetapi dibuat dalam bentuk seperti gelombang yang terlihat seperti bagian kecil dari material pada permukaan depan dan secara berangsur menambah bagian, dimana memindahkannya ke dalam material. Umumnya, bentuk dari tipe ini pada material

yaitu piramida. Hasil absorber yang paling tinggi dengan reflektivitas yang terkenal (lebih baik dari -50 dB) dan biasanya digunakan pada *anechoic chamber*. Tipe kedua dari gradien impedansi absorber menggunakan suatu parameter gradien. Pada absorber ini, materialnya merupakan *flat sheet*, tetapi parameter elektrik dalam *sheet* akan berubah secara kontinue dengan kedalaman pada absorber. Pada kelas ini dari absorber dapat mempunyai hasil reflektivitas lebih baik dari -20 dB diatas *wide band*.



Gambar 2.2 Pyramidal absorber [7]

- 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. Umumnya, resistivitas dari *sheet* dapat mengurangi dari bagian depan ke bagian belakang pada absorber Jaumann. Ketika *low loss spacer* material yang biasanya suatu *cell foam* yang tertutup, maka suatu Jaumann menampilkan resistansi air yang melekat dan intensitas cahaya [7].

2.2 Metamaterial

Istilah metamaterial berasal dari kombinasi dari dua kata yaitu “meta” dan “material”. Kata “meta” berasal dari kata Greek, dimana diartikan sebagai sesuatu yang sulit, jarang atau sesuatu yang terdepan seperti dipresentasikan dalam Sihovola (2007). Metamaterial dapat mempunyai sifat elektromagnetik yang diubah untuk sesuatu yang sulit dan tidak ditemukan di alam [13].

Metamaterial dapat dikarakterisasi menggunakan persamaan Maxwell (DaviBibiano 2010). Transformasi dari persamaan Maxwell mempunyai aturan

yang jelas dalam mendeskripsikan metamaterial. Untuk persamaan Maxwell dalam domain waktu seperti ditunjukkan pada persamaan (2.6) [13] berikut.

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H}; \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} + j\omega\epsilon\vec{E}; \nabla \cdot \vec{B} = 0\end{aligned}\quad (2.6)$$

Untuk bidang gelombang, persamaan dapat direduksi seperti pada persamaan (2.7).

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H}; \vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E}\quad (2.7)$$

Oleh karena itu, untuk nilai positif ϵ dan μ , E, H dan k dari suatu *right hand orthogonal system*. Ketika ϵ dan μ bernilai negatif, maka dapat dirubah menjadi persamaan (2.8) berikut ini.

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega\mu\vec{H}; k \times \vec{H} = \omega\epsilon\vec{E}\quad (2.8)$$

Kasus diatas menunjukkan *left hand material* dan arahnya berlawanan, serta *left hand triplet* dari E, H dan k.

Material dapat diklasifikasikan dari dasar ϵ dan μ pada empat kuadran sebagai berikut [13].

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*).

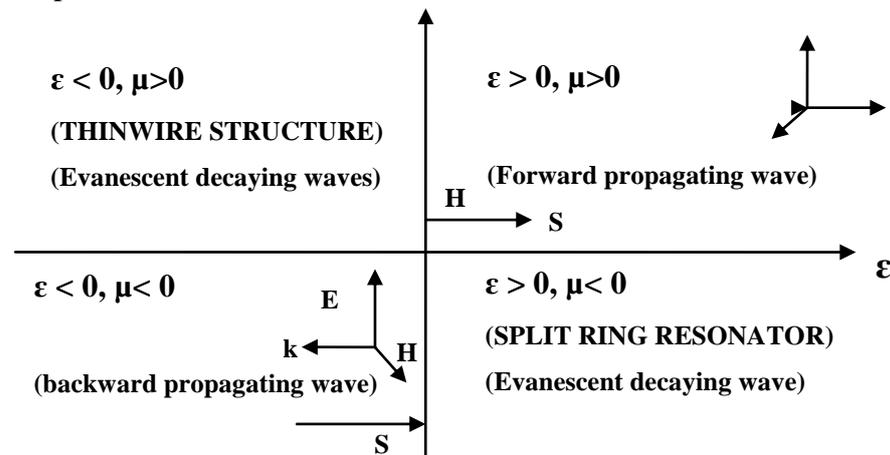
3. Kuadran ketiga

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. Seharusnya, nilai indeks bias ϵ negatif dan μ negatif dari medium dapat dihitung menjadi negatif. Sehingga, juga diistilahkan sebagai NIM (*negative index material*). Untuk

Electric vector E, *Electromagnetic vector H* dan *wave vector k* merupakan *left hand triplet* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. ketika menggunakan sifat dari kuadran ketiga, maka tes pertama *left handed*.

4. Kuadran keempat

Kondisi ($\epsilon > 0, \mu < 0$) juga mendukung *evanescent* dan menyesuaikan dengan MNG (miu negative material) μ . Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 2.3 [13].



Gambar 2.3 Klasifikasi material berdasar dari μ dan ϵ

2.3 Metamaterial Absorber

Metamaterial merupakan material struktural buatan yang terdiri dari metal dan dielektrik yang diatur sedemikian periodik. Dimana, diperlihatkan properties yang disesuaikan seperti permitivitas dan permeabilitas. Metamaterial telah ditemukan banyak aplikasinya seperti *invisibility cloak*, *sub-wavelength imaging*, *perfect lens*, dan *perfect absorber* [8].

Kebanyakan metamaterial perfect absorber unit sel juga dipanggil sebagai tiga struktur layer, yang mana terdiri dari dua layer metal, satu layer *ground plane* dan bermacam-macam bentuk dari *Elektrik Ring Resonator* (ERR) yang terpisah dari dielektrik layer. ERR pada bagian atas dielektrik layer berpasangan dengan kuat untuk medan listrik yang seragam dari gelombang datang, tetapi lemah pada medan magnet, yang mana penyediaan frekuensi tergantung pada respon elektrik $\epsilon(\omega)$. Medan magnet dari gelombang datang akan menembus ruang diantara ERR dan bagian belakang metal *ground plane*, utamanya frekuensi yang tergantung pada respon magnetik $\mu(\omega)$. Salah satu dapat menyesuaikan efektif dari $\epsilon(\omega)$ dan

$\mu(\omega)$ melalui penyesuaian dimensi dari ERR, bagian belakang 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. Secara simultan, divariasikan bagian imajiner dari permitivitas material untuk mencapai loss yang besar dan meminimalkan transmisi yang dekat dengan nol. Hasil absorpsi $A(\omega)$ dapat dihitung dengan persamaan 2.9 [8] :

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2.9)$$

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

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

Dimana :

$R(\omega)$ = koefisien refleksi

$T(\omega)$ = koefisien transmisi

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

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

Secara umum, ketika gelombang elektromagnetik terjadi boundary diantara metal dan layer dielektrik serta memenuhi kondisi propagasi *surface electromagnetic wave* (SEWs) dengan menggunakan persamaan $k_1=k_0$, dimana k_1 merupakan bagian real dari paralel vektor gelombang pada permukaan beberapa propagasi SEWs sepanjang permukaan. Dalam optik gelombang permukaan disebut sebagai gelombang permukaan Plasmon karena terjadi suatu interaksi antara elektron bebas pada layer metal dan gelombang elektromagnetik. Gelombang permukaan ini melakukan propagasi, tetapi teredam juga dan harus menentukan bagaimana melakukan propagasi dan bagaimana meredam. Istilah terakhir memainkan aturan yang paling penting ketika berhadapan dengan absorber.

Suatu cara bahwa propagasi SEWs dapat ditentukan dari karakteristik dispersi, parameter kunci kecepatan dari gelombang yang melakukan propagasi sepanjang permukaan $k_1=k_1+ik_2$ dan besar propagasi digambarkan sebagai

$L_p=1/2k_2$, yang mana ciri intensitas penetrasi dari SEWs atau meluruhkan Plasmon dengan $1/e$. Jika k_2 merupakan pilihan yang selektif, SEWs dalam form dari loss dan L_p ialah kesesuaian sempurna dari $k_1=k_0$, sehingga mengurangi refleksi dan transmisi serta mencapai unit absorpsi yang dekat [8].

Untuk analisa fitur dari absorpsi, salah satu hal yang paling penting dari konsep adalah operasi bandwidth yang dikarakteristik oleh *full wave at half maximum* (FWHM), dimana didefinisikan sebagai persamaan 2.10 [8] :

$$FWHM = \frac{\Delta f}{f_o} \times 100\% \quad (2.10)$$

Dimana :

f_o = frekuensi tengah dari gelombang datang dari spektrum absorpsi

$\Delta f = f_2 - f_1$ = selisih frekuensi ketika terjadi pengurangan absorpsi ke setengah nilai maksimum.

2.3.1 Parameter Metamaterial Absorber

Akurasi pengukuran pada parameter elektromagnetik secara kritis digunakan untuk memodelkan hasil dari absorber microwave. Permittivitas elektrik $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ dan permeabilitas magnetik $\mu^* = \mu' - j\mu''$ merupakan fungsi umum dari frekuensi, juga metode frekuensi berjalan dan sesuai yang diinginkan.

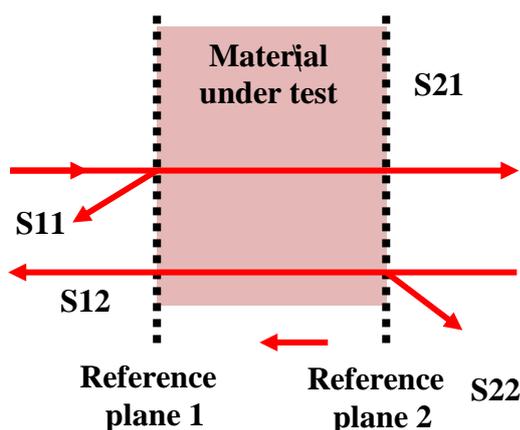


Gambar 2.4 Alat ukur *Vector Network Analyzer* [7]

Pada frekuensi rendah (< 1 GHz), parameter dapat diukur menggunakan sebuah impedansi *analyzer* dengan peralatan pengukuran yang lain. Peralatan pengukuran permitivitas mengukur kapasitansi dari dua paralel dengan bagian depan keduanya, dimana dengan kondisi material dan tanpa material dalam pengukuran. Permittivitas berasal dari kapasitansi. Sedangkan, Permeabilitas

ditentukan dari perubahan impedansi induktansi dari lubang silinder dari sisipan dari bentuk donut MUT. Hasil sangat baik dapat ditemukan dibawah 1 MHz.

Pada frekuensi tinggi mengukur kapasitansi atau induktansi tidak lebih panjang dari hasil yang memuaskan dan teori medan harus digunakan. Parameter pengukuran melakukan tes pada frekuensi untuk meminta pengiriman suatu gelombang ke dalam material dan pengukuran respon material. Ketika keempat hasil pengukuran diperlukan (real dan imajiner ϵ, μ), maka keempat pengukuran perlu untuk diambil sampel, dimana biasanya magnitude dan fase dari S11 (refleksi) dan S21 (transmisi) melalui sampel. Jika diketahui bahwa material tidak mempunyai komponen magnetik ($\mu=1$), maka permitivitas elektrik dapat ditentukan dengan dua pengukuran, S11 sebagai magnitude dan fase atau S21 sebagai magnitude dan fase seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 [7].



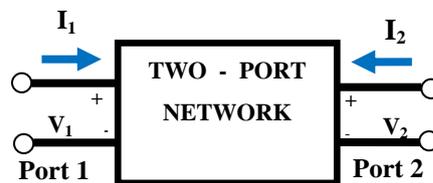
Gambar 2.5 Hubungan S-parameter

Sementara itu, pengukuran ruang bebas dari amplitudo refleksi/transmisi dan fase mempunyai hasil yang baik dan dapat dilihat pada sistem tertutup menggunakan kabel coaxial atau waveguide. Pada kasus ini kalibrasi dari network analyzer ialah kritis. Kedua port penuh kalibrasi atau kalibrasi TRL diperlukan untuk akurasi pengukuran fase, terutama pada refleksi. Sampel yang tepat dalam coax atau waveguide ini sangat penting sebagai suatu sampel yang kurang baik dan tidak akan menghasilkan sesuatu yang baik. Pada frekuensi diperluas kedalam gelombang milimeter, kalibrasi dan sampel yang pas hingga lengkap menjadi lebih dual kritis pada panjang gelombang yang pendek.

Untuk material non magnetik, teknik ruang bebas dapat menghasilkan nilai yang sangat baik pada semua cara melalui gelombang milimeter. Dimana, akan lebih banyak kejelasan pada pengukuran transmisi fase ditambah pengukuran yang baik dan dapat dibuat dalam ruang bebas, yang mana mengeliminasi masalah sampel yang tepat [7].

2.3.1.1 Two port network

Meskipun suatu network mempunyai banyak jumlah port, parameter network dapat dijelaskan paling mudah dengan mempertimbangkan suatu network dengan hanya dua port yaitu port input dan port output seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 [9].



Gambar 2.6 Two port network secara umum [9]

Untuk karakteristik performansi dari suatu network, banyak dari beberapa parameter yang dapat digunakan, dimana masing-masing menguntungkan. Tiap parameter set berhubungan pada set dari keempat variabel yang diasosiasikan dengan model 2 port. Kedua dari variabel tersebut direpresentasikan untuk membangkitkan network (variabel independen) dan menyisakan dua untuk merepresentasikan respon dari network dalam membangkitkannya (variabel dependen). Jika network pada Gambar 2.6 dibangkitkan oleh sumber tegangan V_1 dan V_2 . Arus network I_1 dan I_2 akan berhubungan dengan persamaan (2.11)-(2.12) dibawah ini (asumsi network dalam kondisi linier) [9] :

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \quad (2.11)$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \quad (2.12)$$

Pada kasus ini, port tegangan dipilih sebagai variabel independen dan arus port diambil sebagai variabel dependen, hubungan parameter dipanggil sebagai *short-circuit* admitansi parameter atau *y* parameter. Pada kekurangan dari penambahan informasi, keempat pengukuran diperlukan untuk menentukan keempat parameter y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} . Tiap pengukuran dibuat dengan 1 port dari

network yang dibangkitkan oleh sumber tegangan, dimana port yang lain merupakan *short circuit*. Untuk contoh y_{21} *forward* transadmitansi ialah perbandingan dari arus pada port 2 dengan tegangan pada port 1 dan port 2 *short circuit*, seperti ditunjukkan pada persamaan 2.13 [9]. :

$$y_{11} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0(\text{Output_short circuit})} \quad (2.13)$$

Jika variabel independen yang lain dan variabel dependen telah dipilih, network akan dideskripsikan, seperti sebelumnya dengan dua persamaan linier yang sama pada persamaan diatas, kecuali bahwa variabel dan parameter menggambarkan hubungannya akan berbeda. Bagaimanapun, semua parameter set berisi informasi yang sama tentang *network* dan selalu mungkin untuk menghitung banyak *set* dalam aturan dari banyak *set* yang lain.

2.3.1.2 S-parameter

Merupakan singkatan dari *scattering parameter* yaitu pengaturan parameter yang berhubungan pada gelombang berjalan, dimana tersebar atau refleksi ketika sebuah *n-port network* dimasukkan ke dalam jalur transmisi. Kemudahan dengan s-parameter (*scattering parameter*) dapat diukur, sehingga membuatnya sesuai dengan baik untuk menggambarkan transistor dan peralatan aktif yang lainnya. Pengukuran dari banyak parameter lain dipanggil sebagai input dan output dari peralatan berturut-turut termasuk open circuit dan short circuit. Ini dapat memberatkannya, terutama pada frekuensi RF dimana mempermudah induktansi dan kapasitansi membuat short dan open circuit sulit untuk diperoleh. Pada frekuensi paling tinggi, pengukuran itu secara khas memerlukan tuning stub, secara terpisah biasa pada tiap pengukuran frekuensi, untuk merefleksikan kondisi *short* atau *open circuit* untuk peralatan terminal. Tidak hanya merepotkan dan membosankan, tetapi tuning stub melangsir input atau output yang dapat menyebabkan sebuah transistor terombang-ambing, membuat pengukuran tidak valid [9].

Suatu S-parameter pada hal yang lain biasanya diukur dengan peralatan yang mengikat diantara 50Ω load dan source dan sangat kecil terjadi ombang-ambing. Keuntungan terpenting lain dari s-parameter yaitu membendung dari

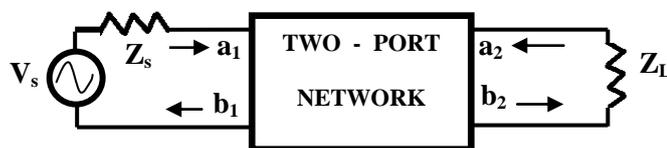
fakta gelombang berjalan, tidak seperti tegangan terminal dan arus, tidak mengubah magnitudo pada titik sepanjang jalur transmisi lossless. Ini mengartikan bahwa scattering parameter dapat diukur pada peralatan yang ditempatkan pada beberapa jarak dari pengukuran transduser, disediakan bahwa mengukur peralatan dan transduser dikoneksikan dengan jalur transmisi low-loss.

Secara umum *scattering parameter* telah didefinisikan oleh K. Kurokawa. Parameter tersebut menggambarkan hubungan timbal balik dari set baru dari variabel a_i, b_i . Variabel a_i dan b_i dinormalisasikan tegangan kompleks gelombang insiden dan direfleksikan dari i^{th} port dari network dan didefinisikan pada aturan dari tegangan terminal V_i , arus terminal I_i dan suatu perubahan referensi impedansi Z_i , dimana tanda bintang (*) dinotasikan kompleks *conjugate* seperti pada persamaan (2.14) – (2.15) [9] :

$$a_i = \frac{V_i + Z_i I_i}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_i|}} \quad (2.14)$$

$$b_i = \frac{V_i - Z_i^* I_i}{2\sqrt{|\operatorname{Re} Z_i|}} \quad (2.15)$$

Pada banyak pengukuran dan perhitungan sesuai untuk mengasumsikan impedansi referensi Z_i positif dan real. Sebagai pengingat, semua variabel dan parameter akan direferensikan menjadi single positif impedansi real Z_0 . Fungsi gelombang digunakan untuk mendefinisikan S-parameter pada two-port network seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 [9].



Gambar 2.7. Two port network menunjukkan gelombang insiden (a_1, a_2) dan gelombang refleksi (b_1, b_2) digunakan dalam S-parameter.

Variabel independen a_1 dan a_2 merupakan normalisasi tegangan insiden, seperti persamaan (2.16) - (2.17) [9] :

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_o I_1}{2\sqrt{Z_o}} = \frac{\text{gelombang tegangan insiden pada port 1}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.16)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_o I_2}{2\sqrt{Z_o}} = \frac{\text{gelombang tegangan insiden pada port 2}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{i2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.17)$$

Variabel dependen b_1 dan b_2 merupakan normalisasi tegangan refleksi, seperti persamaan (2.18) - (2.19) [9] :

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_o I_1}{2\sqrt{Z_o}} = \frac{\text{gelombang tegangan refleksi pada port 1}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.18)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_o I_2}{2\sqrt{Z_o}} = \frac{\text{gelombang tegangan refleksi pada port 2}}{\sqrt{Z_0}} = \frac{V_{r2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (2.19)$$

Persamaan linier menggambarkan *two-port network* seperti persamaan (2.20) - (2.21) [9] berikut.

$$b_1 = S11a_1 + S12a_2 \quad (2.20)$$

$$b_2 = S21a_1 + S22a_2 \quad (2.21)$$

Kemudian, S-parameter S11, S22, S21, dan S12 mempunyai persamaan (2.22) - (2.25) [9] seperti berikut ini :

$$S11 = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.22)$$

Pada persamaan (2.22) didefinisikan sebagai koefisien refleksi input dengan port output diakhiri oleh *match load* ($Z_L = Z_0$ dengan $a_2 = 0$).

$$S22 = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.23)$$

Pada persamaan (2.23) didefinisikan sebagai koefisien refleksi output dengan port input diakhiri oleh *match load* ($Z_S = Z_0$ dengan $V_S = 0$).

$$S21 = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (2.24)$$

Pada persamaan (2.24) didefinisikan sebagai transmisi forward (*insertion*) gain dengan port output diakhiri dalam *match load*.

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.25)$$

Pada persamaan (2.25) didefinisikan sebagai transmisi reverse (*insertion*) gain dengan port input diakhiri dalam *match load*. Perlu diingat bahwa :

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1}{I_1} - Z_0 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.26)$$

Dengan : $Z_1 = Z_0 \frac{(1 + S_{11})}{(1 - S_{11})}$, dimana : $Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$ merupakan impedansi input pada port 1.

2.4 Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian mengenai metamaterial absorber yang sudah pernah dilakukan diantaranya dilakukan perancangan dan simulasi metamaterial absorber yang diteliti pada [2] dengan jenis dual band menggunakan *loop resonator* dan dioperasikan pada frekuensi 7 GHz dan 10.7 GHz yang disimulasikan dengan Ansoft HFSS. Kemudian, melakukan simulasi pada metamaterial absorber yang diteliti oleh [3] dengan *multiple dielectric layer* pada jenis band *broadband* pada *mid-infrared* yang disimulasikan dengan CST dengan range panjang gelombang dari 4.2 μm hingga 9.8 μm dengan kondisi jumlah resonant stack dibuat berbeda yaitu 2 dan 3 resonant stack. Selanjutnya, dilakukan penelitian mengenai kelas baru dari *frequency-switchable metamaterial absorber* pada frekuensi X-band yang diteliti pada [4], dimana digunakan *metal liquid* yang berinjeksi dalam suatu *microfluidic channel* pada *polymethyl methacrylate* (PMMA) untuk mencapai switching frekuensi. Terdapat dua kondisi dalam simulasi maupun pengujian yaitu pada *microfluidic channel* yang kosong dan *microfluidic channel* yang terisi dengan metal liquid. Pada pengujian dari fabrikasi dibutuhkan *waveguide* dengan bentuk *rectangular*.

Kemudian, dilakukan simulasi ultrathin metamaterial absorber berdasarkan pada *Minkowski fractal frequency selective surface* dan *resistive film*, dimana ditunjukkan pada [14] dengan jenis multiband pada polarisasi dibuat berbeda dan absorber terdiri dari *Minkowski fractal loop* struktur elektrik resonator, dielektrik substrat dan *backing continuous resistive film*. Selanjutnya, dilakukan desain dan

realisasi yang diteliti pada [16] dengan jenis multiband pada metamaterial absorber dengan ketebalan FR4 1.1 mm pada kondisi polarisasi dibuat berbeda. Dilanjutkan dengan penelitian simulasi metamaterial absorber broadband dengan CST yang diteliti pada [15] berdasarkan mekanisme berkurangnya interferensi. Metamaterial dari multilayer struktur SRR digunakan untuk merealisasikan indeks bias yang diinginkan pada dispersi spektrum, dimana dapat mendorong anti refleksi secara berturut-turut pada range frekuensi lebar. Untuk mengetahui deskripsi dari nama, judul dan tahun publikasi dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Deskripsi Penelitian sebelumnya

No.	Nama	Judul	Tahun Publikasi
1.	L.Huang	Multi-Band And Polarization Insensitive Metamaterial Absorber [16]	2012
2.	Jingbo Sun	An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference [15]	2012
3.	FAN Yue-Nong	Absorbing Performance of Ultrathin Wide-Band Planar Metamaterial Absorber [14]	2012
4.	S.Ramya	Dual Band Microwave Metamaterial Absorber Using Loop Resonator For Electromagnetic Interference Suppression [2]	2015
5.	Nan Zhang	Broadband absorption in mid-infrared metamaterial absorbers with multiple dielectric layers [3]	2015
6.	Kenyu Ling	Frequency-Switchable Metamaterial Absorber Injecting Eutectic Gallium-Indium (EGaIn) Liquid Metal Alloy [4]	2015

2.5 Metode Pengukuran Metamaterial Absorber

Ada beberapa metode yang digunakan dalam pengukuran absorber [7] yaitu :

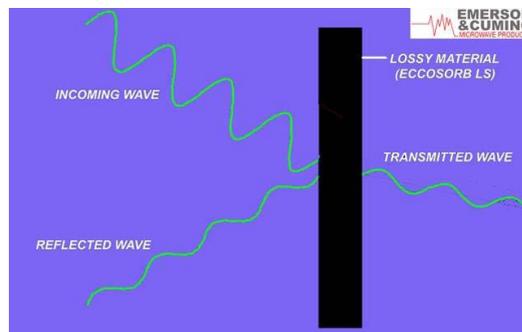
2.5.1 Insertion Loss

Insertion loss merupakan ukuran dari berapa banyak energi *microwave* berjalan dari titik A menuju titik B, dimana direduksi oleh insertion dari suatu

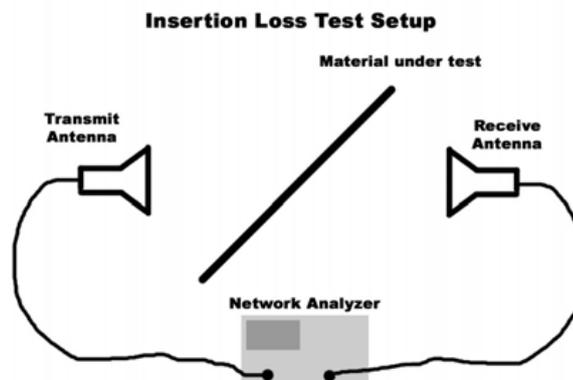
microwave material absorber pada suatu lintasan. Sebuah pengukuran dari *insertion loss* tidak berbeda diantara unsur, dimana akan berpengaruh dalam reduksi daya dan termasuk refleksi dari material serta loss sebagai transit gelombang melalui material.

Suatu aturan desain yang baik untuk mengukur *insertion loss* yaitu dapat mencakup dua antena 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. Ukuran sampel yang lebih besar harus diminimalkan errornya karena disebabkan oleh kebocoran energi sekitar pinggir dari sampel dalam pengukuran.

Dalam praktek pengukuran *insertion loss* merupakan nilai sebenarnya. Suatu sinyal yang ditransmisikan melalui satu antena dan respon diukur dari antena kedua. Penentuan dari referensi atau level 0 dB biasanya diukur sebagai fungsi dari frekuensi. Material dalam pengukuran selanjutnya ditempatkan diantara antena dan pengukurannya adalah hasil. *Insertion loss* dinyatakan dalam dB sebagai fungsi dari frekuensi [7].



Gambar 2.8 Prinsip dari *insertion loss*



Gambar 2.9 Aturan dari pengukuran *insertion loss*

2.5.2 Attenuasi

Attenuasi merupakan suatu ukuran dari seberapa banyak sebuah gelombang dapat melakukan propagasi melalui suatu material yang diattenuasikan dimana pengukuran tidak langsung, tetapi dihitung dari kompleks material permitivitas dan permeabilitas. Definisinya, jika semua ruang diisi dengan material, maka suatu gelombang akan berattenuasi pada kecepatan ini per satuan jarak. Attenuasi biasanya dinyatakan dalam dB/cm. Nilai attenuasi tidak berhubungan secara langsung untuk banyak pengukuran dan harus berhati-hati dengan penggunaan nilai untuk memprediksi reflektivitas, serta digunakan untuk membandingkan absorpsi relatif dari material yang berbeda. Pada situasi yang sebenarnya, impedansi material harus juga diambil dalam perhitungan. Attenuasi dalam dB/cm seperti pada persamaan 2.27 [7] :

$$\text{Attenuasi} \left(\frac{dB}{cm} \right) = \frac{2\pi(8.686)}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu' \epsilon'}{2} (\sqrt{(1 + \tan^2 \delta_d)1 + \tan^2 \delta_m}) - (1 - \tan \delta_d \tan \delta_m)} \quad (2.27)$$

2.5.3 Pengukuran medan dekat

Interferensi medan dekat diambil beberapa form dan juga tidak terdapat pengukuran tunggal yang dapat mencukupi dalam karakteristik hasil penuh dari absorber medan dekat. IEC didesain dengan empat pengukuran untuk mengukur penekanan noise dari absorber medan dekat yaitu :

- *Intradecoupling ratio* : pengukuran ini didesain untuk mengukur keefektifan dari absorber dalam mengurangi coupling diantara elemen pada sisi yang sama dari sheet absorber. Dua antena loop disebarkan sebagai ilustrasi yang benar. Coupling diantara antena diukur dan absorber ditempatkan diatas loop serta coupling dibandingkan pada kondisi tidak dengan absorber.
- *Interdecoupling ratio* : pengukuran ini mengukur keefektifan ketika pengirim dan penerima berlawanan tempat dari absorber. Aturan yang sama untuk Intradecoupling ratio, tetapi kasus ini sheet absorber ditempatkan diantara antena loop.
- *Transmission Attenuation Power Ratio* : pengukuran ini mengukur keefektifan dari absorber dalam penekanan arus noise sepanjang dari suatu PCB. Sebuah line mikrostrip digunakan dan transmisi serta pengukuran karakteristik refleksi.

Material selanjutnya menempati puncak dari konduktor dan transmisi serta pengukuran kembali suatu refleksi.

- *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.

2.6 Aplikasi Metamaterial Absorber

Metamaterial absorber dapat digunakan dalam beberapa aplikasi diantaranya seperti berikut ini.

2.6.1 Reduksi lubang resonansi

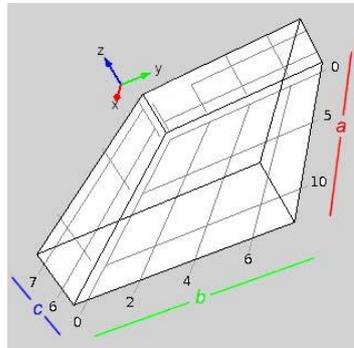
Setelah rangkaian didesain dan diukur, maka harus dilindungi dengan baik dan secara fisik dilindungi sebelum dapat digunakan. Ini biasanya menyertakan cakupan dari seluruh rangkaian dengan *cover metallic*. Terkadang menyediakan pelindung yang cukup dan pelindung *cover* dapat mengenalkan masalahnya sendiri. Bahkan, dapat membuat lubang konduktif dimana akan melakukan resonansi jika didorong pada salah satu dari frekuensi resonansinya. Lubang resonansi ini mengenalkan medan E dan H dimana dapat melewati lubang yang dapat berpengaruh besar pada hasil rangkaian. Material absorber yang benar ketika dikenalkan untuk lubang, yang mana dapat memperkecil resonansi dan memperbolehkan operasi yang tepat dari rangkaian [4].

Pada bentuk *rectangular* dari lubang resonansi frekuensi mempunyai persamaan 2.28 [7] :

$$f_{mp} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (2.28)$$

Dimana m, n dan p mengindikasikan nilai dari setengah panjang gelombang dan melewati dimensi x, y dan z dari lubang-lubang berturut-turut. Lubang akan beresonansi pada frekuensi yang ditentukan oleh dimensi lubang. Mode resonansi yang dominan sama dengan mode *waveguide* TE01, tetapi dipilih pada nol pertama dari $\sin(\beta z)$. Mode ini didesain oleh mode TE011, yang mana merupakan frekuensi paling rendah dan lubangnya dapat mendukung suatu lubang resonansi. Dalam frekuensi ini, suatu lubang resonansi tidak akan ada. Untuk

sebuah lubang yang kosong, maka frekuensi cut off menyesuaikan dimana dimensi paling panjang dari lubang sama dengan $\frac{1}{2} \lambda$ kondisi free space.



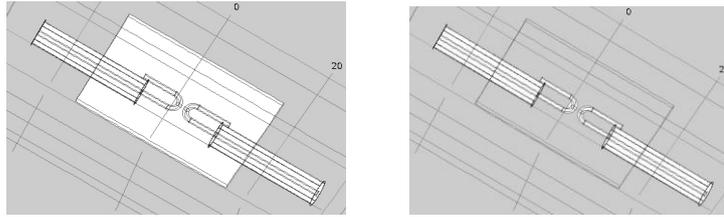
Gambar 2.10 Lubang resonansi dalam bentuk *rectangular* [7]

2.6.2 Absorber medan dekat

Merupakan suatu kelas dari absorber yang ditempatkan dekat atau secara langsung pada radiasi elemen. Sejak itu, energi dalam medan dekat sebgaaian besar ialah magnetik. Absorber medan dekat mempunyai permeabilitas magnetik yang tinggi dan loss magnetik yang tinggi. Sejak itu, sering dilakukan hubungan langsung dengan rangkaian elemen, yang mana harus mempunyai konduktivitas yang sangat rendah.

Ketetapan desain rangkaian yang baik akan mengandung elemen, dimana akan melakukan resonansi dan radiasi pada frekuensi khusus. Radiator ini dapat menjadi induktor/kapasitor dan juga menghubungkan kawat, yang mana akan berjalan dengan perbedaan pada frekuensi tertentu. Pada medan dekat dari energi radiasi disebut juga magnetik radiator, dimana merupakan model dari antena loop. Energi magnetik berjalan dengan sangat cepat melalui jarak, tetapi masih dapat terjadi interferensi pada rangkaian komponen yang dekat.

Pemodelan medan dekat terdiri dari reaksi dari suatu antena loop dan penentuan *coupling* dari pengukuran antena (juga loop). *Coupling* ialah perbandingan setelah menempatkan sebuah material absorber secara dekat dan berhubungan dengan loop seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 [7].



Gambar 2.11 Model medan dekat dengan coupling antenna loop dengan dan tanpa absorber.

2.6.3 Absorber Load Material

Terminasi *microwave* merupakan *waveguide* atau bagian *coax* yang menunjukkan refleksi yang rendah dalam gelombang datang. Terminasi digunakan dalam banyak sistem *microwave* seperti sirkulator atau coupler untuk mengeliminasi sinyal yang tidak diinginkan. Suatu terminasi harus dapat untuk menyerap terjadinya energi. Oleh karena itu, maka digunakan absorber load material. Suatu load harus menyerap diatas semua band *waveguide* dan dibentuk untuk menunjukkan suatu ujung impedansi pada gelombang datang. Load material umumnya absorber magnetik, dimana dibuat dengan mudah atau dicetak.



Gambar 2.12 Load absorber [7]

2.6.4 Absorber Gelombang Milimeter

Perbedaan mode dari analisis dan tipe absorber diperlukan dalam band RF/microwave dan tergantung dimana absorber digunakan dalam ruang bebas atau dalam lubang tertutup. Absorber untuk reflektivitas ruang bebas menggunakan desain yang berbeda dibandingkan dengan filosofi reduksi lubang resonansi. Banyak aplikasi dalam bidang RF/microwave mempunyai kejelasan satu atau yang lain. Fisik akan merubah sebagai perpindahan ke dalam gelombang milimeter. Ketetapan secara fisik lubang kecil atau lampiran dapat mencakup

beberapa panjang gelombang pada frekuensi gelombang milimeter. Dalam gelombang milimeter mempunyai ukuran panjang gelombang lebih kecil dari 1.

2.6.5 Reduksi Refleksi

Banyak sistem dalam pengiriman energi yang dapat mengalami interferensi dari kembalinya refleksi ke *transmitter*. Juga, ketidaksesuaian refleksi dapat berinterferensi dengan sistem yang lain. Sering sumber refleksi tidak dapat dipindahkan dengan suatu bangunan atau tiang kapal. Absorber dapat digunakan untuk mengurangi tingkat refleksi. Ciri reduksi reflektivitas untuk menyelesaikan resistansi *outdoor* dari material absorber yaitu -20 dB, dimana akan menghapus 99% dari refleksi. Perlu untuk diperhatikan pada absorber yang dipilih atau yang didesain untuk menyerap pada frekuensi yang dikirim.

2.6.6 Radar Cross Section Reduction

Absorber dapat juga digunakan untuk mengurangi *radar cross section* dari objek target. Dengan pengurangan tingkat refleksi, suatu objek akan menunjukkan *cross section* yang paling kecil. Bagaimanapun, seharusnya pada hasil narrowband dari ketipisan *radar absorbing material* (RAM) dan ketebalan serta berat dari broadband RAM, maka sulit untuk mencapai keefektifan dari reduksi *radar cross section* menggunakan absorber sendiri.

2.6.7 Penggunaan pada Anechoic Chamber

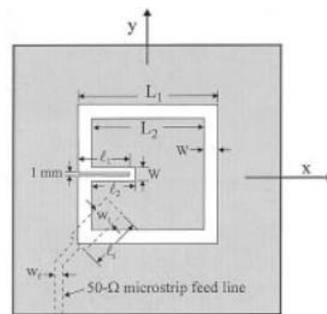
Anechoic Chamber digunakan untuk membuat kondisi ruang bebas (*free space*) di dalam ruang tertutup. Hasil sangat tinggi dari material absorber ialah ketika digunakan pada dinding, langit-langit dan lantai untuk mengurangi refleksi. Reflektivitas dari absorber digunakan pada *anechoic chamber* dapat menjadi -50 dB atau lebih baik. Tingkat dari hasil tersebut secara kritis digunakan untuk menjamin antena dengan baik atau pengukuran *radar cross section* [7].

2.7 Split Ring Resonator (SRR)

Merupakan struktur buatan (metamaterial) yang diproduksi untuk menghasilkan *magnetic susceptibility* (respon magnetik) dalam beberapa tipe metamaterial hingga frekuensi 200 THz. Setiap SRR mempunyai sebuah respon individual yang disesuaikan untuk medan elektromagnetik. SRR didesain untuk

meniru respon magnetik dari atom, tetapi hanya pada skala besar. Split Ring Resonator (SRR) ini lebih aktif dibanding material ferromagnetik yang ditemukan di alam.

Split Ring Resonator (SRR) terdiri dari beberapa jenis seperti *rod-split ring*, *nested split ring*, *single split ring*, *spiral split ring* dan termasuk S-struktur dan sebagainya. Salah satu jenis *single split ring* pada SRR yaitu *rectangular ring resonator* dengan bentuk seperti Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Bentuk *Rectangular Ring Resonator*

Nilai frekuensi dipengaruhi oleh dimensi SRR dan epsilon bahan substrat yang digunakan. Untuk mencari frekuensi resonansi f_a dari *rectangular ring resonator* seperti ditunjukkan pada persamaan (2.29).

$$f_a \approx \frac{c}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (2.29)$$

Dimana :

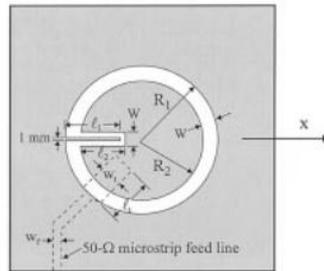
f_a = frekuensi resonansi

ϵ_r = nilai epsilon bahan substrat

L_1 = panjang ring luar

L_2 = panjang ring dalam

Dalam *single split ring* juga terdapat bentuk *circular ring resonator*, dimana bentuk ring berupa lingkaran dengan terdapat sebuah gap. Untuk bentuk *circular ring resonator* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Bentuk *Circular Ring Resonator*

Untuk mencari frekuensi resonansi dari *circular ring resonator* seperti ditunjukkan pada persamaan (2.30).

$$f_b \approx \frac{c}{\pi(R_1 + R_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (2.30)$$

Dimana :

f_b = frekuensi resonansi

ϵ_r = nilai epsilon bahan substrat

R_1 = jari-jari ring dalam

R_2 = jari-jari ring luar

2.8 Radar Cross Section (RCS)

Radar cross section merupakan suatu ukuran dari daya target dalam memberikan arah spasial ketika suatu target dilakukan iluminasi oleh gelombang yang datang. Nama lain untuk RCS adalah area yang bergema (*echo area*). RCS berfokus pada karakteristik dari target dan tidak berdampak pada daya transmisi, sensitivitas penerima serta jarak atau lokasi diantara target dan pengirim atau penerima. Oleh karena itu, RCS ialah normalisasi pada *power density* dari gelombang datang pada target, sehingga RCS tidak tergantung pada jarak dari sumber iluminasi ke target [10].

Pada kamus istilah elektronika IEEE mendefinisikan RCS sebagai ukuran dari daya refleksi suatu target. Secara matematis, RCS didefinisikan sebagai 4π perbandingan dari daya per satuan *solid angle* target pada arah yang dispesifikasikan. Lebih tepatnya, RCS ialah limit dari perbandingan jarak dari sumber ke target, dimana daya sebar diukur dari pendekatan yang tak terbatas. Untuk menentukan nilai RCS dapat menggunakan persamaan (2.31) [17].

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2} \quad (2.31)$$

Keterangan :

E^{scat} = medan listrik *scattered*

E^{inc} = medan datang pada target

σ = RCS (m^2)

Secara formal, *cross section* dapat juga didefinisikan sebagai energi yang disebar, diabsorpsi, dipindahkan dari gelombang datang. Suatu total *cross section* dapat juga didefinisikan sebagai pemasukan semua efek tersebut. Energi yang tersebar mempunyai ketertarikan secara praktis paling besar karena mampu merepresentasikan energi yang tersedia untuk deteksi radar [10].

RCS secara fundamental merupakan perbandingan dari *power density* target ke *power density* sumber. Daya atau intensitas dari gelombang elektromagnetik merupakan perbandingan kuadrat dari besar medan listrik atau medan magnetik, sehingga RCS dapat diekspresikan seperti persamaan (2.32) [17]:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2} = 4\pi R^2 \frac{|H^{scat}|^2}{|H^{inc}|^2} \quad (2.32)$$

Hal ini dikarenakan medan E dan medan H berhubungan satu sama lain oleh impedansi dari ruang bebas. Satuan dari *radar cross section* σ yaitu area, biasanya m^2 . RCS terkadang dibuat non dimensi caranya membagi dengan panjang gelombang yang dikuadratkan, σ/λ^2 . Radar cross section dari target merupakan fungsi dari beberapa atribut dari target, radar mengamati suatu target dan target radar geometris. Secara khusus, RCS tergantung pada beberapa faktor yaitu :

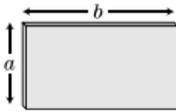
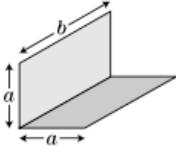
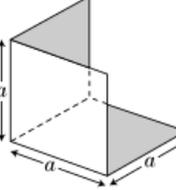
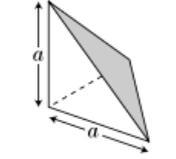
- a. Geometris target dan komposisi material
- b. Posisi dari *transmitter* relatif ke target
- c. Posisi dari *receiver* relatif ke target
- d. Frekuensi atau panjang gelombang
- e. Polarisasi *transmitter*
- f. Polarisasi *receiver*

Suatu kejadian spekulasi scattering pada RCS sangat tergantung pada geometri dari permukaan target dan sudut dari *transmitter* maupun *receiver*. Suatu permukaan berbentuk *flat* hanya mempunyai satu titik *backscatter*, sehingga hanya mempunyai satu arah spasial dimana permukaan normal dapat memfokuskan kembali menuju suatu radar. Bentuk bola mempunyai jumlah titik spekulasi yang tak terbatas, sehingga selalu tegak lurus pada permukaan bola tanpa memperhatikan tampilan sudut. Permukaan silinder hanya mempunyai satu bidang dalam ruang tegak lurus ke permukaan yang mana merupakan *specular scattering*. Amplitudo *backscatter* untuk specular scattering tergantung pada luas fase konstan, A_c , pada titik spekulasi dan panjang gelombang didefinisikan seperti persamaan (2.33) [1].

$$\sigma_{\text{specular}} = 4\pi \frac{A_c^2}{\lambda^2} \quad (2.33)$$

Untuk menghitung nilai maksimum RCS sesuai dengan bentuk target dapat menggunakan persamaan seperti pada Gambar 2.15.

**Maximum RCS of Simple Shapes,
 $\lambda \ll \text{Object Size}$**

Shape		RCS
Sphere, radius r		πr^2
Flat plate, edge lengths a and b		$4\pi(ab)^2/\lambda^2$
Dihedral, edge lengths a and b		$8\pi(ab)^2/\lambda^2$
Trihedral, square sides, edge length a		$12\pi a^4/\lambda^2$
Trihedral, triangular sides, edge length a		$4\pi a^4/3\lambda^2$

Gambar 2.15. Perhitungan maksimum RCS sesuai bentuknya [1]

Gambar 2.15 menunjukkan bahwa nilai maksimum RCS dalam bentuk *flat plate* tergantung pada luas fase konstan, dimana merupakan luas fisik dari lempengan. Dalam kasus ini, semua bagian dasar dari lempengan sama jauhnya dari *transmitter* atau *receiver*. Oleh karena itu, semua area bagian ditambahkan dalam fase untuk memberikan nilai fix yang besar dari spekulasi amplitudo.

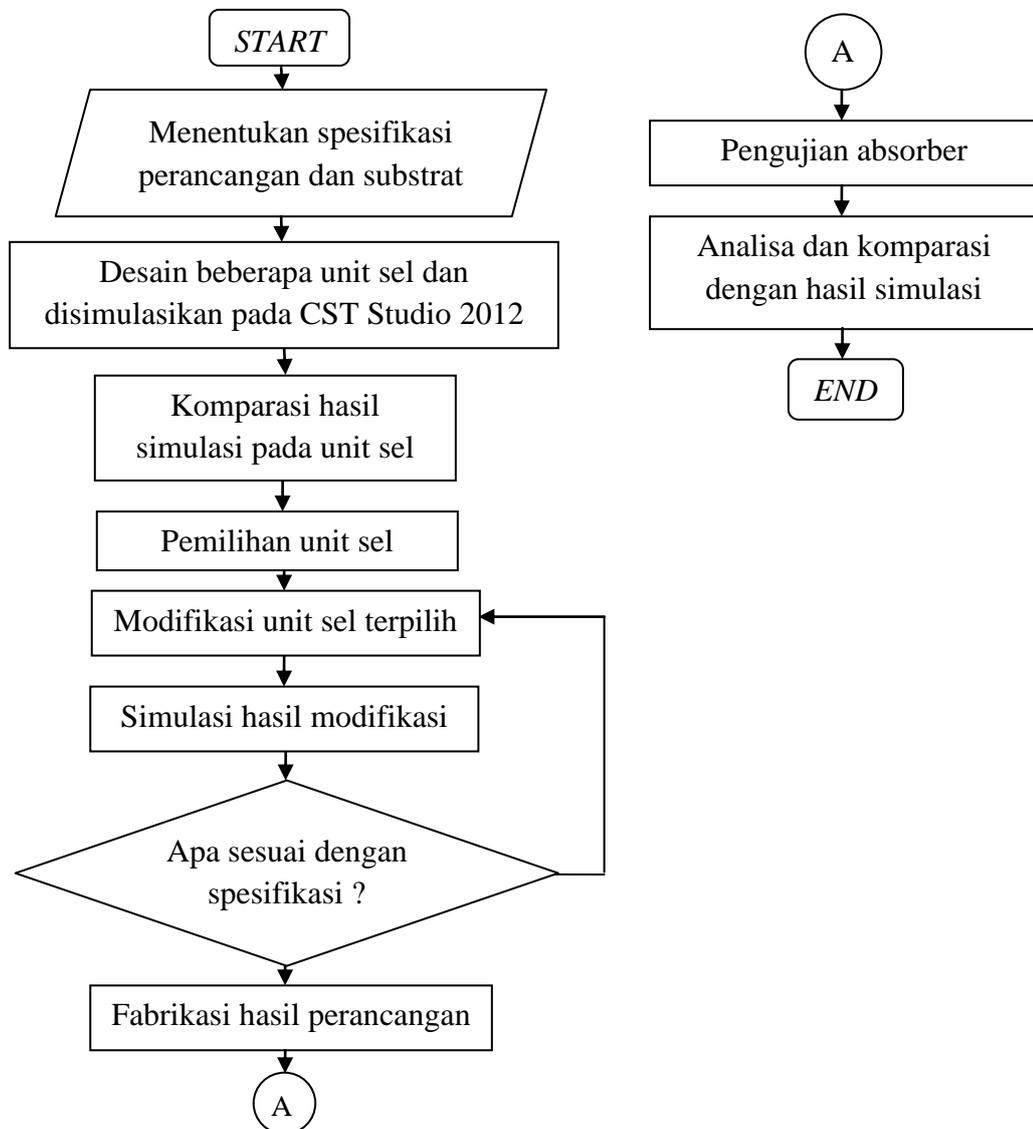
<Halaman ini sengaja dikosongkan>

BAB III

PERANCANGAN DAN SIMULASI

3.1 Diagram Alir Perancangan

Untuk melakukan perancangan unit sel metamaterial absorber, maka akan dilakukan langkah langkah yang meliputi penentuan spesifikasi dan substrat dari metamaterial absorber, pemilihan bentuk dan dimensi unit sel dan penggabungan unit sel. Setelah penentuan perancangan unit sel tersebut, maka dilakukan simulasi dan fabrikasi metamaterial absorber, lalu dilakukan pengujian hasil fabrikasi. Secara ringkas dijelaskan pada diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir perancangan Metamaterial Absorber

3.2 Perancangan Metamaterial Absorber

Perancangan metamaterial absorber disesuaikan dengan spesifikasi yang dibutuhkan dalam aplikasi *Radar Cross Section Reduction* (RCSR) untuk diaplikasikan pada *body* kapal maritim. Spesifikasi absorber yang diperlukan dalam perancangan metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Parameter Perancangan Metamaterial Absorber

Parameter	Spesifikasi
Jenis band	Pita Lebar
Range Frekuensi	8.5-10.5 GHz
S11-parameter	≤ -3.5 dB
S21-parameter	0 (linear)
<i>Absorption rate</i>	≥ 80 %

Tabel 3.1 menunjukkan parameter perancangan metamaterial absorber, dimana untuk jenis band yang digunakan adalah pita lebar. Hal ini karena range frekuensi yang digunakan untuk navigasi dan pengawasan kapal antara 8.5 hingga 10.5 GHz [6], sehingga nilai *bandwidth* sebesar 2 GHz yang tergolong lebar, maka jenis band disebut pita lebar (*broadband*).

Dalam perancangan metamaterial absorber ini menggunakan ground plane pada bagian bawah metamaterial absorber. Oleh karena itu, nilai magnitude S21 bernilai 0 sebab tidak ada daya yang tembus ketika melewati metamaterial absorber. Untuk nilai S11 mempunyai spesifikasi sebesar ≤ -3.5 dB. Nilai tersebut didapatkan dari konversi S11 ke *absorption rate* dengan menggunakan persamaan $A(\omega)$ pada Bab II. Dimana, absorpsi dikatakan baik jika nilai minimum *absorption rate* sebesar ≥ 80 %, sehingga dengan menggunakan konversi tersebut maka spesifikasi batas nilai minimum S11 bernilai -3.5 dB.

Untuk bahan pada perancangan metamaterial absorber ini menggunakan PCB dengan jenis FR-4(*epoxy*). Untuk detail spesifikasi bahan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi PCB

Parameter	Spesifikasi
Permitivitas bahan (ϵ_r)	4.6
Tebal substrat	1.6 mm
Tebal konduktor (<i>copper</i>)	0.035 mm

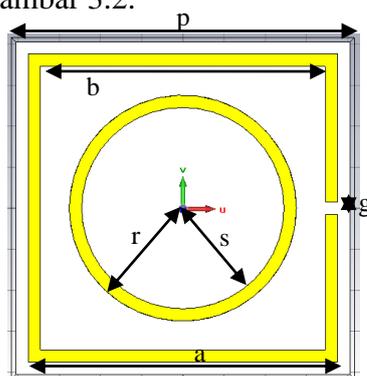
Tabel 3.2 menunjukkan bahwa permitivitas bahan sebesar 4.6 dan tebal copper sebesar 0.035 mm. Hal ini dikarenakan pada perancangan metamaterial absorber ini menyesuaikan pada ketersediaan pada pasar fabrikasi, dimana hanya ada nilai tersebut. Sedangkan, untuk tebal substrat menyesuaikan dengan desain dan simulasi unit sel yaitu 1.6 mm, untuk tebal substrat yang ada dipasaran hanya terdapat dua jenis yaitu 0.8 mm dan 1.6 mm.

3.3 Desain dan Simulasi Unit Sel

Pada bagian ini dilakukan simulasi beberapa bentuk unit sel berdasarkan metode SRR (*Split Ring Resonator*) sebagai berikut.

3.3.1 Unit Sel 1

Desain unit sel 1 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu *Rectangular Ring Resonator* dan *Circular Ring Resonator*. Desain unit sel 1 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Unit sel 1 Tampak depan

Frekuensi resonansi dari bentuk *Rectangular Ring Resonator* dapat digunakan untuk menentukan nilai L_1 dan L_2 dengan persamaan 3.1[12].

$$f_a \approx \frac{c}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

Keterangan :

f_a = frekuensi resonansi bentuk *rectangular*

L_1 = panjang ring luar

L_2 = panjang ring dalam

ϵ_r = nilai epsilon bahan substrat

Sedangkan, frekuensi resonansi dari bentuk *Circular Ring Resonator* dapat digunakan untuk menentukan nilai R_1 dan R_2 dengan persamaan 3.2 [12].

$$f_b \approx \frac{c}{\pi(R_1 + R_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

Keterangan :

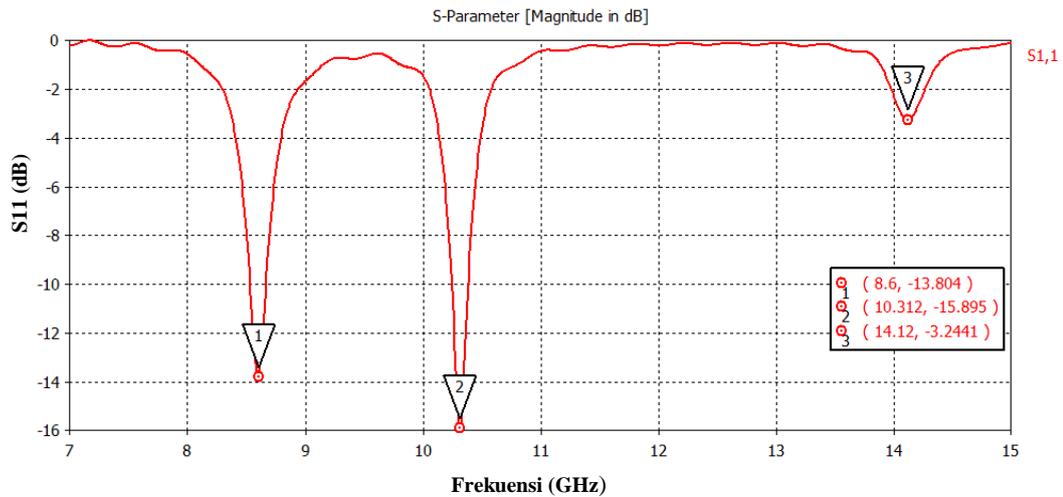
f_b = frekuensi resonansi bentuk *circular*

R_1 = jari-jari lingkaran luar

R_2 = jari-jari lingkaran dalam

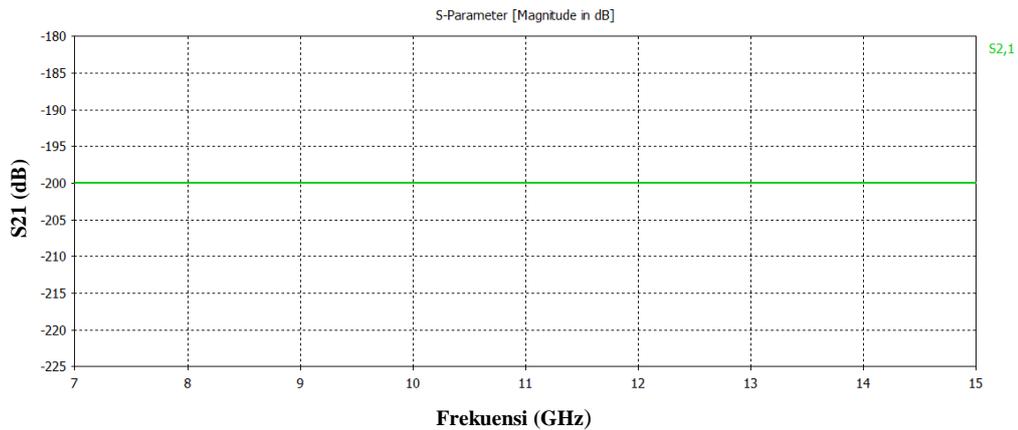
ϵ_r = nilai epsilon bahan substrat

Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.1$ mm, $a=7.5$ mm, $b=6.9$ mm, $g=0.3$ mm, $r=2.75$ mm, $s=2.45$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $loss\ tangent = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm. Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio 2012 ini menggunakan prinsip *periodic boundary condition*, dimana bagian atas dan bawah unit sel dengan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$), tetapi pada bagian samping kiri dan kanan menyentuh bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$), sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi S11 pada unit sel 1 dengan CST Studio 2012 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



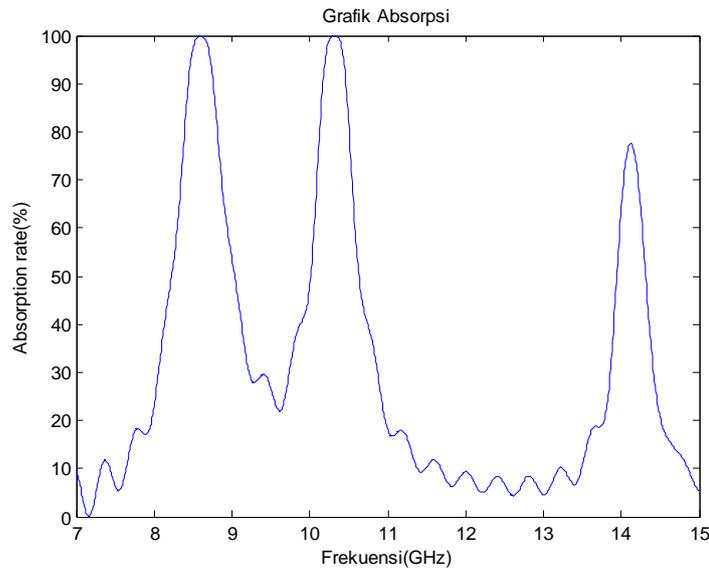
Gambar 3.3 Hasil S11-parameter Unit sel 1

Sedangkan, Hasil simulasi S21 pada unit sel 1 dengan CST Studio 2012 dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hasil S21-parameter Unit sel 1

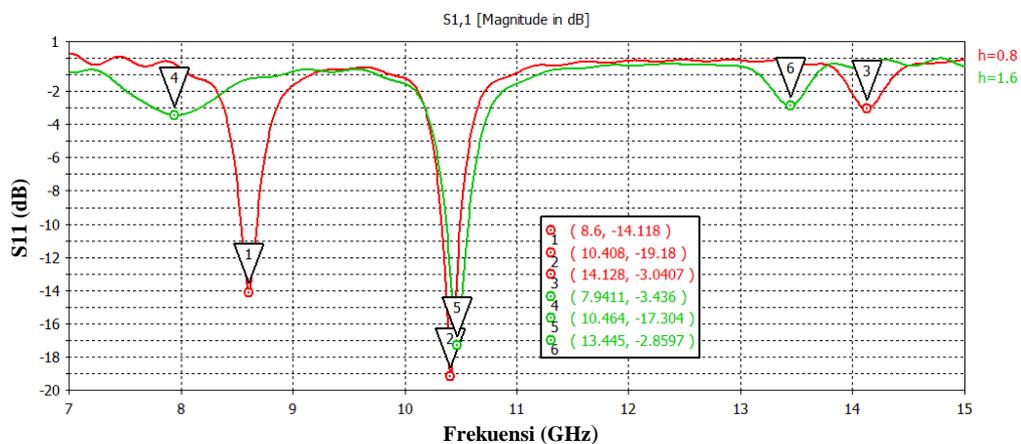
Untuk nilai *absorption rate* dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai S21 yang dihasilkan dari simulasi seperti pada gambar 3.4 sebesar -200 dB atau nilai magnitude bernilai 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Grafik *absorption rate* Unit sel 1

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.5 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 8.392 GHz hingga 8.808 GHz dengan *bandwidth* sebesar 416 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 10.128 GHz hingga 10.504 GHz dengan *bandwidth* sebesar 376 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.6 GHz, 10.31 GHz, dan 14.12 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 99.82 %, 99.93 % dan 77.55 %.

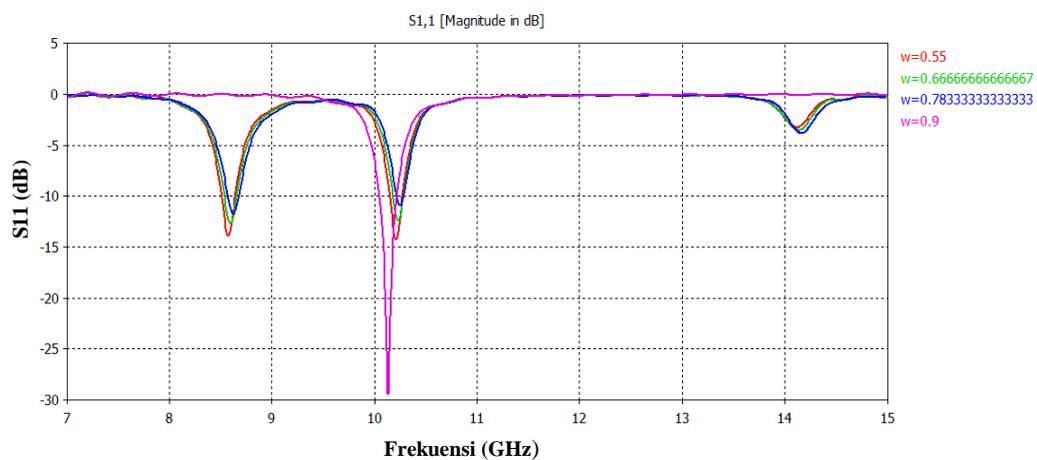
Selanjutnya, dilakukan modifikasi dengan ketebalan substrat yang ada di pasaran yaitu 0.8 mm dan 1.6 mm. Hasil simulasi dari variasi tebal substat ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Hasil S11-parameter Unit sel 1 dengan variasi tebal substrat

Gambar 3.6 menunjukkan bahwa semakin besar tebal substrat (h), maka semakin rendah kecuraman nilai parameter S_{11} , tetapi mempunyai bandwidth yang lebih lebar yang terletak pada band 1.

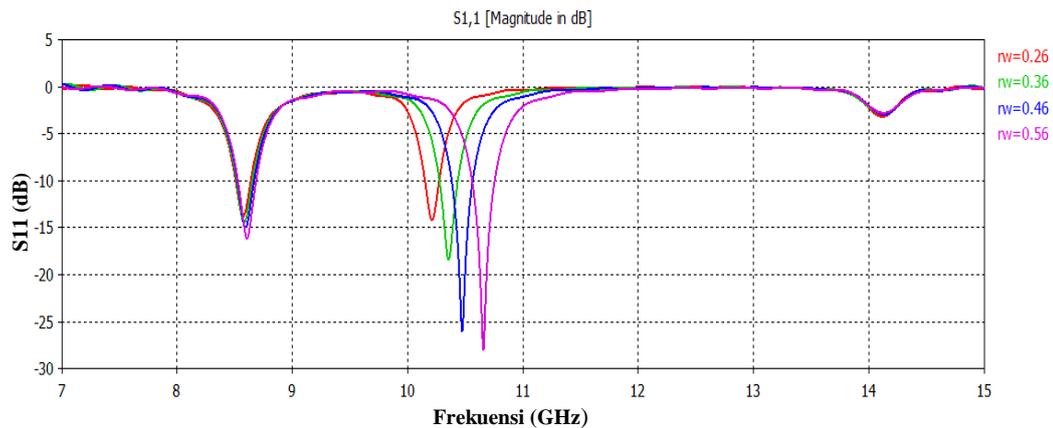
Modifikasi selanjutnya dilakukan pada lebar *copper* dalam SRR bentuk *rectangular* dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh pada frekuensi kerja. Variasi lebar *copper* yang dilakukan yaitu 0.55 mm, 0.66 mm, 0.783 mm dan 0.9 mm. Hasil simulasi dengan variasi lebar *copper* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Hasil S_{11} -parameter variasi lebar *copper* bentuk *rectangular*

Gambar 3.7 menunjukkan bahwa hasil simulasi dengan variasi lebar *copper* berpengaruh pada kecuraman nilai S_{11} , dimana semakin besar lebar *copper* pada bentuk *rectangular*, maka semakin kecil nilai S_{11} dan mengalami pergeseran ke frekuensi yang lebih besar.

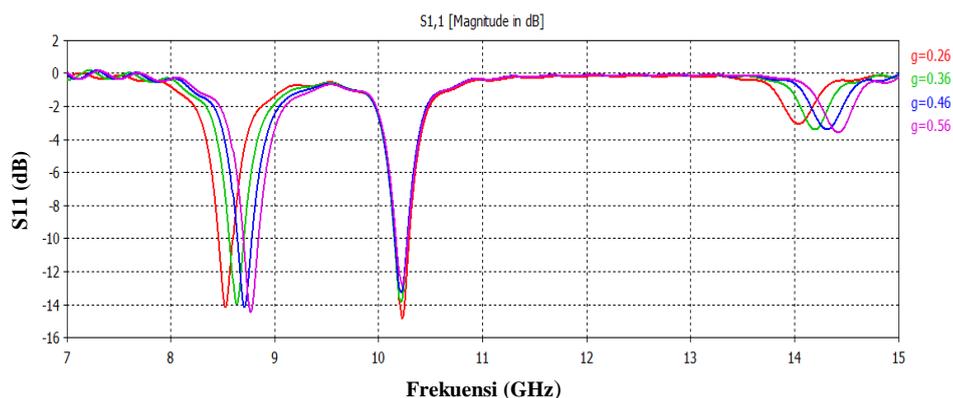
Kemudian, dilakukan modifikasi pada lebar *copper* dari bentuk *circular* SRR dengan menggunakan fitur teknik *sweeping* pada CST Studio 2012 dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi lebar *copper* pada frekuensi kerja. Variasi lebar *copper* yang dilakukan adalah 0.26 mm, 0.36 mm, 0.46 mm dan 0.56 mm. Hasil simulasi S_{11} -parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Hasil S11-parameter dengan variasi lebar *copper* bentuk *circular*

Gambar 3.8 menunjukkan bahwa variasi lebar *copper* bentuk *circular* berpengaruh pada hasil simulasi S11, dimana semakin lebar *copper* akan membuat tingkat kecuraman nilai S11 semakin besar seperti ditunjukkan pada band 1 dan band 2, serta mengalami pergeseran frekuensi yang lebih besar pada band 2.

Modifikasi dilakukan pada lebar gap dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh lebar gap terhadap frekuensi kerja, sehingga digunakan teknik *sweeping* pada CST Studio 2012 dengan nilai gap bervariasi yaitu 0.26 mm, 0.36 mm, 0.46 mm dan 0.56 mm. Hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada gambar 3.9.

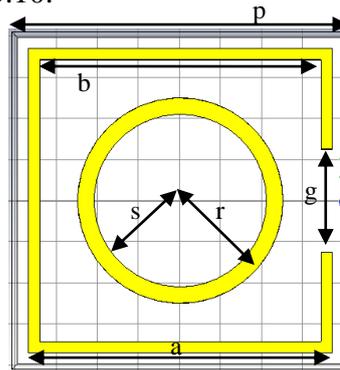


Gambar 3.9 Hasil S11-parameter dengan variasi lebar gap

Gambar 3.9 menunjukkan bahwa variasi lebar gap berpengaruh pada hasil simulasi nilai S11, yang mana semakin lebar gap maka mengalami pergeseran ke

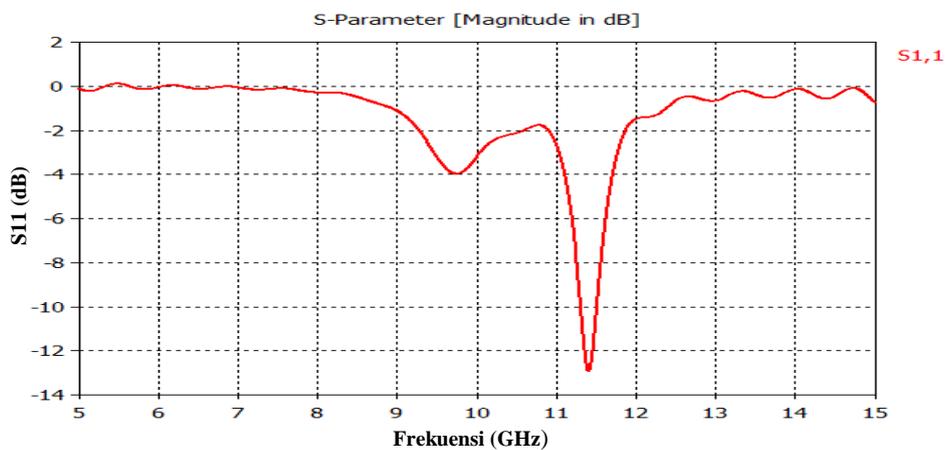
frekuensi yang lebih besar pada band 1 dan band 3, sedangkan pada band 2 mengalami penurunan tingkat kecuraman pada nilai S11.

Selanjutnya, dilakukan modifikasi desain unit sel 1 dengan mengubah tebal substrat menjadi 1.6 mm, nilai r dan s diubah yaitu 2.5 mm dan 2.1 mm, serta gap diubah lebih lebar. Hasil desain metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10.



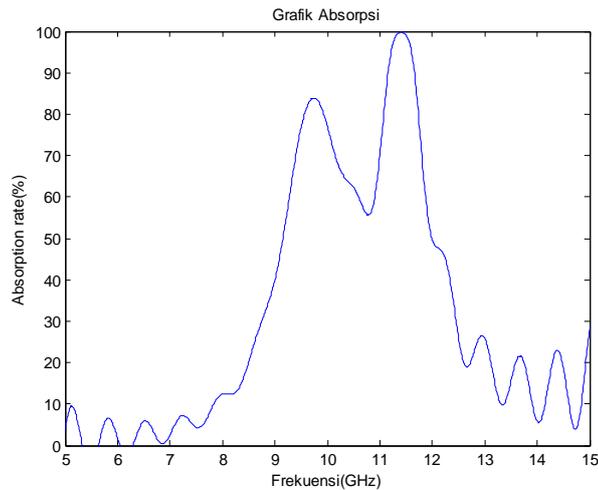
Gambar 3.10 Desain Unit sel 1 modifikasi Tampak depan

Hasil simulasi pada modifikasi unit sel 1 dengan CST Studio 2012 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 5 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 1

Dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.12.

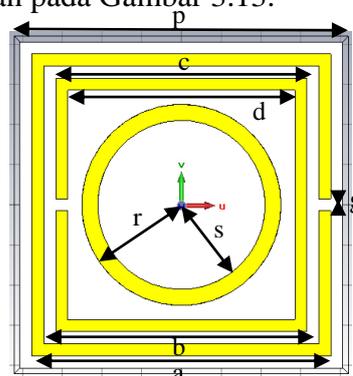


Gambar 3.12 Grafik *absorption rate* modifikasi Unit sel 1

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.12 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 9.57 GHz hingga 9.93 GHz dengan *bandwidth* sebesar 360 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 11.08 GHz hingga 11.73 GHz dengan *bandwidth* sebesar 650 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada dua band frekuensi yaitu pada frekuensi 9.74 GHz dan 11.41 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 99.7 % dan 83.87 %.

3.3.2 Unit Sel 2

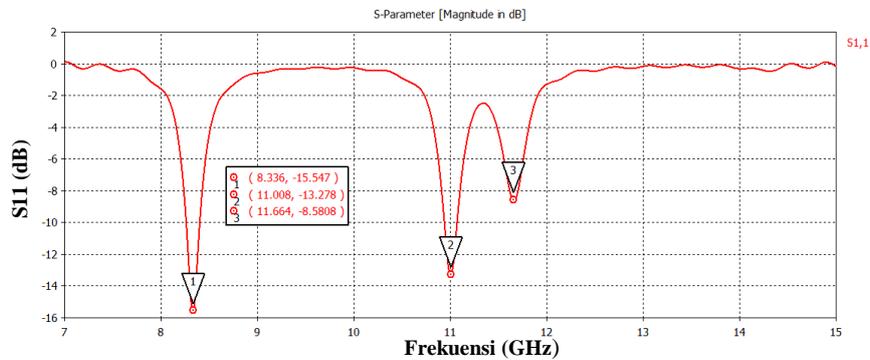
Desain unit sel 2 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu double *Rectangular Ring Resonator* dengan *Circular Ring Resonator* pengembangan dari unit sel 1 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Unit sel 2 Tampak depan

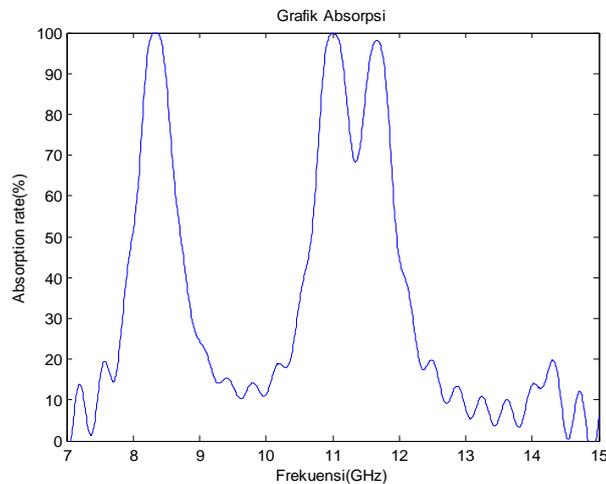
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.1$ mm, $a=7.5$ mm, $b=6.9$ mm, $g=0.3$ mm, $c=6.3$ mm, $d=5.7$ mm, $r=2.5$ mm, $s=2.1$ mm. Untuk bahan substrat

yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $loss\ tangent = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm. Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 2 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Hasil S11-parameter Unit sel 2

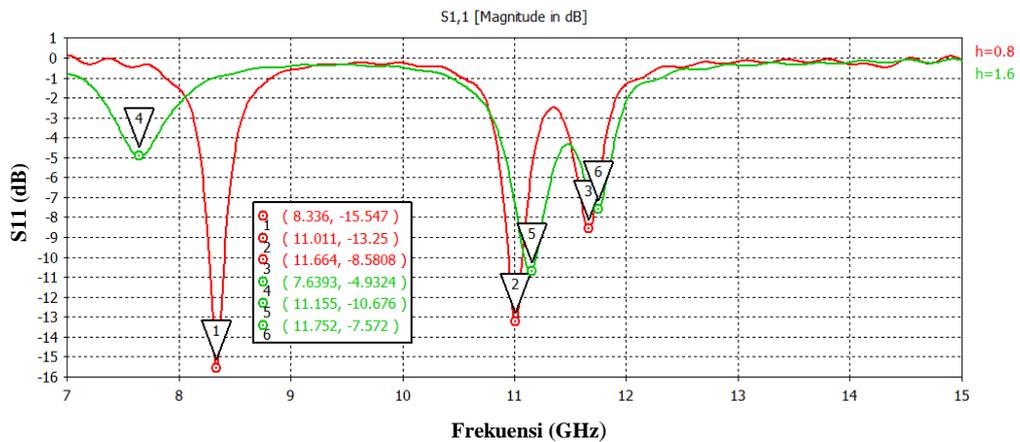
Ketika menentukan nilai *absorption rate*, dapat dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Grafik *absorption rate* Unit sel 2

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.15 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 8.15 GHz hingga 8.356 GHz dengan *bandwidth* sebesar 206 MHz, band 2 terletak pada frekuensi 10.816 GHz hingga 11.224 GHz dengan *bandwidth* sebesar 408 MHz dan band 3 terletak pada frekuensi 11.464 GHz hingga 11.832 GHz dengan *bandwidth* sebesar 368 MHz Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.336 GHz, 11.008 GHz dan 11.664 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 99.92 %, 99.779 % dan 98.077 %.

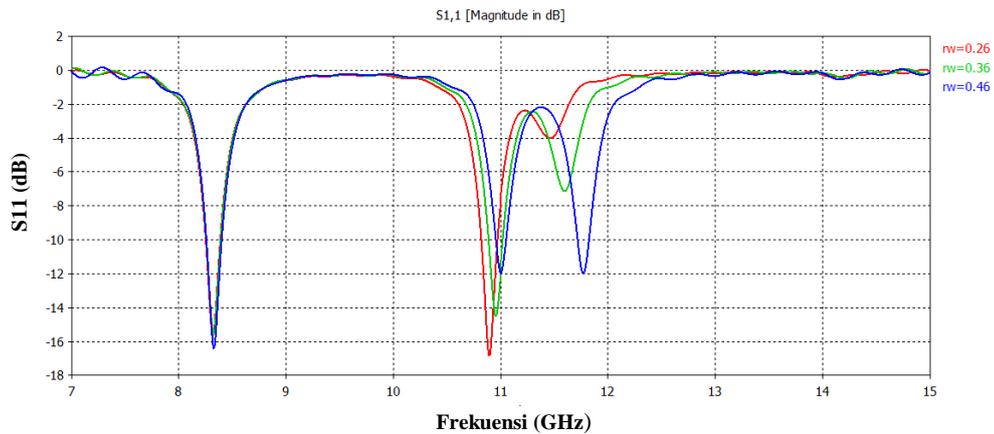
Kemudian, dilakukan modifikasi dengan ketebalan substrat yang ada di pasaran yaitu 0.8 mm dan 1.6 mm. Hasil simulasi dari variasi tebal substat ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi tebal substrat

Gambar 3.16 menunjukkan bahwa variasi tebal substrat berpengaruh pada hasil simulasi S11, dimana semakin besar tebal substrat, maka mengalami pergeseran frekuensi yang lebih kecil pada band 1, tetapi mengalami pergeseran frekuensi yang lebih besar pada band 2 dan band 3, serta terjadi penurunan tingkat kecuraman nilai S11.

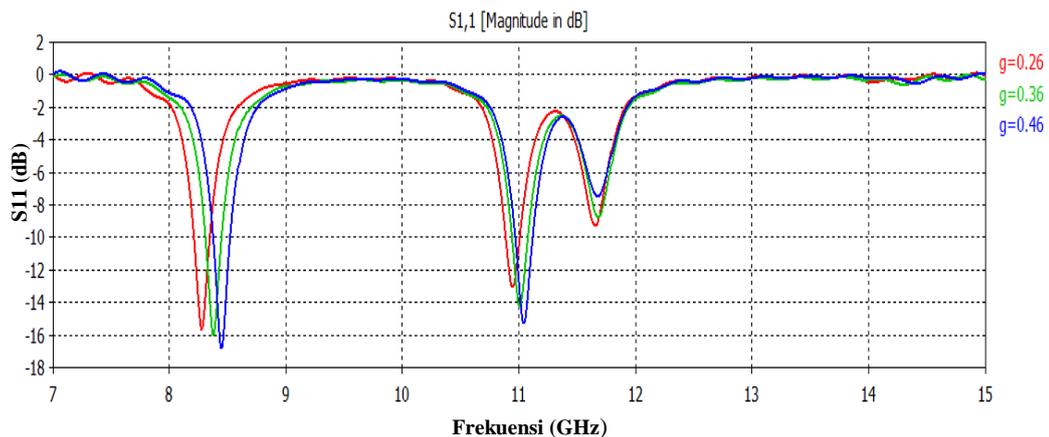
Selanjutnya, dilakukan modifikasi pada lebar *copper* bentuk *circular* dengan tujuan untuk mengetahui perubahan lebar *copper* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi lebar *copper* terdiri dari 0.26 mm, 0.36 mm dan 0.46 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi lebar *copper*

Gambar 3.17 menunjukkan bahwa variasi lebar *copper* berpengaruh pada hasil simulasi S11, dimana semakin besar lebar *copper*, maka terjadi penurunan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 2, tetapi mengalami peningkatan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 3, serta mengalami pergeseran ke frekuensi yang lebih besar pada band 2 dan band 3.

Modifikasi dilakukan pada lebar gap yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh lebar gap terhadap frekuensi kerja, digunakan variasi nilai gap yaitu 0.26 mm, 0.36 mm, 0.46 mm dan 0.56 mm. Hasil simulasi S11-parameter unit sel 2 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.18.



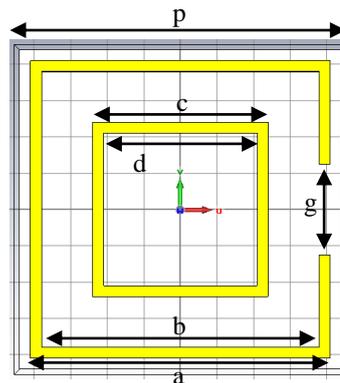
Gambar 3.18 Hasil S11-parameter Unit sel 2 dengan variasi lebar gap

Gambar 3.18 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi oleh variasi lebar gap, dimana semakin besar lebar gap maka semakin besar tingkat kecuraman nilai S11 pada band 1 dan band 2, tetapi mengalami penurunan tingkat

kecuraman nilai S11 pada band 3, serta mengalami pergeseran frekuensi yang lebih besar.

3.3.3 Unit Sel 3

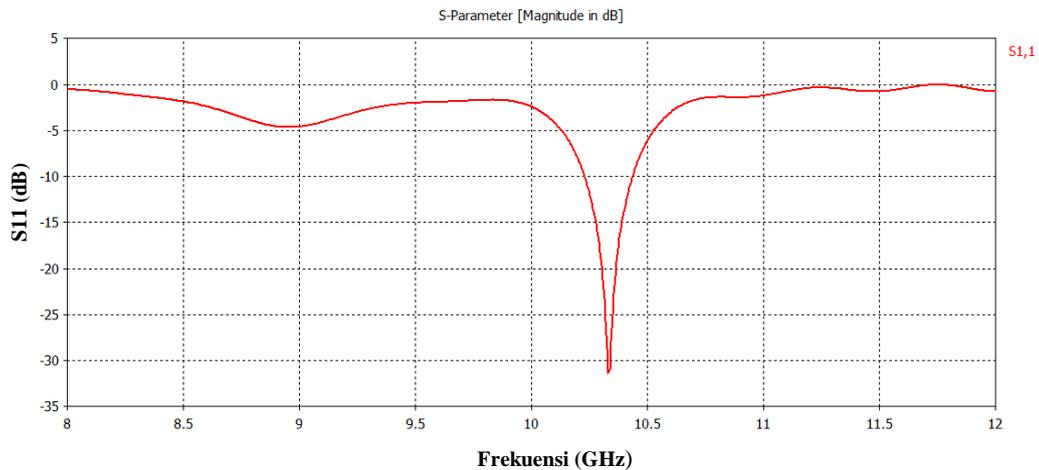
Desain unit sel 3 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu gabungan dari dua bentuk *Rectangular Ring Resonator* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Unit sel 3 Tampak depan

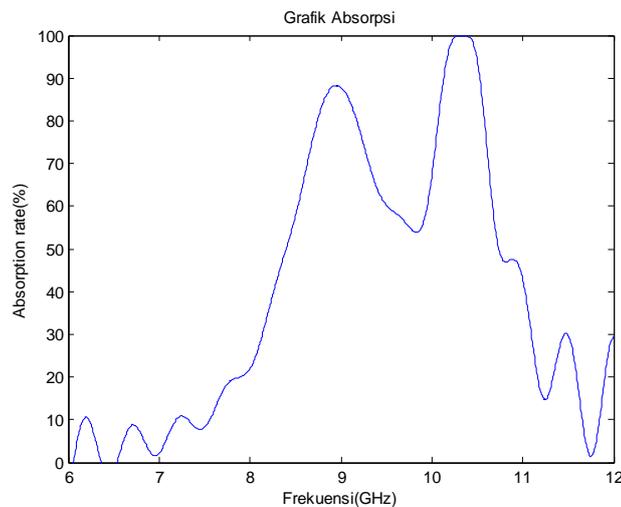
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.1$ mm, $a=7.5$ mm, $b=6.9$ mm, $g=0.9$ mm, $c=5.1$ mm, $d=4.5$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $\tan \delta = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 1.6 mm. *loss tangent*

Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 3 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 8 GHz hingga 12 GHz yang ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Hasil S11-parameter Unit sel 3

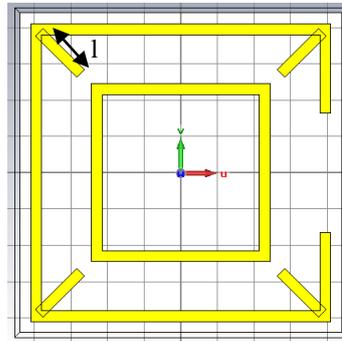
Untuk menentukan nilai *absorption rate*, maka dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21 Grafik *absorption rate* Unit sel 3

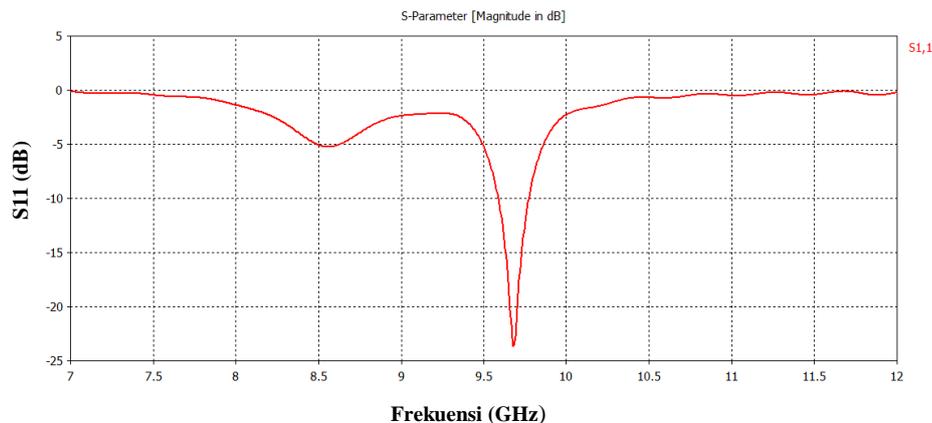
Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.21 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 8.742 GHz hingga 9.174 GHz dengan *bandwidth* sebesar 432 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 10.074 GHz hingga 10.578 GHz dengan *bandwidth* sebesar 504 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada dua band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.95 GHz dan 10.32 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 88.3 % dan 99.99 %.

Selanjutnya, dilakukan modifikasi desain unit sel 3 dengan menambah strip bentuk persegi panjang (l) pada tiap titik sudut ring *rectangular*. Tujuannya adalah untuk mengetahui perubahan nilai S11-parameter terhadap frekuensi kerja. Hasil modifikasi desain unit sel 3 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.22.



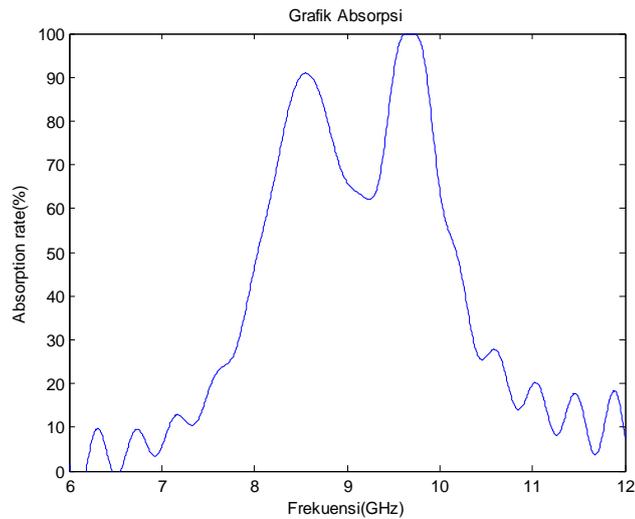
Gambar 3.22 Modifikasi Unit sel 3 Tampak depan

Dari hasil desain unit sel 3 pada CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) pada rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 12 GHz didapatkan hasil simulasi S11-parameter yang ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Hasil S11-parameter Modifikasi Unit sel 3

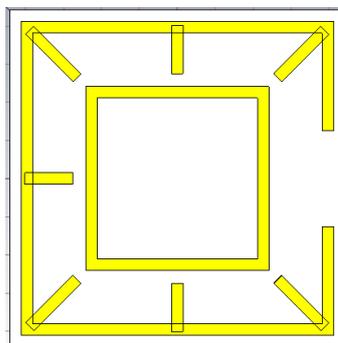
Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega) = 1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24 Grafik *absorption rate* modifikasi Unit sel 3

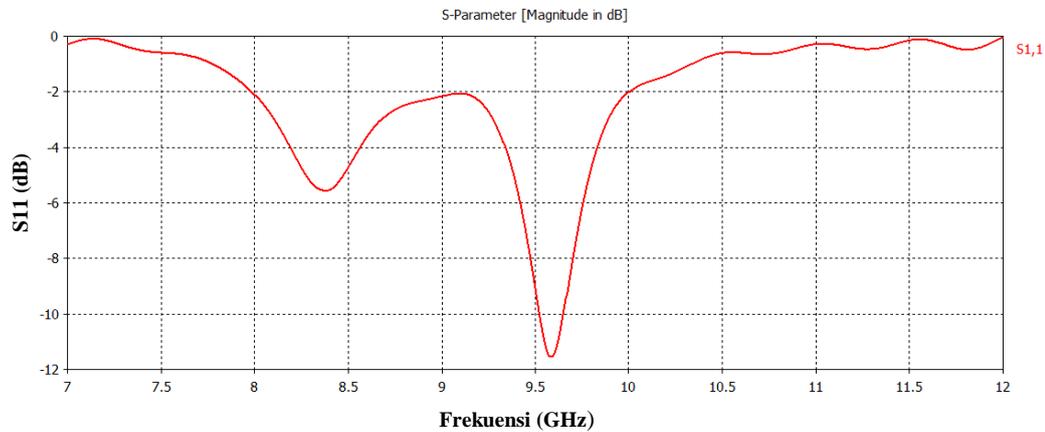
Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.24 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 8.34 GHz hingga 8.79 GHz dengan *bandwidth* sebesar 450 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.44 GHz hingga 9.91 GHz dengan *bandwidth* sebesar 470 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada dua band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.56 GHz dan 9.68 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 90.94 % dan 99.99 %.

Kemudian, dilakukan modifikasi desain unit sel 3 dengan menambah strip bentuk persegi panjang pada tiap titik sudut ring *rectangular* dan titik tengah panjang *ring rectangular*. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengetahui perubahan nilai S11-parameter terhadap frekuensi kerja. Hasil modifikasi desain unit sel 3 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.25.



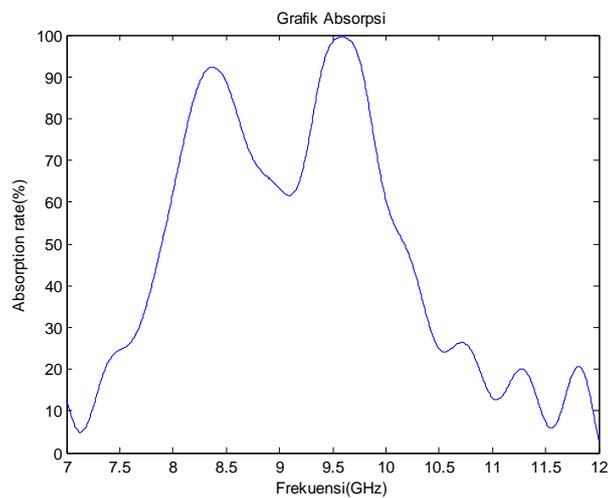
Gambar 3.25 Modifikasi Unit sel 3 Tampak depan

Hasil simulasi pada modifikasi unit sel 3 dengan CST Studio 2012 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) pada rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 12 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.26.



Gambar 3.26 Hasil S11-parameter Modifikasi Unit sel 3

Dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.27.



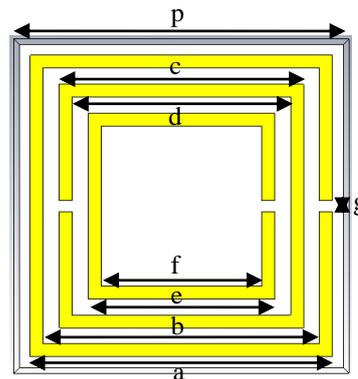
Gambar 3.27 Grafik *absorption rate* modifikasi Unit sel 3

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.27 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 8.15 GHz hingga 8.61 GHz dengan *bandwidth* sebesar 460 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.315 GHz hingga 9.855 GHz dengan *bandwidth* sebesar 540

MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada dua band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.375 GHz dan 9.585 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 92.32 % dan 99.51 %.

3.3.4 Unit Sel 4

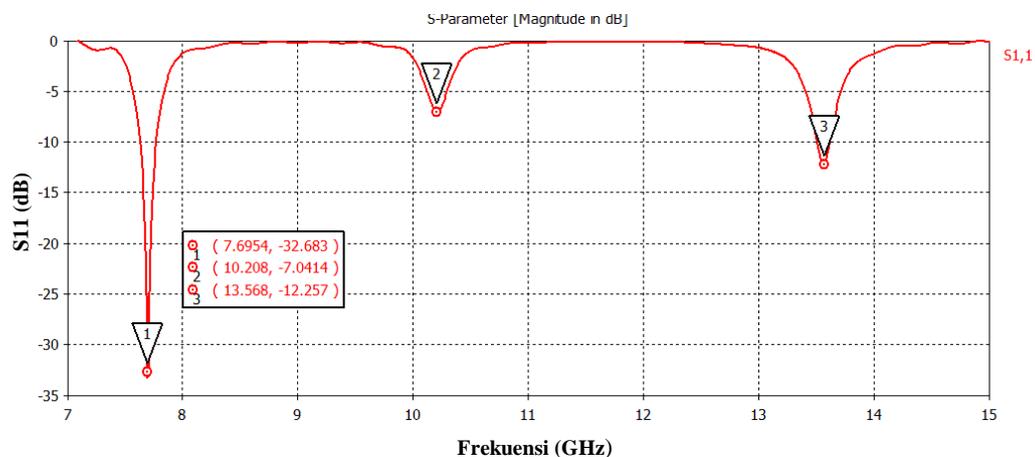
Desain unit sel 4 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu gabungan dari tiga bentuk *rectangular ring resonator* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.28.



Gambar 3.28 Unit sel 4 Tampak depan

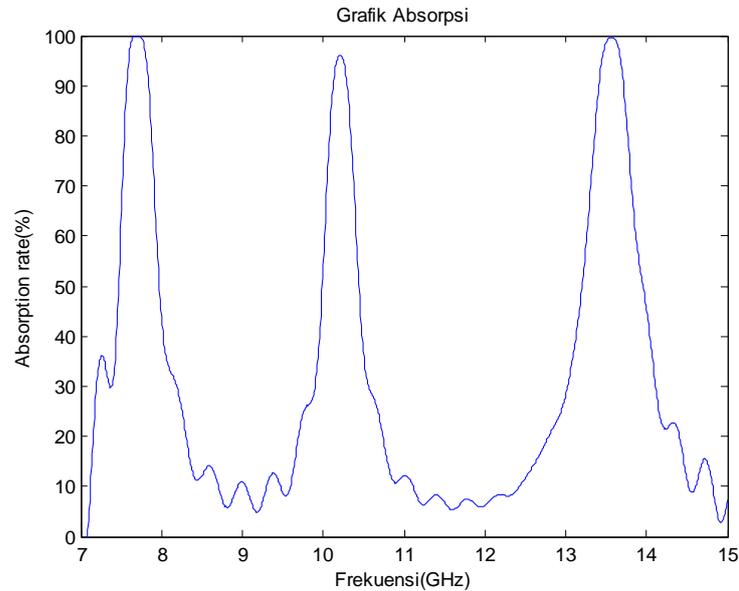
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.85$ mm, $a=8.25$ mm, $b=7.55$ mm, $g=0.3$ mm, $c=6.67$ mm, $d=5.97$ mm, $e=5.09$ mm, $f=4.39$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, *loss tangent* = 0.025 dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm.

Hasil simulasi pada unit sel 4 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.29.



Gambar 3.29 Hasil S11-parameter Unit sel 4

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil S_{11} -parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S_{21} sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A=1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.30.

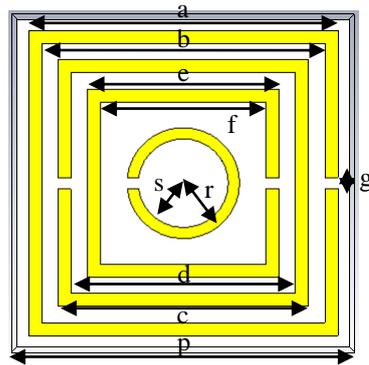


Gambar 3.30 Grafik *absorption rate* Unit sel 4

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.30 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 7.544 GHz hingga 7.872 GHz dengan *bandwidth* sebesar 328 MHz, band 2 terletak pada frekuensi 10.08 GHz hingga 10.344 GHz dengan *bandwidth* sebesar 264 MHz dan band 3 terletak pada frekuensi 13.36 GHz hingga 13.76 GHz dengan *bandwidth* sebesar 400 MHz Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 7.696 GHz, 10.208 GHz, dan 13.568 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 99.99 %, 96.09 % dan 99.64 %.

3.3.5 Unit Sel 5

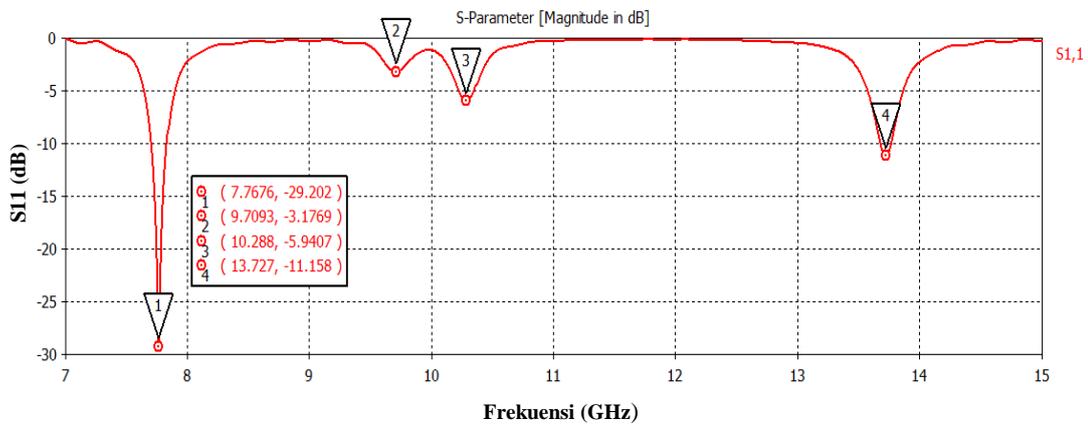
Desain unit sel 5 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu gabungan dari tiga bentuk *rectangular ring resonator* dan sebuah bentuk *circular ring resonator* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.31.



Gambar 3.31 Unit sel 5 Tampak depan

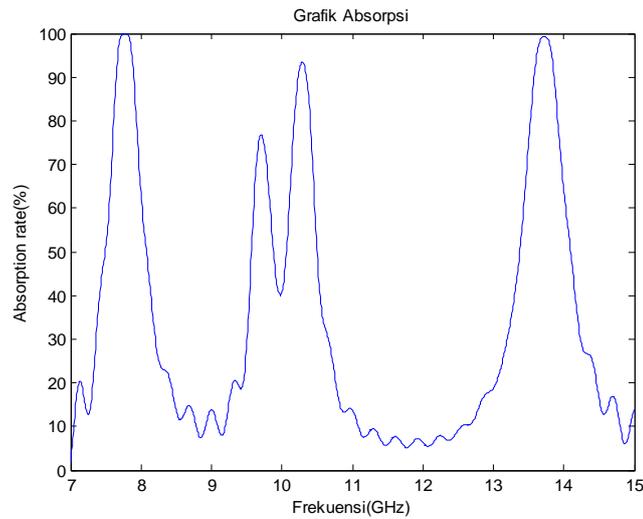
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.85$ mm, $a=8.25$ mm, $b=7.55$ mm, $g=0.3$ mm, $c=6.67$ mm, $d=5.97$ mm, $e=5.09$ mm, $f=4.39$ mm, $r=1.5$ mm, $s=1.2$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $loss\ tangent = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm.

Hasil simulasi dalam memodifikasi unit sel 5 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) pada rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.32.



Gambar 3.32 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 5

Berikutnya, untuk menentukan nilai *absorption rate*, dapat dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A=1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.33.

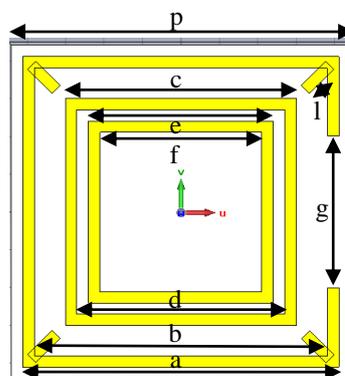


Gambar 3.33 Grafik *absorption rate* Unit sel 5

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.33 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 7.615 GHz hingga 7.928 GHz dengan *bandwidth* sebesar 328 MHz, band 2 terletak pada frekuensi 10.176 GHz hingga 10.4 GHz dengan *bandwidth* sebesar 264 MHz dan band 3 terletak pada frekuensi 13.528 GHz hingga 13.912 GHz dengan *bandwidth* sebesar 400 MHz Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 7.768 GHz, 10.288 GHz, dan 13.72 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 99.99 %, 93.51 % dan 99.41 %.

3.3.6 Unit Sel 6

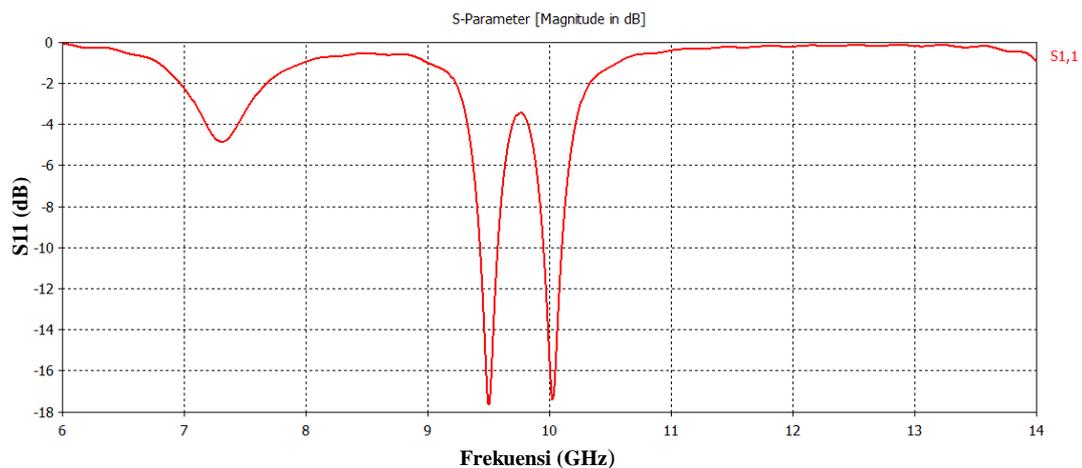
Desain unit sel 6 ini merupakan modifikasi dari bentuk SRR yaitu gabungan dari tiga bentuk *rectangular ring resonator* dengan menambah strip bentuk persegi panjang pada tiap titik sudut ring *rectangular* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.34.



Gambar 3.34 Unit sel 6 Tampak depan

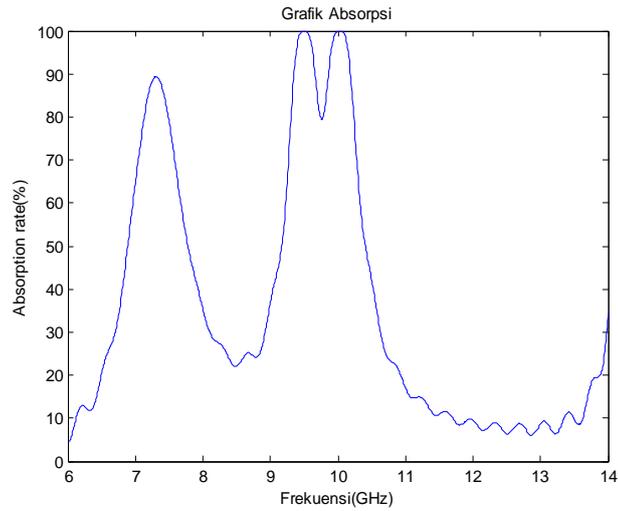
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.8$ mm, $a=8.1$ mm, $b=7.5$ mm, $g=3$ mm, $c=6.3$ mm, $d=5.7$ mm, $e=5.1$ mm, $l=0.5$ mm dan $f=4.5$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, *loss tangent* = 0.025 dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm.

Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 6 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 6 GHz hingga 14 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.35.



Gambar 3.35 Hasil S11-parameter Unit sel 6

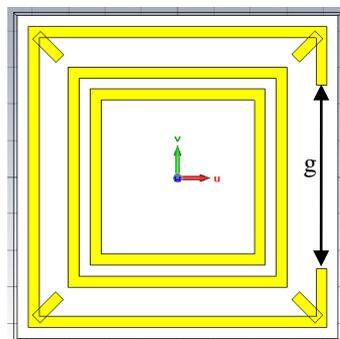
Selanjutnya, untuk menentukan nilai *absorption rate*, dapat dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A=1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.36.



Gambar 3.36 Grafik *absorption rate* Unit sel 6

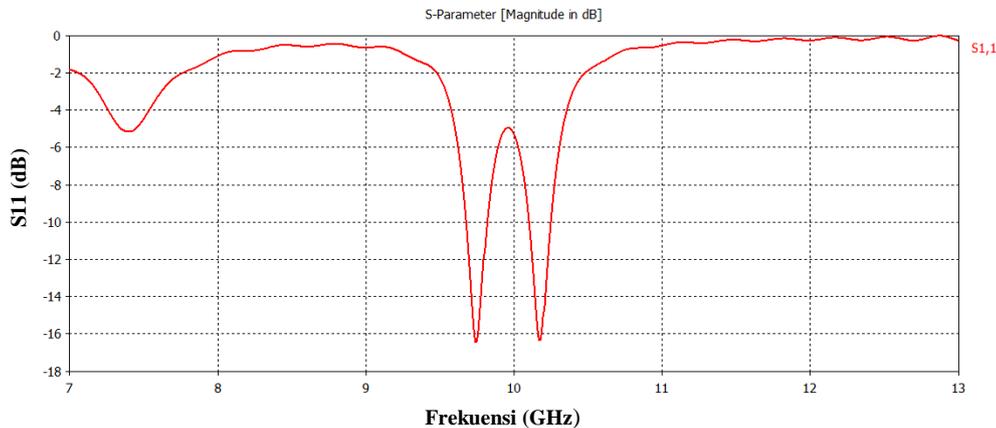
Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.36 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 7.136 GHz hingga 7.488 GHz dengan *bandwidth* sebesar 352 MHz, band 2 terletak pada frekuensi 9.312 GHz hingga 9.736 GHz dengan *bandwidth* sebesar 424 MHz dan band 3 terletak pada frekuensi 9.784 GHz hingga 10.232 GHz dengan *bandwidth* sebesar 448 MHz Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 7.304 GHz, 9.504 GHz, dan 10.024 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 89.305 %, 99.97 % dan 99.96 %.

Kemudian, dilakukan modifikasi desain unit sel 5 dengan menambah besar gap pada ring 1 *rectangular ring resonator*. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh gap terhadap perubahan nilai S11-parameter. Hasil modifikasi desain unit sel 6 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.37.



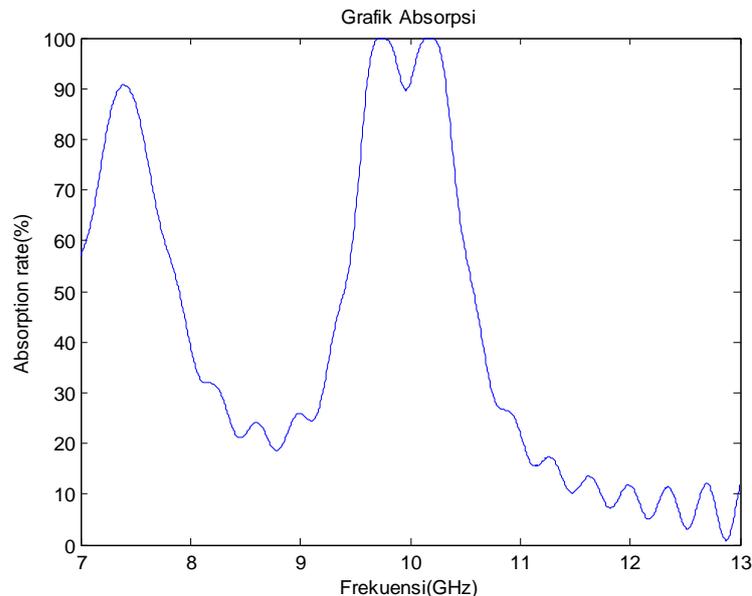
Gambar 3.37 Modifikasi Unit sel 6 Tampak depan

Dimana, lebar gap diubah dari sebelumnya yaitu sebesar 3.5 mm. Hasil simulasi pada modifikasi unit sel 6 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 13 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.38.



Gambar 3.38 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 6

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.39.



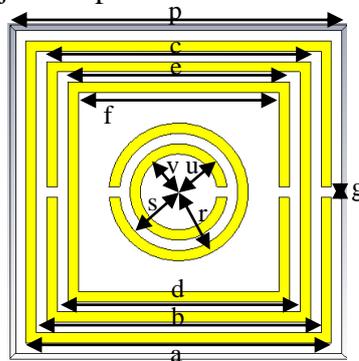
Gambar 3.39 Grafik *absorption rate* modifikasi Unit sel 6

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.39 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi

7.228 GHz hingga 7.57 GHz dengan *bandwidth* sebesar 342 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.562 GHz hingga 10.372 GHz dengan *bandwidth* sebesar 810 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 7.396 GHz, 9.724 GHz, dan 10.174 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 90.7 %, 99.9 % dan 99.946 %.

3.3.7 Unit Sel 7

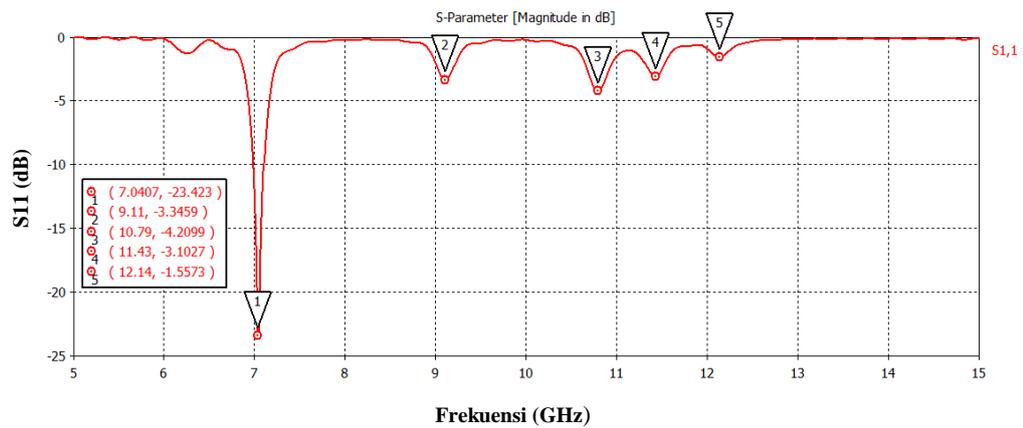
Pada desain unit sel 7 ini melakukan modifikasi dari bentuk SRR yaitu gabungan dari tiga bentuk *rectangular ring resonator* dan dua bentuk *circular ring resonator* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.40.



Gambar 3.40 Unit sel 7 Tampak depan

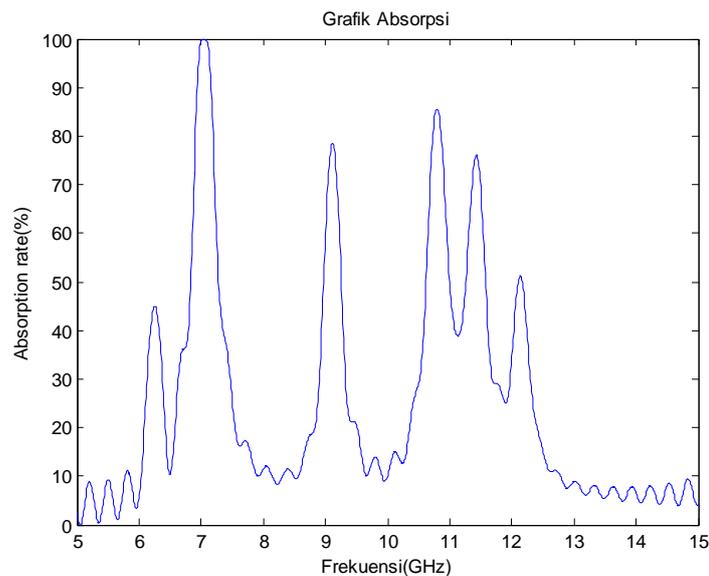
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 9.36$ mm, $a=8.76$ mm, $b=8.16$ mm, $g=0.3$ mm, $c=7.56$ mm, $d=6.96$ mm, $e=6.36$ mm, $f=5.76$ mm, $r=2$ mm, $s=1.7$ mm., $u=1.4$ mm, dan $v=1.1$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, *loss tangent* = 0.025 dan tebal *copper* sebesar 0.8 mm.

Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio 2012 ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 7 dengan CST Studio 2012 menggunakan time domain solver (TDS) dengan rentang frekuensi antara 5GHz hingga 15 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.41.



Gambar 3.41 Hasil S11-parameter Unit sel 7

Untuk menentukan nilai *absorption rate*, dapat dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.42.



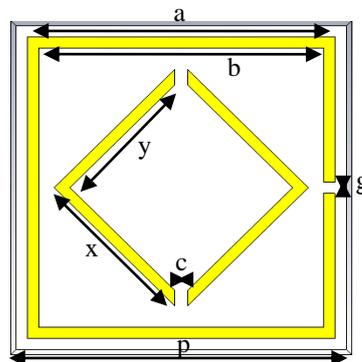
Gambar 3.42 Grafik *absorption rate* Unit sel 7

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.42 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 6.91 GHz hingga 7.19 GHz dengan *bandwidth* sebesar 280 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 10.73 GHz hingga 10.86 GHz dengan *bandwidth* sebesar 130 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada enam band frekuensi yaitu pada frekuensi 6.25 GHz, 7.05 GHz, 9.11 GHz, 10.8 GHz, 11.43 GHz dan 12.13 GHz

dengan *absorption rate* masing-masing 45.031 %, 99.99 %, 78.58 %, 85.61 %, 76.04 % dan 51.21 %. Sedangkan, *absorption rate* yang memenuhi batas minimum 80 % hanya dua band frekuensi saja yaitu frekuensi 7.05 GHz dan 10.8 GHz dengan masing-masing *peak absorption* 99.99 % dan 85.61 %.

3.3.8 Unit Sel 8

Pada desain unit sel 8 ini dilakukan modifikasi dengan bentuk SRR yaitu gabungan dari *Rectangular Ring Resonator* dengan *diamond shape* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.43.



Gambar 3.43 Unit sel 8 Tampak depan

Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.8$ mm, $a=8.2$ mm, $b=7.6$ mm, $g=0.3$ mm, $x=4.8$ mm, $y=4.2$ mm dan $c=0.26$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, *loss tangent* = 0.025 dan tebal *copper* sebesar 1.6 mm.

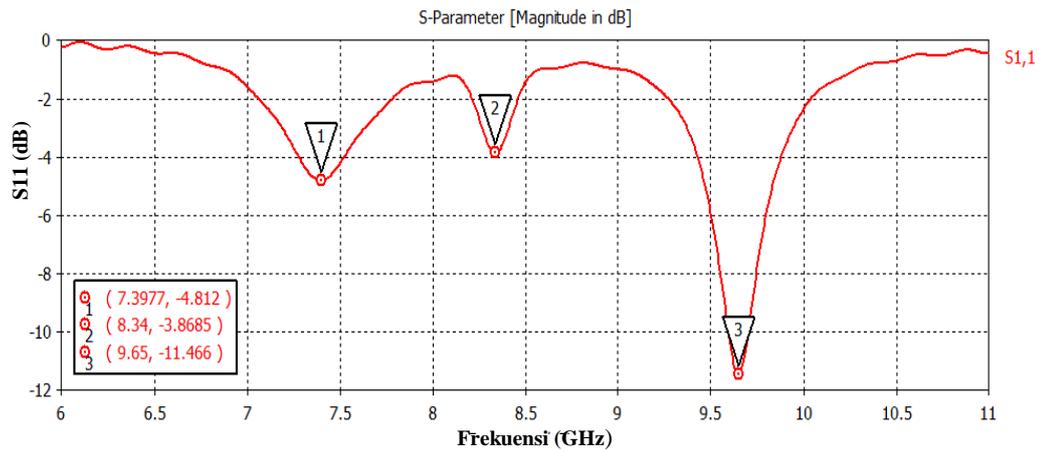
Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 8 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 6 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.44.

Secara teoritis, dimensi pada *rectangular ring resonator* tersebut dapat dihitung frekuensi resonansinya dengan persamaan SRR sebagai berikut.

$$f_a \approx \frac{c}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2}$$

$$f_a \approx \frac{3 \times 10^8}{2(8.2 \times 10^{-3} + 7.6 \times 10^{-3}) - 0.3 \times 10^{-3}} \left(\frac{1 + 4.6}{2 \times 4.6} \right)^{1/2}$$

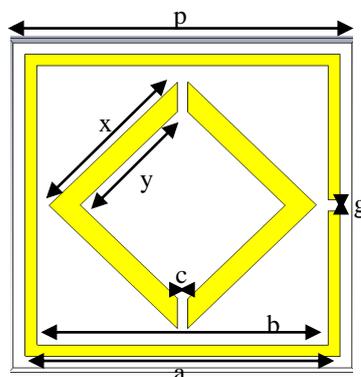
$$f_a \approx 7.47 \times 10^9 \text{ Hz} = 7.47 \text{ GHz}$$



Gambar 3.44 Hasil S11-parameter Unit sel 8

Hasil perhitungan frekuensi resonansi pada bentuk *rectangular ring resonator* hampir sama dengan hasil simulasi S11 di CST Studio 2012 pada gambar 3.44, dimana hasil simulasi pada band 1 menunjukkan frekuensi 7.397 GHz.

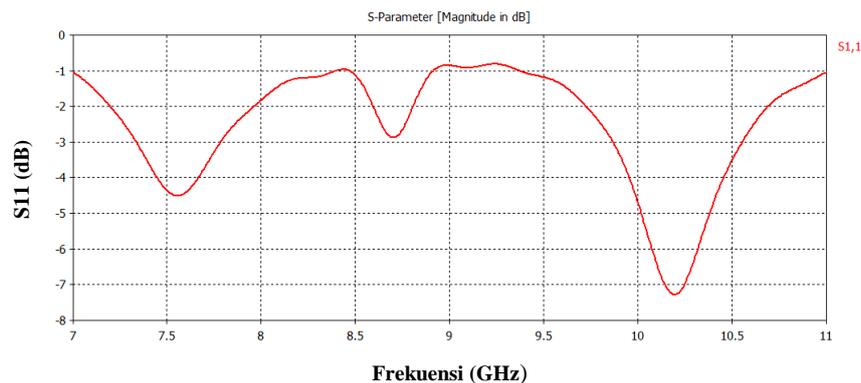
Kemudian, dilakukan modifikasi desain unit sel 8 dengan mengubah dimensi bentuk *rectangular* dan lebar *copper* bentuk *diamond shape* (y) menjadi 3.68 mm. Hasil desain metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 3.45.



Gambar 3.45 Unit sel 8 modifikasi Tampak depan

Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.6 \text{ mm}$, $a=8 \text{ mm}$, $b=7.4 \text{ mm}$, $g=0.3 \text{ mm}$, $x=4.2 \text{ mm}$, $y=3.68 \text{ mm}$ dan $c=0.3 \text{ mm}$. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $loss \ tangent = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 1.6 mm .

Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 8 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 7 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.46.



Gambar 3.46 Hasil S11-parameter modifikasi Unit sel 8

Secara teori, dimensi pada *rectangular ring resonator* dapat dihitung frekuensi resonansinya sebagai berikut.

$$f_a \approx \frac{c}{2(L_1 + L_2)} \left(\frac{1 + \epsilon_r}{2\epsilon_r} \right)^{1/2}$$

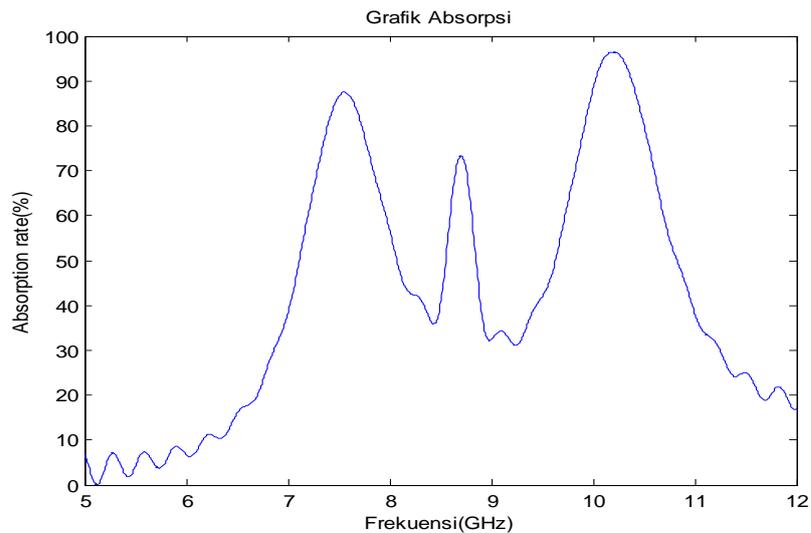
$$f_a \approx \frac{3 \times 10^8}{2(8 \times 10^{-3} + 7.4 \times 10^{-3}) - 4.45 \times 10^{-3}} \left(\frac{1 + 4.6}{2 \times 4.6} \right)^{1/2}$$

$$f_a \approx 8.88 \times 10^9 \text{ Hz} = 8.88 \text{ GHz}$$

Hasil perhitungan frekuensi resonansi pada bentuk *rectangular ring resonator* hampir sama dengan hasil simulasi S11 di CST Studio 2012 seperti

ditunjukkan pada Gambar 3.46, dimana hasil simulasi pada band 2 menunjukkan frekuensi 8.7 GHz

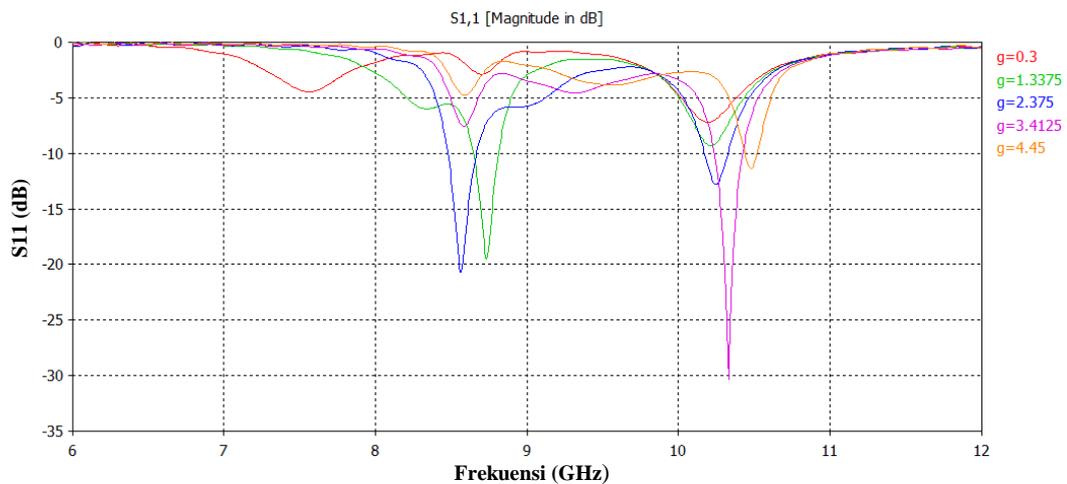
Kemudian, dilakukan penentuan nilai *absorption rate*, dapat dilakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A = 1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.47.



Gambar 3.47 Grafik *absorption rate* modifikasi unit sel 8

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.47 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % pada band 1 terletak pada frekuensi 7.394 GHz hingga 7.723 GHz dengan *bandwidth* sebesar 329 MHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.92 GHz hingga 10.5 GHz dengan *bandwidth* sebesar 580 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 7.55 GHz, 8.703 GHz, dan 10.19 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 87.49 %, 73.39 % dan 96.5 %. Sedangkan, *peak absorption* yang memenuhi batas minimum hanya ada dua band frekuensi yaitu 7.55 GHz dan 10.19 GHz.

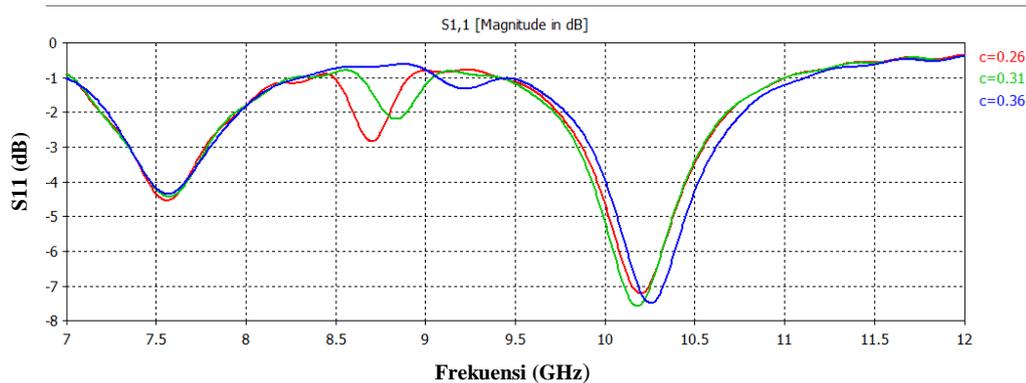
Modifikasi desain unit sel 8 dilakukan dengan menambah besarnya gap pada ring 1 *rectangular ring resonator*. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh gap terhadap perubahan nilai S11-parameter. Hasil modifikasi desain unit sel 8 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.48.



Gambar 3.48 Hasil S11-parameter variasi lebar gap bentuk *rectangular*

Gambar 3.48 menunjukkan bahwa variasi lebar gap pada bentuk *rectangular* berpengaruh pada hasil simulasi S11, dimana semakin besar lebar gap, maka semakin besarnya tingkat kecuraman nilai S11 serta mengalami pergeseran ke frekuensi yang lebih besar.

Modifikasi berikutnya pada desain unit sel 8 ini dilakukan dengan menambah besarnya gap pada ring 2 pada bentuk *diamond shape*. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh besar gap terhadap perubahan nilai S11-parameter. Hasil modifikasi desain unit sel 8 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.49.



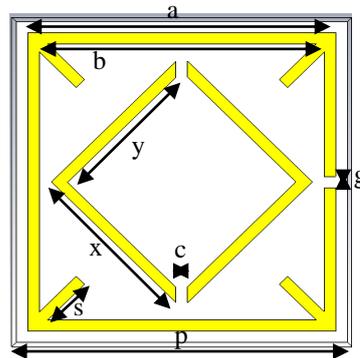
Gambar 3.49 Hasil S11-parameter variasi lebar gap bentuk belah ketupat

Gambar 3.49 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi oleh variasi lebar gap pada bentuk belah ketupat, dimana semakin besar lebar gap, maka mengalami pergeseran ke frekuensi yang lebih besar dan berpengaruh pada

besarnya tingkat kecuraman nilai S11 yaitu pada band 1 dan band 2 mengalami penurunan tingkat kecuraman nilai S11, tetapi band 3 hampir konstan nilai S11.

3.3.9 Unit Sel 9

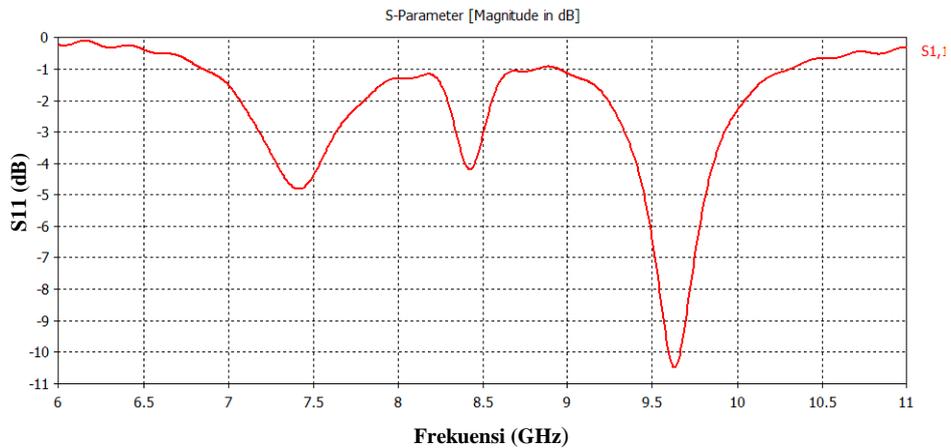
Pada desain unit sel 9 ini dilakukan modifikasi dengan bentuk SRR yaitu gabungan dari *Rectangular Ring Resonator* dengan *diamond shape* dan menambah strip bentuk persegi panjang pada tiap titik sudut ring *rectangular* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.50.



Gambar 3.50 Unit sel 9 Tampak depan

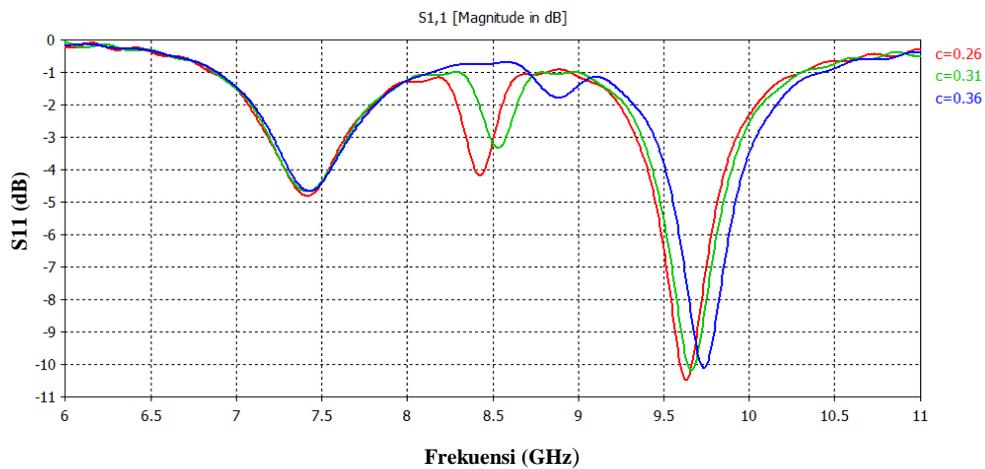
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.6$ mm, $a = 8$ mm, $b = 7.4$ mm, $g = 0.3$ mm, $x = 4.8$ mm, $y = 4.2$ mm, $s = 1.5$ mm dan $c = 0.26$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, $loss\ tangent = 0.025$ dan tebal *copper* sebesar 1.6 mm.

Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio 2012 ini menggunakan prinsip *periodic boundary condition*, dimana bagian atas dan bawah unit sel dengan bahan *perfect electric conductor* ($E_t = 0$), tetapi pada bagian samping kiri dan kanan menyentuh bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t = 0$), sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 9 dengan CST Studio 2012 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 6 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.51.



Gambar 3.51 Hasil S11-parameter Unit sel 9

Kemudian, dilakukan modifikasi pada lebar gap dari bentuk belah ketupat dengan menggunakan fitur teknik *sweeping* pada CST Studio 2012 dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi lebar *gap* pada frekuensi kerja. Variasi lebar *gap* yang dilakukan adalah 0.26 mm, 0.31 mm dan 0.36 mm. Hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.52.

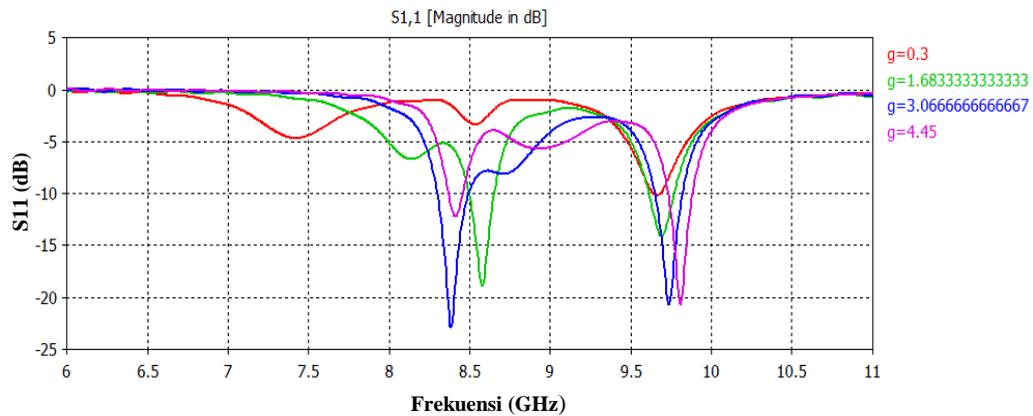


Gambar 3.52 Hasil S11-parameter unit sel 9 variasi lebar gap belah ketupat

Gambar 3.52 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi oleh variasi lebar gap belah ketupat, dimana semakin besar gap dari bentuk belah ketupat, maka terjadi pergeseran ke frekuensi yang lebih besar dan mengalami penurunan tingkat kecuraman pada nilai S11.

Selanjutnya, dilakukan modifikasi pada lebar *gap* pada bentuk *rectangular* dengan tujuan untuk mengetahui perubahan lebar *gap* tersebut pada frekuensi

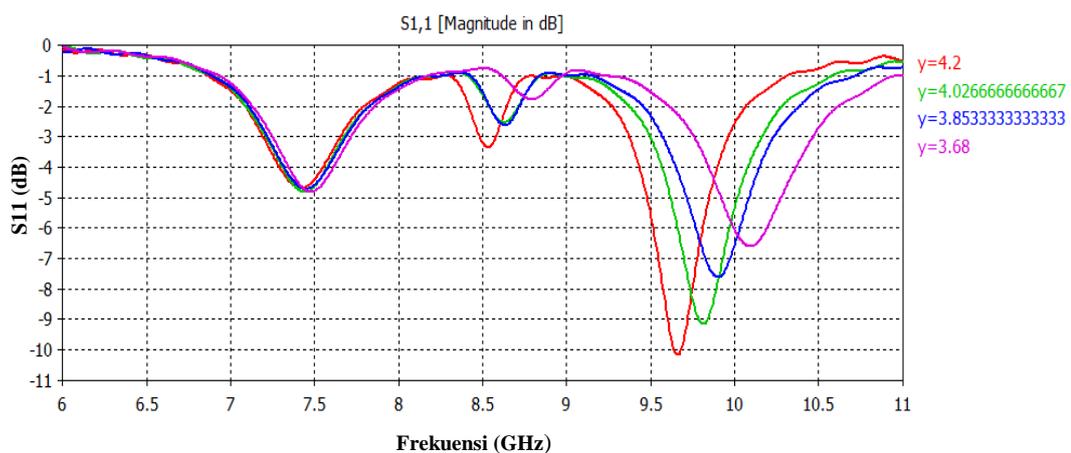
kerja. Untuk variasi lebar *gap* terdiri dari 0.3 mm, 1.683 mm, 3.067 mm dan 4.45 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.53.



Gambar 3.53 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi lebar *gap rectangular*

Gambar 3.53 menunjukkan bahwa variasi lebar *gap rectangular* berpengaruh pada hasil S11, yang mana semakin besar *gap*, maka semakin besar pula pergeseran frekuensinya dan besarnya tingkat kecuraman nilai S11, serta besarnya lebar *bandwidth* ketika diukur pada batas minimum untuk S11 pada metamaterial absorber ini yaitu ≤ -3.5 dB.

Dilakukan modifikasi pada lebar *copper* bentuk belah ketupat dengan tujuan untuk mengetahui perubahan lebar *copper* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi lebar *copper* terdiri dari 3.68 mm, 3.853 mm, 4.026 mm dan 4.2 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.54.

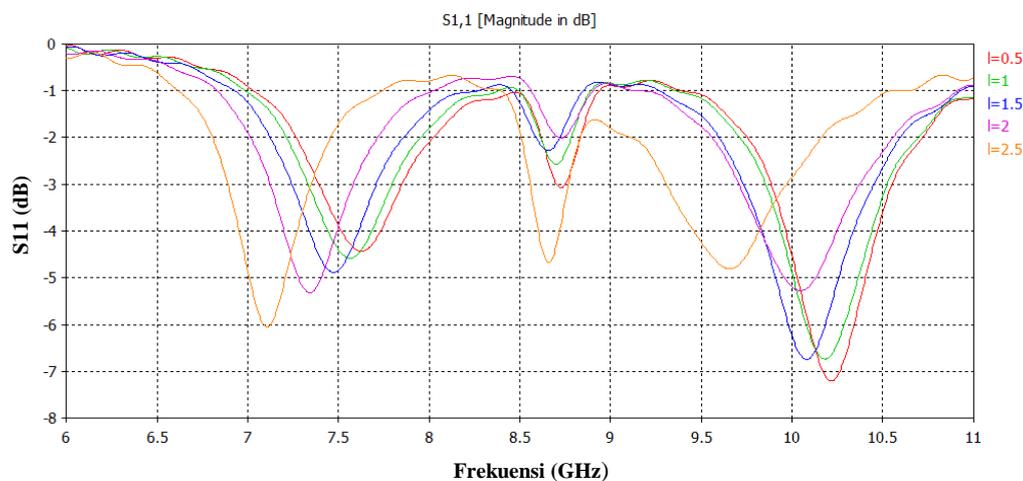


Gambar 3.54 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi lebar *copper* belah ketupat

Gambar 3.54 menunjukkan bahwa hasil simulasi dipengaruhi oleh variasi lebar *copper* belah ketupat, dimana semakin besar lebar *copper* pada belah

ketupat, maka mengalami peningkatan besarnya kecuraman dari nilai S11 pada band 2 dan band 3, sedangkan pada band 1 mempunyai besar nilai konstan karena dipengaruhi oleh bentuk *rectangular*.

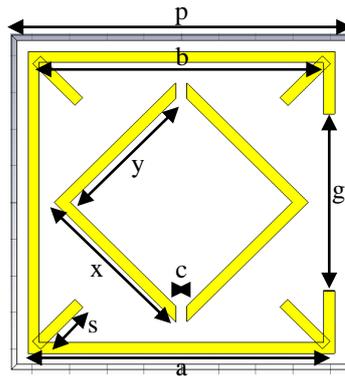
Selanjutnya, dilakukan modifikasi pada panjang strip *copper* penambahan dari bentuk *rectangular* dengan tujuan untuk mengetahui perubahan panjang strip *copper* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi panjang strip *copper* terdiri dari 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, dan 2.5 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.55.



Gambar 3.55 Hasil S11-parameter Unit sel 9 variasi panjang strip *copper*

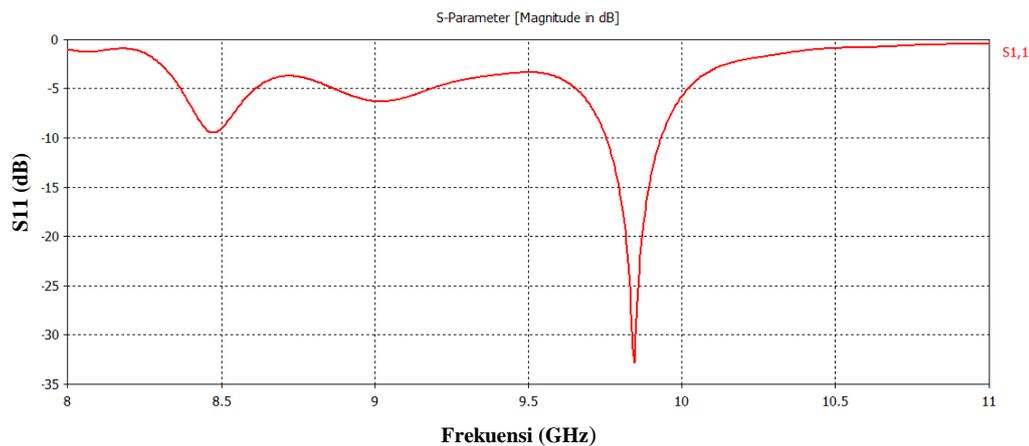
Gambar 3.55 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi dengan adanya variasi panjang strip *copper*, yang mana semakin besar panjang strip *copper*, maka mengalami pergeseran frekuensi yang lebih kecil dan terjadi peningkatan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 1, tetapi mengalami penurunan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 3.

Pada desain unit sel 9 ini dilakukan modifikasi dengan bentuk SRR yaitu bentuk *Rectangular Ring Resonator* dengan *diamond shape* dan menambah strip bentuk persegi panjang pada tiap titik sudut ring *rectangular* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.56.



Gambar 3.56 Unit sel 9 Tampak depan

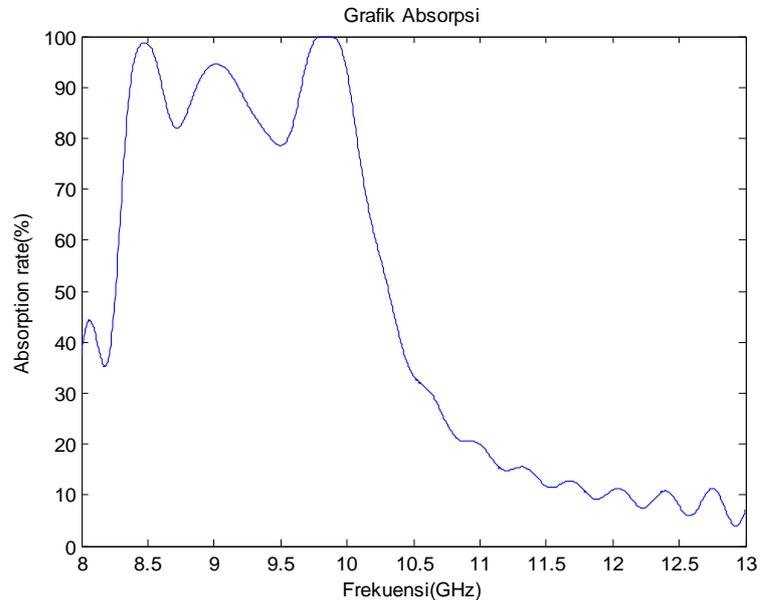
Dimensi dari masing-masing ukuran adalah $p = 8.8$ mm, $a=8.2$ mm, $b=7.6$ mm, $g=0.3$ mm, $x=4.8$ mm, $y=3.68$ mm, $s=1.5$ mm, $g=4.8$ dan $c=0.26$ mm. Untuk bahan substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai $\epsilon_r = 4.6$, *loss tangent* = 0.025 dan tebal *copper* sebesar 1.6 mm. Teknik simulasi metamaterial absorber dengan CST Studio ini menggunakan *prinsip periodic boundary condition*, dimana menggunakan bahan *perfect electric conductor* ($E_t=0$) pada bagian atas dan bawah unit sel, tetapi menggunakan bagian *perfect magnetic conductor* ($H_t=0$) pada bagian samping kiri dan kanan, sedangkan bagian depan dan belakang dengan posisi *open* karena sebagai arah datang gelombang dan pemasangan port. Hasil simulasi pada unit sel 9 dengan CST Studio 2012 menggunakan *time domain solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 8 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.57.



Gambar 3.57 Hasil S11-parameter unit sel 9

Kemudian, dilakukan penentuan nilai *absorption rate* dengan cara menghitung hasil dari S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=$

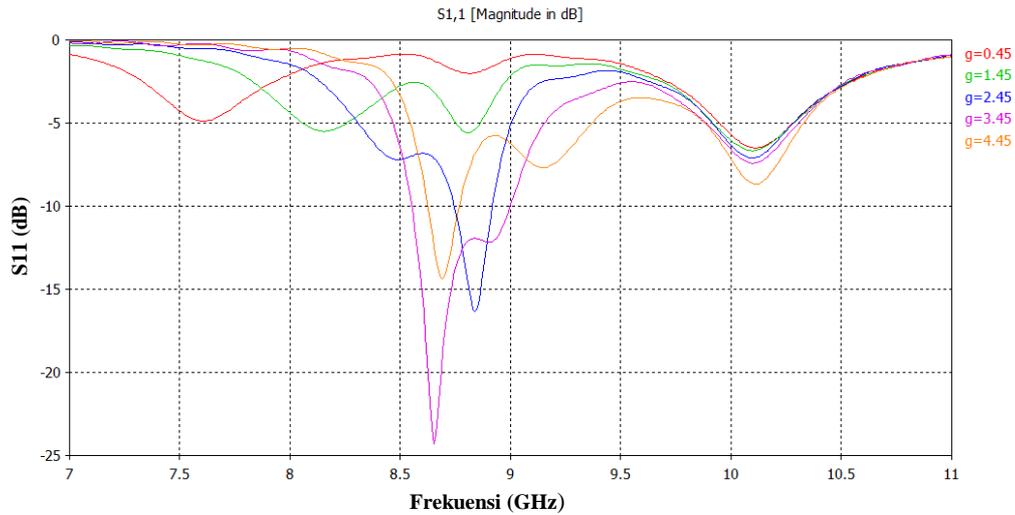
$1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitude S_{21} sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.58.



Gambar 3.58 Grafik *absorption rate* unit sel 9

Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.58 diatas, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % terletak pada frekuensi 8.335 GHz hingga 9.425 GHz dengan *bandwidth* sebesar 1.09 GHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.56 GHz hingga 10.075 GHz dengan *bandwidth* sebesar 515 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.475 GHz, 9.02 GHz, dan 9.85 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 98.73 %, 94.54 % dan 99.99 %.

Kemudian, dilakukan modifikasi lebar *gap* pada bentuk *rectangular* dengan menggunakan fitur teknik *sweeping* pada CST Studio 2012 dengan tujuan untuk mengetahui perubahan lebar *gap* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi lebar *gap* terdiri dari 0.45 mm, 1.45 mm, 2.45 mm, 3.45 mm dan 4.45 mm dengan hasil simulasi S_{11} -parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.59.



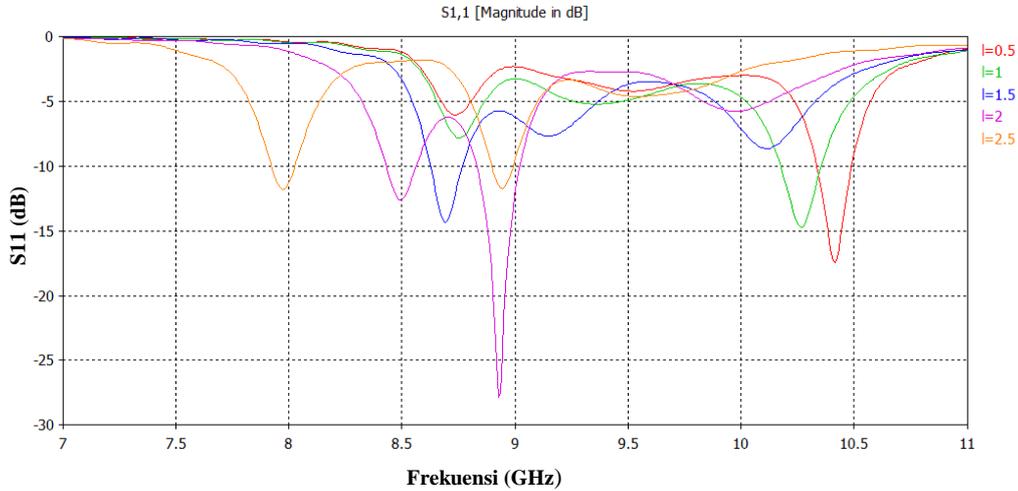
Gambar 3.59 Hasil S11-parameter unit sel 9 variasi lebar gap *rectangular*

Gambar 3.59 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi dengan adanya variasi lebar gap *rectangular*, dimana semakin besar gap, maka mempengaruhi besarnya tingkat kecuraman nilai S11 dan terjadi pergeseran ke frekuensi yang lebih besar, yang mana range frekuensi yang memenuhi spesifikasi yaitu antara 8.5 GHz hingga 10.5 GHz terletak pada besar gap sebesar 3.45 mm dan 4.45 mm, sedangkan ketika dilihat dari besarnya lebar bandwidth untuk besar gap yang memenuhi terletak pada besar gap 4.45 mm karena dilihat dari batas minimum untuk S11 pada metamaterial absorber ini yaitu ≤ -3.5 dB.

Selanjutnya, dilakukan modifikasi pada panjang strip *copper* penambahan dari bentuk *rectangular* dengan tujuan untuk mengetahui perubahan panjang strip *copper* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi panjang strip *copper* terdiri dari 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, dan 2.5 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.60.

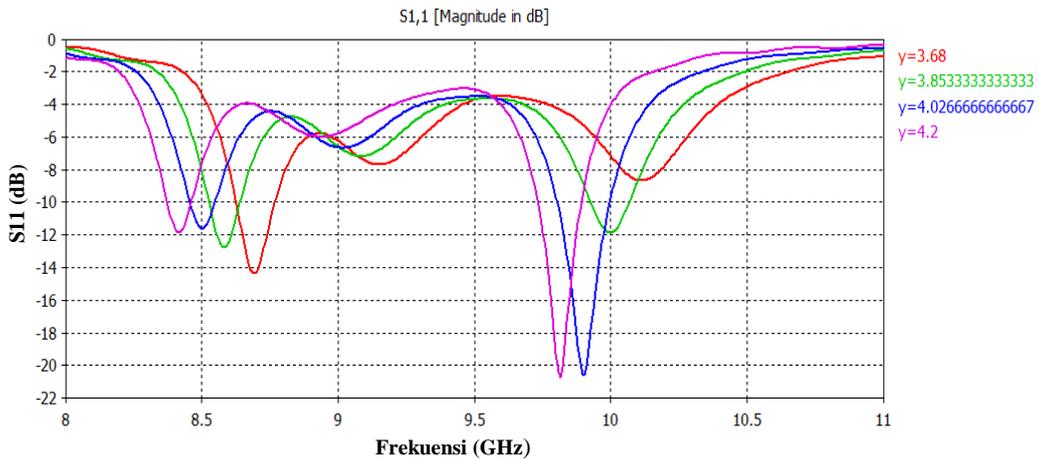
Gambar 3.60 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi dengan adanya variasi panjang strip *copper*, yang mana semakin besar panjang strip *copper*, maka mengalami pergeseran frekuensi yang lebih kecil dan terjadi peningkatan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 1, tetapi mengalami penurunan tingkat kecuraman nilai S11 pada band 3. Dari hasil S11 dengan variasi panjang strip *copper rectangular* yang memenuhi spesifikasi range frekuensi berada pada panjang strip *copper* yaitu 0.5 mm, 1 mm dan 1.5 mm,

tetapi ketika dilihat dari batas minimum untuk S11 pada metamaterial absorber ini yaitu ≤ -3.5 dB, panjang strip *copper* yang memenuhi yaitu 1.5 mm.



Gambar 3.60 Hasil S11 unit sel 9 variasi panjang strip *copper* *rectangular*

Dilakukan modifikasi berikutnya pada lebar *copper* bentuk belah ketupat dengan tujuan untuk mengetahui perubahan lebar *copper* tersebut pada frekuensi kerja. Untuk variasi lebar *copper* terdiri dari 3.68 mm, 3.853 mm, 4.026 mm dan 4.2 mm dengan hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.61.

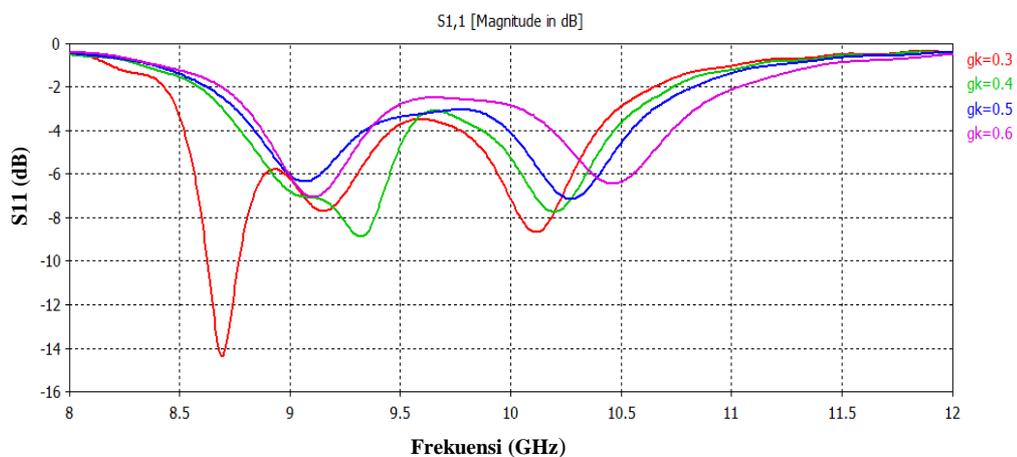


Gambar 3.61 Hasil S11 unit sel 9 variasi lebar *copper* belah ketupat

Gambar 3.61 menunjukkan bahwa hasil simulasi dipengaruhi oleh variasi lebar *copper* belah ketupat, dimana semakin besar lebar copper pada belah ketupat, maka mengalami peningkatan besarnya kecuraman dari nilai S11 pada

band 3, sedangkan terjadi penurunan tingkat kecuraman dari nilai S11 pada band 1 dan band 2. Ketika dilihat dari spesifikasi range frekuensi dan batas minimum S11 untuk metamaterial absorber yang memenuhi syarat adalah pada lebar *copper* sebesar 3.68 mm.

Kemudian, dilakukan modifikasi pada lebar gap dari bentuk belah ketupat dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi lebar *gap* pada frekuensi kerja. Variasi lebar *gap* yang dilakukan adalah 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm dan 0.6 mm. Hasil simulasi S11-parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 3.62.

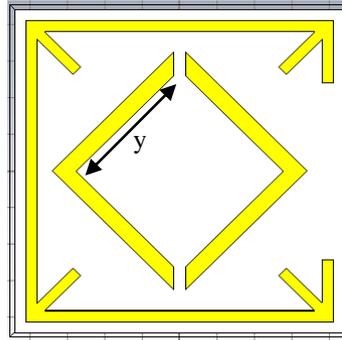


Gambar 3.62 Hasil S11 unit sel 9 variasi lebar *gap* bentuk belah ketupat

Gambar 3.62 menunjukkan bahwa hasil simulasi S11 dipengaruhi oleh variasi lebar gap belah ketupat, dimana semakin besar gap dari bentuk belah ketupat, maka terjadi pergeseran ke frekuensi yang lebih besar dan mengalami penurunan tingkat kecuraman pada nilai S11. Dari hasil S11 unit sel 9 variasi lebar *gap* bentuk belah ketupat yang memenuhi spesifikasi range frekuensi antara 8.5 GHz hingga 10.5 GHz dan batas minimum nilai S11 untuk metamaterial absorber yaitu ≤ -3.5 dB terletak pada besarnya lebar gap = 0.3 mm.

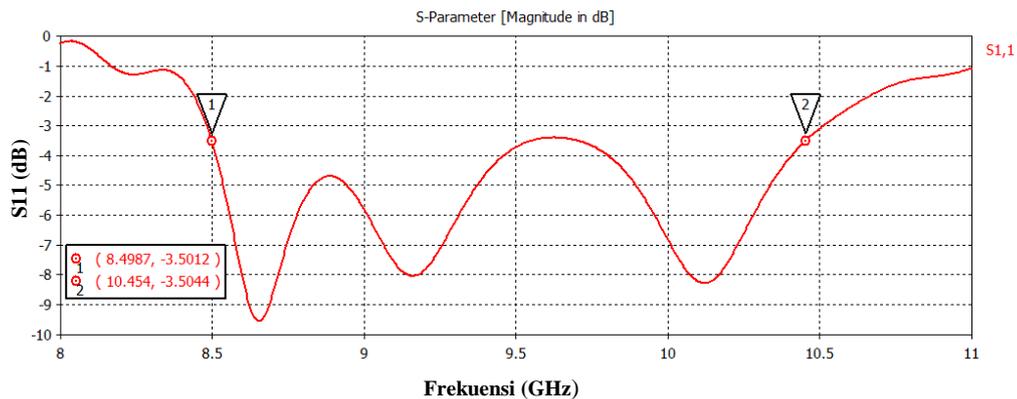
3.3.10 Unit Sel 10

Dilakukan modifikasi dari desain unit sel 9 dengan menambah lebar copper pada ring 2 bentuk *diamond shape* (y). Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh lebar terhadap perubahan nilai S11-parameter. Hasil desain unit sel 10 seperti *copper* ditunjukkan pada Gambar 3.63.



Gambar 3.63 Unit sel 10 Tampak depan

Dimana, lebar copper pada ring 2 bentuk *diamond shape* diubah dari sebelumnya 4.2 mm pada unit sel 9 menjadi sebesar 3.68 mm. Hasil simulasi unit sel 10 dengan CST Studio 2012 menggunakan time domain solver (TDS) dengan rentang frekuensi antara 8 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.64.

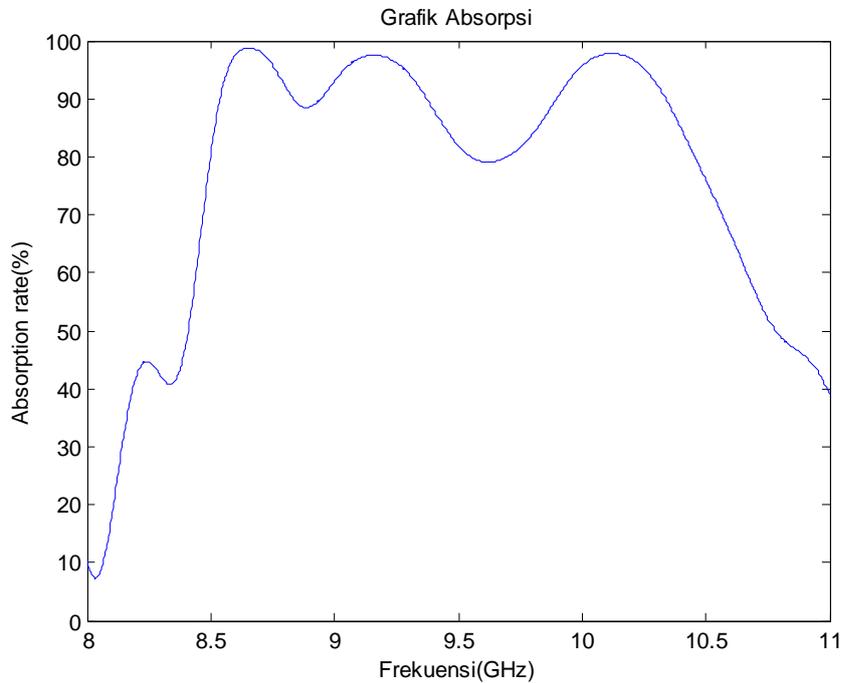


Gambar 3.64 Hasil S11-parameter unit sel 10

Kemudian, hasil dari S11-parameter dilakukan untuk menentukan nilai *absorption rate* dengan cara menghitung dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$. Karena nilai magnitude S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A=1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.65.

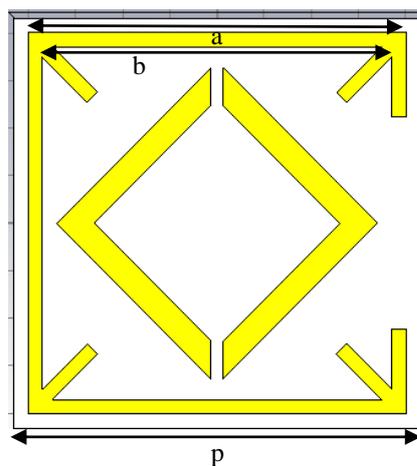
Dari grafik absorpsi pada Gambar 3.65, diketahui bahwa untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % terletak pada frekuensi 8.501 GHz hingga 9.551 GHz dengan *bandwidth* sebesar 1.05 GHz dan band 2 terletak pada frekuensi 9.701 GHz hingga 10.454 GHz dengan *bandwidth* sebesar 753 MHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi

8.654 GHz, 9.16 GHz, dan 10.12 GHz dengan *absorption rate* masing-masing 98.77 %, 97.54 % dan 97.79 %.



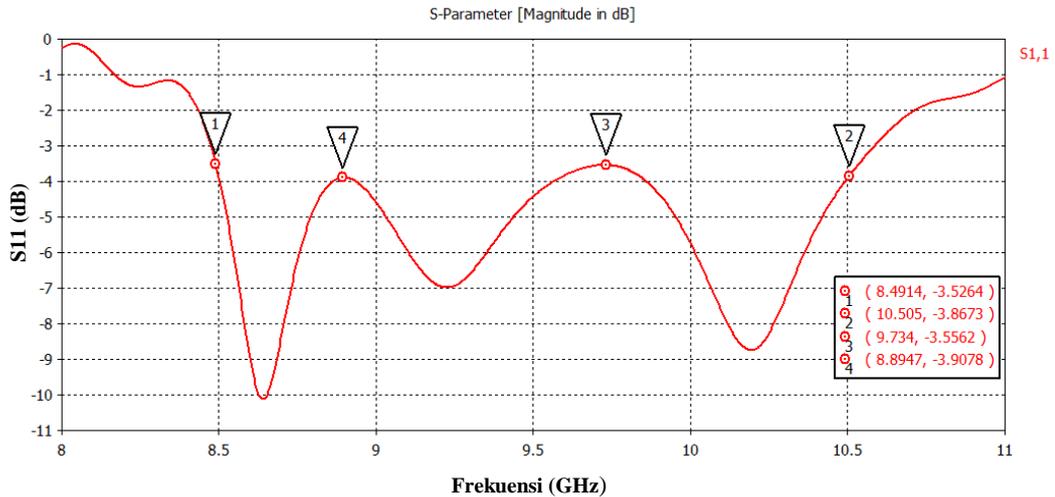
Gambar 3.65 Grafik *absorption rate* unit sel 10

Selanjutnya, dilakukan modifikasi desain unit sel 10 dengan mengubah lebar substrat (p) menjadi 8.6 mm dan nilai panjang *copper* a dan b diubah yaitu 8 mm dan 7.6 mm. Hasil modifikasi desain metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 3.66.



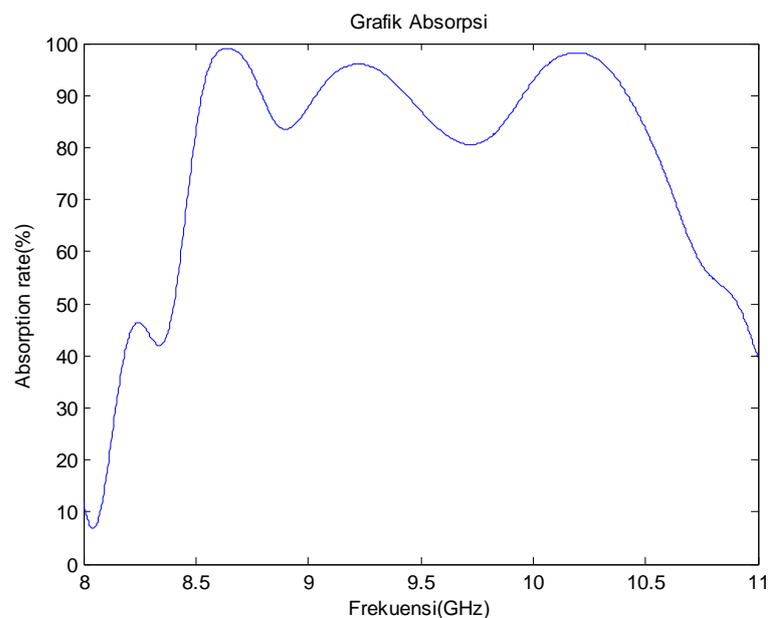
Gambar 3.66 Desain Unit sel 10 hasil modifikasi Tampak depan

Hasil simulasi pada modifikasi unit sel 10 dengan CST Studio 2012 menggunakan *Time Domain Solver* (TDS) dengan rentang frekuensi antara 8 GHz hingga 11 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 3.67.



Gambar 3.67 Hasil S11-parameter unit sel 10 hasil modifikasi

Kemudian, dilakukan penentuan nilai *absorption rate* dengan melakukan perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ karena nilai magnitudo S21 sebesar 0. Maka persamaannya menjadi $A=1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 3.68.



Gambar 3.68 Grafik *absorption rate* unit sel 10 hasil modifikasi

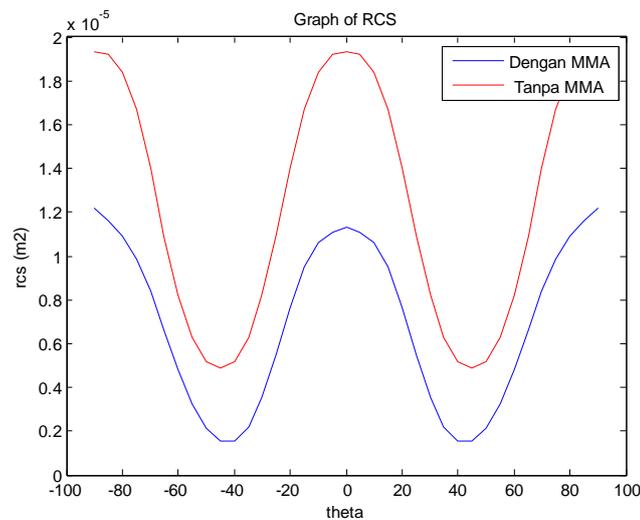
Dari grafik absorpsi dalam Gambar 3.68 menunjukkan bahwa unit sel 10 hasil modifikasi telah memenuhi spesifikasi dari perancangan metamaterial absorber, dimana untuk batas minimum *absorption rate* sebesar 80 % terletak pada frekuensi 8.492 GHz hingga 10.538 GHz dengan *bandwidth* sebesar 2.046 GHz. Untuk *peak absorption* terletak pada tiga band frekuensi yaitu pada frekuensi 8.642 GHz, 9.227 GHz, dan 10.193 GHz dengan *absorption rate* masing-masing yaitu 99.06 %, 96.002 % dan 98.22 %.

3.4 Radar Cross Section (RCS)

3.4.1 Hasil Simulasi RCS

Untuk menentukan nilai *radar cross section* dapat dilakukan simulasi dengan CST Microwave Studio 2012, dimana diinputkan range sudut yang ingin ditentukan nilai RCS nya. Pada simulasi ini diinputkan range sudut antara -90° hingga 90° . Satuan dari RCS pada simulasi CST yaitu *linearsm* diartikan sebagai *linear square meter* atau m^2 . Untuk nilai RCS hasil simulasi dari unit sel 10 hasil modifikasi seperti ditunjukkan pada gambar 3.69.

Gambar 3.69 menunjukkan grafik hasil simulasi rcs terhadap sudut (theta), dimana dilakukan perbandingan antara hasil simulasi RCS dengan metamaterial absorber dan RCS tanpa menggunakan metamaterial absorber. Pada grafik ditunjukkan bahwa besar nilai RCS dengan metamaterial absorber lebih kecil dibandingkan dengan nilai RCS tanpa menggunakan metamaterial absorber.



Gambar 3.69 Grafik RCS unit sel 10 hasil modifikasi

Gambar 3.69 menunjukkan bahwa pada sudut 0° nilai RCS yang dihasilkan ketika menggunakan metamaterial absorber (MMA) yaitu $1.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, Sedangkan nilai RCS yang dihasilkan tanpa menggunakan metamaterial absorber pada sudut 0° yaitu $1.93 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Dari nilai RCS pada sudut 0° menunjukkan bahwa nilai RCS menggunakan metamaterial absorber lebih kecil nilainya dibandingkan nilai RCS tanpa menggunakan metamaterial absorber dengan persentase penurunan nilai RCS sebesar 58.22 %.

3.4.2 Perhitungan RCS secara teori

Untuk menghitung nilai RCS secara teori dari desain metamaterial absorber unit sel 10 hasil modifikasi dapat menggunakan persamaan maksimum RCS dengan bentuk *flat plate* seperti berikut [1] :

$$RCS_{\max} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2}$$

Dimana, a merupakan panjang dimensi metamaterial absorber dan b merupakan lebar dimensi metamaterial absorber. Pada desain metamaterial absorber menggunakan dimensi $a=b=8.6 \text{ mm}$, range frekuensi 8.5 hingga 10.5 GHz (frekuensi tengah = 9.5 GHz), sehingga perhitungan RCS maksimum yaitu

$$RCS_{\max} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2}$$

$$RCS_{\max} = \frac{4\pi(8.6 \times 10^{-3} \times 8.6 \times 10^{-3})^2}{(0.032)^2}$$

$$RCS_{\max} = 6.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

3.4.3 Perbandingan RCS simulasi dan teori

Dari nilai *radar cross section* (rcs) dari hasil simulasi dengan CST Microwave Studio 2012 dan perhitungan secara teori dapat dibuat tabel perbandingannya seperti ditunjukkan pada tabel 3.3.

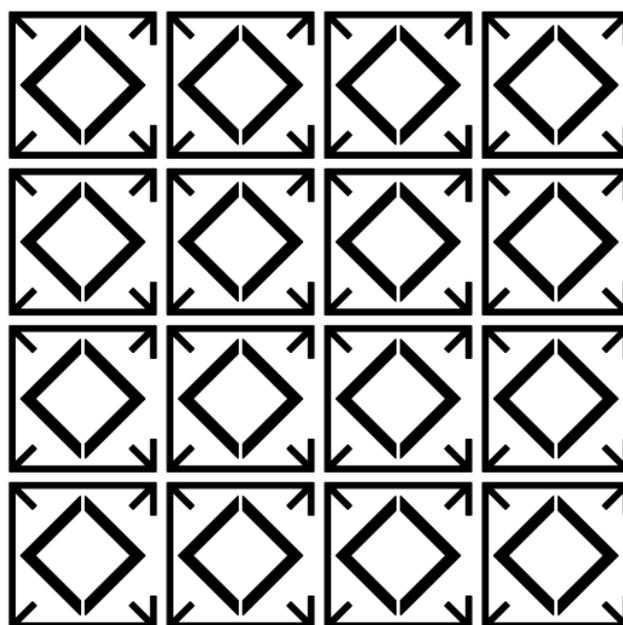
Tabel 3.3 menunjukkan bahwa nilai RCS hasil simulasi telah memenuhi spesifikasi RCS maksimum. Hal ini dikarenakan nilai RCS hasil simulasi lebih kecil nilainya dari batas RCS maksimum pada hasil perhitungan teori sesuai dengan range frekuensi yang digunakan.

Tabel 3.3 Perbandingan RCS simulasi dengan Teori

Frekuensi	RCS maksimum (Teori)	RCS hasil simulasi
8.5 GHz	$5.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
9.5 GHz	$6.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	
10.5 GHz	$8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	

3.5 Penggabungan Unit Sel dan Fabrikasi

Tahapan setelah terpilih unit sel 10 hasil modifikasi, maka dilakukan penggabungan unit sel yang telah didesain dan disimulasikan serta dioptimalkan menjadi satu lembaran yang siap difabrikasi dengan menggunakan bahan substrat FR4 berukuran 30 cm x 30 cm x 1.6 mm. Untuk jarak antar unit sel dilakukan dengan cara berhimpitan antar unit sel dengan tujuan agar sesuai dengan desain simulasi unit sel. Dengan menggunakan dimensi sel yang telah dirancang, terdapat 34 unit sel pada posisi vertikal dan 34 unit sel pada posisi horizontal. Gambaran sampel gabungan dari unit sel 10 hasil modifikasi seperti Gambar 3.70.



Gambar 3.70 Sampel Gabungan Unit sel 10 hasil modifikasi Tampak Depan

Untuk hasil fabrikasi dari penggabungan unit sel terdapat 34 unit sel pada posisi vertikal dan 34 unit sel pada posisi horizontal, dengan bagian depan seperti pada pola desain simulasi, sedangkan bagian belakang terdiri dari *full copper* yang

bertujuan sebagai *ground plane*. Hasil fabrikasi metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 3.71.



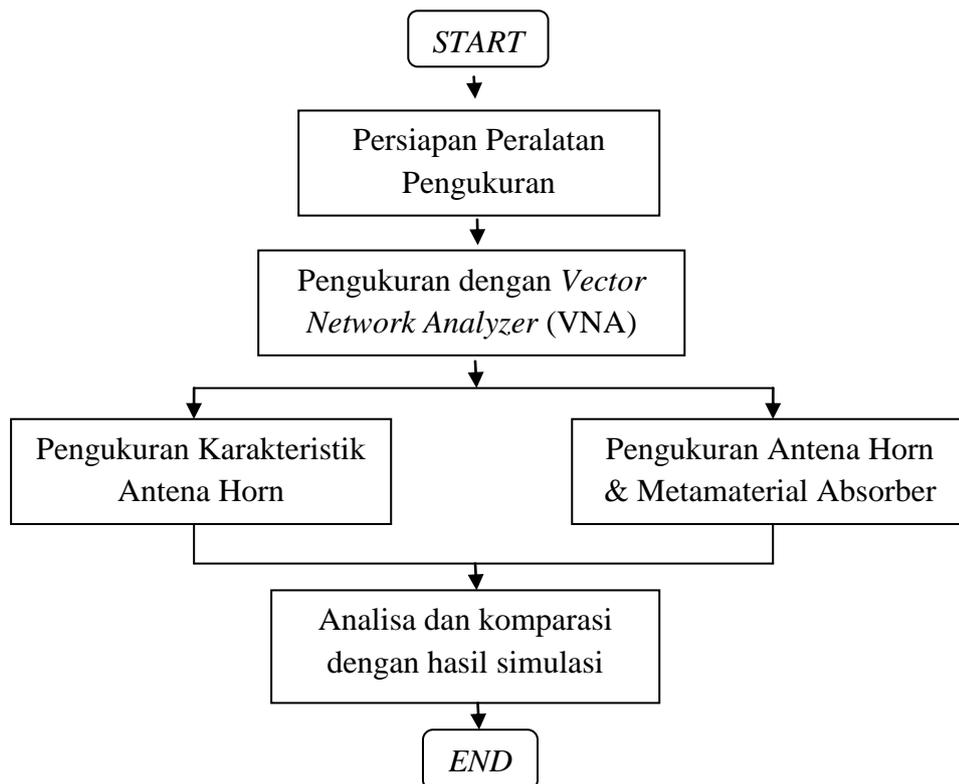
Gambar 3.71 Hasil Fabrikasi gabungan unit sel 10 hasil modifikasi

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada tahap pengujian ini, Metamaterial Absorber yang telah dibuat akan diuji untuk memperoleh nilai performanya. Pengujian dilakukan dengan mengukur parameter-parameter diantaranya adalah S-parameter dan perhitungan absorption rate.

Pengujian terhadap parameter-parameter 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 antenna horn sebagai antenna referensi. Secara ringkas dijelaskan pada diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



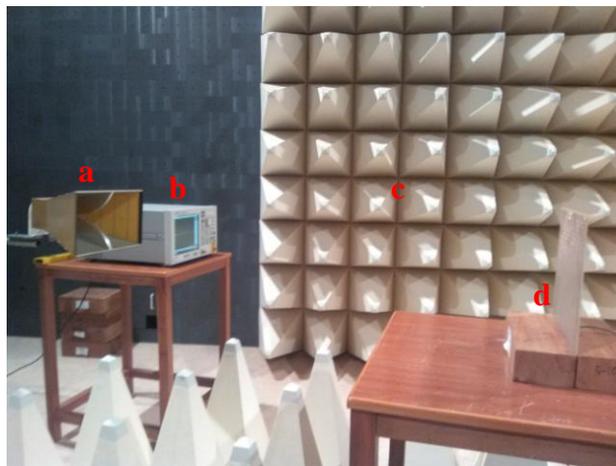
Gambar 4.1 Diagram alir pengukuran Metamaterial Absorber

4.1 Metode Pengukuran

Metamaterial Absorber yang telah dibuat akan diuji untuk memperoleh nilai performanya. Pengujian dilakukan dengan mengukur parameter dari metamaterial

absorber yaitu S-parameter, sehingga dari hasil S-parameter dapat dihitung nilai dari absorption rate.

Pengujian terhadap parameter-parameter absorber dilakukan untuk mengetahui kinerja dari absorber. Pengujian dilakukan di ruang *Anechoic chamber*. Untuk langkah pertama dalam pengujian ini dengan mempersiapkan peralatan pengukuran yaitu VNA (*Vector Network Analyzer*) dan antenna horn sebagai antenna referensi. Untuk penyusunan peralatan dalam pengukuran seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Skenario Pengukuran

Keterangan gambar :

- a= Antena horn sebagai transmitter
- b= Perangkat *Vector Network Analyzer* (VNA)
- c= Ruang *anechoic chamber*
- d= Metamaterial Absorber

Selanjutnya, dilakukan perhitungan jarak antara antenna horn (*transmitter*) dan metamaterial absorber (*receiver*) dengan cara menghitung *farfield* (jarak medan jauh) dari antenna horn menggunakan persamaan 4.1.

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

Nilai panjang gelombang λ tergantung pada frekuensi kerja metamaterial absorber, yang mana frekuensi yang digunakan sebagai pengukuran yaitu antara 8.5 GHz dengan 10.5 GHz sehingga dapat dihitung nilai dari λ_{\min} dan λ_{\max} seperti berikut.

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\text{upper}}} = \frac{3 \times 10^8}{10.5 \times 10^9} = 2.86 \text{ cm}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\text{bottom}}} = \frac{3 \times 10^8}{8.5 \times 10^9} = 3.53 \text{ cm}$$

Sedangkan, untuk menentukan nilai D dapat memanfaatkan panjang dan lebar dari antenna horn, perhitungan nilai D dapat dicari dengan teorema pythagoras sebagai berikut.

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

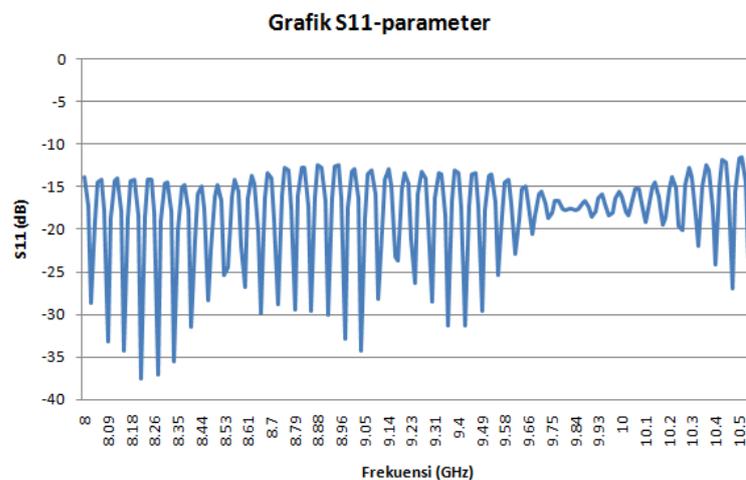
Sehingga, nilai *farfield* (jarak medan jauh) dapat dihitung sebagai berikut.

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda_{\min}} = \frac{2 \times (20.7)^2}{2.86 \text{ cm}} = 2.99 \text{ m}$$

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda_{\max}} = \frac{2 \times (20.7)^2}{3.53 \text{ cm}} = 2.42 \text{ m}$$

Dari perhitungan *farfield* diatas, dapat ditentukan jarak antenna horn dengan metamaterial absorber dengan posisi saling berhadapan yaitu pada jarak 3 m Langkah berikutnya yaitu memasang antenna horn dengan perangkat *Vector Network Analyzer* menggunakan konektor jenis *N-connector*.

Kemudian, dilakukan pengujian frekuensi dari antenna horn, dimana range frekuensi yang digunakan dalam pengukuran adalah 8.5 GHz hingga 10.5 GHz. Hasil pengukuran antenna horn dengan *Vector Network Analyzer* (VNA) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.

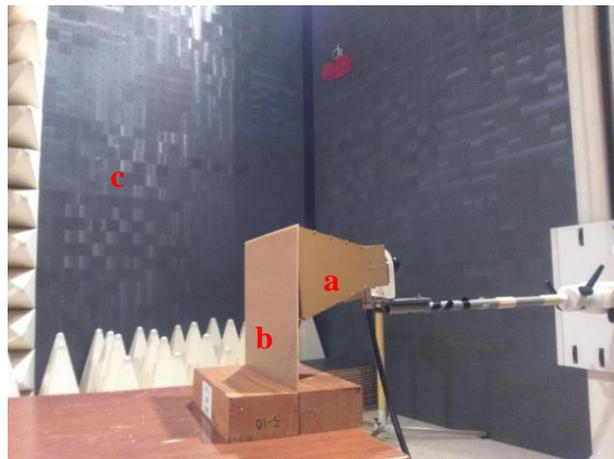


Gambar 4.3 Hasil Pengukuran Karakteristik Antena Horn

Pada range frekuensi yang diukur, hasil pengukuran S11 dari antenna horn tanpa metamaterial absorber pada VNA menghasilkan nilai minimal -15 dB. Hal ini dikatakan bahwa nilai tersebut merupakan frekuensi kerja dari antenna horn. Kemudian, dilakukan pemasangan metamaterial absorber dengan sisi depan berhadapan dengan antenna horn dengan tujuan untuk menguji daya refleksi yang terbaca di VNA.

4.2 Pengujian Metamaterial Absorber

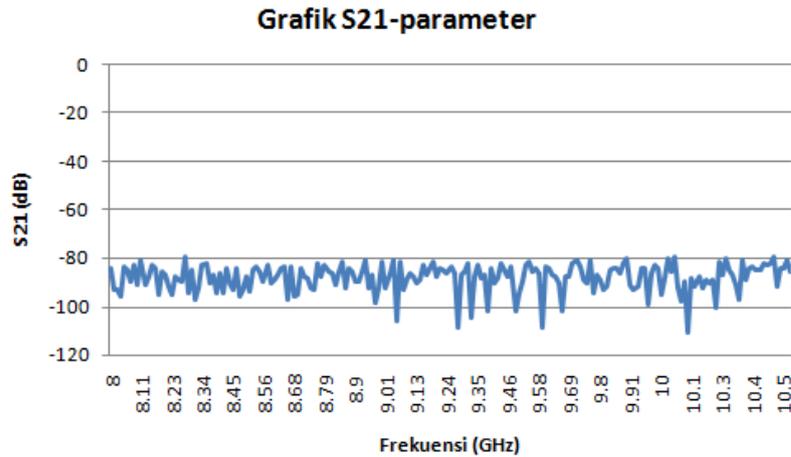
Pada tahap pengujian ini dilakukan pengukuran metamaterial absorber hasil fabrikasi. Dimana langkah awal yang dilakukan yaitu memasang *ground* metamaterial absorber dari bahan *full copper* sebagai penutup dari antenna horn dengan tujuan untuk mengetahui besarnya transmisi yang diserap. Untuk skenario pengujian *ground* metamaterial absorber sebagai penutup antenna horn seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 .



Gambar 4.4 Skenario pengukuran antenna horn tertutup oleh ground full copper

Keterangan gambar : a= Antena horn sebagai transmitter, b= Metamaterial Absorber, dan c= Ruang *anechoic chamber*

Dari pengukuran yang dilakukan pada Gambar 4.4, didapatkan hasil pengukuran S21 yang ditampilkan oleh VNA seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil Pengukuran S21-parameter

Dalam hasil pengukuran S21 pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa pada range frekuensi yang digunakan menghasilkan nilai transmisi yang sangat kecil yaitu hampir nol pada range frekuensi yang digunakan.

Langkah berikutnya yaitu menempatkan metamaterial absorber searah dengan antenna horn, dimana tinggi antenna horn sebesar 1 m sehingga tinggi metamaterial absorber disesuaikan tingginya dengan menggunakan meja penyangga dan untuk membuat metamaterial absorber berdiri tegak dibutuhkan balok penyangga. Posisi pengukuran metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Posisi pengukuran Metamaterial Absorber

Pada posisi pengukuran dibuat antenna horn searah berhadapan ke metamaterial absorber dengan jarak yang ditentukan. Metamaterial absorber terdiri dari dua sisi yaitu sisi depan sesuai dengan desain metamaterial absorber,

sedangkan sisi belakang terdiri dari *full copper* sebagai *ground plane*. Kemudian, hasil pengukuran ditampilkan daya refleksi dan daya transmisi pada VNA.

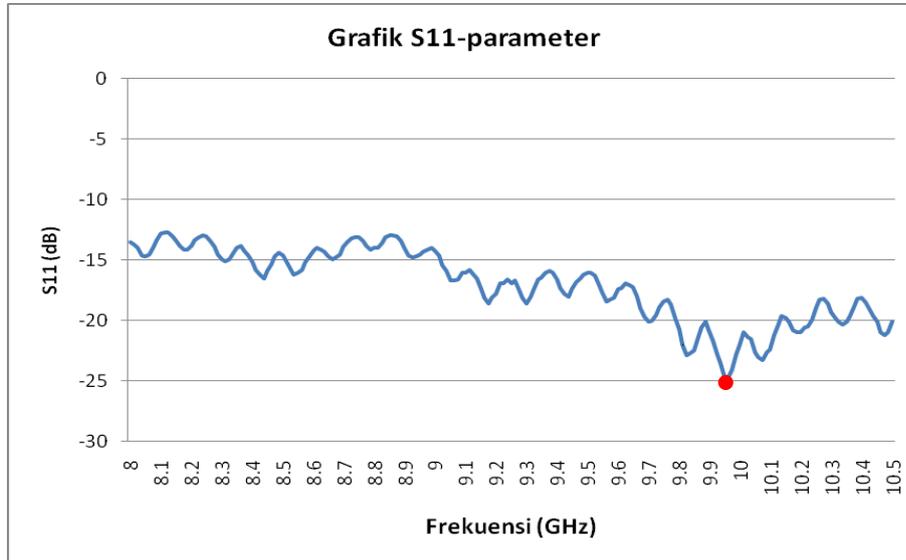
4.2.1 Pengujian Metamaterial Absorber dengan 1 antena horn

Pada tahap ini dilakukan pengujian metamaterial absorber hasil fabrikasi dengan menggunakan *Vector Network Analyzer*, dimana penggunaan *Vector Network Analyzer* tersebut dapat mengamati parameter metamaterial absorber yaitu S-parameter. Nilai S-parameter dapat menunjukkan daya refleksi, daya transmisi, frekuensi dan *bandwidth* kerja metamaterial absorber. Pada pengukuran metamaterial absorber ini diperlukan sebuah antena horn sebagai *transmitter* dan metamaterial absorber sebagai *receiver* dengan jarak diantara keduanya yaitu 3 m. Metamaterial absorber pada sisi depan dibuat sesuai dengan desain simulasi unit sel 10 hasil modifikasi. Untuk bagian depan dari bentuk metamaterial absorber hasil fabrikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Metamaterial Absorber Hasil Fabrikasi

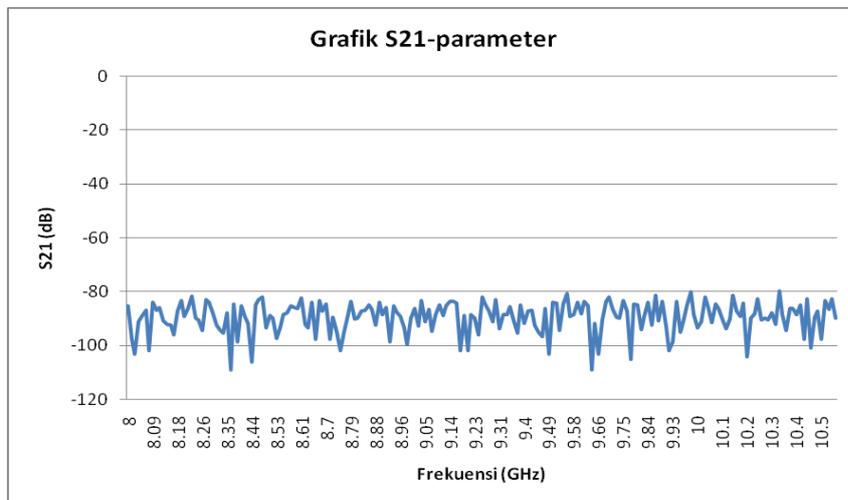
Dari hasil pengukuran dengan perangkat VNA didapatkan nilai S11 sebagai daya refleksi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil Pengukuran S11-parameter

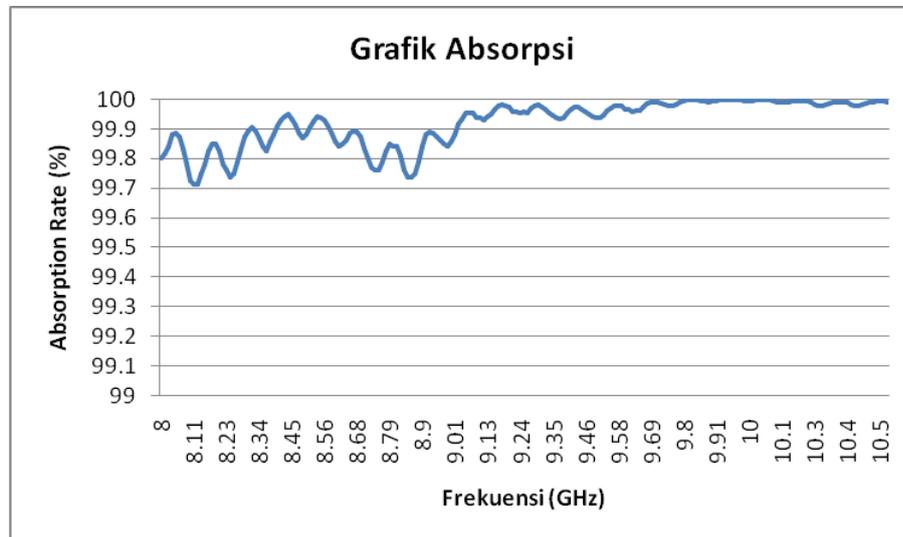
Gambar 4.8 diatas menunjukkan bahwa pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari S11-parameter, dimana S11 kurang dari -3.5 dB. Sedangkan untuk peak S11-parameter terkecil terletak pada frekuensi 9.95 GHz dengan nilai S11 sebesar -24.7 dB.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil pengukuran S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$. Dari hasil pengukuran didapatkan hasil S21 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Hasil Pengukuran S21-parameter

Dari hasil pengukuran S_{21} pada gambar 4.9 diatas menunjukkan nilai S_{21} rata-rata sebesar -90 dB atau magnitude 0. Maka persamaannya yaitu $A= 1-|S_{11}|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik *absorption rate* hasil pengukuran

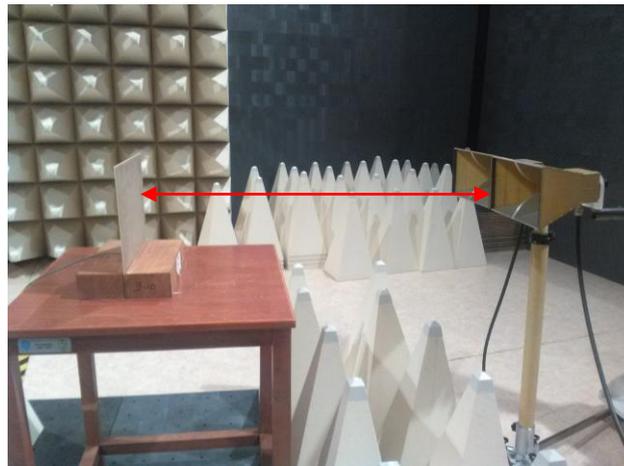
Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada range frekuensi kerja dari 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari *absorption rate*, dimana nilai *absorption rate* yang dihasilkan yaitu lebih besar dari 80 %. Untuk *peak absorption* terletak pada frekuensi 9.95 GHz dengan nilai *absorption rate* sebesar 99.998 %.

4.2.2 Pengujian Metamaterial Absorber (MMA) dengan 2 antenna horn

Pada tahap pengujian ini dilakukan pengukuran metamaterial absorber dengan menggunakan dua buah antenna horn sebagai *transmitter* dan metamaterial absorber sebagai *receiver*. Tujuan dari penggunaan dua buah antenna horn adalah ketika antenna horn 1 mengirimkan gelombang elektromagnetik sebagai transmitter ke metamaterial absorber sebagai receiver, sinyal akan terpantul dan diterima oleh antenna horn 2. Untuk pengujian MMA dengan 2 antenna horn itu dibuat dua variasi jarak antenna horn yaitu pada jarak 24.5 cm dan jarak 80 cm, dimana jarak diukur dari titik tengah antenna horn ke-1 dengan antenna horn ke-2. Tujuan dari variasi jarak dua antenna horn ini untuk mengetahui pengaruh jarak dua antenna horn dengan hasil S- parameter yang dihasilkan pada VNA.

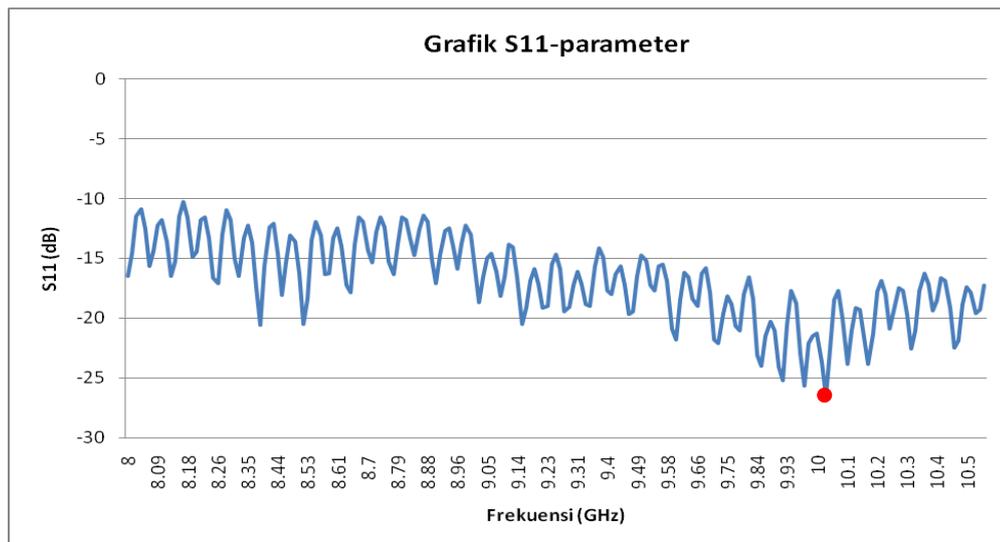
4.2.2.1 Pengujian MMA dengan 2 antenna horn berjarak 24.5 cm

Pada tahap pengujian ini, dilakukan pengukuran metamaterial absorber dengan dua antenna horn, dimana jarak pada kedua antenna horn tersebut adalah 24.5 cm dari titik tengah antenna horn. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengetahui daya refleksi (S11) maupun daya transmisi (S21) yang terbaca pada perangkat VNA. Untuk skenario pengukuran pada kondisi ini seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Skenario posisi pengukuran dengan dua antenna horn

Dari hasil pengukuran dengan perangkat VNA didapatkan nilai S11 sebagai daya refleksi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12.

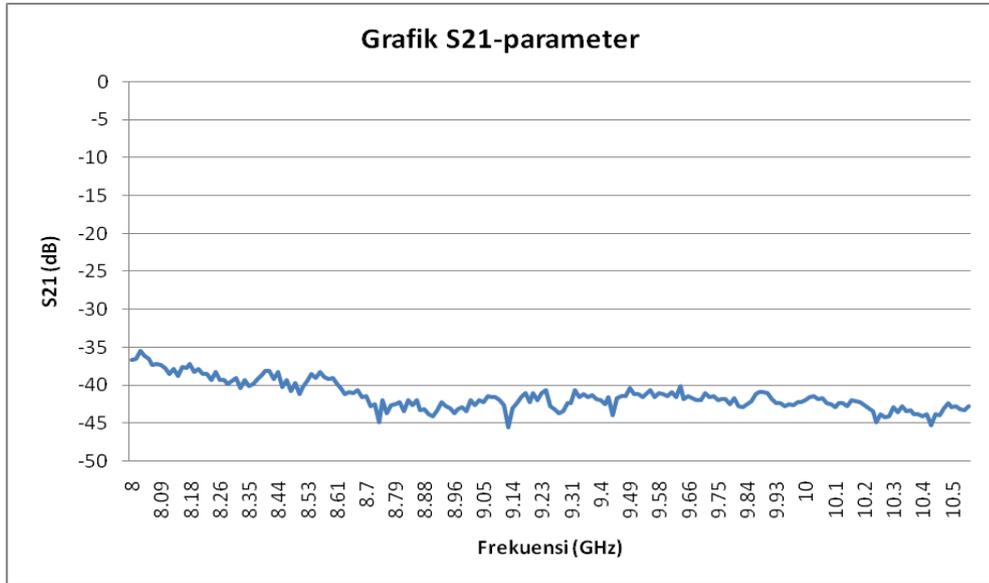


Gambar 4.12 Hasil Pengukuran S11-parameter dengan dua antenna horn

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari S11-parameter, dimana S11 kurang dari

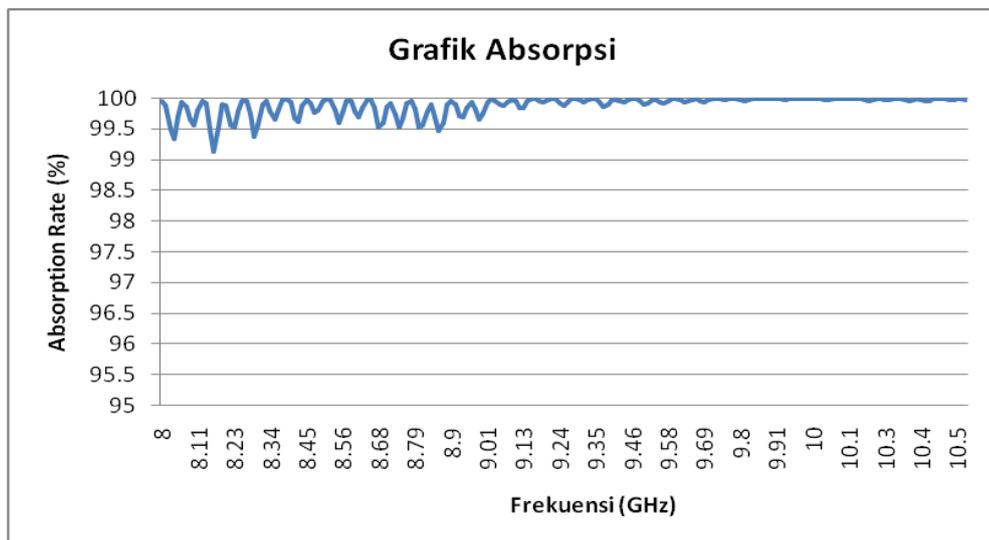
-3.5 dB. Sedangkan untuk peak S11-parameter terkecil terletak pada frekuensi 10.03 GHz dengan nilai S11 sebesar -26.6 dB.

Dari hasil pengukuran didapatkan hasil S21 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Hasil Pengukuran S21-parameter dengan dua antenna horn

Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil pengukuran S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$. Dari hasil pengukuran S21 pada gambar 4.13, dimana nilai S21 rata-rata sebesar -40 dB atau magnitude 0. Maka persamaannya menjadi $A= 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik *absorption rate* hasil pengukuran dengan dua antenna horn

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa pada range frekuensi kerja dari 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari *absorption rate*, dimana nilai *absorption rate* yang dihasilkan yaitu lebih besar dari 80 %. Untuk *peak absorption* terletak pada frekuensi 10.03 GHz dengan nilai *absorption rate* sebesar 99.999 %.

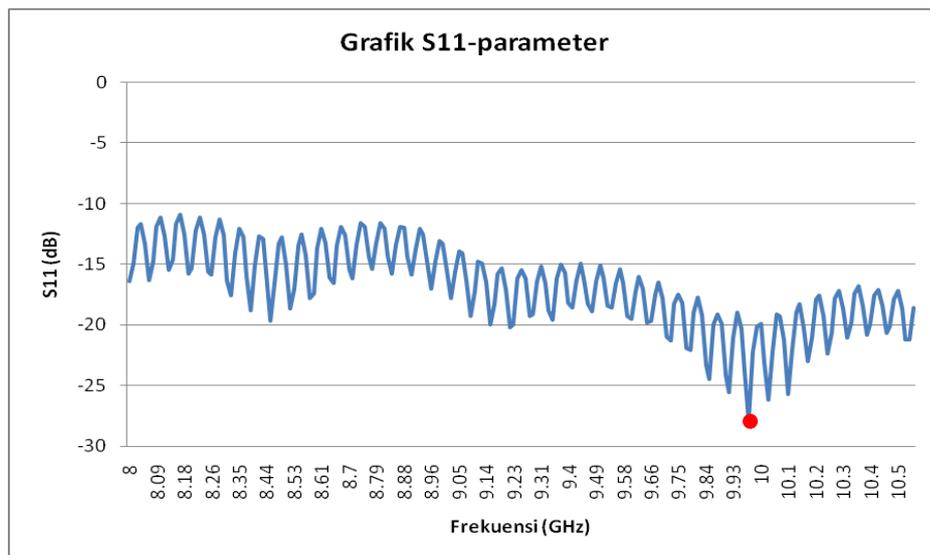
4.2.2.2 Pengujian MMA dengan 2 antenna horn berjarak 80 cm

Untuk skenario pengukuran metamaterial absorber dengan dua antenna horn seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Skenario posisi pengukuran dengan dua antenna horn

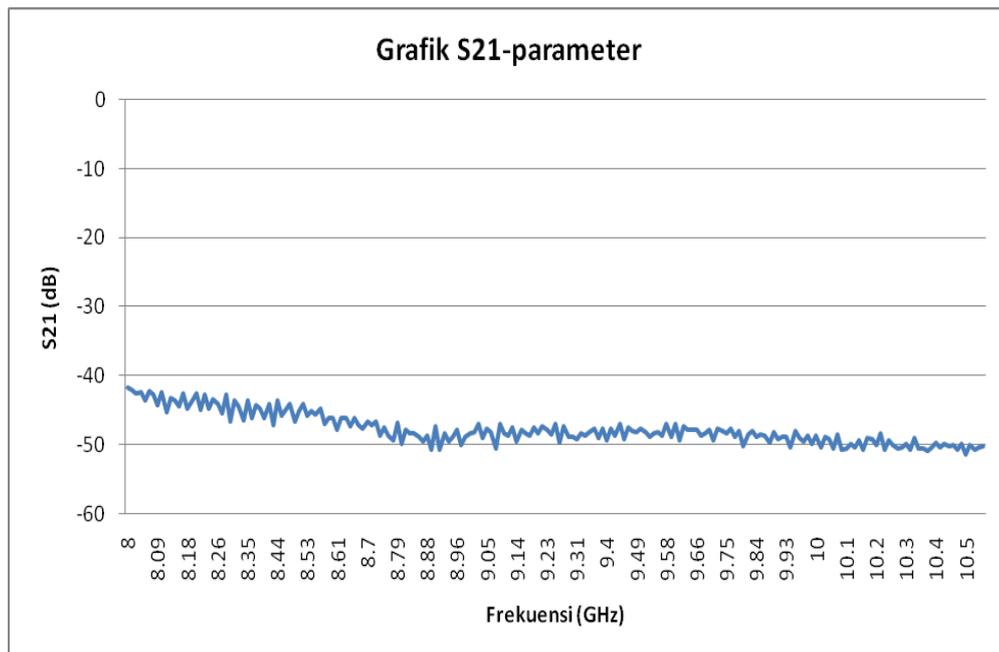
Dari hasil pengukuran metamaterial absorber dengan menggunakan dua antenna horn yang terhubung ke VNA, maka didapatkan hasil pengukuran S_{11} seperti pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Hasil Pengukuran S_{11} -parameter dengan dua antenna horn

Gambar 4.16 diatas menunjukkan bahwa pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari S11-parameter, dimana S11 kurang dari -3.5 dB. Sedangkan untuk *peak* S11-parameter terkecil terletak pada frekuensi 9.98 GHz dengan nilai S11 sebesar -27.9 dB.

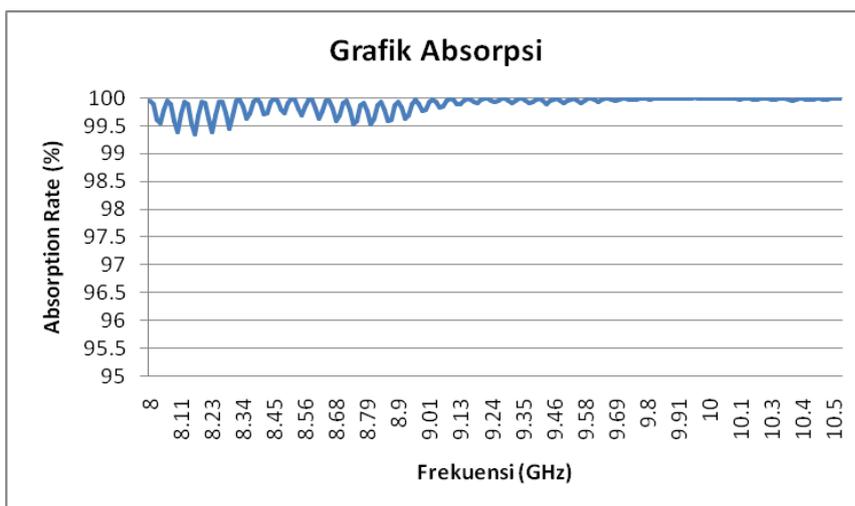
Kemudian, dilakukan pengamatan daya transmisi atau parameter S21 sesuai dengan hasil pengukuran dengan VNA, sehingga didapatkan grafik S21 seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil Pengukuran S21-parameter dengan dua antenna horn

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa dari hasil pengukuran S21, didapatkan nilai S21 antara -40 dB hingga -50 dB atau nilai magnitude sebesar 0.

Kemudian, dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* dari hasil pengukuran S11-parameter menggunakan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$. Karena S21 magnitude bernilai 0, maka persamaannya menjadi $A=1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.18.

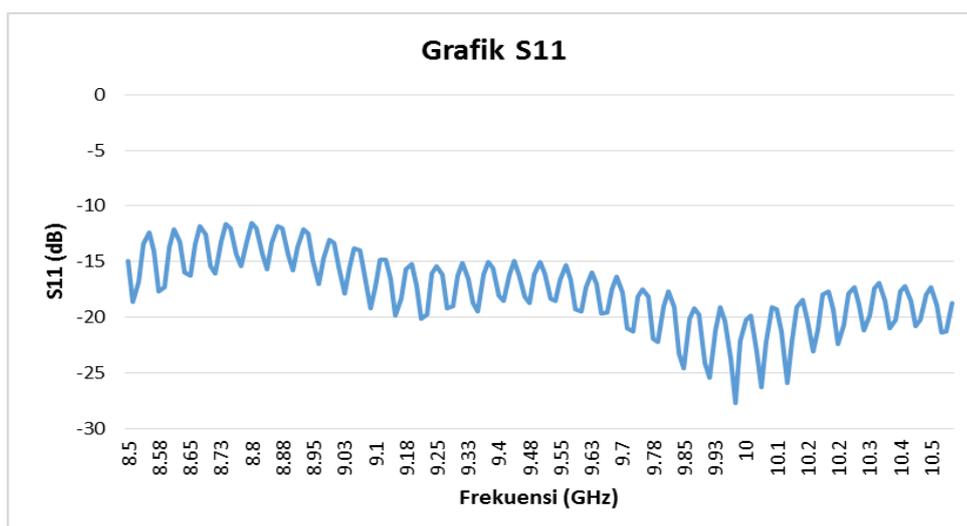


Gambar 4.18 Grafik *absorption rate* hasil pengukuran dengan dua antena horn

Gambar 4.18 menunjukkan bahwa pada range frekuensi kerja dari 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari *absorption rate*, dimana nilai *absorption rate* yang dihasilkan yaitu lebih besar dari 80 %. Untuk *peak absorption* terletak pada frekuensi 9.98 GHz dengan nilai *absorption rate* sebesar 99.999 %.

4.2.2.3 Hasil Pengujian MMA pada sudut 30°

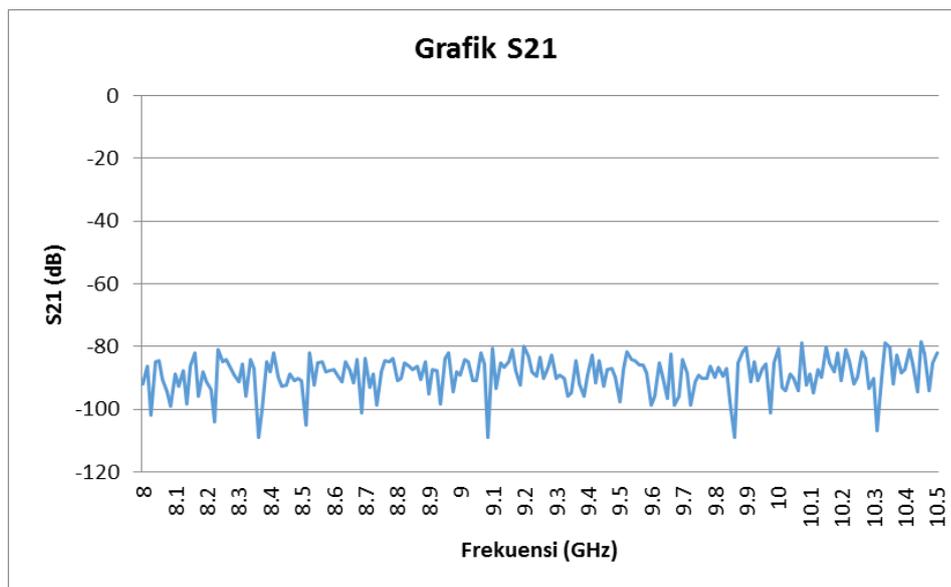
Dari pengujian metamaterial absorber dengan dua antena horn, dilakukan penempatan posisi kedua antena horn berada pada sudut 30° terhadap posisi metamaterial absorber. Untuk nilai S11 yang terbaca di perangkat VNA seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 30°

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa nilai S11 dengan sudut 30° mempunyai nilai S11 dari -27.7 dB hingga -11.5 dB pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S11 terkecil berada pada frekuensi 9.98 GHz. Sedangkan nilai S11 terbesar berada pada frekuensi 8.8 GHz.

Untuk hasil S21 yang terbaca di perangkat VNA ketika posisi antenna horn berada pada sudut 30° terhadap metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20.

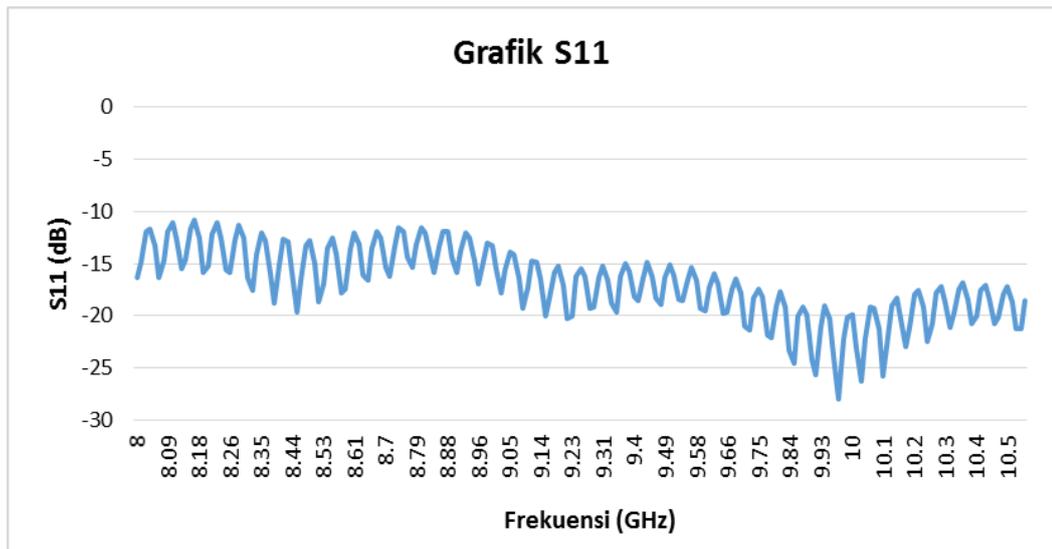


Gambar 4.20 Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 30°

Dari gambar 4.20 menunjukkan ketika kedua antenna horn dengan sudut 30° dari posisi metamaterial absorber mempunyai nilai S21 dari -109 dB hingga -78.4 dB dari range frekuensi 8 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S21 terkecil berada pada frekuensi 9.86 GHz. Sedangkan, nilai S21 terbesar berada pada frekuensi 10.5 GHz.

4.2.2.4 Hasil Pengujian MMA pada sudut 68°

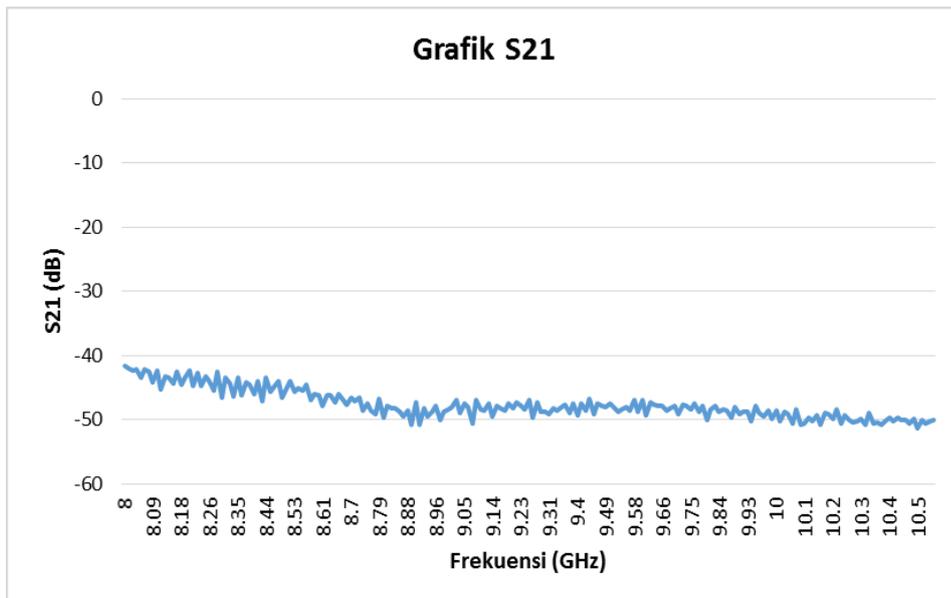
Pada bagian ini dilakukan pengujian metamaterial absorber dengan dua antenna horn, dimana untuk penempatan posisi kedua antenna horn berada pada sudut 68° terhadap posisi metamaterial absorber. Untuk hasil pengukuran S11 yang terbaca di perangkat VNA seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 68°

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa hasil pengukuran metamaterial absorber dengan sudut 68° menghasilkan nilai S11 dari -27.9 dB hingga -10.9 dB dari range frekuensi 8 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S11 terkecil berada pada frekuensi 9.98 GHz. Sedangkan nilai S11 terbesar berada pada frekuensi 8.16 GHz.

Untuk hasil pengukuran S21 ketika kedua antena horn berada pada sudut 68° terhadap posisi metamaterial absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 4.22.

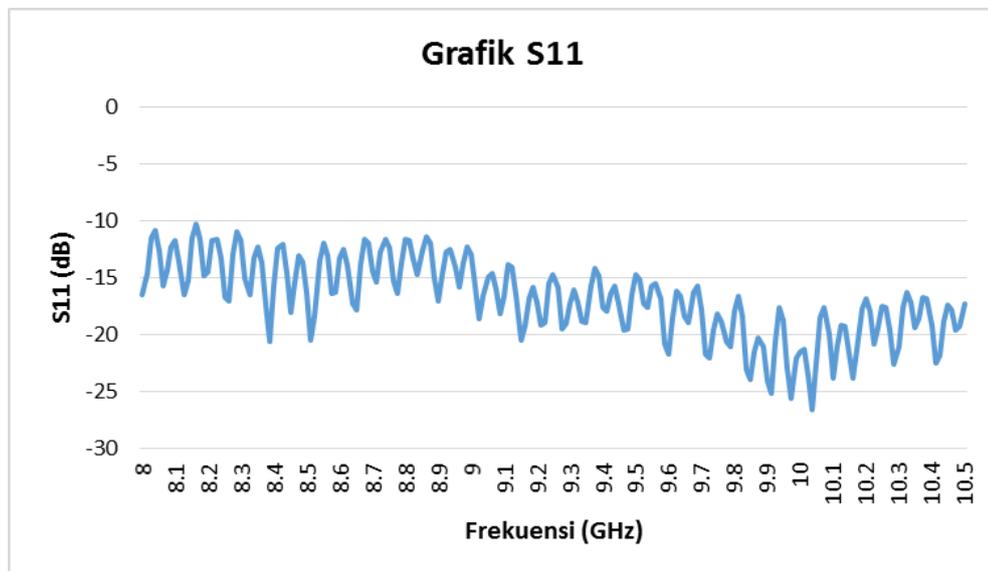


Gambar 4.22 Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 68°

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa hasil pengukuran S21 dari metamaterial absorber dengan sudut 68° , dihasilkan nilai S21 dari -51.3 dB hingga -41.6 dB dengan range frekuensi dari 8 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S21 terkecil berada pada frekuensi 10.1 GHz. Sedangkan, nilai S21 terbesar berada pada frekuensi 8 GHz.

4.2.2.5 Hasil Pengujian MMA pada sudut 83°

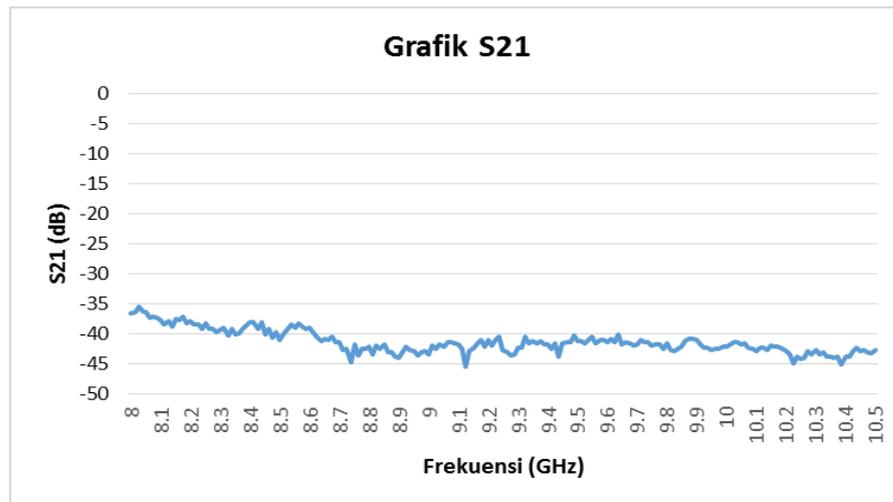
Dari pengujian metamaterial absorber dengan kedua antenna horn, dibuat kondisi dimana posisi antenna horn tersebut terletak pada sudut 83° dari posisi metamaterial absorber. Sehingga, dari hasil pengukuran didapatkan nilai S11 yang terbaca di perangkat VNA seperti ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Hasil Pengukuran S11 dengan sudut 83°

Gambar 4.23 menunjukkan bahwa hasil pengukuran S11 dari metamaterial absorber dengan sudut 83° menghasilkan nilai S11 dari -26.6 dB hingga -10.3 dB dari range frekuensi 8 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S11 terkecil berada pada frekuensi 10 GHz. Sedangkan, nilai S11 terbesar berada pada frekuensi 8.16 GHz.

Untuk hasil pengukuran metamaterial absorber dapat dilihat nilai S21 yang terukur pada perangkat VNA seperti ditunjukkan pada Gambar 4.24.

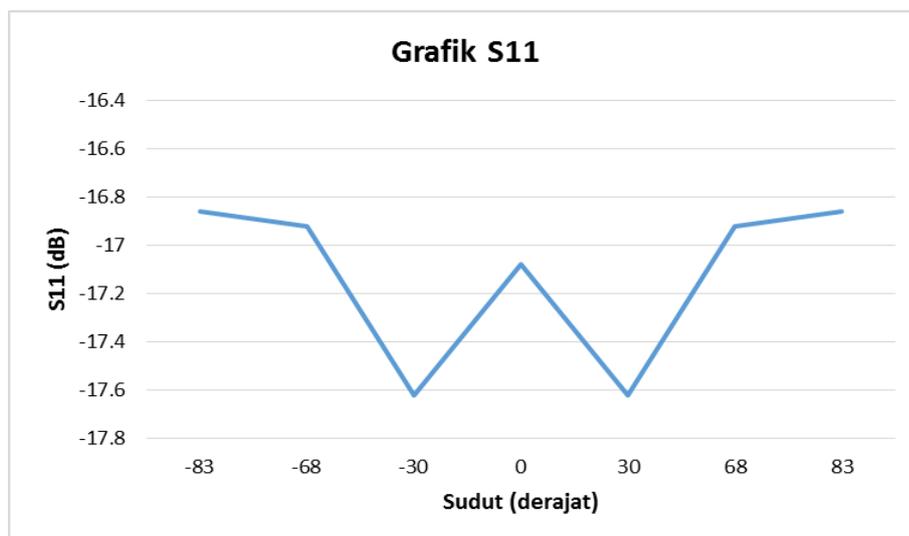


Gambar 4.24 Hasil Pengukuran S21 dengan sudut 83°

Gambar 4.24 menunjukkan bahwa pengukuran S21 dari metamaterial absorber dengan sudut 83° menghasilkan nilai S21 dari -45.5 dB hingga -35.5 dB dari range frekuensi 8 GHz hingga 10.5 GHz. Untuk nilai S21 terkecil berada pada frekuensi 9.13 GHz. Sedangkan nilai S21 terbesar berada frekuensi 8.03 GHz.

4.2.2.6 Pengujian S11 rata-rata terhadap sudut

Pada tahap ini, dilakukan pengujian S11 terhadap sudut dimana nilai S11 merupakan rata-rata dari nilai S11 yang dihasilkan dari pengujian pada masing-masing sudut pada rentang frekuensi 8.5 hingga 10.5 GHz. Untuk grafiknya seperti ditunjukkan pada Gambar 4.25.

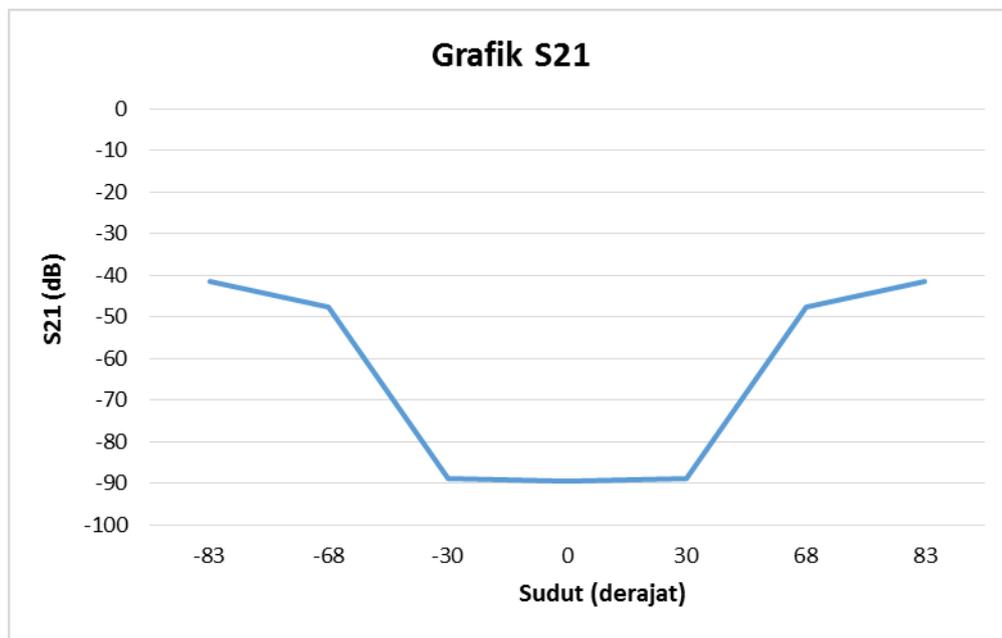


Gambar 4.25 Grafik Hasil Pengujian S11 rata-rata terhadap sudut

Gambar 4.25 menunjukkan bahwa pada sudut 0° nilai S11 rata-rata yang dihasilkan pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz ketika pengujian metamaterial absorber (MMA) yaitu -17.07 dB. Kemudian, besarnya nilai S11 rata-rata pada sudut $\pm 30^\circ$ sebesar -17.62 dB. Untuk sudut $\pm 68^\circ$ menghasilkan nilai S11 rata-rata sebesar -16.92 dB dan nilai S11 rata-rata yang dihasilkan pada sudut $\pm 83^\circ$ sebesar -16.86 dB.

4.2.2.7 Pengujian S21 rata-rata terhadap sudut

Pada tahap ini, dilakukan pengujian S21 terhadap sudut dimana nilai S11 merupakan rata-rata dari nilai S21 yang dihasilkan dari pengujian pada masing-masing sudut pada rentang frekuensi 8.5 hingga 10.5 GHz. Untuk grafiknya seperti ditunjukkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Grafik Hasil Pengujian S21 rata-rata terhadap sudut

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa pada sudut 0° nilai S21 rata-rata yang dihasilkan pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz ketika pengujian metamaterial absorber (MMA) yaitu -89.57 dB. Kemudian, besarnya nilai S21 rata-rata pada sudut $\pm 30^\circ$ sebesar -88.96 dB. Untuk sudut $\pm 68^\circ$ menghasilkan nilai S21 rata-rata sebesar -47.6 dB dan nilai S21 rata-rata yang dihasilkan pada sudut $\pm 83^\circ$ sebesar -41.37 dB.

4.3 Analisa Hasil Pengukuran dan Simulasi

Dari hasil pengukuran metamaterial absorber yang meliputi S-parameter dan perhitungan *absorption rate*, dapat dilakukan perbandingan hasil simulasi metamaterial absorber dengan software CST Studio 2012 dengan hasil pengukuran metamaterial absorber dengan perangkat *Vector Network Analyzer* (VNA) seperti ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Hasil Simulasi

No.	Parameter	Hasil Simulasi	Hasil Pengukuran		
			1 antenna horn	2 antenna horn berjarak 24.5 cm	2 antenna horn berjarak 80 cm
1.	Frekuensi kerja (GHz)	8.492 – 10.538	8 – 10.5	8-10.5	8-10.5
2.	<i>Bandwidth</i> (GHz)	2.046	2.5	2.5	2.5
3.	<i>Peak S11</i> (GHz)	8.642, 9.227, dan 10.193	9.95	10.03	9.98
4.	<i>Absorption rate</i> (%)	≥ 80	≥ 99.7	≥ 99	≥ 99.3
5.	<i>Peak absorption</i> (%)	99.06, 96.002 dan 98.22	99.998	99.999	99.999

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa pada hasil pengukuran mempunyai range frekuensi yang lebih lebar dibandingkan dengan hasil simulasi sehingga mempengaruhi pada *bandwidth*-nya. Untuk *peak S11* parameter terletak pada satu band dalam hasil pengukuran, sedangkan pada hasil simulasi terdapat tiga band peak dari S11-parameter. Pada 3 kondisi pengukuran didapatkan peak S11 yang berbeda-beda, dimana mengalami pergeseran ke frekuensi yang lebih besar tetapi dengan rentang frekuensi pergeseran hampir 80 MHz.

Kemudian, untuk *absorption rate* telah memenuhi spesifikasi baik dari hasil simulasi maupun pengukuran. Dimana, untuk hasil pengukuran mempunyai batas minimum lebih besar dibanding hasil simulasinya. Untuk *peak absorption* yang dihasilkan dari hasil pengukuran lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi dikarenakan hasil *peak absorption* sebesar 99.99 % pada tiga kondisi pengukuran, yang mana pada tiga kondisi pengukuran mempunyai *peak absorption* yang hampir sama.

4.4 Pengujian dengan software LTSpice XVII

Pada tahap ini dilakukan pengujian metamaterial absorber dengan menggunakan software LTSpice XVII, dimana LTSpice merupakan software yang digunakan untuk menghasilkan output kinerja suatu rangkaian ekuivalen. Pada desain metamaterial absorber hasil modifikasi unit sel 10 dilakukan konversi dari dimensi metamaterial absorber menjadi rangkaian ekuivalen, yang mana rangkaian ekuivalen dari desain metamaterial absorber unit sel 10 hasil modifikasi terdiri dari induktansi dan kapasitansi. Untuk konversi dimensi metamaterial absorber menjadi induktansi digunakan persamaan sebagai berikut [11] :

$$L = 2 \times 10^{-3} \times l \left[\ln \left\{ \frac{2l}{w+t} \right\} + 0.5 + 0.2235 \left\{ \frac{w+t}{l} \right\} \right] \mu H$$

Dimana :

L = induktansi (μH)

l = panjang *copper* (cm)

w = lebar *copper* (cm)

t = tebal *copper* (cm)

Sedangkan, untuk konversi dimensi metamaterial absorber menjadi kapasitansi digunakan persamaan sebagai berikut [11] :

$$C = \frac{0.0885 \times \epsilon_r (l \times w)}{d}$$

Dimana :

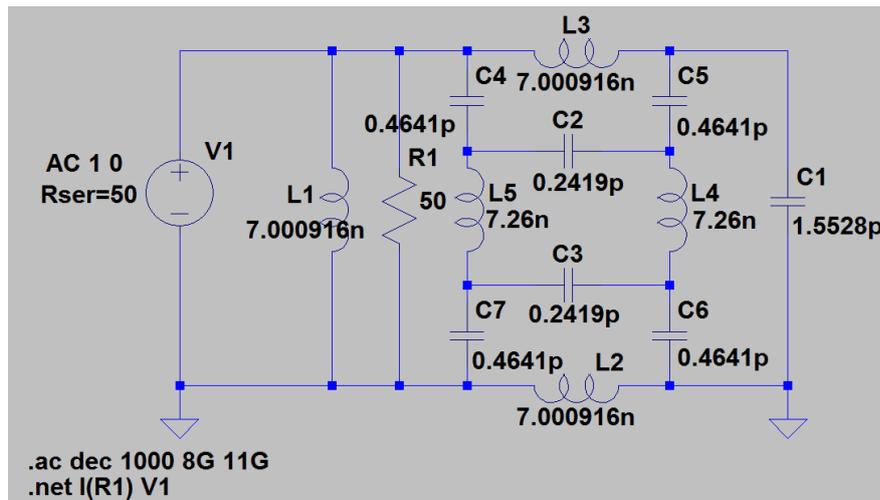
ϵ_r = konstanta dielektrik relatif

l = panjang gap (cm)

w = lebar gap (cm)

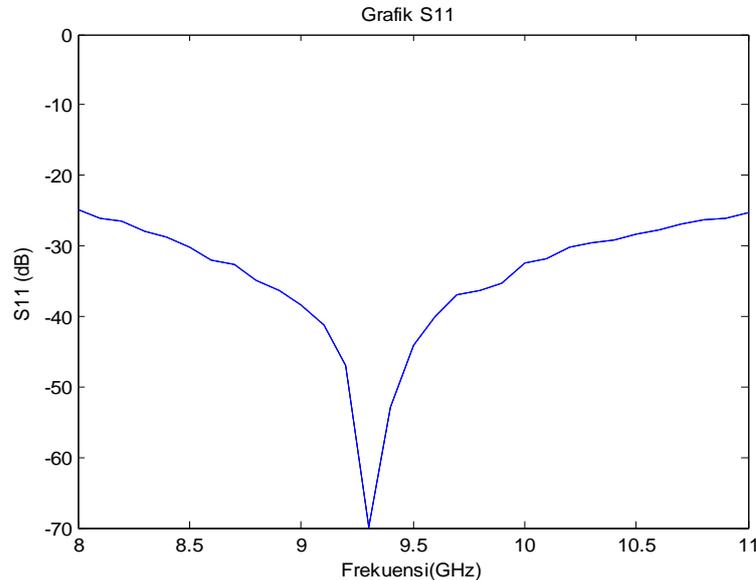
d = tebal dielektrik substrat (cm)

Dari perhitungan induktansi dan kapasitansi tersebut, dilakukan input hasil perhitungan pada rangkaian ekuivalen yang didapatkan dari desain metamaterial absorber unit sel 10 hasil modifikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Rangkaian ekuivalen unit sel 10 hasil modifikasi dengan LTSpice

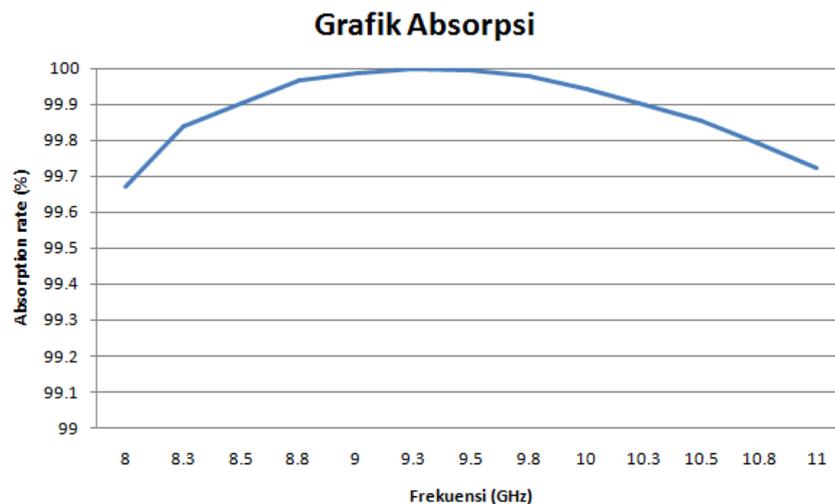
Selanjutnya, rangkaian ekuivalen pada Gambar 4.27 dilakukan proses run dengan memasukkan range frekuensi yang digunakan yaitu 8 GHz hingga 11 GHz dan melakukan input Rseri sebesar 50Ω terhadap V1 (tegangan input) dengan tujuan untuk menampilkan grafil S11 dengan perintah net . Dari hasil pengujian didapatkan hasil S11 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Hasil pengujian S11 unit sel 10 hasil modifikasi pada LTSpice

Gambar 4.28 diatas menunjukkan bahwa pada range frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz telah memenuhi spesifikasi dari S11-parameter, dimana S11 kurang dari -3.5 dB. Sedangkan untuk *peak* S11-parameter terkecil terletak pada frekuensi 9.3 GHz dengan S11 sebesar -69 dB.

Kemudian, Dilakukan perhitungan nilai *absorption rate* perhitungan dari hasil S11-parameter dengan persamaan $A=1-R(\omega)-T(\omega)=1-|S11|^2-|S21|^2$ karena nilai S21 yang dihasilkan dari hasil pengujian seperti bernilai 0. Maka persamaannya menjadi $A = 1-|S11|^2$, sehingga plot grafik *absorption rate* ditunjukkan pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Hasil pengujian *absorption rate* unit sel 10 hasil modifikasi

Dari grafik absorpsi pada gambar 4.29 menunjukkan bahwa nilai *absorption rate* berada pada range frekuensi kerjanya dimana dari frekuensi 8.5 GHz hingga 10.5 GHz, sehingga telah memenuhi spesifikasi dari *absorption rate* yaitu ≥ 80 %. Untuk *peak absorption* terletak pada frekuensi 9.3 GHz dengan nilai *absorption rate* sebesar 99.99 %.

Hasil pengukuran dengan LTSpice ini mempunyai nilai *absorption rate* yang tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi maupun hasil pengukuran fabrikasi metamaterial absorber karena nilai *absorption rate* yang dihasilkan lebih besar dari 95 %, sehingga telah memenuhi dari spesifikasi perancangan metamaterial absorber untuk diaplikasikan pada *body* kapal dengan range frekuensi kerja dari 8.5 GHz hingga 10.5 GHz.

4.5 Radar Cross Section (RCS)

Untuk menentukan besarnya *radar cross section* (RCS) terhadap hasil pengujian metamaterial absorber, dapat dilakukan dengan cara menghitung perbandingan kuadrat dari nilai E^{scat} dengan E^{inc} (nilai S11) terhadap $4\pi R^2$

(*steradian solid angle*) seperti ditunjukkan dalam persamaan (2.31) pada bab II berikut [17].

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E^{scat}|^2}{|E^{inc}|^2}$$

Keterangan :

E^{scat} = medan listrik *scattered*

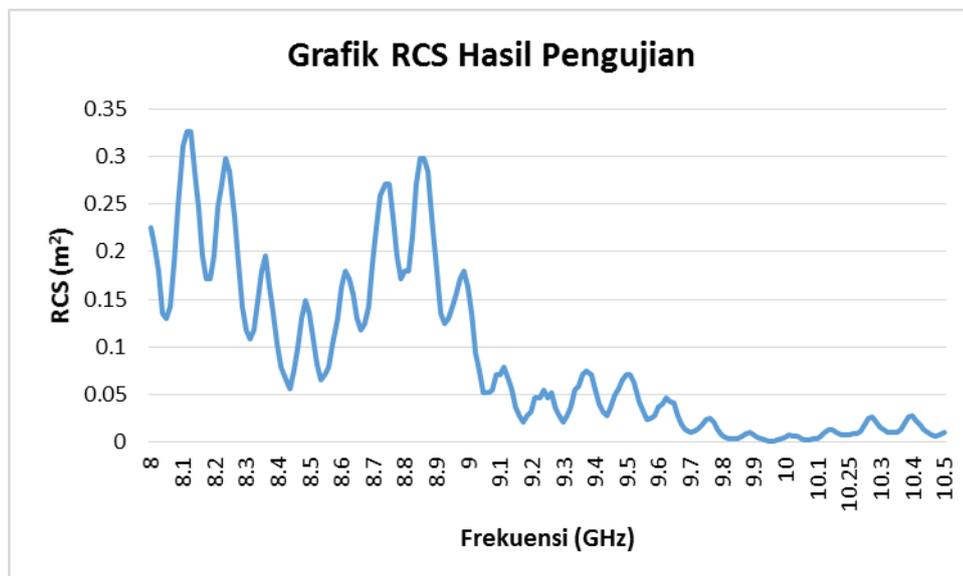
R = jarak *farfield* terhadap target (m)

E^{inc} = medan datang pada target

σ = RCS (m^2)

4.5.1 Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap frekuensi

Dari hasil pengujian metamaterial absorber dengan menggunakan 1 antena horn, dimana dibuat posisi antena horn searah dan berhadapan ke metamaterial absorber dengan jarak yang ditentukan. Dari posisi tersebut, bisa dikatakan besar sudut dari metamaterial absorber terhadap antena horn yaitu 0° , sehingga hasil perhitungan radar cross section (RCS) pada sudut 0° dengan menggunakan persamaan (2.31) seperti grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.30.



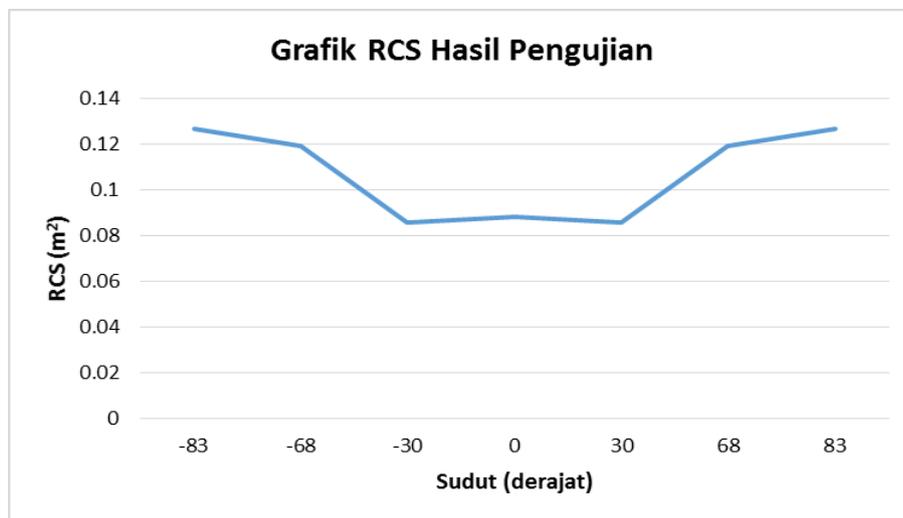
Gambar 4.30 Grafik Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap frekuensi

Gambar 4.30 menunjukkan bahwa pada sudut 0° nilai RCS yang dihasilkan dari hasil pengujian metamaterial absorber (MMA) yaitu 0.001 hingga 0.297 m^2

pada range frekuensi kerja yaitu 8.5 hingga 10.5 GHz. Untuk nilai RCS terkecil terletak pada frekuensi 9.95 GHz, sedangkan nilai RCS terbesar terletak pada frekuensi 8.86 GHz.

4.5.2 Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap sudut

Untuk perhitungan RCS selanjutnya didapatkan dari hasil pengujian metamaterial absorber dengan menggunakan dua buah antenna horn sebagai *transmitter* dan metamaterial absorber sebagai *receiver*. Untuk pengujian MMA dengan dua antenna horn itu dibuat dua variasi jarak antenna horn yaitu pada jarak 24.5 cm dan jarak 80 cm, dimana jarak diukur dari titik tengah antenna horn ke-1 dengan antenna horn ke-2. Pada pengujian MMA dengan kedua antenna horn berjarak 24.5 cm menghasilkan sudut sebesar 83° . Sedangkan, pengujian MMA dengan kedua antenna horn berjarak 80 cm menghasilkan sudut sebesar 68° , sehingga range sudut yang ditentukan antara -83° hingga 83° . Oleh karena itu, perhitungan nilai RCS hasil pengujian metamaterial absorber terhadap sudut dengan menggunakan persamaan (2.31) dan diambil rata-rata terhadap frekuensi dalam rentang frekuensi kerja dari 8.5 hingga 10.5 GHz seperti ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Grafik Perhitungan RCS hasil pengujian terhadap sudut

Gambar 4.31 menunjukkan bahwa pada sudut 0° nilai RCS yang dihasilkan ketika pengujian metamaterial absorber (MMA) yaitu 0.088 m^2 . Kemudian, besarnya nilai RCS pada sudut $\pm 30^\circ$ sebesar 0.085 m^2 . Untuk sudut

$\pm 68^\circ$ menghasilkan RCS sebesar 0.119 m^2 dan nilai RCS yang dihasilkan pada sudut $\pm 83^\circ$ sebesar 0.126 m^2 . Dari grafik perhitungan RCS pada metamaterial absorber hasil pengujian, dapat dikatakan bahwa nilai RCS terendah terdapat pada sudut 0° dan sudut $\pm 30^\circ$. Sedangkan, nilai RCS terbesar terletak pada sudut $\pm 68^\circ$ dan sudut $\pm 83^\circ$.

4.5.3 Perbandingan RCS hasil pengujian dan teori

Dari nilai *radar cross section* (RCS) pada hasil pengujian metamaterial absorber pada sudut 0° di ruang *anechoic chamber* dan perhitungan RCS secara teori dapat dibuat tabel perbandingannya seperti ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan RCS Pengujian dengan Teori

Frekuensi (GHz)	RCS maksimum (Teori) (m^2)	RCS hasil pengujian (m^2)
8.5	81.67	0.136
9.5	102.02	0.071
10.5	124.63	0.011

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa nilai RCS hasil pengujian telah memenuhi spesifikasi dari RCS maksimum. Hal ini dikarenakan nilai RCS hasil pengujian lebih kecil nilainya dibandingkan dengan batas maksimum RCS pada hasil perhitungan RCS teori, dimana menyesuaikan dengan range frekuensi yang ditentukan dalam perancangan metamaterial absorber yaitu 8.5 GHz hingga 10.5 GHz.

<Halaman ini sengaja dikosongkan>

BAB V

PENUTUP

Setelah dilakukan pengambilan data dari pengukuran dan analisis terhadap data hasil simulasi, maka dapat disimpulkan bahwa desain yang dipakai dalam tesis ini dapat dipakai dalam pengembangan dan penelitian pada waktu yang akan datang.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan dan pengukuran metamaterial absorber yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Metamaterial absorber dari hasil simulasi mampu bekerja dengan baik pada range frekuensi kerja yang ditentukan yaitu 8.492GHz hingga 10.538 GHz dengan *bandwidth* sebesar 2.046 GHz, sehingga tergolong dalam pita lebar.
2. Hasil simulasi metamaterial absorber pada parameter *absorption rate* telah memenuhi spesifikasi dengan nilai minimum dari *absorption rate* sebesar 80.55 %.
3. Hasil simulasi metamaterial absorber pada parameter RCS menghasilkan nilai rcs lebih kecil dengan persentase penurunan hampir 60% dibandingkan dengan tanpa menggunakan metamaterial absorber.
4. Perbandingan nilai S11-parameter dari hasil simulasi dan pengukuran metamaterial absorber hampir mendekati satu sama lain dengan tingkat kecuraman dari nilai S11 yang lebih baik pada hasil pengujian metamaterial absorber.
5. Hasil pengukuran fabrikasi metamaterial absorber pada ruang anechoic chamber telah memenuhi spesifikasi dari absorpsi karena nilai *absorption rate* diatas 80% dan letak frekuensi resonansi tidak mengalami pergeseran yang jauh dibandingkan frekuensi yang direncanakan.
6. Hasil pengukuran fabrikasi metamaterial absorber pada parameter *absorption rate* dipengaruhi oleh posisi jarak dari metamaterial absorber terhadap antena horn.

7. Hasil pengukuran metamaterial absorber fabrikasi hampir mendekati hasil simulasi metamaterial absorber dengan nilai *absorption rate* yang lebih besar.
8. Hasil pengukuran metamaterial absorber dengan software LTSpice mendekati hasil simulasi maupun hasil pengukuran fabrikasi dengan range frekuensi kerja, S11-parameter dan *absorption rate* telah memenuhi spesifikasi.

5.2 Saran

Saran yang diberikan dalam perancangan dan pembuatan metamaterial absorber ini yaitu :

1. Untuk melakukan pembuatan metamaterial absorber perlu diperhatikan nilai epsilon, tebal substrat dan tebal copper yang tersedia di pasar fabrikasi, karena untuk menyesuaikan perancangan dimensi metamaterial absorber.
2. Pada perancangan metamaterial absorber perlu diperhatikan nilai epsilon karena pada software CST Studio 2012 hanya bernilai epsilon yang default dan belum tentu sama nilai epsilon dari pasar fabrikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] William L. Melvin and James A. Scheer, "Principles of Modern Radar Vol. III: Radar Applications", SciTech Publishing, 2014.
- [2] S.Ramya and I.Srinivasa Rao, "Dual Band Microwave Metamaterial Absorber Using Loop Resonator For Electromagnetic Interference Suppression", International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562 Vol. 10 No.30, 2015.
- [3] Longjiang Deng, "Broadband absorption in mid-infrared metamaterial absorbers with multiple dielectric layers", Optics Communications 338 (2015) 388–392, 2015.
- [4] Kenyu Ling, Hyung Ki Kim, Minyeong Yoo and Sungjoon Lim, "Frequency-Switchable Metamaterial Absorber Injecting Eutectic Gallium-Indium (EGaIn) Liquid Metal Alloy", *Sensors* 2015, 15, 28154-28165; doi:10.3390/s151128154, 2015.
- [5] Tao Liu, Xiangyu Cao, Jun Gao, Qiurong Zheng, Wenqiang Li, and Huanhuan Yang, "RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna With Metamaterial Absorber", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 3, MARCH 2013.
- [6] William M. Daley, Kathy Smith dkk "FEDERAL RADAR SPECTRUM REQUIREMENTS," U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Telecommunications and Information Administration, 2000.
- [7] Arthur von Hippel and Paul Dixon, "Theory and Application of RF/Microwave Absorbers", Emerson & Cuming Microwave Products, Inc
- [8] Claire M. Watts, Xianliang Liu, and Willie J. Padilla, "Metamaterial Electromagnetic Wave Absorber", Adv. Mater, 24 2012.
- [9] Hewlett-Packard Company, "S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design"1997. 3000 Hanover Street, Palo Alto California, USA.
- [10] Mark A. Richards, James A. Scheer and William A. Holm, "Principles of Modern Radar Vol. I: Basic Principles", SciTech Publishing, 2014.
- [11] F.E. Terman and McGraw-Hill "Radio Engineers Handbook", New York, 1945.
- [12] Kin-Lu Wong, Chien-Chin Huang, and Wen-Shan Chen, "Printed Ring Slot Antenna for Circular Polarization", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 50, NO. 1, 2002.
- [13] Kaushal Gangwar, Dr. Paras and Dr. R.P.S. Gangwar, "Metamaterials: Characteristics, Process and Applications", Advance in Electronic and Electric Engineering. 2014.
- [14] H. Yoshiizumi, R. Suga, O. Hashimoto, and K. Araki, "A Design of Circular Patch Array Absorber Based on Patch Antenna Theory", Proceedings of the 45th European Microwave Conference, 2015.
- [15] FAN Yue-Nong, CHENG Yong-Zhi, DENG Yan-Ming and GONG Rong-Zhou, "Absorbing Performance of Ultrathin Wide-Band Planar Metamaterial Absorber, 978-1-4673-1800-6/12/\$31.00 ©2012 IEEE, 2012.

- [16] Jingbo Sun, Lingyun Liu, Guoyan Dong, and Ji Zhou¹, “An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference”, Vol. 19, No. 22 / OPTICS EXPRESS 21156, 2012.
- [17] Doren W. Hess, “INTRODUCTION TO RCS MEASUREMENTS”, 1125 Satellite Boulevard, Suite 100.
- [18] L.Huang and H.Chen, “Multi-Band And Polarization Insensitive Metamaterial Absorber”, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 113, 103{110, 2011.
- [19] C. F. Tseng, S. C. Lu, and Y. C. Hsu, “Design of Microstrip Antenna with Modified Annular-ring Slot for GPS Application”, PIERS Proceedings, Suzhou, China, September 12{16, 2011.
- [20] FAN Yue-Nong, CHENG Yong-Zhi, DENG Yan-Ming, GONG Rong-Zhou “Absorbing Performance of Ultrathin Wide-Band Planar Metamaterial Absorber”, IEEE, 2012.
- [21] Gunthard Kraus, “SPICE-Simulation using LTspice IV”, DHBW (Duale Hochschule Baden-Wuerttemberg) Germany, December 15th, 2010.
- [22] Wei Shi, Shaobin Liu*, Busheng Zheng, Xiangkun Kong, Haifeng Zhang, Siyuan Liu”, Broadband perfect metamaterial absorption, based on flexible material”, IEEE 2016.
- [23] M.R. Soheilifar, R.A. Sadeghzadeh, “Design, fabrication and characterization of stacked layers planar broadband metamaterial absorber at microwave frequency”, Int. J. Electron. Commun. (AEÜ) 69 (2015).

LAMPIRAN

1. Data hasil simulasi nilai RCS

Sudut	Nilai RCS		Persentase Penurunan (%)
	Dengan MMA	Tidak dengan MMA	
-90	1.22E-05	1.93E-05	63.22712863
-85	1.16E-05	1.92E-05	60.74793836
-80	1.09E-05	1.84E-05	59.0936059
-75	9.84E-06	1.67E-05	58.92106206
-70	8.41E-06	1.40E-05	59.96107068
-65	6.62E-06	1.09E-05	60.60006537
-60	4.80E-06	8.19E-06	58.60404282
-55	3.23E-06	6.26E-06	51.61490318
-50	2.11E-06	5.20E-06	40.50782155
-45	1.53E-06	4.87E-06	31.38341484
-40	1.54E-06	5.20E-06	29.56103051
-35	2.18E-06	6.26E-06	34.87374717
-30	3.52E-06	8.19E-06	42.93224771
-25	5.47E-06	1.09E-05	50.01315601
-20	7.66E-06	1.40E-05	54.60244644
-15	9.49E-06	1.67E-05	56.83427364
-10	1.06E-05	1.84E-05	57.83081655
-5	1.11E-05	1.92E-05	58.16224971
0	1.13E-05	1.93E-05	58.22188982
5	1.11E-05	1.92E-05	58.16092763
10	1.06E-05	1.84E-05	57.82824156
15	9.49E-06	1.67E-05	56.83027176
20	7.66E-06	1.40E-05	54.59702108
25	5.47E-06	1.09E-05	50.00662009
30	3.51E-06	8.19E-06	42.92360688
35	2.18E-06	6.26E-06	34.8634293
40	1.54E-06	5.20E-06	29.54841117
45	1.53E-06	4.87E-06	31.36861903
50	2.11E-06	5.20E-06	40.49211294
55	3.23E-06	6.26E-06	51.59966884
60	4.80E-06	8.19E-06	58.59063687
65	6.62E-06	1.09E-05	60.58923846
70	8.41E-06	1.40E-05	59.95267226
75	9.83E-06	1.67E-05	58.91469587
80	1.09E-05	1.84E-05	59.08887061
85	1.16E-05	1.92E-05	60.74460234
90	1.22E-05	1.93E-05	63.22514144

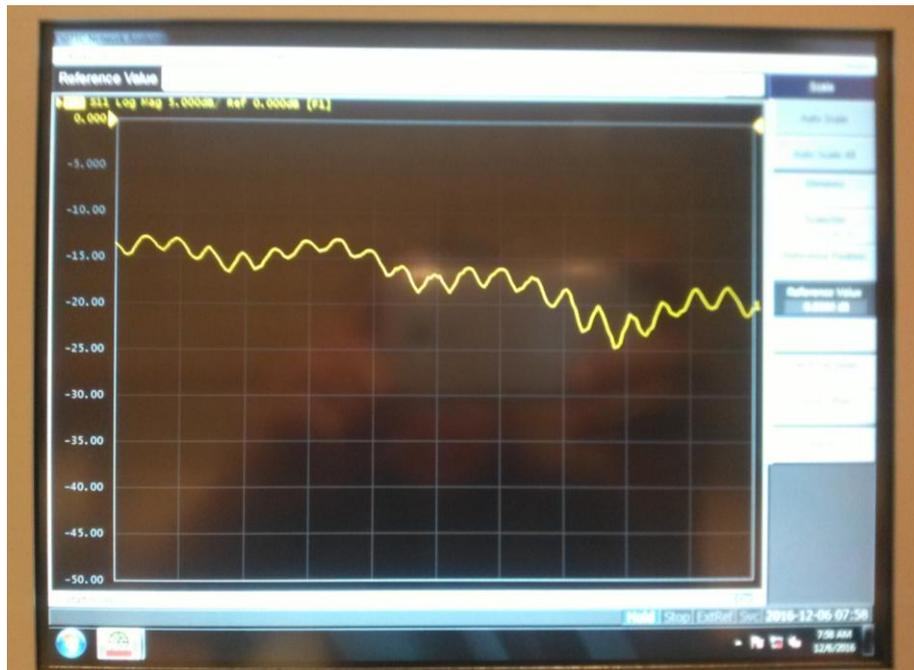
2. Gambar proses pengukuran Metamaterial Absorber



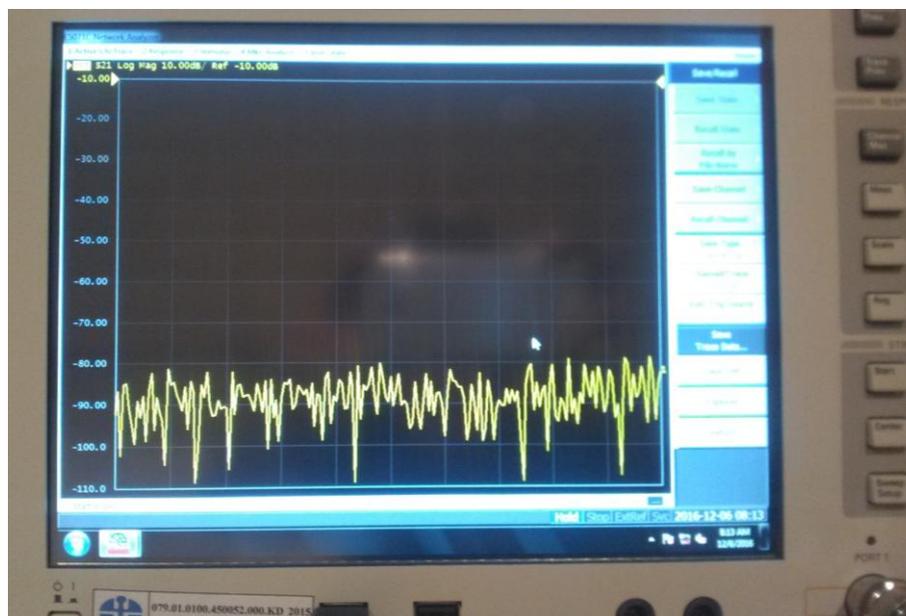
Kondisi Pengukuran di Ruang Anechoic Chamber-LIPI
(Tampak Samping)



Kondisi Pengukuran di Ruang Anechoic Chamber-LIPI
(Tampak Belakang)



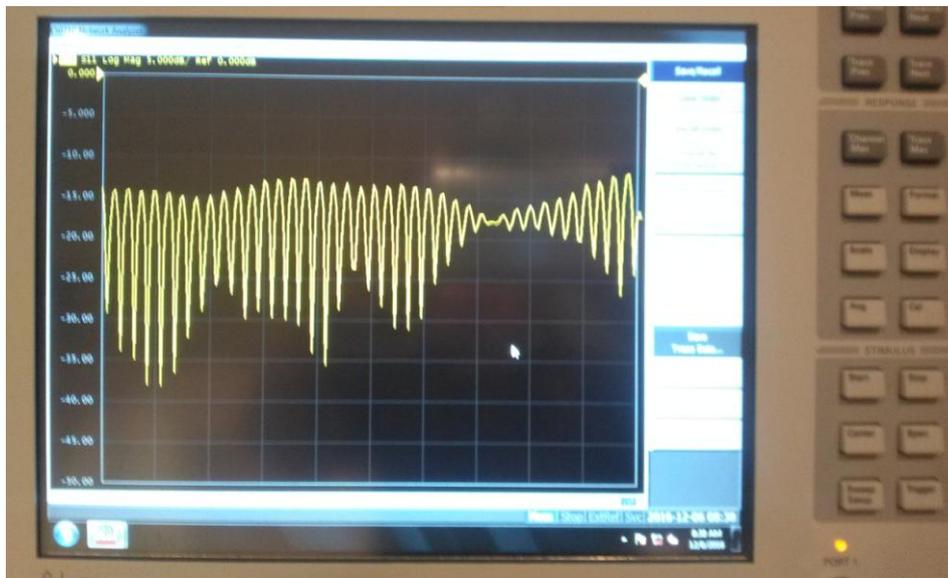
Hasil Pengukuran S11 pada VNA



Hasil Pengukuran S21 pada VNA



Kondisi Pengukuran Karakteristik Antena Horn di Ruang Anechoic Chamber-LIPI



Hasil Pengukuran S11 Antena Horn pada VNA

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Penulis telah menyelesaikan pendidikan jenjang diploma 4 (D4/S1) Di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) dengan jurusan Teknik Telekomunikasi, Lulus pada September 2015 dan terdaftar sebagai mahasiswa Program Pasca Sarjana Program Strata Dua (S2) Tahun 2015 pada Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).



Penulis telah mengikuti Seminar Tesis dengan judul “Rancang Bangun Metamaterial Absorber Pita Lebar Untuk Aplikasi Radar Cross Section Reduction” pada 2 Juni 2016 dan Ujian Tesis pada 5 Januari 2017 sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T).

Nama : Heri Agus Susanto
Alamat : Dsn. Turi Ds. Turi Kec.Turi RT/RW 001/001 Lamongan
Tempat, tgl lahir : Lamongan, 27 Maret 1993
Agama : Islam
No. Telepon : 085852879404
Email : hery.every.history@gmail.com
Motto : Today is must better than yesterday.

Riwayat Pendidikan :

1. SDN Turi Lamongan (1999-2005)
2. SMP Negeri 1 Turi Lamongan (2005-2008)
3. SMA 1 Negeri Lamongan (2008-2011)
4. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) (2011-2015)
5. Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya (ITS) (2015-2017)