



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2X2
ELEMEN PERADIASI SEGITIGA UNTUK APLIKASI WIMAX**

SKRIPSI

**DARYANTO
07 06 16 36 40**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2X2
ELEMEN PERADIASI SEGITIGA UNTUK APLIKASI WIMAX**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

**DARYANTO
0706163640**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber baik dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : Daryanto

NPM : 0706163640

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juli 2011


HALAMAN PENGESAHAN


Skripsi ini diajukan oleh :


Nama : Daryanto
NPM : 0706163640
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Antena Mikrostrip MIMO 2x2
Elemen Peradiasi Segitiga untuk Aplikasi WiMAX

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Eko Tjipto Rahardjo, M.Sc., Ph.D. ()

Penguji : Dr. Fitri Yuli Zulkifli, S.T., M.Sc. ()

Penguji : Dr. Ir. Muhammad Asvial, M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juli 2011

KATA PENGANTAR

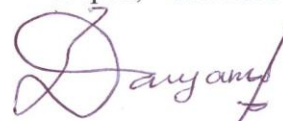
Puji syukur hanya kepada Allah SWT karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang mendukung sangat diharapkan.

Untuk segala jenis bantuan yang telah penulis peroleh selama penyusunan skripsi ini, ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Ir. Eko Tjipto Rahardjo, M.Sc, Ph.D, selaku dosen pembimbing dan Ketua *Antena Propagation and Microwave Research Group* (AMRG), maupun Dr. Ir. Fitri Yuli Zulkifli, M.Sc, yang telah bersedia meluangkan waktu memberi pengarahan, diskusi, bimbingan serta menyetujui, sebagai bagian dari penelitian pada (AMRG) sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik
2. Kedua orang tua dan keluarga penulis atas cinta dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis,
3. “Teman Seperjuangan” Anne Widiastri, Rudi Saputra, dan Ulil Ulya atas kebersamaannya dalam penyusunan skripsi
4. Kakak-kakak terbaik tim AMRG Aditya Inzani W., Heri Rahmadiyanto, M. Tajudin, Achmad Fauzi, Novrizal, Yudha D.P., dan Subroto F. Siddiq atas keseluruhan bantuan dan suka cita bersama
5. Teman-teman Elektro UI angkatan 2007 yang selalu memberikan motivasi, semangat dan dukungan.

Serta semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini, namun tidak dapat disebutkan satu persatu. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2011



Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Daryanto
NPM : 0706163640
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

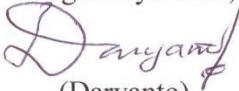
RANCANG BANGUN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2X2
ELEMEN PERADIASI SEGITIGA UNTUK APLIKASI WIMAX

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : Juli 2011

Yang menyatakan,

(Daryanto)

ABSTRAK

Nama : Daryanto
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Rancang Bangun Antena Mikrostrip Mimo 2x2 Elemen
Peradiasi Segitiga Untuk Aplikasi WiMAX

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) menjadi salah satu teknologi telekomunikasi nirkabel yang paling sering dikaji belakangan ini. Hal ini dikarenakan WiMAX dipercaya memiliki kemampuan transmisi data dengan *bitrate* yang cepat serta *bandwidth* yang lebar. Dengan mengadopsi antena MIMO diharapkan mampu meningkatkan efisiensi transmisi sinyal yang secara teoritis telah terbukti. Selain itu, kebutuhan akan antena berdimensi kecil menjadi salah satu nilai tambah karena kebutuhan ruang lebih sempit, mudah untuk difabrikasi secara massal serta kemudahan untuk mengkoneksikannya dengan keseluruhan perangkat. Untuk itu, perancangan antena mikrostrip dapat dijadikan salah satu kandidat antena untuk aplikasi WiMAX.

Pada skripsi ini dilakukan perancangan antena MIMO 2X2 mikrostrip *patch* segitiga dengan *slot ring* yang beroperasi pada frekuensi kerja WiMAX 2.300-2.390 MHz. Penggunaan satu lapis substrat dan teknik pencatutan saluran mikrostrip secara langsung (*direct microstrip line*) diharapkan mampu memperoleh antena dengan dimensi kecil. Penambahan slot ring pada elemen peradiasi berbentuk segitiga menghasilkan *bandwidth* yang lebih lebar dibandingkan karakteristik aslinya. Dengan menggunakan simulator HFSS v.11, rancangan optimum menghasilkan *bandwidth* antena 1 sebesar 112 MHz, antena 2 sebesar 112 MHz, antena 3 sebesar 113 MHz, dan antena 4 sebesar 109 MHz dengan referensi $VSWR < 1,9$.

Sementara itu, hasil pengukuran menunjukkan bahwa *bandwidth* yang dihasilkan oleh antena 1 hingga antena 4 secara berurutan memiliki nilai 105 MHz, 108 MHz, 110 MHz, 120 MHz dengan referensi $VSWR < 1,9$. Dengan menerapkan mode dua antena sebagai pemancar (antena 2 dan antena 4) dan dua antena sebagai penerima (antena 1 dan antena 3), *mutual coupling* antar antena tersebut yaitu S_{12} : -25,31 dB, S_{32} : -23,22 dB, S_{41} : -23,17 dB dan S_{43} : -24.6 dB.

Kata kunci: WiMAX, antena mikrostrip, antena peradiasi segitiga, *slot ring*.

ABSTRACT

Name : Daryanto
Majority : Electrical Engineering
Title : Design of Triangular Microstrip Antenna MIMO 2x2 for WiMAX Application

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) has recently become one of wireless telecommunication technology which is most frequently studied. It is because WiMAX is believed to be able to transmit with high bitrate and has wide bandwidth. By adopting MIMO antenna, it is expected that the system is able to increase signal transmission which has been proven theoretically. Besides, design of compact antenna is an additional value for limited space, easy to mass-manufactured and easy to be connected to the entire device system. Thus, design of microstrip antenna can be one of candidate of antenna for WiMAX application.

In this research, design of MIMO equitriangular microstrip antenna 2x2 with ring slot operates on WiMAX frequency 2.300-2390 MHz. Using single layer substrat and direct microstrip feed line are proposed in order to get compact antenna. Additional ring slot on triangular patch results wide bandwidth compare to its nature characteristic. Using HFSS v.11 simulator, it is obtained optimized design which has bandwidth of antenna 1 to 4 each : 112 MHz, 112 MHz, 113 MHz, and 109 MHz.

Measurement of proposed antenna shows that the antenna 1 to 4 each has bandwidth 105 MHz, 108 MHz, 116 MHz, 120 MHz with reference $V_{SWR} < 1,9$. Applying two transmitters and two receivers antenna mode, shows that mutual coupling between each antenna are S_{12} : -25,31 dB, S_{32} : -23,22 dB, S_{41} : -23,17 dB dan S_{43} : -24.6 dB.

Keywords: WiMAX, microstrip antenna, triangular patch, ring slot

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 WIMAX DAN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2X2	5
2.1 WiMAX	5
2.2 Antena MIMO.....	7
2.3 Antena Mikrostrip	9
2.4 Struktur Antena Mikrostrip.....	12
2.5 Dimensi Elemen Peradiasi Segitiga Sama Sisi	13
2.6 Teknik Pencatuan Antena Mikrostrip	15
2.6.1 Perhitungan Saluran Pencatu Mikrostrip.....	15
2.7 Parameter antena	16
2.7.1 Impedansi Masukan.....	17
2.7.2 <i>Matched Impedance</i>	18
2.7.3 <i>Bandwidth</i>	20
2.7.4 Pola Radiasi	21
2.7.5 <i>Gain</i>	22
2.7.6 Polarisasi	23
BAB 3	26
ALUR PERANCANGAN ANTENA	26

3.1	Menentukan Karakteristik Antena	26
3.2	Peralatan yang digunakan untuk perancangan dan pengukuran antena	26
3.3	Diagram Alir	28
3.4	Menentukan bentuk elemen peradiasi antena mikrostrip.....	29
3.5	Menentukan Jenis Subtrat Yang Digunakan	30
3.6	Perancangan Elemen Peradiasi Segitiga Elemen Tunggal.....	30
3.7	Perancangan Lebar Saluran Pencatu	31
3.8	Perancangan antena mikrostrip MIMO 2x2.....	32
BAB 4		35
SIMULASI PERANCANGAN ANTENA		35
4.1	Simulasi Rancangan Antena Mikrostrip Elemen Tunggal.....	35
4.1.1	Hasil rancangan awal.....	35
4.1.2	Hasil Simulasi Rancangan Awal	36
4.1.3	Karakterisasi Perancangan Antena Elemen Tunggal	37
4.1.4	Hasil Simulasi Elemen tunggal dengan penambahan <i>slot ring</i> ...	38
4.2	Simulasi Rancangan Antena Mikrostrip MIMO 2x2.....	40
4.2.1	Hasil Rancangan Awal Antena MIMO	40
4.2.2	Hasil Simulasi Rancangan Awal	41
4.2.3	Karakterisasi Rancangan Antena MIMO	42
BAB 5		46
FABRIKASI DAN OPTIMASI.....		46
5.1	Hasil Pengukuran Fabrikasi Antena Awal	46
5.1.1	Optimasi Fabrikasi Antena Untuk Pergeseran Frekuensi.....	48
5.1.2	Optimasi Fabrikasi Antena Untuk Perolehan <i>Bandwidth</i> Dan Kondisi <i>Matched</i>	49
5.2	Pengukuran Fabrikasi Antena Dengan Pergeseran Frekuensi	51
5.2.1	Optimasi Fabrikasi Antena Dengan Penambahan <i>Tuning Stub Loaded</i>	52
BAB 6 PENGUKURAN ANTENA DAN ANALISIS ANTENA		55
6.1	Pengukuran Parameter <i>Port</i> Tunggal Antena	55
6.1.1	Parameter Return Loss	55
6.1.2	Parameter VSWR	56

6.1.3	Parameter Impedansi Masukan.....	58
6.2	Parameter <i>Mutual Coupling</i>	60
6.2.1	Pencatuan 1 Port Antena Pemancar.....	60
6.2.2	Pencatuan 2 Port Antena Pemancar.....	61
6.3	Pengukuran Pola Radiasi	62
6.4	Pengukuran <i>Beamwidth</i>	65
6.5	Pengukuran <i>Gain</i>	66
6.6	Analisis Pengukuran Antena	67
6.6.1	Pengukuran Parameter <i>Port</i> Tunggal	67
6.6.2	Pengukuran Parameter <i>Mutual Coupling</i>	69
6.6.3	Pengukuran Parameter Pola Radiasi.....	70
6.6.4	Pengukuran Parameter <i>Beamwidth</i>	71
6.6.5	Pengukuran Parameter <i>Gain</i>	71
6.7	Analisis Kesalahan Umum.....	73
BAB 7	74
KESIMPULAN	74
DAFTAR ACUAN	75
DAFTAR PUSTAKA	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hierarki jaringan nirkabel [4].....	6
Gambar 2.2 Persebaran negara pengguna layanan WiMAX [10].....	7
Gambar 2.3 Plot medan elektromagnetik yang diradiasikan oleh antena. [13]	10
Gambar 2.4 Jenis-jenis antena: a. Antena dipole, b. Antena horn, c. Antena Reflektor, d. Antena Mikrostrip, e. Antena Array, f. Antena Lens [13].....	11
Gambar 2.5 Struktur antena mikrostrip [14].....	12
Gambar 2.6 Jenis-jenis bentuk elemen peradiasi [14]	13
Gambar 2.7 Rangkaian pengganti antena [13].....	17
Gambar 2.8 Model sederhana antena [13].	17
Gambar 2.9 Representasi <i>bandwidth</i> pada grafik <i>return loss</i> [19].....	20
Gambar 2.10 Representasi pola radiasi [13]	21
Gambar 2.11 Polarisasi linier [21]	24
Gambar 2.12 Polarisasi melingkar [21]	24
Gambar 2.13 Polarisasi elips [21]	25
Gambar 3.1 Diagram alir perancangan simulasi antena.....	28
Gambar 3.2 Bentuk geometri elemen peradiasi segitiga sama sisi (<i>equitriangular</i>) [15].....	29
Gambar 3.3 Tampilan PCAAD.	32
Gambar 3.4 Contoh konfigurasi antena mikrostrip MIMO 2x2 [27].....	33
Gambar 3.5 Rancangan awal konfigurasi antena MIMO 2x2.....	34
Gambar 4.1 Rancangan awal antena mikrostrip.	35
Gambar 4.2 Grafik <i>Return loss</i> simulasi awal	36
Gambar 4.3 Grafik <i>return loss</i> iterasi <i>slot ring</i>	37
Gambar 4.4 Hasil rancangan simulasi akhir optimum.	39
Gambar 4.5 Grafik <i>return loss</i> hasil rancangan optimum.....	40
Gambar 4.6 Konfigurasi awal antena MIMO 2x2	41
Gambar 4.7 Grafik <i>return loss</i> konfigurasi awal antena MIMO 2x2.....	42
Gambar 4.8 Rancangan antena mikrostrip MIMO 2x2 dengan <i>stub</i>	44
Gambar 4.9 Grafik <i>return loss</i> hasil simulasi antena mikrostrip MIMO 2x2 dengan penambahan <i>stub</i>	44

Gambar 5.1 Grafik <i>return loss</i> perbandingan rancangan awal hasil simulasi dengan pengukuran fabrikasi antenna.....	47
Gambar 5.2 Grafik <i>return loss</i> iterasi pelebaran elemen peradiasi.....	49
Gambar 5.3 Grafik <i>return loss</i> iterasi posisi dan panjang <i>stub</i>	50
Gambar 5.4 Hasil rancangan optimum dengan penambahan <i>stub</i>	51
Gambar 5.5 Grafik <i>return loss</i> hasil pengukuran antenna fabrikasi	52
Gambar 5. 6 Penampakan antenna dengan penambahan <i>tuning stub loaded</i>	53
Gambar 5. 7 Grafik <i>return loss</i> hasil pengukuran antenna dengan penambahan <i>tuning stub loaded</i>	54
Gambar 6.1 Grafik <i>return loss</i> hasil pengukuran.....	55
Gambar 6.2 Grafik pengukuran VSWR antenna	57
Gambar 6.3. Grafik Impedansi masukan a. antenna1; b. antenna2; c. Antena3; d. Antena4	59
Gambar 6.4 Grafik hasil <i>mutual coupling</i>	60
Gambar 6.5 Grafik hasil <i>mutual coupling</i>	62
Gambar 6.6 Representasi beamwidth pada plot pola radiasi	64
Gambar 6.7 Grafik <i>gain</i> antenna terhadap frekuensi	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan standar teknologi nirkabel [3]	6
Tabel 3.1 Spesifikasi substrat yang digunakan.	30
Tabel 4.1 Tabel spesifikasi rancangan awal.....	35
Tabel 4.2 Hasil iterasi <i>return loss</i> dan <i>bandwidth</i>	38
Tabel 4. 3 Dimensi hasil simulasi rancangan antenna optimum.....	39
Tabel 4.4 <i>Bandwidth</i> antenna MIMO 2x2 dengan penambahan <i>stub</i>	45
Tabel 5.1 Perbandingan frekuensi tengah rancangan awal hasil imulasi dengan pengukuran fabrikasi antenna	47
Tabel 6.1 Hasil pengukuran <i>port</i> tunggal berdasarkan parameter <i>return loss</i>	56
Tabel 6.2 Hasil impedansi masukan pada $f=2.350$ MHz	60
Tabel 6.3 Hasil pengukuran <i>mutual coupling</i> pada frekuensi 2350 MHz.....	61
Tabel 6.4 Efek <i>Mutual Coupling</i> pada frekuensi 2.350 MHz	62
Tabel 6.5 Tabel perbandingan sudut pancar maksimum.....	65
Tabel 6.6 Parameter <i>beamwidth</i> untuk pola radiasi tiap-tiap elemen	65
Tabel 6.7 <i>Gain</i> antenna untuk tiap antenna.....	66

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, teknologi pada sistem komunikasi dituntut keras agar mampu memenuhi kebutuhan manusia dalam bertukar informasi. Tidak hanya memperhatikan ukuran informasi yang harus ditransmisikan secara keseluruhan tetapi juga waktu untuk menyalurkan informasi harus dalam waktu yang relatif singkat untuk efektivitas dan efisiensi kerja kita. Salah satu teknologi yang paling sering dibicarakan adalah WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) yang dianggap sebagai teknologi generasi keempat (4G) [1].

Teknologi WiMAX dapat masuk ke dalam kategori teknologi 4G dikarenakan unjuk kerja WiMAX itu sendiri yang memiliki kualitas yang baik. Dengan kecepatan transfer data yang sangat cepat serta *bandwidth* yang cukup lebar [2], dengan teknologi WiMAX ini dimungkinkan terjadinya pertukaran informasi dengan sangat cepat. Selain itu, daerah yang mampu dicakup oleh teknologi ini sangat jauh dibandingkan dengan teknologi yang ada saat ini. Ditambah lagi, implementasi teknologi ini akan tidak lama lagi akan dirasakan di Indonesia mengingat tender alokasi frekuensi telah dilaksanakan [3].

Selain itu, berbagai teknologi yang diterapkan pada sistem ini membuat keandalan sistem sangat baik di kala menghadapi kondisi lingkungan yang kurang memadai. Penggunaan antena MIMO menjadi salah satu bahan pertimbangan untuk sistem WiMAX ini [4]. Antena MIMO merupakan antena yang diperuntukkan secara khusus untuk mendukung teknologi MIMO yang akan menjadi salah satu teknologi pendukung sistem telekomunikasi masa depan. Karakteristik dari antena MIMO ini adalah dengan cara menggabungkan lebih dari satu antena baik di sisi pengirim maupun penerima sehingga disebut MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Dengan menggunakan antena ini diharapkan akan

meningkatkan kualitas sinyal informasi yang dikirim dari pengirim ke penerima.

Di sisi lain, penelitian akan antenna mikrostrip masih menjadi hal yang menarik bagi para peneliti. Diiringi dengan penemuan teknologi MIMO yang masih terus berkembang, menyebabkan peningkatan ketertarikan dalam mendesain antenna mikrostrip yang mendukung teknologi MIMO tersebut. Terkait dengan kebutuhan akan antenna mikrostrip yang *compact*, antenna mikrostrip *patch* segitiga menjadi salah satu pilihannya. Namun demikian, karakteristik *patch* segitiga yang dikombinasikan dengan satu saluran mikrostrip secara langsung memiliki karakteristik *bandwidth* yang sempit. Untuk itu, pada skripsi ini dilakukan penambahan *slot ring* untuk memperlebar *bandwidth* sehingga kriteria frekuensi kerja 2,3-2,4 GHz yang ditetapkan oleh Dirjen Postel Indonesia [5] dari teknologi WiMAX dapat terpenuhi. Perangkat lunak HFSS v.11 digunakan untuk merancang antenna mikrostrip. Melalui panduan perancangan perangkat lunak tersebut, diperoleh antenna yang telah difabrikasi untuk kemudian diukur parameter-parameter antenna lebih lanjut.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah-masalah yang dibahas pada penelitian ini berkisar pada perancangan antenna MIMO 2X2 mikrostrip elemen peradiasi segitiga dengan *slot* pengurangan efek *mutual coupling* pada MIMO antenna, secara rinci penelitian ini mengenai:

- a. perancangan antenna mikrostrip segitiga *single layer substrat* untuk aplikasi WiMAX untuk memperoleh antenna dengan dimensi sederhana
- b. penambahan *slot ring* untuk meningkatkan *bandwidth* antenna
- c. penggunaan teknik satu saluran mikrostrip langsung (*direct microstrip line*) agar membuat antenna lebih sederhana
- d. perancangan antenna mikrostrip MIMO 2x2 dengan menggabungkan empat elemen antenna mikrostrip elemen peradiasi segitiga

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan rancang bangun suatu antenna MIMO 2X2 berupa antenna mikrostrip dengan elemen peradiasi segitiga untuk aplikasi WiMAX dengan frekuensi kerja 2.300-2.390 MHz sesuai dengan spesifikasi Dirjen Postel Indonesia.

1.4 Batasan Masalah

Pada skripsi ini hanya terbatas sejauh rancang bangun antenna MIMO 2X2 mikrostrip elemen peradiasi segitiga untuk aplikasi WiMAX untuk kemudian memfabrikasi rancangan tersebut. Antena yang dibuat menggunakan teknik pencatutan saluran mikrostrip secara langsung serta menggunakan *single layer substrat*. Dengan demikian, diperoleh antenna yang memenuhi parameter-parameter yang ditetapkan oleh Dirjen Postel Indonesia.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan makalah ini mengikuti sistematika sebagai berikut ini:

BAB 1: Pendahuluan

Bagian ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2: Dasar Teori

Bagian ini akan berisi tentang bahasan teori dasar mengenai antenna mikrostrip khususnya antenna mikrostrip patch segitiga, parameter umum suatu antenna, WiMAX, teknologi MIMO serta penerapannya pada WiMAX.

BAB 3: Alur Perancangan Antena

Bagian ini memberikan penjelasan mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan dalam melakukan perancangan antenna serta pemilihan berbagai aspek yang dibutuhkan dalam perancangan

BAB 4: Simulasi Perancangan Antena

Bagian ini menjelaskan simulasi perancangan dan tahapan-tahapan hingga diperoleh hasil perancangan yang sesuai dengan spesifikasi

BAB 5: Fabrikasi dan Optimasi

Bagian ini menjelaskan hasil fabrikasi antenna berdasarkan hasil simulasi, karakterisasi, serta optimasi rancangan antenna sehingga diperoleh fabrikasi antenna yang memenuhi kriteria

BAB 6: Pengukuran dan Analisis

Bagian ini menjelaskan pengukuran paramete-parameter antenna optimum serta analisis terhadap hasil pengukuran tersebut.

Bab 7: Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan pembahasan sebelumnya.



BAB 2

WIMAX DAN ANTENA MIKROSTRIP MIMO 2X2

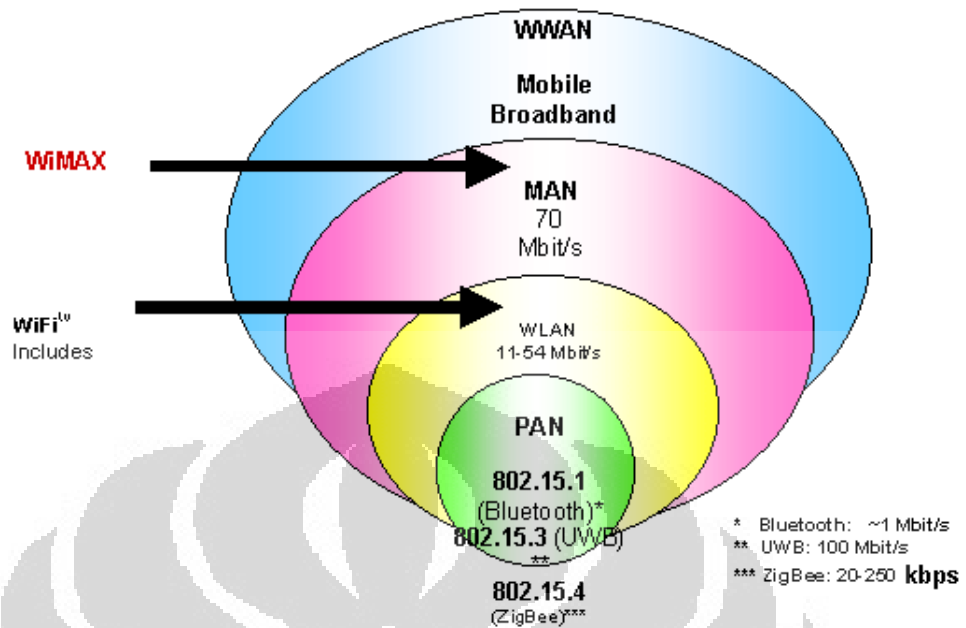
2.1 WiMAX

WiMAX adalah singkatan dari *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, merupakan teknologi nirkabel akses pita lebar yang menyediakan performansi seperti halnya jaringan 802.11 (Wi-Fi) dengan jangkauan dan QOS jaringan seluler [6]. Tidak hanya itu, jaringan WiMAX ini telah berbasis IP.

Seperti halnya Wi-Fi, WiMAX ini diatur oleh standar yang dikeluarkan oleh IEEE dengan standar 802.16. Standar tersebut merupakan standar Wireless MANs (*Wireless Metropolitan Area Network*) [7]. Standar 802.16 memiliki beberapa turunan standar. Untuk standar WiMAX sendiri yang paling sering digunakan adalah 802.16d pada tahun 2004 dan 802.16e pada tahun 2005. Untuk standar 802.16d digunakan untuk aplikasi *fixed wireless* sebaliknya untuk 802.16e dipakai untuk aplikasi *mobile wireless* [2].

Secara performa layanan, teknologi WiMAX ini memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan Wi-Fi. Teknologi ini mampu menyediakan akses pita lebar atau BWA (*Broadband Wireless Access*) dengan jangkauan yang luas. dengan teknologi WiMAX ini, untuk yang *fixed wireless* mampu menjangkau hingga 50 km sedangkan untuk yang *mobile wireless* mampu menjangkau hingga 5-15 km. Hal ini berbedanya sekali dengan teknologi Wi-Fi yang hanya mampu menjangkau antara 30-100 km [6].

Untuk kecepatan data yang mampu dikirimkan dengan teknologi WiMAX mampu mencapai 70 Mbps. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.1. Untuk itu, secara teori teknologi tersebut sesuai untuk aplikasi *last mile broadband connection, backhaul* maupun *high speed enterprise* [3]. Perbandingan antara teknologi WiMAX dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.1 Hierarki jaringan nirkabel [4]

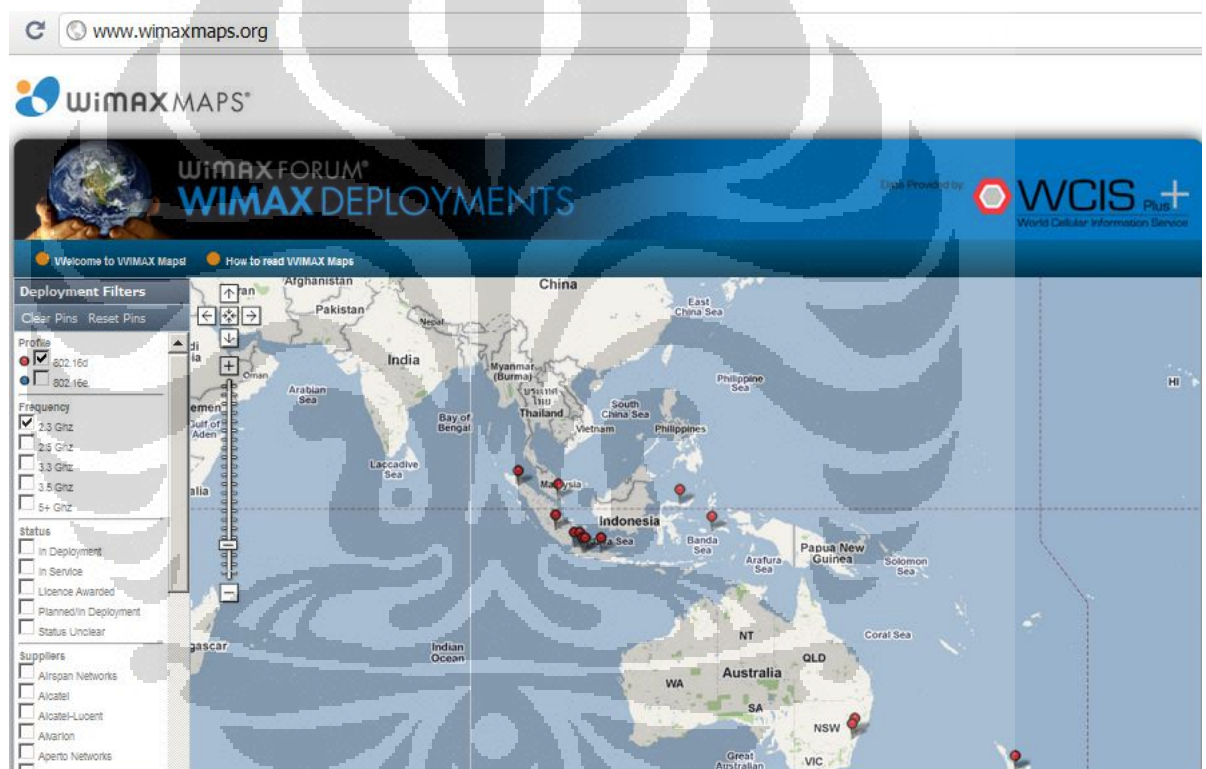
Tabel 2.1. Perbandingan standar teknologi nirkabel [3]

Perbandingan Perkembangan Teknologi Wireless					
	WiFi 802.11g	WiMAX 802.16-2004*	WiMAX 802.16e	CDMA2000 1x EV-DO	WCDMA/ UMTS
Approximate max reach (dependent on many factors)	100 Meters	8 Km	5 Km	*	*
Maximum throughput	54 Mbps	75 Mbps (20 MHz band)	30 Mbps (10 MHz band)	3.1 Mbps (EVDO Rev. A)	2 Mbps (10+ Mbps for HSDPA)
Typical Frequency bands	2.4 GHz	2-11 GHz	2-6 GHz	1900 MHz	1800,1900,2100 MHz
Application	Wireless LAN	Fixed Wireless Broadband (eg-DSL alternative)	Portable Wireless Broadband	Mobile Wireless Broadband	Mobile Wireless Broadband

Seperti yang tercantum pada Tabel 2.1, spektrum frekuensi yang diberikan oleh standar kurang spesifik. Dalam WiMAX forum, spektrum

frekuensi disarankan lebih spesifik lagi. Adapun frekuensi yang disarankan oleh WiMAX forum yaitu: 2.3, 2.6, 3.5, 3.7 and 5.8 GHz [9]

Untuk di Indonesia sendiri, penyelenggaraan jaringan WiMAX telah diselenggarakan oleh Direktorat Jendral Pos dan Telekomunikasi Depkominfo dimana telah dilakukan pelelangan spektrum frekuensi pada tanggal 26 Februari 2008 [5]. Adapun frekuensi kerja yang digunakan adalah frekuensi 2,35 GHz. Frekuensi ini sesuai dengan frekuensi yang disarankan oleh WiMAX Forum dan telah dimasukkan dalam WiMAX maps, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Persebaran negara pengguna layanan WiMAX [10]

2.2 Antena MIMO

MIMO (*Multiple Input multiple output*) merupakan suatu teknik penggunaan *multiple* antena (antena jamak) baik pada sisi pengirim maupun penerima untuk meningkatkan kualitas sistem komunikasi. Penggunaan antena jamak ini mampu meningkatkan kualitas transmisi

data maupun jangkauan tanpa harus memberikan tambahan bandwidth atau daya masukan [11].

Terdapat berbagai jenis standarisasi untuk teknologi MIMO ini, seperti Wi-Fi, 4G, 3GPP LTE, WiMAX, atau HSPA+. Untuk standarisasi WiMAX tersebut diatur melalui standar IEEE 802.16. Adapun teknologi yang termasuk dalam standar ini yaitu *beamforming*, *space time coding* dan *spatial multiplexing* [12]

Beamforming merupakan pembentukan *beam* dari sinyal yang ditransmisikan dari beberapa antena pada fase tertentu. *Beamforming* memberikan peningkatan pada *link budget* dengan meningkatkan efektivitas *gain* antena. Antena *directive* yang umum dikenal yaitu *switched beam* atau *phase (directional) antenna array*. Pada sistem ini terdapat antena jamak dengan *beam* yang dapat diatur. *Beam* tersebut diatur menggunakan *switch* sedemikian sehingga diperoleh kualitas transmisi terbaik yang ditunjukkan dengan *Signal to Noise Ratio (SNR)*. *Switched beam antenna array* dirancang untuk menghasilkan *gain* yang besar pada posisi sudut tertentu, dan dapat digunakan secara sektoral [11].

Space time coding (STC) merupakan teknik yang biasa dikenal sebagai *transmit diversity* dimana data bit konstelasi yang berdekatan ditransmisikan melalui dua antena yang berbeda ketika berada dalam simbol yang sama. Selanjutnya, data konjugasinya ditransmisikan pada siklus waktu berikutnya melalui kedua antena tersebut pula. Dengan demikian, data yang ditransmisikan lebih handal dibandingkan dengan teknik transmisi biasanya. [4]

Spatial multiplexing (SMX) merupakan suatu teknik pada sistem MIMO dimana satu antena mentransmisikan suatu data bit sedangkan antena lainnya mengirimkan data bit lain secara simultan. Selama bagian penerima memiliki lebih dari satu antena dan kualitas sinyal memadai, bagian penerima tersebut dapat memilah sinyal yang diterimanya. Meskipun terlihat rumit karena terdapat penambahan kompleksitas baik pada pengirim maupun penerima, teknik ini memberikan kecepatan data dua kali lebih cepat. [4]

Pada standar WiMAX, MIMO dapat dikonfigurasi dengan empat buah antena, yaitu [4]:

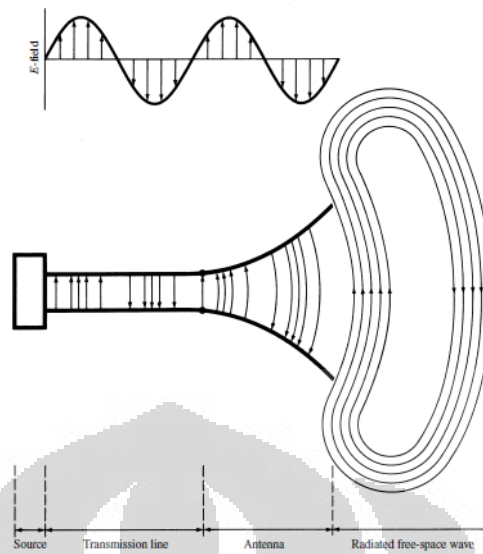
a. Empat antena mode 1; melalui mode ini, data dikirimkan empat kali tiap simbol dengan dikonjugasikan atau dibalik. Mode ini tidak mengubah kecepatan data yang dikirimkan melainkan meningkatkan kehandalan sinyal.

b. Empat antena mode 2; mode ini meningkatkan kecepatan dua kali lipat dan di saat yang bersamaan tingkat kehandalannya juga ditingkatkan karena data dikirimkan dua kali.

c. Empat antena mode matrix C; merupakan mode yang hanya berlaku pada sistem dengan empat antena. mode ini mengirimkan data bit yang berbeda-beda melalui keempat antena yang berbeda tiap satu simbol. Dengan demikian, kecepatan transmisi meningkat empat kali lipat.

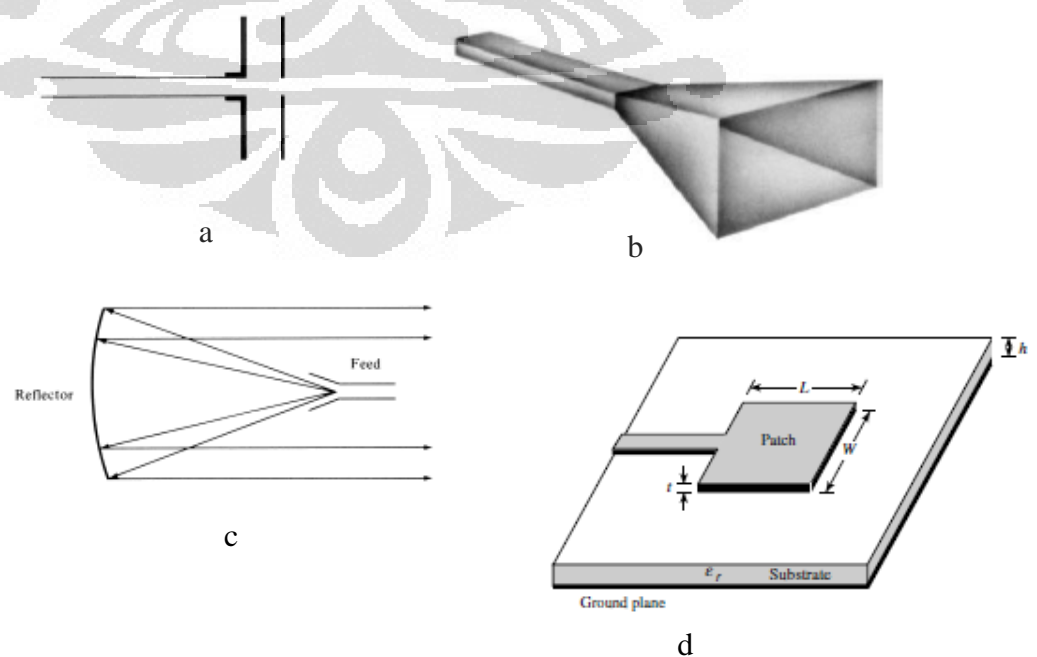
2.3 Antena Mikrostrip

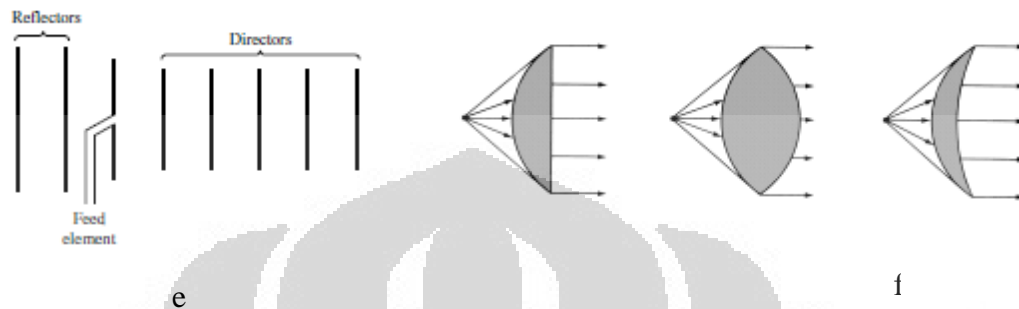
Antena merupakan suatu benda yang digunakan untuk meradiasikan atau menerima gelombang radio. Dengan kata lain, antena merupakan struktur transisi antara ruang bebas (*free space*) dengan divais pengarah yang digunakan untuk meyalurkan energi elektromagnetik dari sumber pengirim ke antena, atau dari antena dengan penerima [13]. Representasi plot medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh antena ditunjukkan melalui ilustrasi pada Gambar 2.3. Keberadaan antena menjadi salah satu komponen penting dalam sistem telekomunikasi terutama sistem telekomunikasi nirkabel mengingat antena inilah yang menjadi gerbang masuk maupun keluar sinyal informasi yang dikirim atau diterima. Apabila antena memiliki kualitas yang kurang baik, sistem komunikasi yang berada dibelakangnya akan terpengaruh. Imbasnya, kualitas komunikasi menjadi buruk.



Gambar 2.3 Plot medan elektromagnetik yang diradiasikan oleh antenna. [13]

Saat ini, terdapat berbagai macam bentuk yang digunakan untuk mendukung sistem telekomunikasi yang ada saat ini. Beberapa diantaranya yaitu: antenna kawat, antenna apertur, antenna mikrostrip, antenna susun, antenna reflektor, serta antenna lens seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 [13]. Berbagai antenna tersebut digunakan sesuai dengan kondisi dan kebutuhan dari sistem komunikasi yang dibuat.





Gambar 2.4 Jenis-jenis antena: a. Antena dipole, b. Antena horn, c. Antena Reflektor, d. Antena Mikrostrip, e. Antena Array, f. Antena Lens [13]

Antena mikrostrip menjadi salah satu bentuk antena yang menjadi perhatian untuk dijadikan bahan penelitian belakangan ini. Hal ini dikarenakan oleh karakteristik antena mikrostrip itu sendiri yang memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan bentuk antena lainnya. Selain itu, eksplorasi untuk jenis antena ini masih dapat dikembangkan lebih jauh lagi. Beberapa keuntungan dari antena mikrostrip ini antara lain [14]:

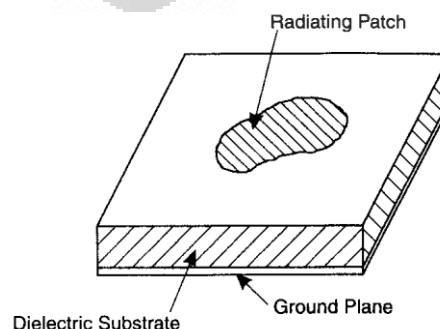
- *Low profile* yakni berdimensi kecil dan ringan dan dapat dibuat konformal.
- Biaya fabrikasi yang murah
- Polarisasi linear maupun melingkar dapat dimungkinkan hanya dengan satu yang sederhana
- Memungkinkan untuk dibuat *dual-frequency* dan *dual-polarization*
- Dapat diintegrasikan dengan rangkaian *microwave* lainnya dengan mudah
- *Feed line* dan *matching network* dapat difabrikasi pada struktur antena sekaligus

Akan tetapi, terdapat beberapa kekurangan dari antena mikrostrip itu sendiri, diantaranya [14]:

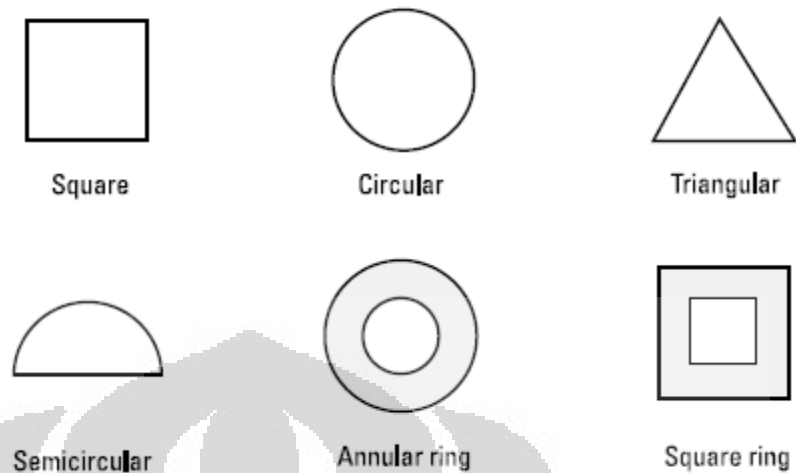
- *Bandwidth* yang sempit
- Memiliki *gain* yang rendah
- Rugi- rugi *ohmic* yang tinggi pada struktur *feed* untuk bentuk antena susun
- Untuk antena mikrostrip susun diperlukan struktur *feed* yang kompleks
- Kemurnian polarisasi sulit dicapai
- Beberapa radiasi yang tidak diinginkan dapat muncul dari pencatu atau sambungan
- Hanya mampu menangani daya yang rendah
- Munculnya gelombang permukaan
- Konsekuensi atas *cross-polarization* atau *mutual coupling* pada antena susun pada penurunan kualitas *gain* dan efisiensi

2.4 Struktur Antena Mikrostrip

Suatu antena mikrostrip sederhana memiliki bagian elemen peradiasi (*radiating patch*) pada salah satu sisi dari suatu substrat dielektrik yang juga memiliki bidang pentanahan (*ground plane*) di sisi lainnya (Gambar 2.5) [14]. Elemen peradiasi terbuat dari bahan konduktor biasanya berupa tembaga. Elemen peradiasi ini dapat berbentuk segiempat, lingkaran, segitiga, ring serta beberapa bentuk elemen modifikasi lainnya seperti pada Gambar 2.6. Tiap- tiap bentuk tersebut memiliki karakteristik yang berbeda yang digunakan sesuai kebutuhannya.



Gambar 2.5 Struktur antena mikrostrip [14]



Gambar 2.6 Jenis-jenis bentuk elemen peradiasi [14]

Sementara itu, bidang pentanahan pun juga terbuat dari bahan konduktor seperti halnya elemen peradiasi tersebut. pada dasarnya, bidang pentanahan ini menutupi keseluruhan bidang bagian bawah antenna. Akan tetapi, pada perkembangannya bidang pentanahan ini dimodifikasi sedemikian sehingga tidak menutupi keseluruhan bidang dalam rangka mencapai karakteristik tertentu dari suatu antenna.

Material yang berada diantara keduanya atau yang sering disebut substrat merupakan bahan dielektrik. Terdapat berbagai macam bahan dielektrik yang dapat digunakan untuk merancang antenna mikrostrip ini. Penggunaan bahan dielektrik yang berbeda ini akan mempengaruhi perhitungan ukuran antenna sekaligus ukuran antenna secara keseluruhan. Dielektrik yang sering digunakan dalam perancangan adalah bahan dielektrik yang memiliki konstanta dielektrik $2.2 < \epsilon_r < 12$ [13].

2.5 Dimensi Elemen Peradiasi Segitiga Sama Sisi

Salah satu elemen peradiasi yang sering digunakan dalam perancangan adalah antenna mikrostrip elemen peradiasi segitiga. Elemen peradiasi berbentuk segitiga dipilih karena bentuk ini menghasilkan

dimensi antenna yang lebih sederhana dibandingkan dengan bentuk elemen peradiasi lainnya [15]. Dengan demikian diharapkan, hasil akhir antenna yang dirancang juga memiliki dimensi yang sederhana.

Ukuran dimensi elemen peradiasi segitiga ini perlu dihitung terlebih dahulu. Penentuan dimensi elemen peradiasi tergantung pada mode yang diterapkan pada antenna tersebut dengan mengikuti persamaan 2.1. berikut [14]:

$$f_{mn} = \frac{ck_{mn}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{m^2 + mn + n^2} \quad (2.1)$$

dimana;

c = kecepatan cahaya ($3 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r = konstanta relatif dielektrik

a = panjang segitiga sama sisi

Subskrip mn yang terdapat pada persamaan tersebutlah yang mengacu pada mode yang digunakan. Dengan demikian, apabila digunakan mode TM₁₀ maka persamaan tersebut akan menjadi:

$$f_{10} = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

Akan tetapi, persamaan tersebut belum mempertimbangkan pengaruh fringing field. Untuk memperoleh hasil yang lebih akurat nilai ϵ_r diubah menjadi ϵ_e yang mengikuti perhitungan seperti berikut [16]:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (2.3)$$

Sementara itu, a juga mengikuti perhitungan:

$$a_e = a + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

Dengan demikian hasil akhir persamaan untuk perhitungan dimensi segitiga pada mode TM₁₀ adalah:

$$f_{10} = \frac{2c}{3a_e\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.5)$$

2.6 Teknik Pencatuan Antena Mikrostrip

Pencatuan merupakan salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam merancang antena mikrostrip. Hal ini terkait bahwa catu antena merupakan sumber daya untuk antena tersebut. pencatuan antena mikrostrip ini dapat dibagi menjadi dua yakni pencatuan langsung dan pencatuan tak langsung. Pencatuan langsung merupakan teknik pencatuan dimana saluran pencatu memberikan catu langsung kepada elemen peradiasi. Sebaliknya pencatuan tidak langsung yaitu memberikan catu daya kepada antena secara tidak langsung dimana pencatu tidak terkena langsung dengan elemen peradiasi.

Terdapat dua jenis teknik pencatuan untuk teknik pencatuan langsung yaitu dengan *coaxial probe* atau dengan *microstrip line* (saluran mikrostrip). Antena mikrostrip juga dapat dicatu menggunakan teknik *electromagnetic coupling*, *aperture coupling*, atau *coplanar waveguide coupling* sebagai catu tidak langsung [17].

Untuk teknik *microstrip line*, *microstrip line* tersebut dicetak pada substrat sehingga strukturnya masih planar tidak seperti pada teknik *coaxial probe*. Teknik ini termasuk teknik yang paling sering digunakan mengingat proses fabrikasi yang dilakukan cukup mudah. Namun demikian, seringkali terjadi peningkatan radiasi gelombang yang tidak diinginkan. [17]

2.6.1 Perhitungan Saluran Pencatu Mikrostrip

Rasio lebar saluran mikrostrip dengan ketebalan substrat (W/d) merupakan parameter yang berkaitan langsung dengan parameter impedansi karakteristik dan konstanta dielektrik. Salah satu parameter yang menjadi persyaratan dalam merancang suatu antena adalah impedansi karakteristik (Z_0). Hal ini terkait dengan *impedance matching* antara saluran mikrostrip tersebut dengan saluran pencatunya. Dalam rangka

memenuhi kesesuaian dengan parameter yang ada, perlu dilakukan perhitungan untuk parameter terkait.

Apabila diketahui dimensi saluran mikrostrip, nilai Z_0 dapat dihitung dengan cara [18]:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{4d}{W} \right) & W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.44 \right) \right]} & \frac{W}{d} > 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

Sedangkan apabila impedansi karakteristik yang diinginkan maupun konstanta dielektrik telah diketahui, perhitungan dimensi saluran mikrostripnya adalah sebagai berikut [18]:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Perhitungan dimensi saluran mikrostrip tidak hanya dapat dilakukan secara manual. Saat ini, terdapat perangkat lunak PCAAD yang mampu mengakomodasi perhitungan parameter dari saluran mikrostrip ini.

2.7 Parameter antenna

Dalam merancang antenna perlu diperhatikan beberapa parameter antenna yang ditetapkan sebelum antenna tersebut dirancang. Parameter-parameter antenna tersebut diantaranya:

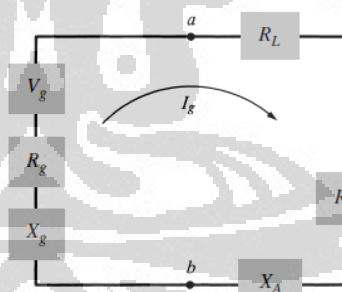
2.7.1 Impedansi Masukan

Impedansi masukan didefinisikan sebagai impedansi dari antena pada terminal penghubungnya atau merupakan rasio tegangan dengan arus pada pasangan terminal atau rasio dari komponen yang bersesuaian dari medan elektrik dengan medan magnetik pada suatu titik [13]. Pada umumnya impedansi masukan yang sering diperhatikan adalah impedansi masukan dari pasangan terminal yang merupakan terminal masukan dari antena tersebut. impedansi masukan dari suatu antena direpresentasikan

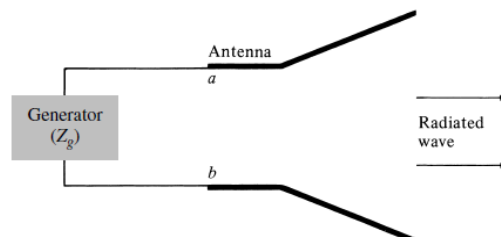
$$Z_A = R_A + jX_A$$

(2.8)

Z_A merupakan impedansi dari antena, R_A merupakan resistansi antena, sedangkan X_A merupakan reaktansi antena. Apabila mengacu pada Gambar 2.8 di bawah ini, terminal yang dimaksud sebagai impedansi masukan yakni pada bagian a-b.



Gambar 2.7 Rangkaian pengganti antena [13].



Gambar 2.8 Model sederhana antena [13].

Pada Gambar 2.8 ditunjukkan pula rangkaian pengganti dari suatu antenna terkait impedansi masukannya. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terdapat dua jenis resistansi pada antenna yaitu R_L dan R_r dimana R_L merupakan *Loss Resistance* dan R_r merupakan *Radiation Resistance* [13]. Impedansi masukan ini sangat erat kaitannya dengan kondisi *matched*, dimana ketika nilai impedansi masukan sama dengan impedansi karakteristik maka kondisi matching tersebut akan terpenuhi. Impedansi yang umum digunakan dalam merancang suatu antenna adalah 50 ohm.

2.7.2 *Matched Impedance*

Seperti yang telah disinggung sebelumnya, impedansi-impedansi yang bersesuaian dalam suatu antenna harus dalam kondisi *matched* satu sama lain. Dengan demikian, impedansi masukan harus sesuai dengan impedansi karakteristik saluran mikrostrip. Sementara itu pula, impedansi karakteristik dari saluran mikrostrip harus sesuai dengan impedansi beban antenna. Apabila kondisi antar ketiganya telah sesuai, maka kondisi *matched* antenna tersebut dapat dicapai.

Dalam teorema saluran transmisi, suatu saluran dapat dikatakan mencapai kondisi *matched* apabila nilai koefisien refleksi memiliki nilai nol ($\Gamma = 0$). Kondisi tersebut dicapai apabila nilai impedansi beban sama dengan nilai impedansi karakteristik. Pada kondisi ini, tidak ada lagi gelombang yang dipantulkan dari beban ke saluran transmisi [18]. Nilai koefisien refleksi tersebut dapat dijadikan sebagai suatu parameter penting untuk mengetahui suatu jaringan *matched* atau tidak. Untuk suatu saluran transmisi, koefisien refleksi dirumuskan sebagai [18]:

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.9)$$

Dimana:

V_0^- = gelombang pantul

V_0^+ = gelombang asli

Z_L = impedansi beban

Z_0 = impedansi karakteristik

Nilai absolut dari koefisien refleksi tersebut berada pada rentang 0 hingga 1 ($0 < |\Gamma| < 1$), dimana apabila bernilai nol menunjukkan bahwa keseluruhan daya diserap oleh beban dan mencapai kondisi *matched* sebaliknya apabila bernilai satu keseluruhan daya dari gelombang asli dipantulkan kembali oleh beban.

Pada kenyataannya sulit sekali dicapai kondisi *matched* ini. Karena kondisi ini, daya dari gelombang asli yang dihasilkan generator tidak dapat di salurkan semuanya ke beban. Adanya rugi-rugi yang dihasilkan ini disebut sebagai Return Loss dimana didefinisikan sebagai:

$$RL = 20 \log|\Gamma| = 20 \log \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.10)$$

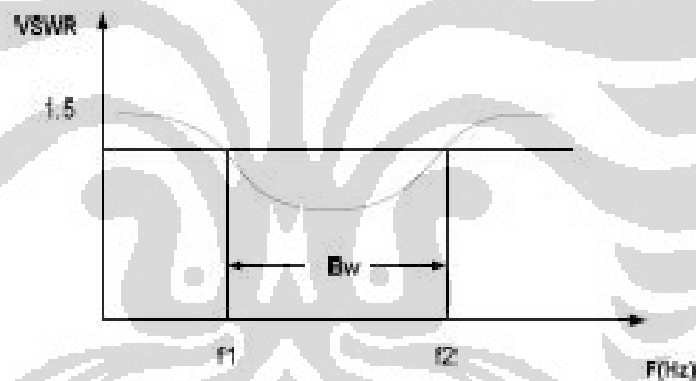
Sementara itu, terdapat parameter VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) yang dapat menunjukkan karakteristik *matched impedance* pula. VSWR adalah perbandingan antara amplitudo gelombang berdiri (*standing wave*) maksimum ($|V|_{\max}$) dengan minimum ($|V|_{\min}$). VSWR tersebut juga memiliki korelasi dengan koefisien refleksi. Hal ini dapat dilihat pada persamaan untuk memperoleh VSWR, yakni [18]:

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.11)$$

Pada saat pengukuran atau simulasi, yang menjadi acuan bahwa antenna tersebut *matched* atau tidak justru dilihat menggunakan return loss atau VSWR ini daripada menggunakan koefisien refleksi. Oleh karena itu, kedua parameter ini harus benar-benar diperhatikan. Untuk perancangan antenna pada penelitian ini menggunakan batas return loss < -10 dB atau setara dengan $VSWR < 1,9$.

2.7.3 Bandwidth

Bandwidth dari sebuah antenna didefinisikan sebagai jarak dari frekuensi-frekuensi dimana performa (karakteristik) dari antenna sesuai dengan standar yang ditetapkan. *Bandwidth* suatu antenna juga dapat didefinisikan sebagai rentang antar frekuensi samping dari suatu frekuensi tengah (biasanya frekuensi resonansi untuk antenna *dipole*) yang mana karakteristik-karakteristik antenna (seperti impedansi masukan, pola radiasi, beamwidth, polarisasi, *gain*, efisiensi, VSWR, return loss) masih terpenuhi [13]. Untuk itu, apabila ingin menghitung *bandwidth* harus mengacu kepada karakteristik tersebut. Pada Gambar 2.10 ditunjukkan perhitungan rentang *bandwidth* mengacu pada return loss dimana rentang frekuensi dihitung saat nilai *return loss* $\leq -9,54$ dB atau $VSWR \leq 2$ dB.



Gambar 2.9 Representasi *bandwidth* pada grafik *retrun loss* [19]

Fractional bandwidth dari suatu antenna menyatakan seberapa lebar *bandwidth* yang dimiliki oleh antenna tersebut [20]. *Fractional bandwidth* ini dinyatakan sebagai perbandingan antara frekuensi atas dan frekuensi bawah dibandingkan dengan frekuensi tengah antenna seperti yang dinyatakan pada rumus di bawah ini:

$$BW = \frac{f_h - f_l}{f_c} \times 100 \% \quad (2.12)$$

Dengan;

f_h = frekuensi tertinggi dalam *band* (GHz)

f_l = frekuensi terendah dalam *band* (GHz)

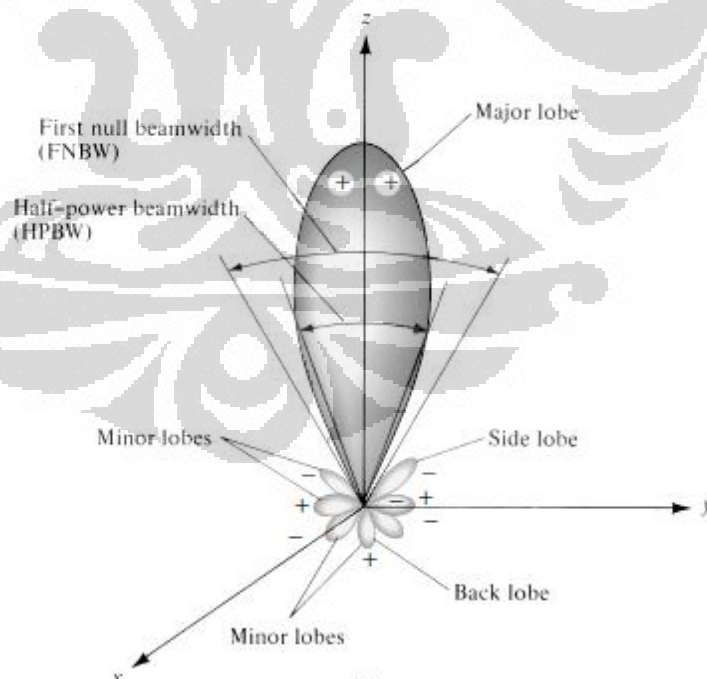
f_c = frekuensi tengah dalam *band* (GHz),

$$f_c = \frac{f_h + f_l}{2} \quad (2.13)$$

2.7.4 Pola Radiasi

Pola radiasi antenna didefinisikan sebagai fungsi matematis atau sebuah representasi grafik dari radiasi antenna sebagai sebuah fungsi dari koordinat ruang. Pada umumnya, pola radiasi ditentukan pada daerah *far field* dan direpresentasikan sebagai suatu fungsi koordinat arah [13].

Pola radiasi ini direpresentasikan dengan cuping- cuping (lobes) dimana terdapat bagian yang disebut sebagai *main/major* (utama), *minor*, *side* (samping), serta *back* (belakang) [13]. Representasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Representasi pola radiasi [13]

Main lobe ialah lobe/cuping radiasi yang memiliki arah radiasi maksimum sedangkan *side lobe* ialah lobe/cuping selain *main lobe*. Sementara itu, *back lobe* ialah lobe yang arahnya berlawanan 180 dengan *mainlobe*. *Side lobe* dan *back lobe* merupakan bagian dari / *minor lobe* yang keberadaannya tidak diharapkan.

Pola radiasi ini dapat dibedakan menjadi :

- Pola Isotropik

Antena isotropik didefinisikan sebagai sebuah antena tanpa rugi-rugi secara hipotesis yang mempunyai radiasi sama besar ke setiap arah

- Pola *Directional*

Antena yang mempunyai pola radiasi atau pola menerima gelombang elektromagnetik yang lebih efektif pada arah-arah tertentu saja. Salah satu contoh antena *directional* adalah antena dengan pola *omnidirectional*.

2.7.5 Gain

Ada dua jenis parameter penguatan (*Gain*) yaitu *absolute gain* dan *relative gain* [13]. *Absolute gain* pada sebuah antena didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas pada arah tertentu dengan intensitas radiasi yang diperoleh jika daya yang diterima oleh antena teradiasi secara isotropik. Intensitas radiasi yang berhubungan dengan daya yang diradiasikan secara isotropik sama dengan daya yang diterima oleh antena (P_{in}) dibagi dengan 4π . *Absolute gain* ini dapat dihitung dengan rumus [13]:

$$gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.14)$$

Selain *absolute gain* juga ada *relative gain*. *Relative gain* didefinisikan sebagai perbandingan antara perolehan daya pada sebuah arah dengan perolehan daya pada antena referensi pada arah yang

direferensikan juga. Daya masukan harus sama di antara kedua antenna itu. Akan tetapi, antenna referensi merupakan sumber isotropik yang *lossless* ($P_{in}(lossless)$). Secara rumus dapat dihubungkan sebagai berikut [11]:

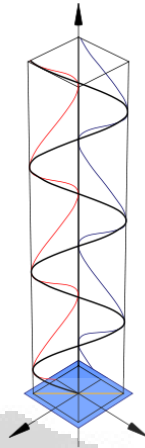
$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}(lossless)} \quad (2.15)$$

2.7.6 Polarisasi

Polarisasi antenna adalah polarisasi dari gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan oleh antenna. Jika arah tidak ditentukan maka polarisasi merupakan polarisasi pada arah *gain* maksimum [13]. Pada prakteknya, polarisasi dari energi yang teradiasi bervariasi dengan arah dari tengah antenna, sehingga bagian lain dari pola radiasi mempunyai polarisasi yang berbeda.

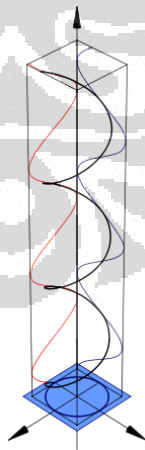
Polarisasi dari gelombang yang teradiasi didefinisikan sebagai suatu keadaan gelombang elektromagnet yang menggambarkan arah dan magnitudo vektor medan elektrik yang bervariasi menurut waktu. Selain itu, polarisasi juga dapat didefinisikan sebagai gelombang yang diradiasikan dan diterima oleh antenna pada suatu arah tertentu [13].

Polarisasi dapat diklasifikasikan sebagai *linear* (linier), *circular* (melingkar), atau *elliptical* (elips). Polarisasi linier (Gambar 2.11) terjadi jika suatu gelombang yang berubah menurut waktu pada suatu titik di ruang memiliki vektor medan elektrik (atau magnet) pada titik tersebut selalu berorientasi pada garis lurus yang sama pada setiap waktu [13].

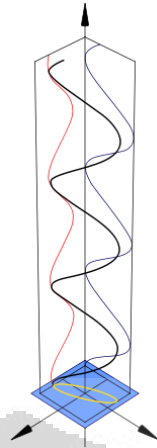


Gambar 2.11 Polarisasi linier [21]

Polarisasi melingkar (Gambar 2.12) terjadi jika suatu gelombang yang berubah menurut waktu pada suatu titik memiliki vektor medan elektrik (atau magnet) pada titik tersebut berada pada jalur lingkaran sebagai fungsi waktu. Polarisasi melingkar dibagi menjadi dua, yaitu *Left Hand Circular Polarization (LHCP)* dan *Right Hand Circular Polarization (RHCP)*. *LHCP* terjadi ketika $\delta = +\pi/2$, sebaliknya *RHCP* terjadi ketika $\delta = -\pi/2$



Gambar 2.12 Polarisasi melingkar [21]



Gambar 2.13 Polarisasi elips [21]

Polarisasi elips (Gambar 2.13) terjadi ketika gelombang yang berubah menurut waktu memiliki vektor medan (elektrik atau magnet) berada pada jalur kedudukan elips pada ruang [13].

BAB 3

ALUR PERANCANGAN ANTENA

3.1 Menentukan Karakteristik Antena

Langkah pertama dalam merancang suatu antena adalah dengan mengetahui terlebih dahulu spesifikasi antena yang ingin dirancang. Karakteristik-karakteristik yang perlu ditentukan diantaranya: frekuensi kerja, *impedance bandwidth*, *return loss* / VSWR dan *gain*. Adapun penentuan karakteristik mengikuti regulasi penerapan WiMAX di Indonesia yang diatur oleh PERATURAN DIREKTUR JENDERAL POS DAN TELEKOMUNIKASI NOMOR: 96/DIRJEN/2008. Mengacu pada regulasi tersebut, beberapa karakteristik yang diinginkan diantaranya:

- | | | |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1. Frekuensi kerja | : | 2.350 MHz (2.300-2.390 MHz) |
| 2. Impedansi terminal | : | 50 Ω koaksial konektor SMA |
| 3. <i>Impedance Bandwidth</i> | : | 90 MHz |
| 4. VSWR | : | $\leq 1,9$ |
| 5. <i>Return loss</i> | : | <10 dB |
| 6. <i>Gain</i> | : | Maksimum 15 dBi |

Pada rancangan antena ini, diharapkan antena mampu bekerja pada frekuensi 2.300-2.390 MHz atau dengan nilai frekuensi tengah 2.350 MHz. Frekuensi tengah resonansi ini, selanjutnya akan menjadi nilai parameter frekuensi dalam menentukan parameter-parameter lainnya seperti dimensi elemen peradiasi dan lebar saluran pencatu.

3.2 Peralatan yang digunakan untuk perancangan dan pengukuran antena

Pada pengukuran antena, diperlukan berbagai macam peralatan yang digunakan baik berupa perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*). Perangkat keras digunakan untuk fabrikasi dan

pengukuran antena, sedangkan perangkat lunak digunakan untuk melakukan simulasi dan untuk mengetahui karakteristik atau kinerja antena yang dirancang. Berikut ini adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran, yaitu

Perangkat keras yang digunakan dalam perancangan antena mikrostrip antara lain :

1. Substrat dielektrik FR4-*Epoxy*, sebagai substrat antena.
2. *Network Analyzer Hewlett Packard 8753E* (30 kHz - 6 GHz), alat ini digunakan untuk pengukuran pola radiasi dan *gain*
3. *Network Analyzer Agilent N5230* (300kHz-13,5 GHz), alat ini digunakan untuk pengukuran parameter *port* tunggal (*return loss*, VSWR, impedansi masukan) dan parameter *mutual coupling*.
4. *Connector SMA 50 ohm*.
5. Kabel *Coaxial 50 ohm RJ-55/U Fujikura*, digunakan untuk kabel penghubung antara port NA dengan antena pada pengukuran pola radiasi dan *gain*

Adapun perangkat lunak (*software*) yang digunakan yaitu :

1. *Ansoft HFSS versi 11.1.1*.

Perangkat lunak ini digunakan untuk merancang dan mensimulasikan antena yang akan dibuat. Setelah disimulasi akan diperoleh beberapa karakteristik antena seperti frekuensi kerja, *bandwidth*, impedansi input, *return Loss*, VSWR, dan pola radiasi.

2. *PCAAD 5.0*

Perangkat lunak ini digunakan untuk menentukan lebar saluran mikrostrip, impedansi karakteristik dan konstanta dielektrik efektif (ξ_{eff}).

3. *Microsoft Visio 2003*

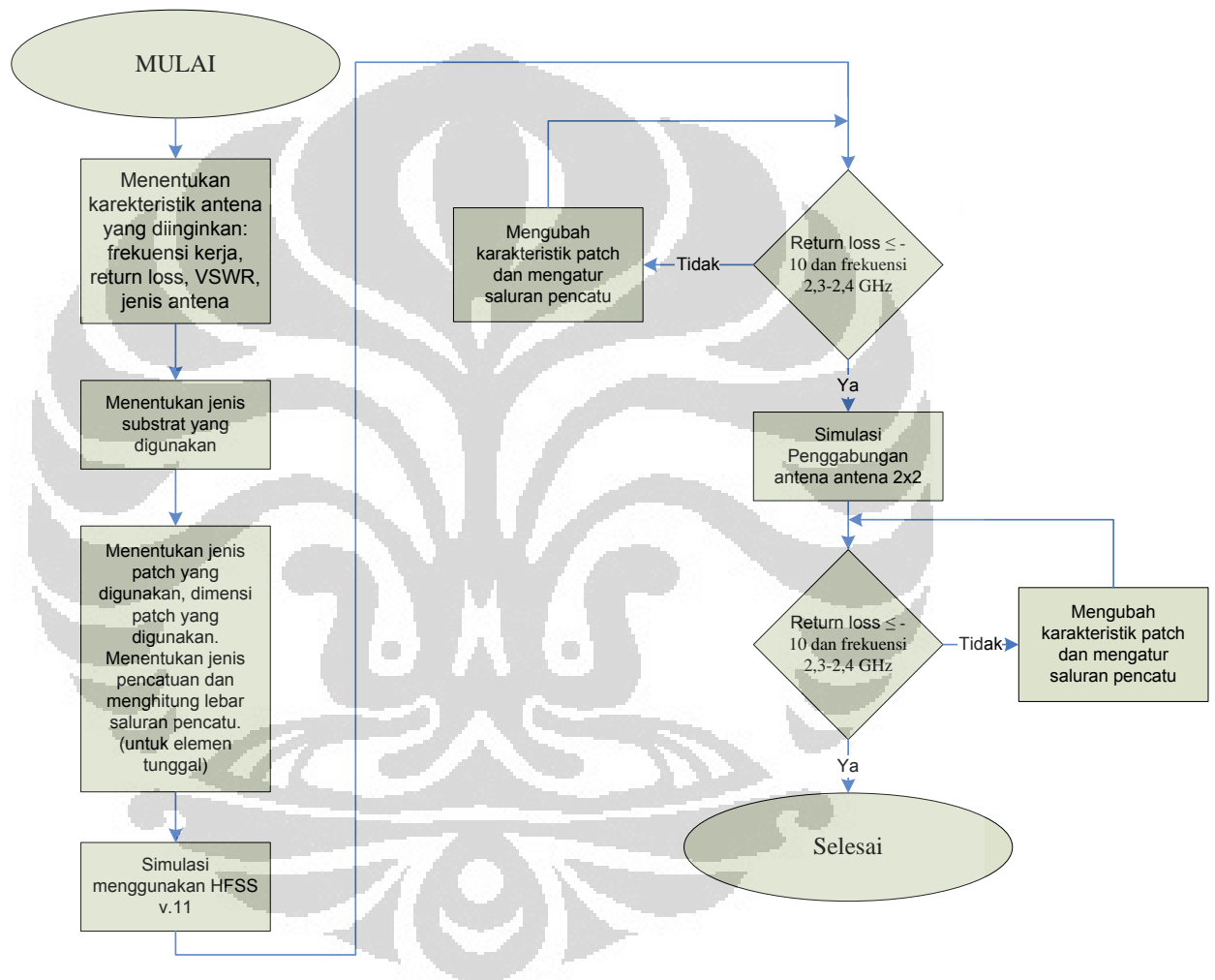
Perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan visualisasi desain perancangan untuk kemudian dapat difabrikasi.

4. *Microsoft Excel 2007*

Perangkat lunak ini digunakan untuk mengolah data dengan persamaan matematis.

3.3 Diagram Alir

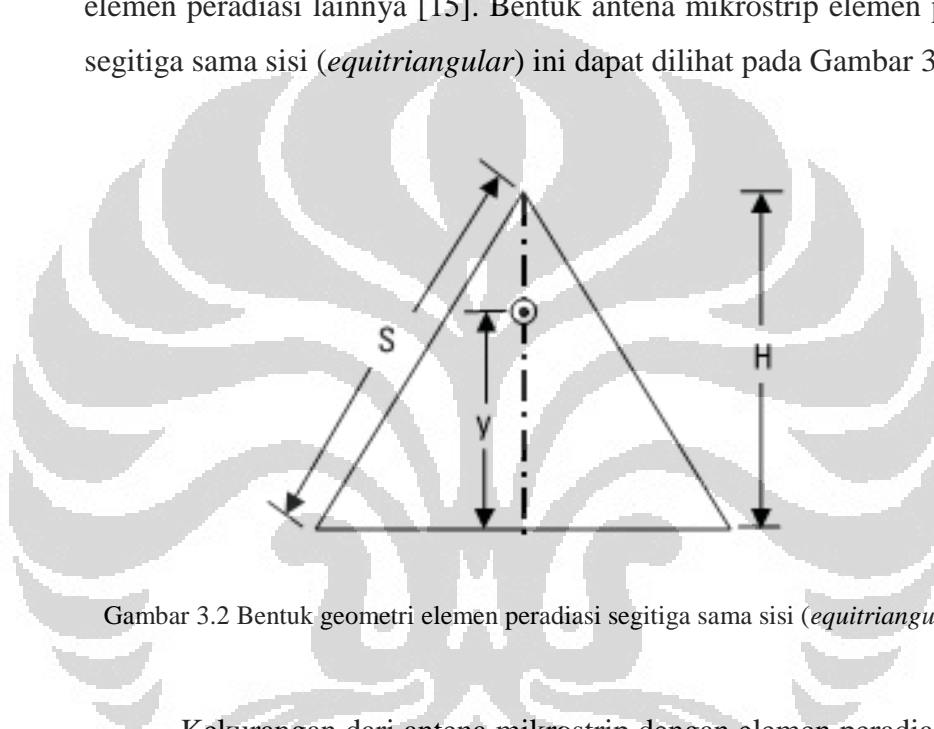
Untuk mempermudah dalam pembuatan antenna tersebut, perlu ditentukan langkah-langkah yang sistematis dalam bentuk diagram alir. Berikut ini (Gambar 3.1) adalah diagram alir untuk perancangan antenna tersebut:



Gambar 3.1 Diagram alir perancangan simulasi antenna.

3.4 Menentukan bentuk elemen peradiasi antenna mikrostrip

Sebagaimana telah disebutkan pada bagian dasar teori, perancangan antenna mikrostrip dapat menggunakan berbagai macam elemen peradiasi. Dalam skripsi ini, elemen peradiasi yang dipilih memiliki bentuk segitiga sama sisi (*equitriangular*). Pemilihan bentuk elemen peradiasi ini dikarenakan oleh karakteristik antenna segitiga yang memiliki dimensi lebih kecil dibandingkan dengan bentuk geometri elemen peradiasi lainnya [15]. Bentuk antenna mikrostrip elemen peradiasi segitiga sama sisi (*equitriangular*) ini dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Bentuk geometri elemen peradiasi segitiga sama sisi (*equitriangular*) [15]

Kekurangan dari antenna mikrostrip dengan elemen peradiasi antenna segitiga adalah sifat antenna yang memiliki *bandwidth* yang sempit. Oleh karena itu, pada perancangan antenna mikrostrip ini mungkin akan diperlukan peningkatan *bandwidth* agar sesuai dengan kriteria. Salah satu teknik yang paling memungkinkan untuk meningkatkan *bandwidth* ini nantinya adalah dengan memodifikasi elemen peradiasi tersebut mengingat teknik peningkatan *bandwidth* dengan mempertebal substrat tidak mungkin digunakan. Hal ini dikarenakan target perancangan adalah antenna mikrostrip yang sederhana dengan satu lapis substrat saja.

3.5 Menentukan Jenis Subtrat Yang Digunakan

Subtrat merupakan bahan dielektrik yang mempunyai porsi terbanyak pada struktur keseluruhan antenna yang dirancang. Oleh karena itu, karakteristik substrat yang dipilih untuk perancangan antenna mikrostrip akan memberikan pengaruh banyak pada perancangan antenna. Subtrat yang digunakan memiliki tiga karakteristik penting yang harus diperhatikan yaitu nilai konstanta dielektrik (ϵ_r), *dielectric loss tangent* ($\tan \delta$) dan ketebalan (h) tertentu. Ketiga nilai tersebut mempengaruhi frekuensi kerja, *bandwidth*, dan juga efisiensi dari antenna yang akan dibuat.

Pada skripsi ini digunakan substrat FR4 sengan ketebalan 1,6 mm. Pemilihan ini dilakukan melalui pertimbangan mengenai spesifikasi substrat sendiri terkait dengan ketersediaan, kualitas, maupun harga dari substrat tersebut. Untuk karakteristik dari substrat tersebut. dapat dilihat pada tabel Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi substrat yang digunakan.

Jenis Subtrat	FR4
Konstanta Dielektrik Relatif (ϵ_r)	4,3
<i>Dielectric Loss Tangent</i> ($\tan \delta$)	0,02
Ketebalan Subtrat (h)	1,6 mm

3.6 Perancangan Elemen Peradiasi Segitiga Elemen Tunggal

Setelah didapatkan spesifikasi mengenai substrat yang digunakan serta spesifikasi antenna yang telah diinginkan, dengan demikian dapat dilakukan perhitungan bagian-bagian dari antenna. Pertama, bagian antenna yang dihitung yaitu elemen peradiasi dari antenna. Spesifikasi antenna yang dirancang di sini akan bekerja pada frekuensi 2.350 MHz (2.300-2.390 MHz) dengan frekuensi tengah 2.350 MHz. Dengan demikian, perhitungan

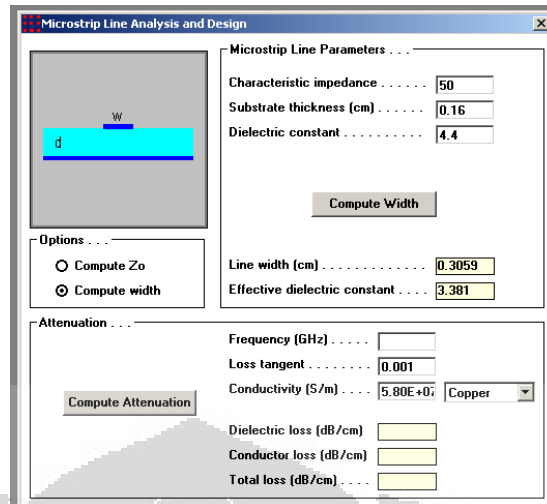
dimensi elemen peradiasi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.5.

$$f_{10} = \frac{2c}{3a_e \sqrt{\epsilon_r}}, a = \frac{2c}{3f_{10} \sqrt{\epsilon_r}} = 41,93 \text{ mm}$$

3.7 Perancangan Lebar Saluran Pencatu

Teknik pencatutan yang akan digunakan dalam perancangan antenna mikrostrip ini adalah pencatutan saluran mikrostrip langsung (*direct microstrip line*). Teknik pencatutan yang sering digunakan untuk antenna mikrostrip elemen peradiasi segitiga pada umumnya adalah dengan teknik *coaxial probe* [22], [23], [24], [25]. Atau menggunakan teknik pencatutan *electromagnetic coupling* [26] yang mampu meningkatkan *bandwidth*. Namun demikian, penggunaan teknik pencatutan tersebut membuat antenna kurang sederhana. Penggunaan teknik pencatutan ini dipilih untuk mendukung perancangan antenna yang sederhana karena antenna yang dihasilkan akan menjadi planar.

Seperti yang telah disebutkan pada dasar teori, dimensi saluran pencatu dapat diketahui melalui dua cara yaitu melalui perhitungan atau menggunakan perangkat lunak PCAAD. Tampilan perangkat lunak ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. Berdasarkan kriteria yang diinginkan, impedansi yang diinginkan adalah 50 ohm. Penentuan impedansi tersebut terkait dengan antenna yang nantinya akan dihubungkan dengan konektor SMA 50ohm. Dengan demikian diharapkan kondisi *matched* dapat terjadi antara keduanya. Hal inilah yang membuat impedansi karakteristik yang dipakai adalah 50 ohm.

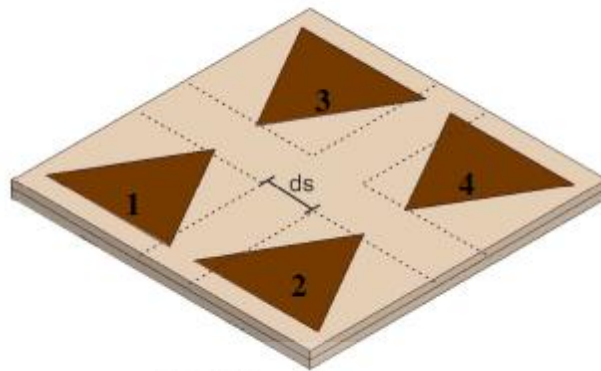


Gambar 3.3 Tampilan PCAAD.

Dengan memasukkan karakteristik impedansi yang diinginkan dan parameter-parameter substrat yang digunakan, maka program ini akan secara otomatis menampilkan besar lebar dari saluran pencatu agar menghasilkan nilai impedansi yang diinginkan. Pada PCAAD ini didapatkan nilai untuk menghasilkan nilai impedansi 50 ohm dengan menggunakan nilai parameter substrat yang digunakan dalam perancangan ini, dibutuhkan lebar saluran pencatu sebesar 3,1 mm.

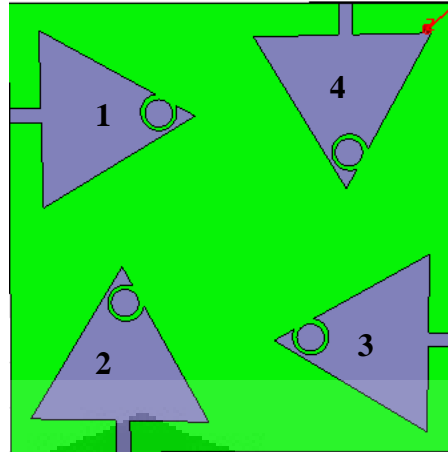
3.8 Perancangan antena mikrostrip MIMO 2x2

Apabila perancangan antena mikrostrip elemen peradiasi segitiga tunggal telah mencapai kondisi optimum yakni telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan, antena tersebut dapat digabungkan secara bersamaan untuk dibuat perancangan antena MIMO 2x2. Antena MIMO 2x2 ini dapat dikonfigurasi dengan berbagai macam konfigurasi dengan konfigurasi yang umum dijumpai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut ini:



Gambar 3.4 Contoh konfigurasi antenna mikrostrip MIMO 2x2 [27]

Parameter yang menjadi perhatian penting dalam perancangan antenna mikrostrip MIMO adalah parameter *mutual coupling*. Apabila mengacu pada konfigurasi antenna mikrostrip MIMO pada Gambar 3.4, pengaruh medan antar antenna yang bersebelahan tidaklah sama. Hal ini terkait dengan arah peletakkan elemen peradiasi. Dengan konfigurasi antenna mikrostrip MIMO pada Gambar 3.4, antenna yang saling bersebelahan tersebut dapat memperoleh efek yang tidak seragam yakni efek medan yang lebih kuat dari salah satu antna sebelahny disaat yang bersamaan akan memperoleh efek yang lebih rendah dari antenna bersebelahan lainnya. Efek yang tidak seragam ini akan memberikan pengaruh pada kinerja antenna karena medan yang dihasilkan pada setiap titik antenna tidaklah sama. Oleh karena itu, dalam rangka memperoleh rancangan antenna dengan efek *mutual coupling* yang seragam antar antenanya, dalam skripsi ini dirancang antenna mikrostrip MIMO dengan konfigurasi memutar. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Rancangan awal konfigurasi antenna MIMO 2x2

Disamping itu, antenna pemancar (Tx) maupun antenna penerima (Rx) perlu ditentukan pula pada bagian awal perancangan terkait dengan mode antenna MIMO 2x2. Untuk konfigurasi antenna mikrostrip ini, diinginkan pasangan antenna pemancar maupun antenna penerima adalah antenna yang berseberangan. Dalam hal ini, antenna pemancar adalah antenna 1 dengan antenna 3 sedangkan antenna penerima adalah antenna 2 dan antenna 4. Pemilihan mode ini didasarkan kepada peninjauan efek *mutual coupling* yang diakibatkan oleh suatu antenna dilakukan pada antenna yang bersebelahan. Dengan demikian, efek *mutual coupling* yang dihasilkan lebih beragam dibandingkan apabila peninjauan dilakukan dengan salah satunya merupakan antenna yang berseberangan.

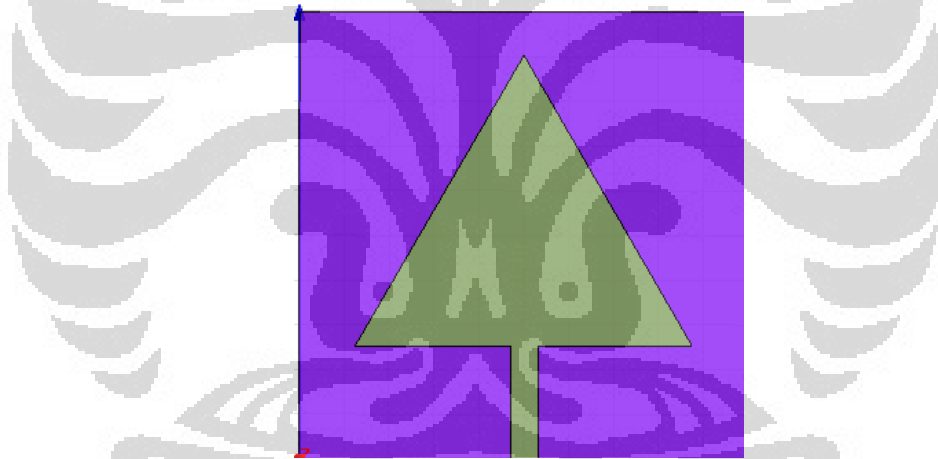
BAB 4

SIMULASI PERANCANGAN ANTENA

4.1 Simulasi Rancangan Antena Mikrostrip Elemen Tunggal

4.1.1 Hasil rancangan awal

Dengan parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya, tiap-tiap parameter perancangan yang ada dirancang pada simulator HFSS. Letak elemen peradiasi bentuk segitiga diletakkan tepat di tengah-tengah substrat. Dimensi substrat yang digunakan adalah 50x50 mm. Untuk lebih jelas, hasil perancangan antena yang diinginkan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 4.1 Rancangan awal antena mikrostrip.

Adapun spesifikasi ukuran perancangan antena tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini:

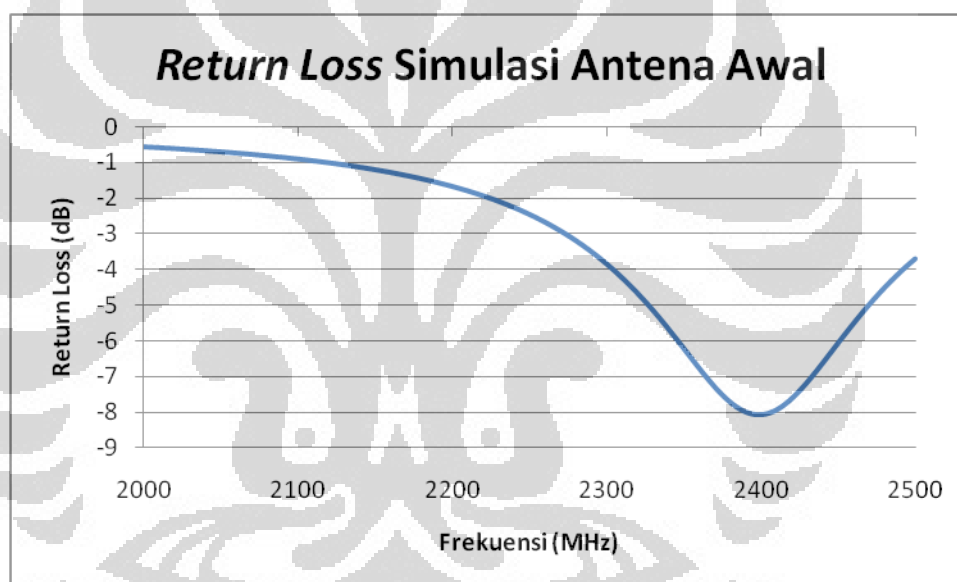
Tabel 4.1 Tabel spesifikasi rancangan awal.

Parameter	Ukuran (mm)
Sisi dimensi elemen peradiasi segitiga (a)	41,93
Ukuran dimensi substrat	50x50

Lebar saluran mikrostrip (w)	3,1
------------------------------	-----

4.1.2 Hasil Simulasi Rancangan Awal

Setelah dilakukan simulasi terhadap rancangan awal antenna kemudian dapat dilakukan observasi terhadap hasil-hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut. Parameter pertama yang diperhatikan dari hasil simulasi adalah terkait dengan *matched impedance*. Parameter ini ditunjukkan dengan grafik *return loss* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



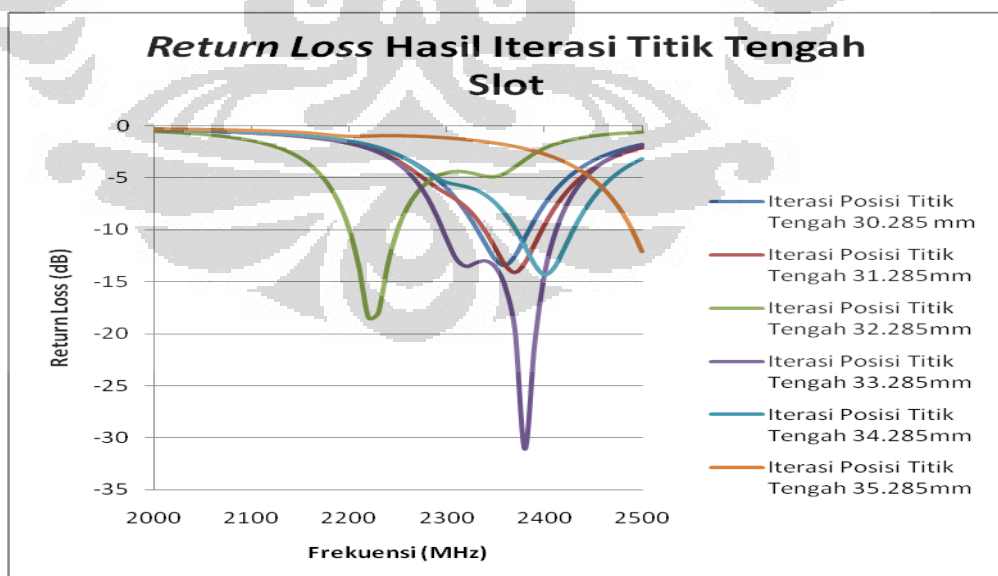
Gambar 4.2 Grafik *Return loss* simulasi awal

Berdasarkan grafik *return loss* hasil simulasi, frekuensi resonansi telah muncul. Akan tetapi, frekuensi yang diinginkan 2.350 MHz bergeser ke frekuensi 2.400 MHz. Sementara itu, nilai *return loss* pada frekuensi resonansi tersebut berada pada nilai -8 dB. Dengan demikian, dari hasil simulasi tersebut dapat dikatakan bahwa perancangan awal telah mendekati spesifikasi antenna yang diinginkan untuk parameter frekuensi kerjanya. Namun demikian, *matched impedance* dari rancangan antenna tersebut masih kurang baik. Oleh karena itu, hal yang dibutuhkan adalah

bagaimana cara untuk memperbaiki *matched impedance* tersebut. Untuk memperoleh perbaikan dari hasil simulasi rancangan awal ini dilakukan karakterisasi perancangan antenna.

4.1.3 Karakterisasi Perancangan Antena Elemen Tunggal

Permasalahan yang perlu menjadi perhatian dari rancangan antenna awal adalah *matched impedance*, frekuensi kerja, serta *bandwidth* yang dibutuhkan. Hal yang dilakukan pertama kali adalah memperbaiki *matched impedance* bersamaan dengan mendapatkan *bandwidth* yang lebar. Dengan mempertimbangkan kedua hal tersebut, bagian yang perlu dimodifikasi adalah elemen peradiasi. Dengan memodifikasi elemen peradiasi, akan memberikan pengaruh kepada keduanya. Pada beberapa penelitian [28], [22] penambahan *slot* pada elemen peradiasi berhasil meningkatkan *bandwidth* suatu antenna. Untuk itu, dari disain perancangan tersebut diberikan modifikasi berupa *slot* dimana dalam skripsi ini digunakan *slot* berbentuk *ring*. Melalui penambahan *slot ring* serta dilakukan iterasi diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik *return loss* iterasi *slot ring*

Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 3.4 di atas, pemberian *slot* pada elemen peradiasi memperbaiki *matched impedance*. Tidak hanya itu, *bandwidth* dengan lebar 100 MHz pun dapat diperoleh. Untuk lebih jelasnya, hasil iterasi titik tengah *ring* (dihitung dari sisi saluran pencatu) dari simulasi dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2 Hasil iterasi *return loss* dan *bandwidth*

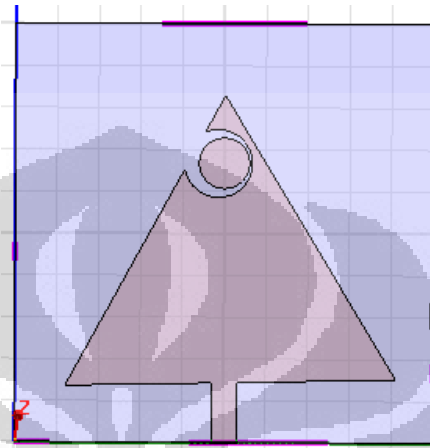
Titik Tengah Lingkaran (mm)	<i>Return loss</i> F:2.35 MHz (dB)	<i>Bandwidth</i> (GHz)
30,285	-12,19	0.054
31,285	-10,98	0.059
32,285	-4,88	-
33,285	-13,14	0.116
34,285	-7,00	-
35,285	-1,56	-

Hasil iterasi menunjukkan bahwa posisi penempatan *slot ring* terbaik adalah dengan meletakkan *slot ring* tersebut dengan titik tengah sejauh 33,285mm dari bagian pencatu. Dengan meletakkan *slot ring* pada posisi tersebut, diperoleh nilai *return loss* pada frekuensi 2.345 MHz sebesar -13,14 dB dengan *bandwidth* yang dihasilkan adalah sebesar 116 MHz. Dengan demikian, kriteria ini telah memenuhi spesifikasi parameter yang diinginkan.

4.1.4 Hasil Simulasi Elemen tunggal dengan penambahan *slot ring*

Pada Gambar 3.6 ditunjukkan geometri hasil rancangan akhir setelah pengkarakterisasian. Pada perancangan tersebut diberikan *slot ring*.

Akan tetapi, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.6, *slot ring* yang dibuat tidak lagi sepenuhnya berbentuk *ring*. Hal ini dikarenakan posisi *ring* untuk hasil optimum berada posisi tersebut. *Slot ring* tersebut dibuat dengan radius dalam 3.0375 mm sedangkan radius luar 4.075.



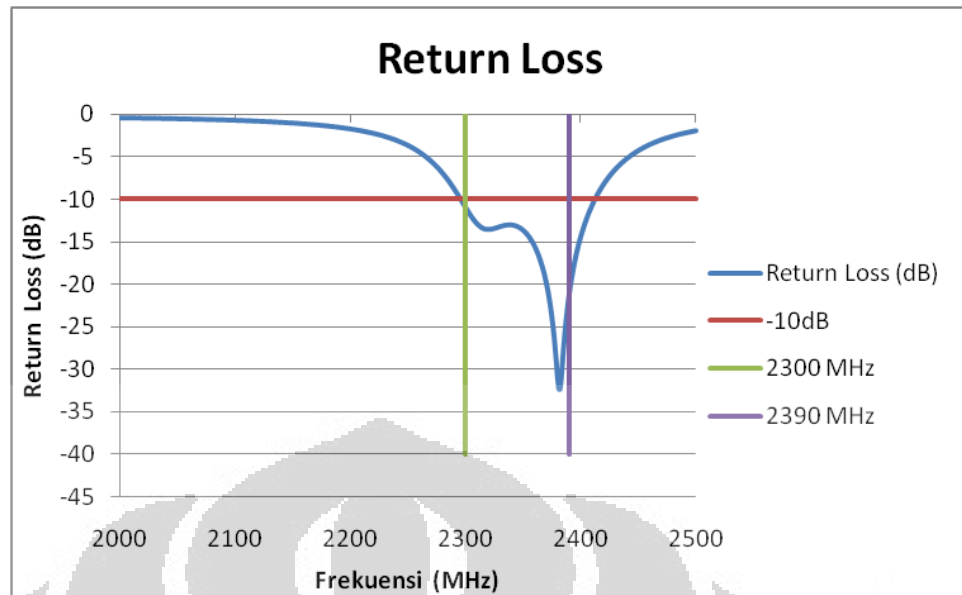
Gambar 4.4 Hasil rancangan simulasi akhir optimum.

Spesifikasi geometri dari rancangan antenna yang telah dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Dimensi hasil simulasi rancangan antenna optimum

Parameter	Ukuran (mm)
Sisi dimensi elemen peradiasi segitiga (a)	41,93
Ukuran dimensi substrat	50
Lebar Pencatu (w)	3,1
Titik Tengah <i>Slot Ring</i>	33,285

Dari rancangan optimum seperti pada Gambar 4.4, diperoleh parameter *return loss* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik *return loss* hasil rancangan optimum

Dari Gambar 3.7 tersebut dapat terlihat bahwa pada nilai *return loss* dibawah -10 dB ($VSWR \leq 2$) *impedance bandwidth* antenna berada pada rentang 2,296 GHz sampai dengan 2,412 GHz. Atau dengan kata lain, bandwidth yang dihasilkan dari perancangan antenna tersebut adalah sebesar 116 MHz. Dengan diperolehnya keseluruhan kriteria tersebut, antenna ini dapat bekerja pada frekuensi tersebut.

Adapun *fractional bandwidth* yang dicapai pada nilai $VSWR \leq 2$ adalah:

$$bandwidth = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100\%$$

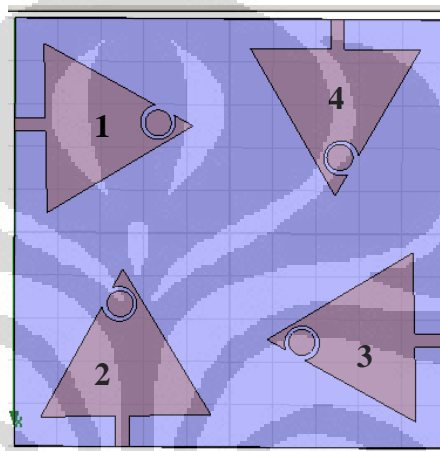
$$bandwidth = \frac{2,412 - 2,296}{2,35} = 4,96 \%$$

4.2 Simulasi Rancangan Antena Mikrostrip MIMO 2x2

4.2.1 Hasil Rancangan Awal Antena MIMO

Setelah dapat diperoleh rancangan antenna untuk elemen peradiasi tunggal, dapat diuji coba perancangan antenna MIMO. Antena MIMO yang

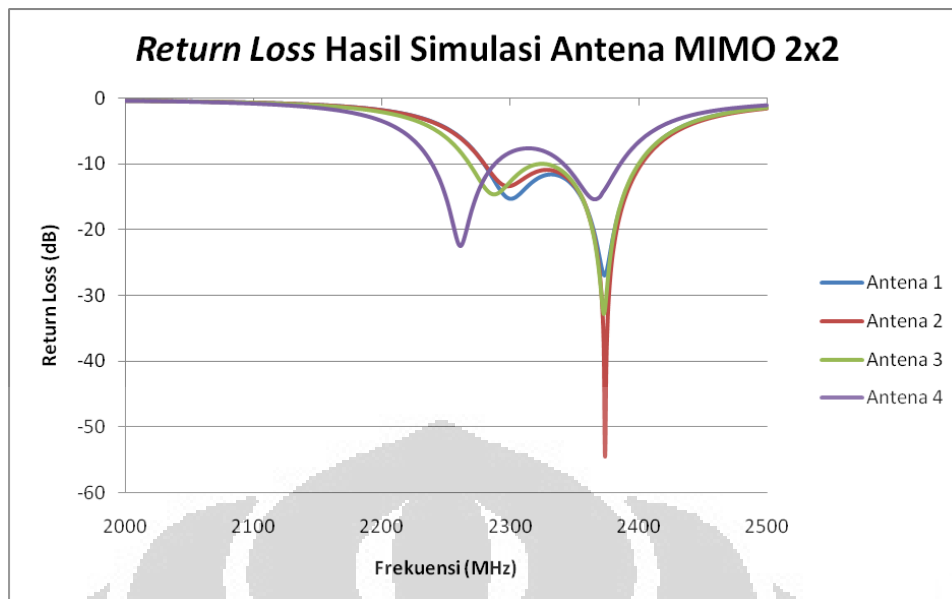
akan dibuat adalah antenna MIMO 2x2. Dengan demikian, pada perancangan antenna MIMO tersebut dibutuhkan empat buah antenna pada satu substrat. Konfigurasi yang digunakan dalam perancangan antenna mikrostrip MIMO 2x2 mengacu pada konsep rancangan sebagaimana telah disebutkan pada bab sebelumnya. Dimensi dari perancangan antenna tersebut menjadi 10cmx10cm. Hasil dari rancangan awal antenna MIMO 2x2 dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.6 Konfigurasi awal antenna MIMO 2x2

4.2.2 Hasil Simulasi Rancangan Awal

Seperti halnya pada perancangan antenna elemen tunggal, pada perancangan antenna MIMO perlu ditinjau parameter-parameter antenanya. Dengan memperhatikan hasil *return loss* dapat diketahui karakteristik *matching* maupun *bandwidth* antenna tersebut. Pada gambar 4.7 ditunjukkan grafik *return loss*.



Gambar 4.7 Grafik *return loss* konfigurasi awal antena MIMO 2x2

Grafik *return loss* pada gambar di atas, menunjukkan parameter S_{11} dari tiap-tiap antena. Berdasarkan hasil yang diperoleh, terlihat bahwa konfigurasi MIMO membuat karakteristik antena berubah. Karakteristik yang jelas terlihat berubah adalah *matched impedance* yang semakin buruk dengan ditunjukkan nilai *return loss* yang semakin besar. Untuk antena pertama hingga ketiga, nilai *return loss* semakin mendekati nilai -10dB sedangkan untuk antena keempat tidak lagi memenuhi kriteria yang diinginkan karena telah melewati batas -10dB.

4.2.3 Karakterisasi Rancangan Antena MIMO

Mengacu pada hasil konfigurasi awal antena MIMO yang menunjukkan parameter *return loss* kurang baik, perlu dilakukan perbaikan untuk memperbaiki parameter ini. Dengan demikian, spesifikasi antena yang telah ditentukan di awal dapat dipenuhi. Untuk itu, perlu dilakukan modifikasi ulang pada desain antena yang telah dibuat.

Parameter *return loss* yang kurang baik disebabkan oleh kondisi yang tidak *matched* antara saluran mikrostrip dengan elemen peradiasi. Selain itu, penggabungan antena akan menurunkan kualitas *matched*

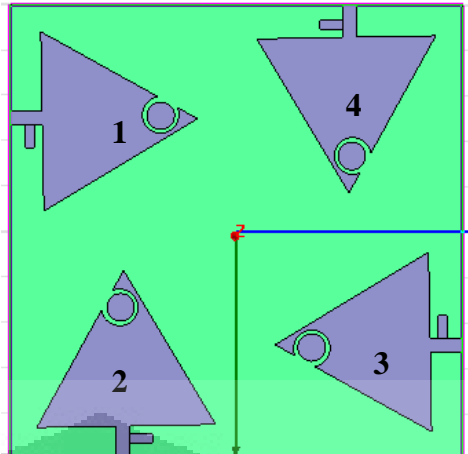
impedance pula walaupun antenna yang digabung berupa antenna dengan elemen peradiasi identik. Hal ini disebabkan oleh adanya efek *mutual coupling* yang diakibatkan oleh radiasi antenna lain dan mempengaruhi efek radiasi antenna itu sendiri. [13]

Teknik yang paling umum digunakan untuk memperbaiki *matched impedance* adalah dengan memerikan *stub* pada saluran transmisi dalam hal ini saluran mikrostrip. *Stub* merupakan rangkaian open atau rangkaian short pada saluran transmisi yang dihubungkan secara paralel atau seri dengan saluran pencatu, dan diletakkan pada jarak tertentu dari beban [18]. Dengan menggunakan teknik ini, kondisi *matched* antara saluran mikrostrip dengan elemen peradiasi sebagai beban dapat dicapai. Posisi *stub* yang diletakkan pada saluran mikrostrip perlu diperhitungkan melalui perumusan tersendiri.

Setelah melalui proses perhitungan posisi *stub*, terdapat dua kemungkinan untuk meletakkan *stub* tersebut. Hal ini dikarenakan posisi peletakkan *stub* lebih panjang dibandingkan dengan panjang saluran pencatunya. Apabila diterapkan pada perancangan, *stub* tersebut akan berada di luar perancangan antenna. Dengan demikian, penggunaan teknik *stub* secara teoritis melalui perhitungan tidak dapat diterapkan pada desain ini.

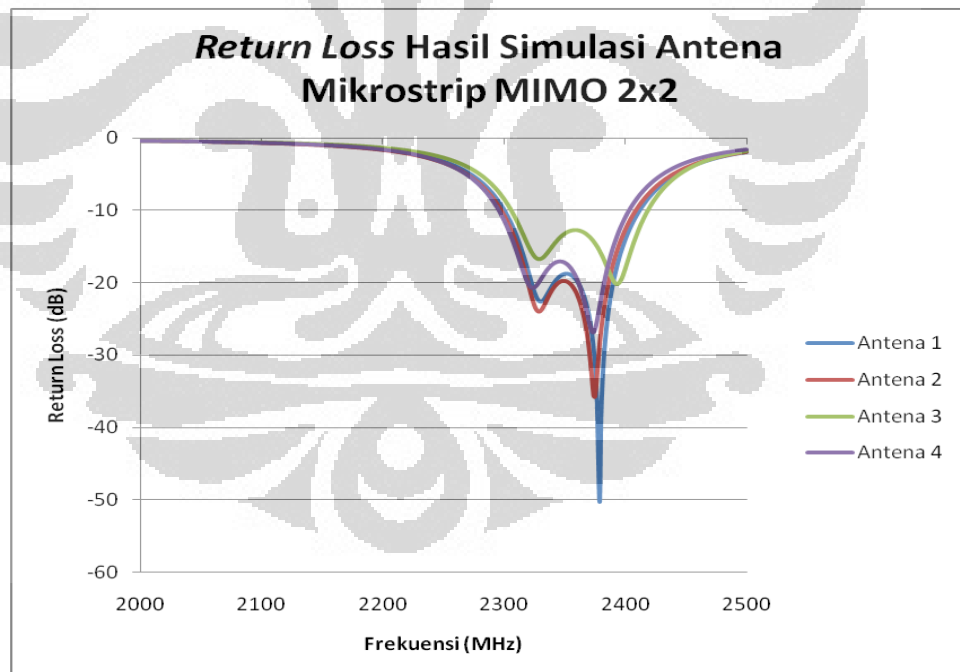
Walaupun secara teoritis penggunaan *stub* tidak memungkinkan, bukan berarti teknik ini tidak dapat digunakan. Penggunaan *stub* ini masih dimungkinkan dengan melakukan iterasi posisi *stub* maupun panjang *stub* pada saluran mikrostrip.

Dengan mensimulasi ulang desain sesuai dengan ukuran *stub* yang optimum maka hasil perancangannya seperti yang terlihat pada Gambar 4.8 berikut ini:



Gambar 4.8 Rancangan antenna mikrostrip MIMO 2x2 dengan *stub*.

Adapun grafik *return loss* yang dihasilkan dari simulasi dengan penambahan *stub* tersebut dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9

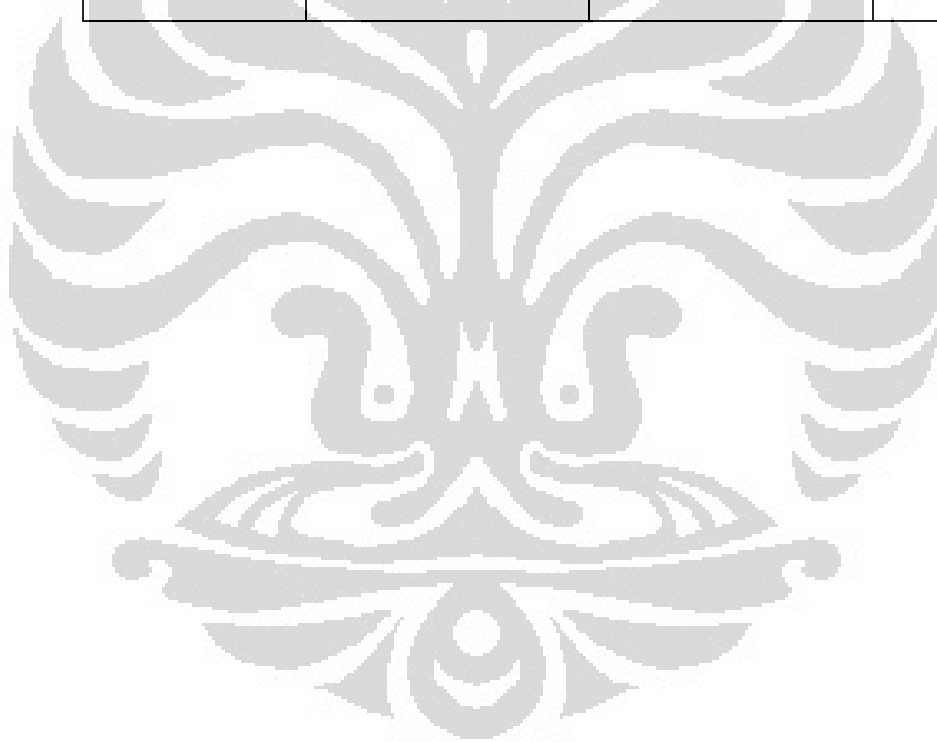


Gambar 4.9 Grafik *return loss* hasil simulasi antenna mikrostrip MIMO 2x2 dengan penambahan *stub*.

Berdasarkan grafik *return loss* yang ditunjukkan pada gambar 4.9, keseluruhan antenna telah memenuhi kriteria dengan *return loss* yang dihasilkan berkisar antara 107-113 MHz. Untuk lebih jelasnya, karakteristik tiap-tiap antenna ditunjukkan oleh tabel 4.4.

Tabel 4.4 *Bandwidth* antenna MIMO 2x2 dengan penambahan *stub*

Antena	Frekuensi (MHz)		<i>Bandwidth</i> (MHz)
	Maksimum	Minimum	
Antena 1	2412	2300	112
Antena 2	2409	2297	112
Antena 3	2419	2306	113
Antena 4	2403	2296	107



BAB 5

FABRIKASI DAN OPTIMASI

Berdasarkan hasil simulasi yang tercantum sebelumnya, menunjukkan bahwa spesifikasi dasar perancangan yakni *return loss* telah terpenuhi. Oleh karena itu, perancangan tersebut siap untuk difabrikasi. Pengukuran hanya dibatasi sampai *return loss* saja karena hasil *return loss* ini mewakili parameter lain seperti *VSWR*, *input impedance*, *bandwidth*, dan frekuensi kerja karena keseluruhan parameter tersebut berkaitan langsung.

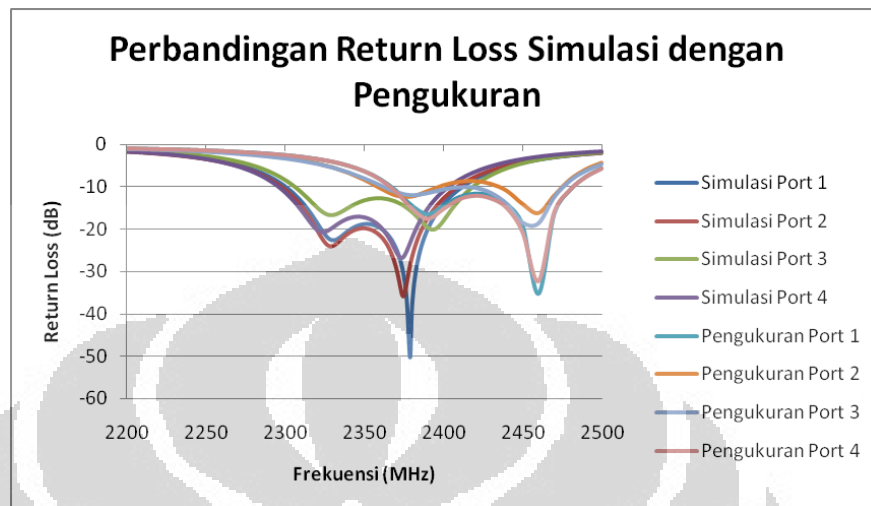
Fabrikasi rancangan antenna tersebut kemudian divalidasi dengan cara diukur parameter *return loss*. Selanjutnya, hasil pengukuran antenna tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi untuk kemudian dianalisis. Berdasarkan analisis antara hasil simulasi dan hasil fabrikasi tersebut, dirancang kembali rancangan baru berdasarkan karakterisasi antara keduanya untuk mendapatkan hasil fabrikasi antenna optimum yang sesuai dengan spesifikasi antenna.

Pengukuran parameter *return loss* ini dikategorikan sebagai pengukuran parameter *port* tunggal dimana tidak memerlukan adanya antenna lain untuk melakukan pengukuran. Pengukuran parameter ini menggunakan alat ukur *network analyzer*. Untuk melakukan pengukuran parameter *return loss*, antenna yang telah difabrikasi dipasang disalah satu *port network analyzer* tersebut. Selanjutnya, layar *network analyzer* akan menampilkan parameter *return loss* maupun parameter *port* tunggal lainnya sesuai dengan format yang diinginkan.

5.1 Hasil Pengukuran Fabrikasi Antena Awal

Pada bagian ini dilakukan pengukuran parameter *return loss* fabrikasi antenna sesuai dengan perancangan antenna hasil simulasi sebelumnya. Fabrikasi antenna tersebut selanjutnya diukur menggunakan *network analyzer* untuk memperoleh parameter *return loss*. Perbandingan

hasil *return loss* antara hasil simulasi dan hasil fabrikasi ditunjukkan oleh grafik *return loss* pada Gambar 5.1 berikut ini:



Gambar 5.1 Grafik *return loss* perbandingan rancangan awal hasil simulasi dengan pengukuran fabrikasi antenna

Berdasarkan grafik tersebut, hasil pengukuran antenna menunjukkan frekuensi tengah yang berbeda dibandingkan dengan hasil simulasi. Fabrikasi antenna memiliki frekuensi tengah yang lebih tinggi dibandingkan dengan simulasi antenna. Pergeseran frekuensi tengah ini terjadi pada keseluruhan *port* antenna. Untuk lebih jelas besarnya pergeseran frekuensi ini dapat dilihat pada tabel 5.1 berikut ini:

Tabel 5.1 Perbandingan frekuensi tengah rancangan awal hasil imulasi dengan pengukuran fabrikasi antenna

Port Antena	Frekuensi Tengah (MHz)		Perbedaan (MHz)
	Simulasi	Pengukuran	
Antena 1	2355	2425	70
Antena 2	2353	2415	62
Antena 3	2362	2415	53
Antena 4	2350	2425	75

Pergeseran frekuensi tengah antena fabrikasi berkisar antara 53-75 MHz. Fenomena ini memang sering terjadi mengingat simulasi tidak selalu sesuai dengan hasil fabrikasi. Hal ini dikarenakan dapat diakibatkan oleh adanya perbedaan berbagai ukuran-seperti elemen peradiasi, ketebalan substrat, maupun ketelitian ukuran lain- antara simulasi dengan fabrikasi. Sebagai contoh, pada saat simulasi, elemen peradiasi dibuat tanpa ketebalan, sedangkan kenyataannya tembaga sebagai elemen peradiasi tersebut memiliki ketebalan walaupun nilainya sangat kecil. Namun demikian, hal ini dapat memberikan pengaruh pada fabrikasi antena.

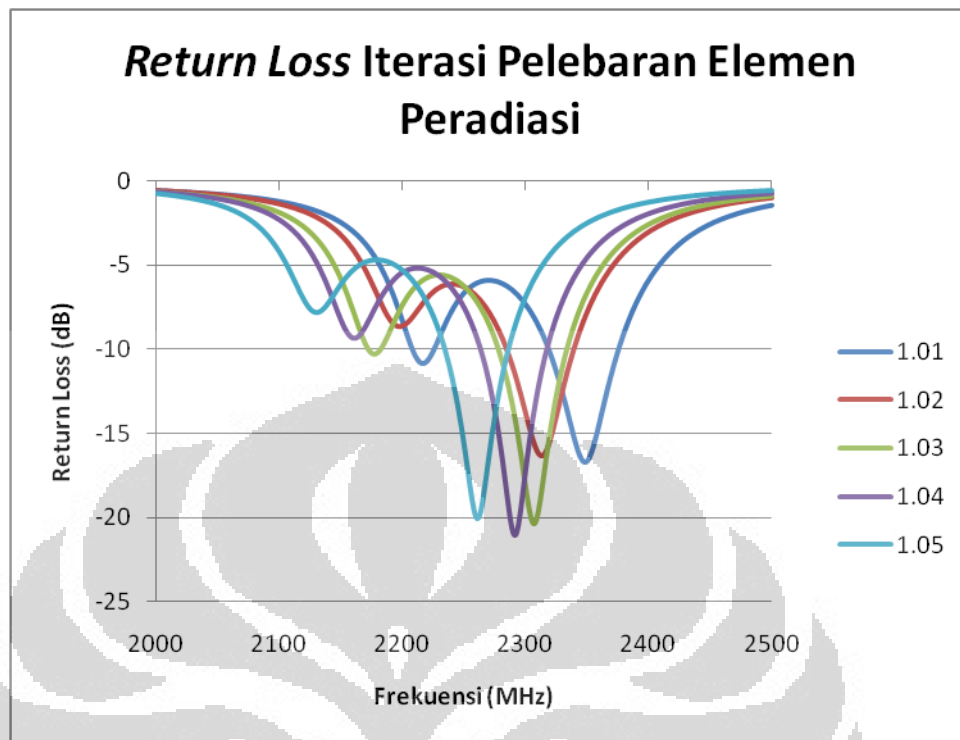
Perbedaan parameter *return loss* antara simulasi dan fabrikasi ini dijadikan acuan untuk merancang ulang antena yang ingin dibuat. Dengan demikian, diharapkan hasil akhir fabrikasi antena mampu memenuhi spesifikasi antena yang diinginkan.

5.1.1 Optimasi Fabrikasi Antena Untuk Pergeseran Frekuensi

Mengacu pada hasil fabrikasi yang menunjukkan bahwa terjadi pergeseran frekuensi tengah, perancangan ulang antena dilakukan lagi melalui simulasi. Perancangan ulang melalui simulasi ini selanjutnya dirancang pada rentang frekuensi 2.200-2.300MHz untuk mengantisipasi pergeseran frekuensi yang telah disebutkan sebelumnya.

Parameter yang berkaitan langsung dengan frekuensi kerja adalah dimensi elemen peradiasi. Berdasarkan perumusan, semakin besar elemen peradiasi semakin kecil frekuensi kerja yang dihasilkan antena tersebut, demikian pula sebaliknya. Mengacu pada karakteristik ini, untuk menggeser frekuensi kerja ke frekuensi yang lebih kecil perlu dilakukan perbesaran elemen peradiasi.

Dalam rangka memperoleh ukuran yang sesuai dengan frekuensi kerja yang diinginkan, dilakukan iterasi lebar elemen peradiasi melalui simulasi. Mekanisme perbesaran elemen peradiasi dilakukan dengan menerapkan teknik skala (*scaling*). Hasil iterasi dari simulasi tersebut ditunjukkan melalui grafik pada gambar 5.2.



Gambar 5.2 Grafik *return loss* iterasi pelebaran elemen peradiasi

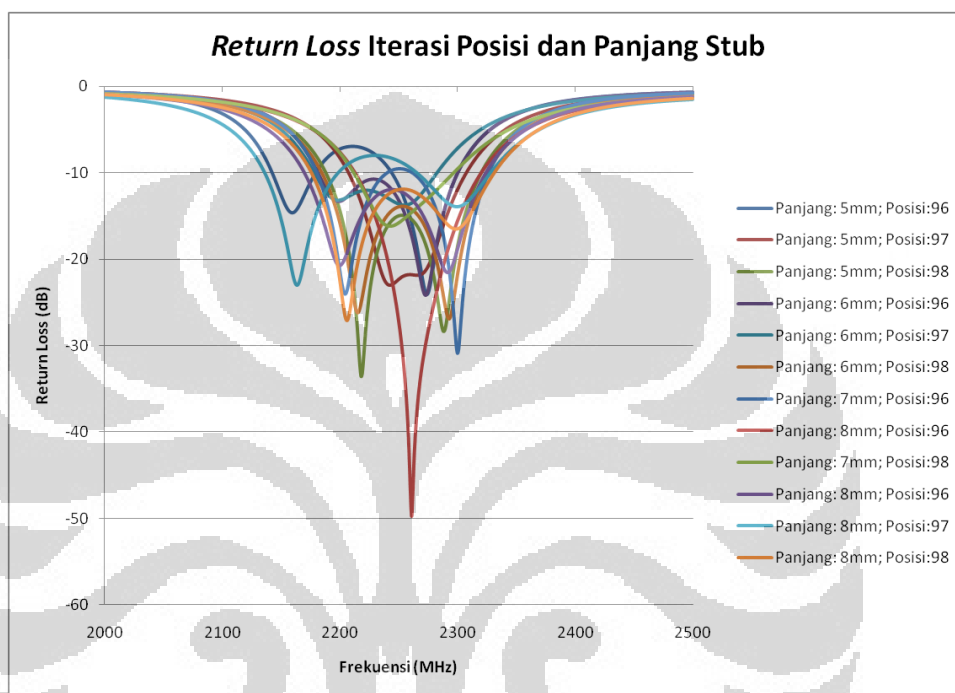
Mengacu pada karakteristik pergeseran frekuensi antara simulasi dan fabrikasi, pelebaran elemen peradiasi yang sesuai adalah dengan skala 1,03. Dengan skala tersebut, pergeseran frekuensi hasil fabrikasi dapat diantisipasi.

5.1.2 Optimasi Fabrikasi Antena Untuk Perolehan *Bandwidth* Dan Kondisi *Matched*

Pergeseran frekuensi yang telah dilakukan sebelumnya menyebabkan kondisi *matched* maupun *bandwidth* yang diinginkan tidak sesuai. Dengan demikian, perlu dilakukan modifikasi untuk memenuhi kriteria ini. Seperti halnya dilakukan pada prosedur sebelumnya, kondisi *matched* dapat diatur dengan peletakkan *stub* pada saluran transmisi dengan posisi yang tepat. Untuk itu, perlu dilakukan kembali iterasi posisi

dan panjang *stub* untuk menghasilkan *bandwidth* maupun *matched impedance* yang diinginkan.

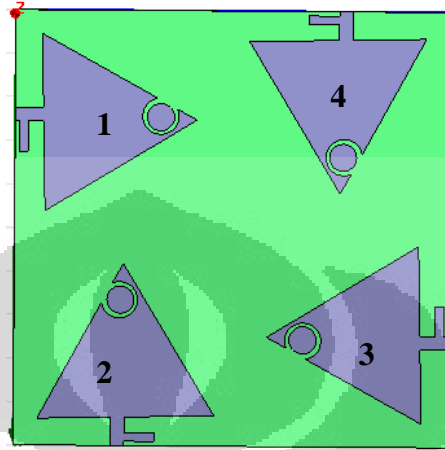
Berdasarkan studi parametrik diperoleh beberapa kemungkinan posisi dan panjang *stub* yang dapat digunakan. adapun hasil iterasi *stub* tersebut dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 5.3



Gambar 5.3 Grafik *return loss* iterasi posisi dan panjang *stub*.

Hasil iterasi *stub* menunjukkan terdapat berbagai kemungkinan posisi dan panjang *stub* yang menghasilkan kondisi *matched*. Namun demikian, untuk memperoleh hasil terbaik, dari keseluruhan kemungkinan dipilih kondisi *matched* yang paling baik. Dengan demikian panjang *stub* 7mm dengan posisi 97 merupakan pilihan yang paling baik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *return loss* yang mencapai -49 dB. Sementara itu, *bandwidth* yang dihasilkan juga masih memenuhi kriteria yakni sekitar 107 MHz dengan frekuensi tengah 2.268 MHz. Pergeseran frekuensi juga telah diperkirakan sesuai dengan karakteristik antenna yang telah diketahui sebelumnya.

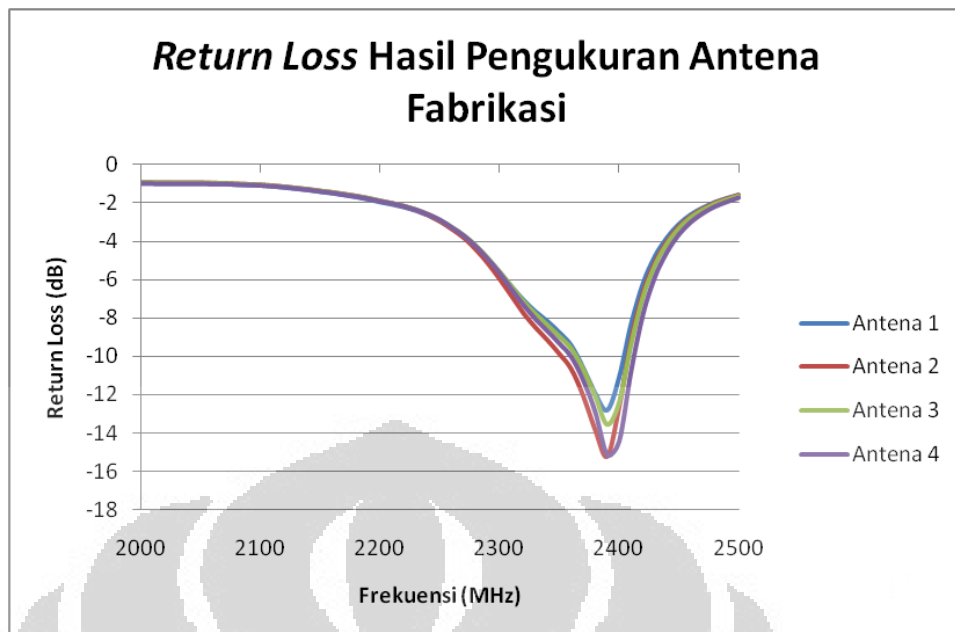
Gambar perancangan antenna setelah melalui optimasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.4. Rancangan tersebut akan difabrikasi untuk kemudian dilakukan pengukuran.



Gambar 5.4 Hasil rancangan optimum dengan penambahan *stub*.

5.2 Pengukuran Fabrikasi Antena Dengan Pergeseran Frekuensi

Melalui perancangan ulang antenna dengan simulasi, telah diperoleh rancangan optimum antenna. Setelah melalui proses fabrikasi, antenna tersebut diukur parameter *return loss*-nya. Hasil pengukuran parameter *return loss* fabrikasi antenna tersebut ditunjukkan pada grafik *return loss* pada Gambar 5.5



Gambar 5.5 Grafik *return loss* hasil pengukuran antena fabrikasi

Berdasarkan hasil pengukuran, pergeseran frekuensi yang diinginkan telah tercapai. Seperti yang terlihat pada grafik, frekuensi tengah antena bergeser ke frekuensi sekitar 2.380 MHz. Sementara itu, berdasarkan kondisi *matched*-nya *bandwidth* yang dihasilkan sekitar 40 MHz.

Hasil pengukuran yang diperoleh ternyata belum mampu memenuhi kriteria yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk itu, perlu dilakukan modifikasi lebih lanjut terhadap rancangan antena tersebut.

5.2.1 Optimasi Fabrikasi Antena Dengan Penambahan *Tuning Stub Loaded*

Mengingat hasil pengukuran jauh dari hasil simulasi perlu dilakukan modifikasi terhadap perancangan antena tersebut. Mengacu pada hasil rancangan terakhir, pergeseran frekuensi telah tercapai. Oleh karena itu, modifikasi antena didasarkan pada rancangan terakhir ini.

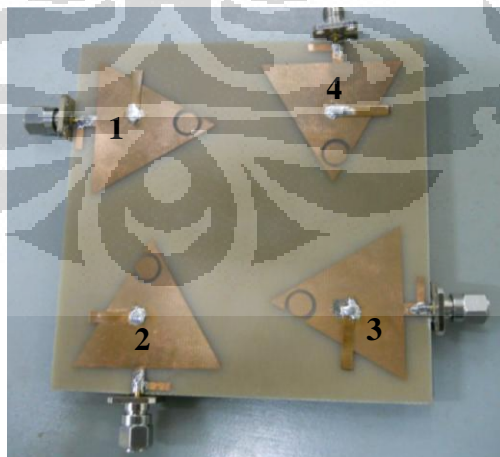
Melihat hasil pengukuran yang menunjukkan nilai *return loss* yang kurang begitu baik dan berimbas pada sempitnya *bandwidth*,

permasalahan dari perancangan tersebut adalah kondisi *matching* antena. Padahal, teknik *stub* telah digunakan pada saluran transmisi mikrostrip.

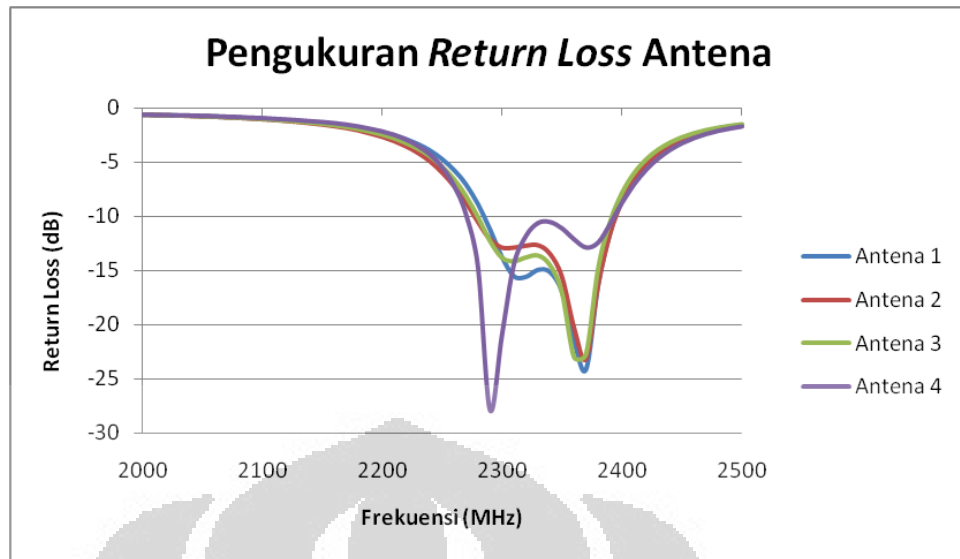
Untuk antena mikrostrip, teknik pemberian *stub* tidak selalu diletakkan pada saluran transmisi melainkan dapat diletakkan pada elemen peradiasi yang biasa disebut sebagai *tuning stub loaded* [16]. Dengan penambahan *stub* tersebut akan mempengaruhi kondisi *matched* antara saluran transmisi mikrostrip dengan elemen peradiasi tersebut.

Pemberian *stub* pada rancangan antena ini dilakukan dengan cara menambahkan lempengan tembaga pada elemen peradiasi. Penambahan *stub* tersebut diterapkan pada rancangan fabrikasi antena terakhir. Posisi yang mungkin untuk menempatkan *stub* tersebut adalah di bagian yang memiliki medan elektromagnetik yang kuat. Posisi ini terletak pada bagian di sekitar *slot* terkait dengan medan yang dihasilkan oleh gangguan *slot* tersebut. Melalui observasi secara manual, diperoleh posisi penempatan *stub* yang paling optimum. Penampakan antena yang telah ditambahkan *tuning stub loaded* dapat dilihat pada Gambar 5.6.

Dengan penambahan *tuning stub loaded* tersebut, memberikan kondisi *matched* pada tiap-tiap antena. Grafik *return loss* untuk hasil rancangan ini dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Penampakan antena dengan penambahan *tuning stub loaded*



Gambar 5. 7 Grafik *return loss* hasil pengukuran antena dengan penambahan *tuning stub loaded*



BAB 6

PENGUKURAN ANTENA DAN ANALISIS ANTENA

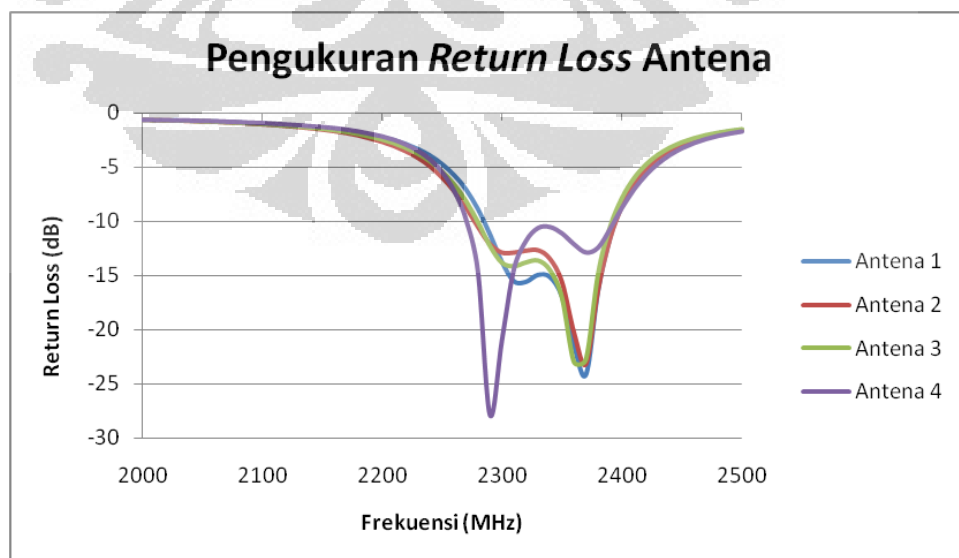
Pada bagian sebelumnya, telah ditunjukkan bahwa perancangan antenna telah mencapai kondisi optimum berdasarkan parameter *return loss*. Dengan demikian, dapat dilakukan pengukuran parameter lain seperti: *return loss*, VSWR, impedansi masukan, pola radiasi, *beamwidth*, serta *gain*.

6.1 Pengukuran Parameter *Port* Tunggal Antena

Pengukuran parameter *port* tunggal merupakan pengukuran antenna uji secara langsung tanpa bantuan antenna lainnya. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat ukur *network analyzer*. Pengukuran dilakukan pada masing-masing elemen sehingga diperoleh empat jenis data untuk masing-masing parameter

6.1.1 Parameter Return Loss

Hasil pengukuran parameter *return loss* untuk masing-masing antenna ditunjukkan pada grafik return loss (Gambar 6.1)



Gambar 6.1 Grafik *return loss* hasil pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran, untuk referensi *return loss* <-10 dB keempat antenna telah memenuhi spesifikasi antenna yang diinginkan. Untuk lebih jelas, frekuensi yang memenuhi referensi tersebut dapat dilihat pada tabel 6.1. Selain itu, pada tabel 6.1 juga ditunjukkan *bandwidth* yang diperoleh masing-masing antenna.

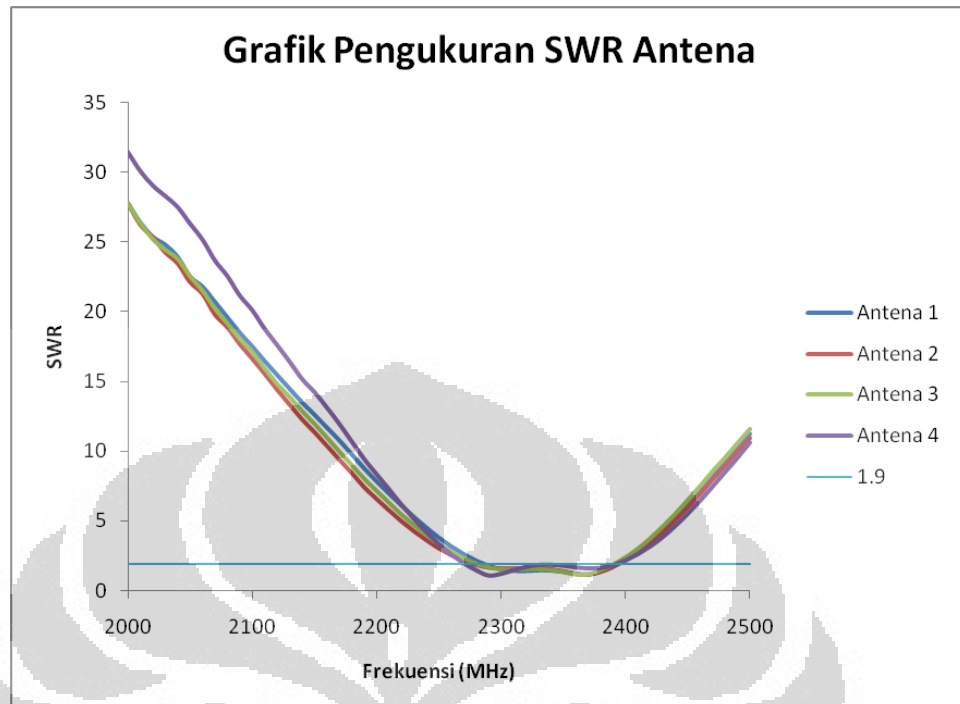
Seperti yang dapat dilihat pada tabel 6.1, *bandwidth* yang diperoleh berkisar antara 105-120 MHz. Sementara itu, jika dalam bentuk *fractional bandwidth*, nilainya antara 4,49-5,14%. Dengan demikian, kriteria antenna yang diinginkan telah terpenuhi mengacu pada hasil pengukuran yang tercantum pada tabel 6.1.

Tabel 6.1 Hasil pengukuran *port* tunggal berdasarkan parameter *return loss*

Antena	Frekuensi Minimum (MHz)	Frekuensi Maksimum (MHz)	<i>Bandwidth</i> (MHz)	<i>Fractional Bandwidth</i> (%)
Antena 1	2288	2393	105	4,49
Antena 2	2282	2390	108	4,62
Antena 3	2282	2392	110	4,71
Antena 4	2272	2392	120	5,14

6.1.2 Parameter VSWR

Hasil pengukuran VSWR dari antenna uji untuk tiap-tiap antenna ditunjukkan pada grafik VSWR (Gambar 6.2). Berdasarkan dasar teori, nilai VSWR berkaitan dengan nilai *return loss*. Oleh karena itu, hasil pengolahan data SWR ini tidak berbeda dengan parameter *return loss*. Untuk referensi VSWR<1,9 dapat diketahui bahwa keempat antenna mampu memenuhi kriteria antenna yang diinginkan. Untuk lebih jelas mengenai frekuensi yang termasuk dalam referensi VSWR <1,9 ditunjukkan oleh tabel 6.2. *Bandwidth* antenna dengan referensi VSWR<1,9 turut dicantumkan pada tabel 6.2.



Gambar 6.2 Grafik pengukuran VSWR antena

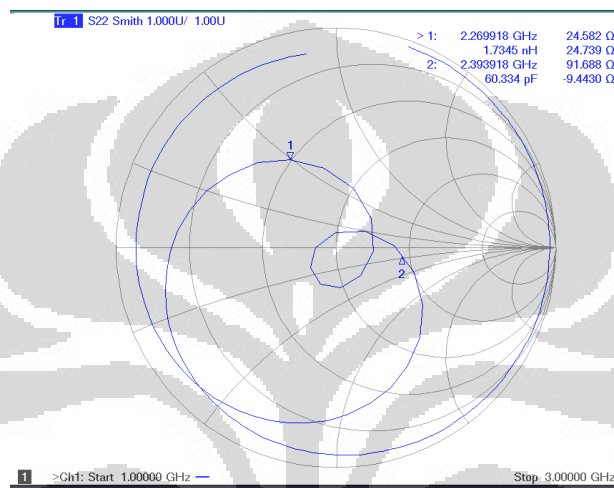
Tabel 5.2 Hasil pengukuran parameter *port* tunggal berdasarkan parameter VSWR

Antena	Frekuensi Minimum (MHz)	Frekuensi Maksimum (MHz)	Bandwidth (MHz)	Fractional Bandwidth (%)
Antena 1	2288	2393	105	4.49
Antena 2	2282	2390	108	4.62
Antena 3	2282	2392	110	4.71
Antena 4	2272	2392	120	5,14

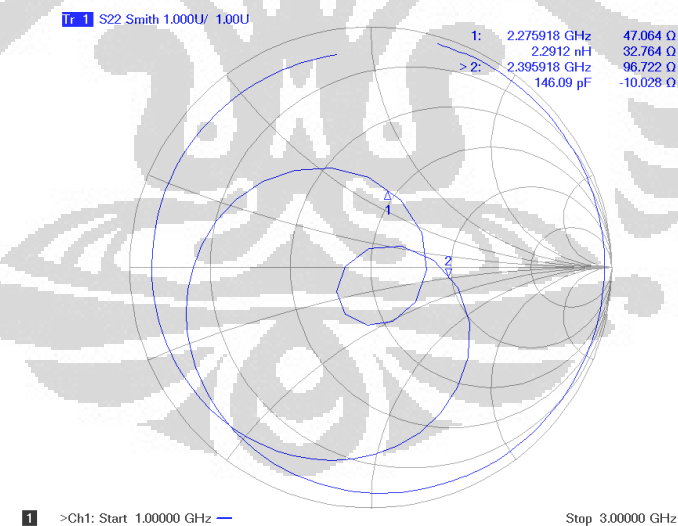
Hasil yang diperoleh pada tabel 5.2 di atas tidak berbeda jauh dengan hasil yang diperoleh pada tabel 5.1. Dengan referensi $VSWR < 1,9$ menghasilkan karakteristik keempat antena memiliki *bandwidth* antara 105-120 MHz.

6.1.3 Parameter Impedansi Masukan

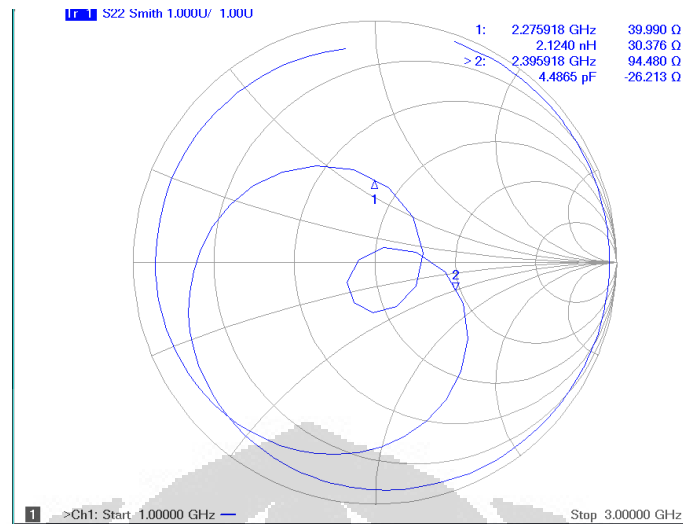
Parameter impedansi masukan juga memiliki keterkaitan dengan parameter VSWR maupun return loss. Nilai impedansi masukan terbaik adalah $50 + 0j$ ohm. Hasil impedansi masukan ini direpresentasikan dengan menggunakan diagram *smith*. Adapun impedansi masukan yang telah diukur dengan menggunakan *network analyzer* ditunjukkan pada Gambar 6.3.



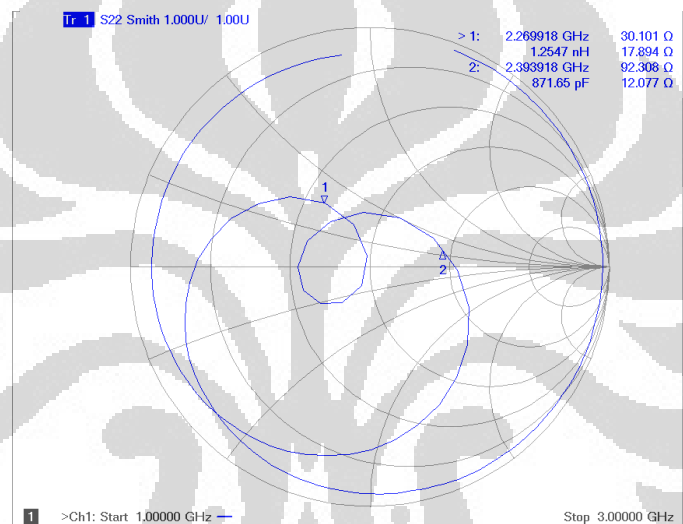
a



b



c



d

Gambar 6.3. Grafik Impedansi masukan a. antena1; b. antena2; c. Antena3; d. Antena4

Melalui pengolahan data impedansi masukan, dapat diperoleh nilai impedansi pada frekuensi 2.350 MHz. Hasil impedansi masukan untuk frekuensi tersebut tercantum pada tabel 5.3 di bawah ini. Namun demikian, nilai impedansi masukan terbaik tidak berada pada frekuensi 2.350 MHz tersebut. Hal ini sesuai dengan grafik *return loss* maupun *VSWR* karena ketiga parameter ini memiliki kaitan satu sama lain.

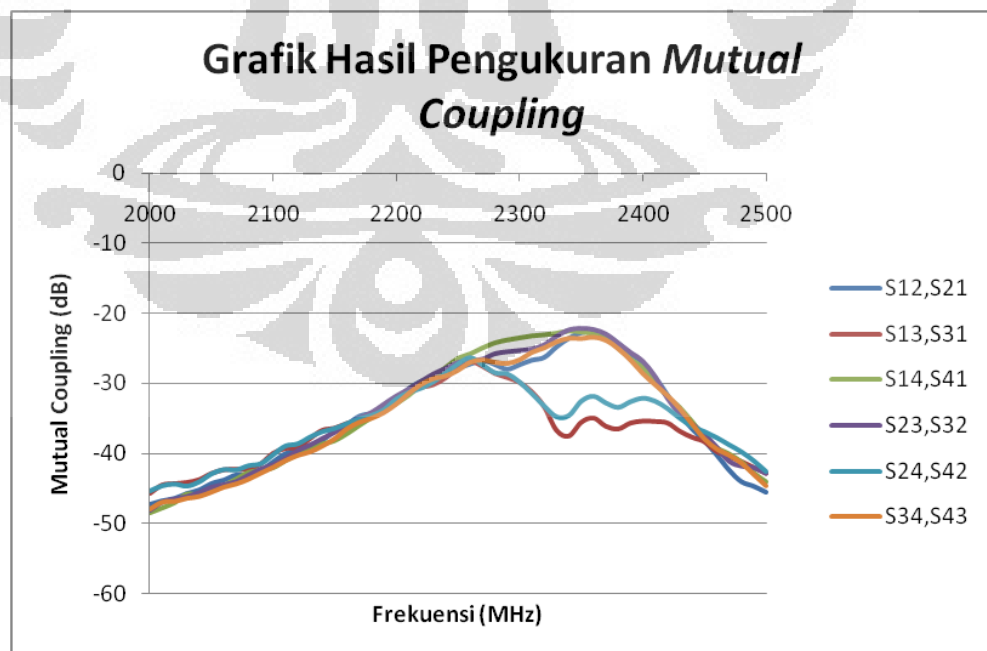
Tabel 6.2 Hasil impedansi masukan pada $f=2.350$ MHz

Antena	Impedansi Masukan $f=2.350$ MHz	
	Riil	Imajiner
Antena1	40.35	-11.07
Antena2	37.59	-7.37
Antena3	40.27	-9.60
Antena4	37.94	-21.23

6.2 Parameter *Mutual Coupling*

6.2.1 Pencatuan 1 Port Antena Pemancar

Parameter *mutual coupling* diukur dengan cara menghubungkan *port 1* dan *port 2 network analyzer* secara langsung ke *port* antena yang diinginkan. Dengan empat buah antena, terdapat enam kali pengukuran parameter *mutual coupling* ini yakni S_{12}/S_{21} , S_{13}/S_{31} , S_{14}/S_{41} , S_{23}/S_{32} , S_{24}/S_{42} , S_{34}/S_{43} . Hasil pengukuran *mutual coupling* ini dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 6.4 berikut ini:

Gambar 6.4 Grafik hasil *mutual coupling*

Tabel 6.3 Hasil pengukuran *mutual coupling* pada frekuensi 2350 MHz

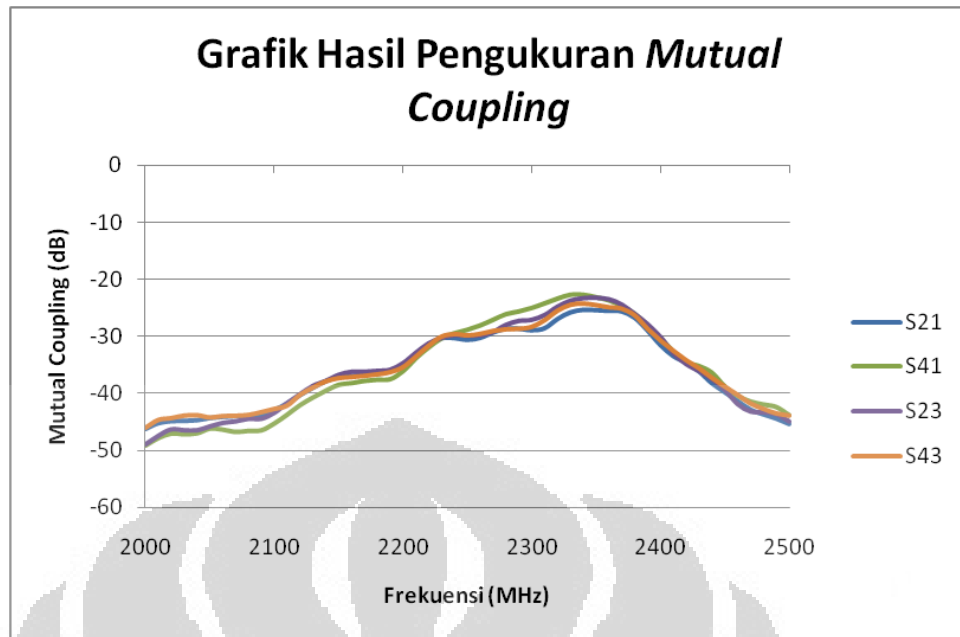
	Antena1	Antena2	Antena3	Antena4
Antena1	-	-22,68 dB	-35,48 dB	-22,58 dB
Antenna2	-22,68 dB	-	-22,21 dB	-32,47 dB
Antena3	-35,48 dB	-22,21 dB	-	-23,61 dB
Antena4	-22,58 dB	-32,47 dB	-23,61 dB	-

Tabel 6.3 di atas menunjukkan *mutual coupling* pada frekuensi 2.350 MHz antara antenna terkait. Untuk antenna yang berdekatan menunjukkan nilai *mutual coupling* yang lebih besar sekitar sekitar -22 ~ -23 dB dibandingkan dengan *mutual coupling* yang dihasilkan oleh antenna yang berseberangan yang mencapai nilai di bawah -30 dB.

6.2.2 Pencatuan 2 Port Antena Pemancar

Selain mode pengukuran seperti yang disebutkan sebelumnya, terdapat mode pengukuran dengan mencatu kedua antenna pemancar. Hal ini dilakukan untuk meninjau pendekatan penerapan antenna pada kondisi yang sebenarnya. Terkait dengan kebutuhan pencatuan pada dua antenna pemancar, diperlukan dua buah *network analyzer* untuk mencatunya. Antena yang dicatu adalah antenna 2 dan antenna 4 sesuai dengan konfigurasi yang diinginkan sebelumnya.

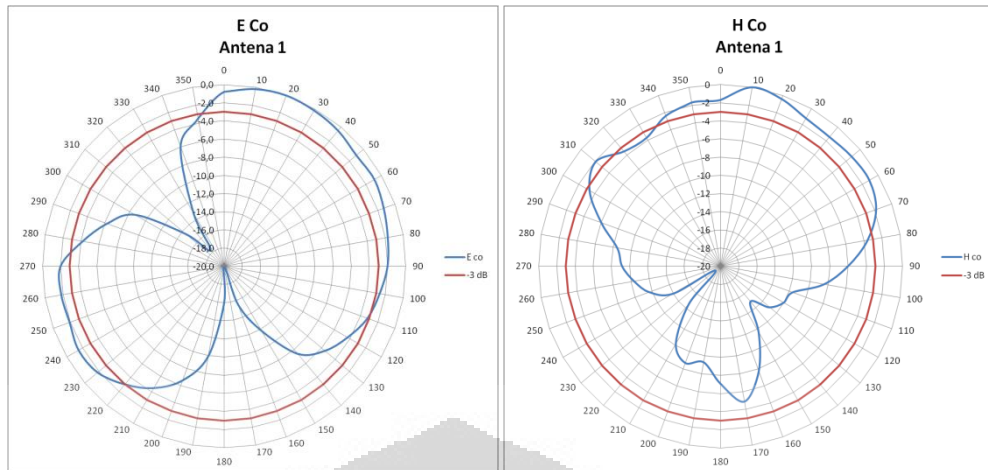
Melalui mode pengukuran ini dapat dilihat efek *mutual coupling* pada antenna penerima sebagai pengaruh dari antenna pemancar. Dengan demikian, terdapat empat kali pengukuran untuk mode ini yakni S_{12} , S_{14} , S_{32} , dan S_{34} . Hasil pengukuran efek *mutual coupling* ini dapat dilihat pada grafik gambar 6.5. Untuk efek *mutual coupling* pada frekuensi 2.350 MHz terdapat pada tabel

Gambar 6.5 Grafik hasil *mutual coupling*Tabel 6.4 Efek *Mutual Coupling* pada frekuensi 2.350 MHz

		Penerima	
		Antena 1	Antena 3
Pemancar	Antena 2	-25.31 dB	-23.22 dB
	Antena 4	-23.17 dB	-24.6 dB

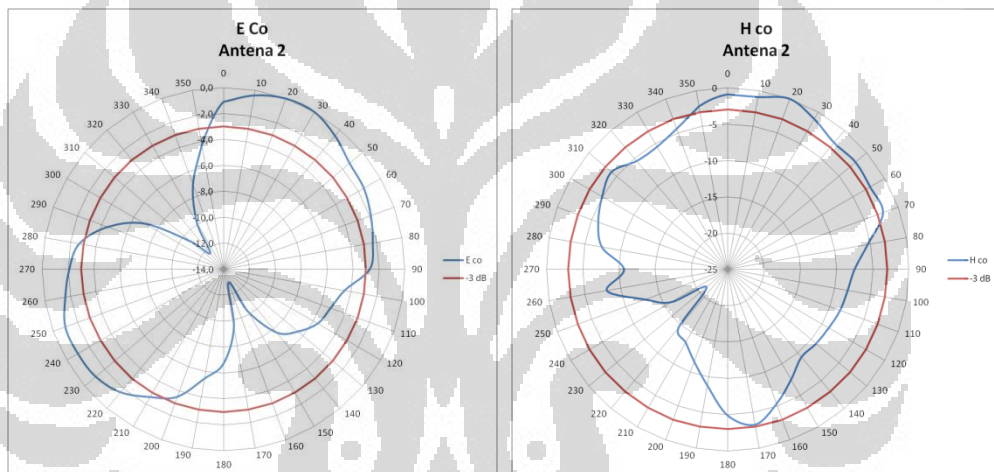
6.3 Pengukuran Pola Radiasi

Pada pengukuran antena, pengukuran pola radiasi untuk satu frekuensi perlu diambil empat jenis pola radiasi. Pola radiasi yang diambil adalah pola radiasi E_{co} dan H_{co} . Pola radiasi E_{co} dan H_{co} digunakan untuk mendeskripsikan pola radiasi dalam bentuk tiga dimensi. Pada pengukuran ini, diambil 8 data pola radiasi karena terdapat empat jenis antena dan masing-masing antena diambil pada frekuensi kerja antena yaitu 2,35 GHz.



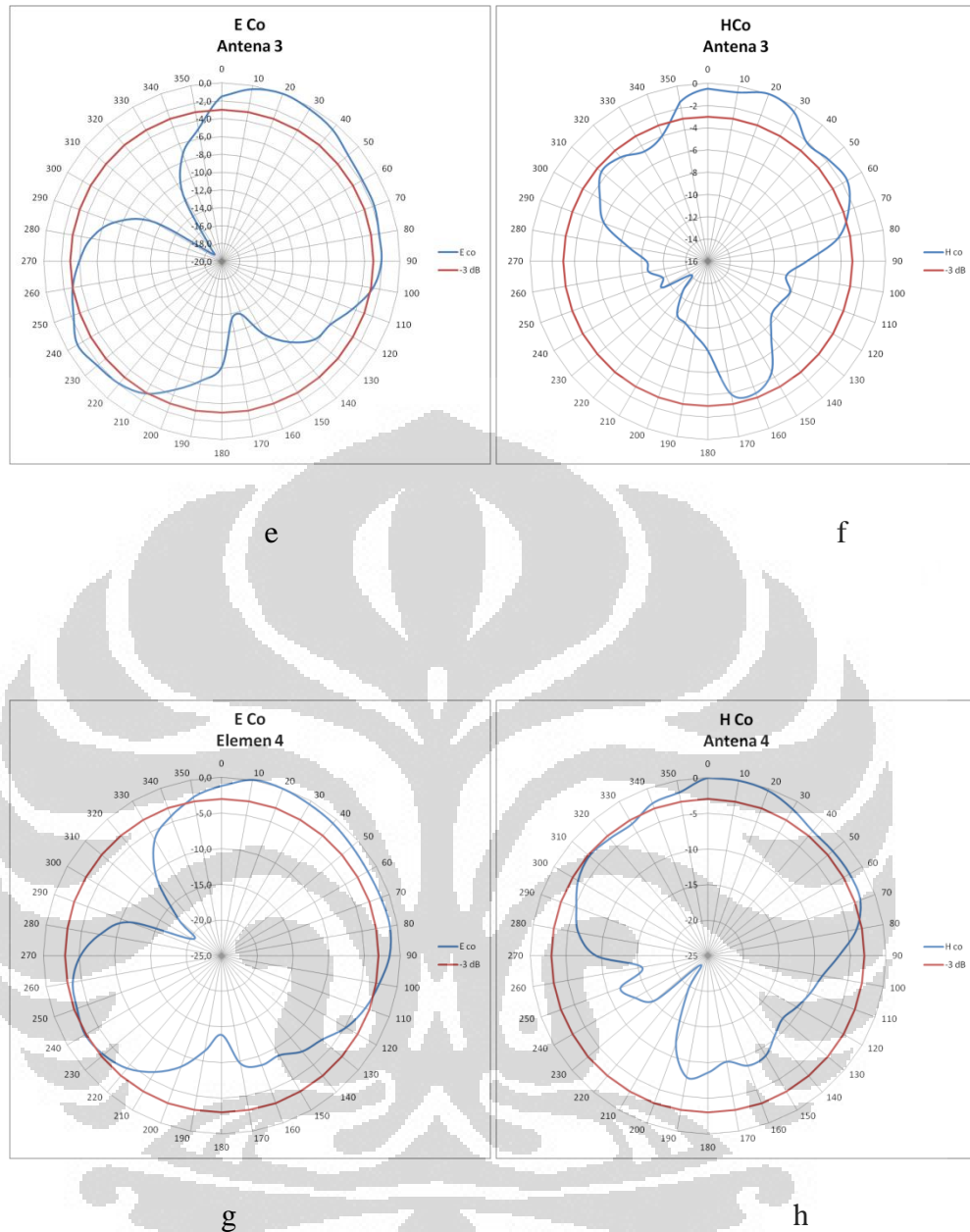
a

b



c

d



Gambar 6.6 Representasi beamwidth pada plot pola radiasi

Pola radiasi *co* merupakan pola radiasi representasi dari antenna yang diuji. Secara keseluruhan, pola radiasi yang dihasilkan antara antenasatu dengan antenna lainnya serupa baik pola radiasi horizontal maupun vertikal. Namun demikian, pancaran maksimum antara antenna satu dengan antenna yang lain tidaklah sama. Perbandingan pancaran maksimum pada suatu sudut antenna tersebut dapa dilihat pada tabel 6.5

Tabel 6.5 Tabel perbandingan sudut pancar maksimum

Antena	Sudut ($^{\circ}$)	
	E <i>co</i>	H <i>co</i>
Antena 1	20	10
Antena2	20	20
Antena3	20	20
Antena4	10	10

6.4 Pengukuran *Beamwidth*

Pengukuran parameter *beamwidth* diperoleh dari pengolahan data plot pola radiasi. Dengan demikian, hasil plot pola radiasi yang telah ditunjukkan pada gambar 6.6 sebelumnya dijadikan acuan untuk memperoleh *beamwidth*. Pengukuran *beamwidth* yang diambil adalah HPBW (*Half Power Beamwidth*) yang menunjukkan seberapa lebar berkas pancaran ketika telah kehilangan setengah dayanya atau secara logaritmis terlihat penurunan 3 dB. Data yang digunakan untuk pola radiasi diolah lebih lanjut dengan menambahkan garis penurunan 3 dB. Data yang digunakan adalah data pengukuran pola radiasi E *co* dan H *co*.

Dengan melihat titik potong antara pola radiasi dengan garis merah yang menunjukkan penurunan daya 3 dB, dapat diperoleh parameter *beamwidth* dari antenna uji. Berdasarkan pengamatan, parameter *beamwidth* untuk masing-masing pola radiasi berbeda antara yang satu dengan yang lainnya. Keseluruhan perhitungan *beamwidth* dari pola radiasi tersebut dapat dilihat pada tabel 6.6 berikut ini:

Tabel 6.6 Parameter *beamwidth* untuk pola radiasi tiap-tiap elemen

Antena	Beamwidth ($^{\circ}$)	
	E <i>Co</i>	H <i>Co</i>
Antena1	115	100
Antena2	100	85
Antena3	105	90
Antena4	100	115

6.5 Pengukuran *Gain*

Konfigurasi antena yang digunakan untuk pengukuran *gain* masih menggunakan konfigurasi pengukuran pola radiasi baik dalam jarak maupun tinggi antena. Pengukuran *gain* tetap menggunakan antena uji dan antena dipole dengan tambahan antena lain yang identik dengan keduanya. Dengan kata lain, *gain* yang diukur merupakan *gain* pada sudut 0° .

Berbeda dengan pengukuran sebelumnya, antena ketiga digunakan sebagai antena pengirim, sedangkan antena uji dan antena *dipole* dipakai sebagai antena penerima. Data yang diambil pertama kali adalah daya yang diterima antena uji pada rentang frekuensi 2.300-2.390 MHz dengan interval 10 MHz. Demikian halnya untuk antena *dipole*, keseluruhan data pada rentang dan interval tersebut diambil datanya. Selain itu, perlu dilakukan pengukuran *return loss* antena uji pada frekuensi yang bersesuaian untuk memperoleh nilai koefisien refleksi. Apabila keseluruhan data telah diperoleh, data tersebut diolah sesuai dengan kaidah pengukuran *gain standard reference antenna method*. Setelah melalui perhitungan, *gain* antena untuk masing-masing antena pada tiap-tiap frekuensi dapat dilihat pada tabel 6.7

Tabel 6.7 *Gain* antena untuk tiap antena

Frekuensi (MHz)	<i>Gain</i> (dBi)			
	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4
2300	1,57	1,04	1,52	3,88
2310	2,08	1,26	1,80	3,61
2320	2,32	1,62	1,96	3,51
2330	2,93	2,49	2,48	3,72
2340	4,01	3,76	3,38	4,12
2350	5,27	5,20	4,56	5,09
2360	5,69	5,77	4,92	5,37
2370	5,25	5,54	4,34	4,77
2380	5,57	5,90	4,60	4,80

2390	5,82	5,70	4,44	4,64
------	------	------	------	------

6.6 Analisis Pengukuran Antena

6.6.1 Pengukuran Parameter *Port Tunggal*

Setelah melalui berbagai tahapan perancangan, parameter port tunggal yang menjadi pertimbangan awal pengukuran telah memenuhi kriteria. Berbagai tahapan perlu ditempuh mengingat sifat dasar antena mikrostrip elemen peradiasi segitiga memiliki *bandwidth* yang sempit. Oleh karena itu, untuk perancangan antena mikrostrip jenis ini biasanya perlu dilakukan teknik peningkatan *bandwidth*.

Sebagaimana telah disebutkan pada bagian sebelumnya, diperolehnya *bandwidth* sesuai kriteria pada skripsi ini dikarenakan adanya *slot ring* yang ditambahkan pada elemen peradiasi antena segitiga. Pada beberapa penelitian telah dipekenalkan teknik penggunaan *slot* untuk meningkatkan *bandwidth* ini tetapi untuk *slot ring* sendiri masih jarang digunakan. Penambahan *slot ring* ini, akan memberikan gangguan arus pada elemen peradiasi. Selain itu, *slot* yang ditambahkan pada elemen peradiasi akan merubah karakteristik impedansi terkait dengan reaktansi elemen peradiasi yang berubah.

Apabila diamati dengan seksama pada grafik *return loss*, grafik tersebut menunjukkan seperti penggabungan dua frekuensi resonansi. Hal inilah yang membuat antena memiliki *bandwidth* yang lebar. Hal ini dimungkinkan terjadi terkait penambahan *slot ring* yang mampu memunculkan frekuensi resonansi yang sangat dekat sehingga dapat terjadi penggabungan antara kedua frekuensi resonansi tersebut. Frekuensi resonansi yang muncul berdekatan ini dapat terjadi sebagai akibat munculnya frekuensi resonansi pada mode lain. Dengan penempatan posisi *slot ring* yang tepat, kondisi *matched* dan *bandwidth* yang lebar dapat diperoleh dari karakteristik tersebut. Adapun untuk memperoleh

posisi slot secara tepat dilakukan studi parametrik terhadap letak *slot ring* tersebut.

Meskipun penambahan *slot ring* berhasil memperbaiki kondisi *matched* dan *bandwidth* dari antenna, karakteristik antenna akan sedikit berubah pada saat empat buah antenna identik digabungkan. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, kondisi *matched* dari tiap-tiap antenna menjadi semakin buruk. Hal ini dapat terjadi sebagai akibat adanya efek *mutual coupling* dimana pada saat dua buah antenna berdekatan dan dicatu, radiasi masing-masing antenna akan mempengaruhi satu sama lain.

Untuk mengatasi kondisi ini, digunakan teknik yang paling umum digunakan dalam memperbaiki kondisi *matched* yakni dengan penambahan *stub*. Sebagaimana yang telah diketahui bahwa penambahan *stub* akan membantu memperbaiki kondisi *matched* antenna.

Hasil akhir rancangan antenna menunjukkan dua buah *stub* ditambahkan pada tiap-tiap antenna yakni *stub* yang terintegrasi secara langsung saat fabrikasi serta *stub* yang ditambahkan secara manual. Penambahan *stub* yang pertama digunakan untuk memperbaiki kondisi *matched* yang terlihat secara simulasi. Walaupun hasil simulasi telah menunjukkan hasil yang baik, ketika difabrikasi hasilnya tidak sebaik hasil simulasi. Oleh karena itu, hasil fabrikasi diberikan penambahan *stub* lagi dalam rangka memperbaiki kondisi *matched* antenna. Meskipun demikian, grafik *return loss* antar satu antenna dengan yang lainnya tetap tidak identik karena efek *mutual coupling* tidak mungkin dihilangkan sepenuhnya.

Selain perbaikan kondisi *matched* antenna, dalam perancangan antenna ini juga dilakukan perbaikan frekuensi kerja. Hal ini terjadi karena frekuensi kerja yang ditunjukkan hasil simulasi tidak sesuai dengan hasil fabrikasi dimana terjadi pergeseran frekuensi kerja. Pergeseran ini dapat dikarenakan oleh adanya ketidaksesuaian dimensi antara simulasi dan fabrikasi. Pada saat simulasi, elemen peradiasi tidak diberi ketebalan sedangkan kenyataannya walaupun kecil tambaga pada elemen peradiasi memiliki ketebalan. Ditambah lagi, tebal substrat yang tidak sesuai secara presisi. Hal-hal demikian ini akan memberikan pengaruh pada hasil

pengukuran. Dengan menganalisis karakteristik antara hasil simulasi dan fabrikasi terkait frekuensi kerja ini, permasalahan diatasi dengan cara merancang antenna pada simulator dengan target frekuensi kerja digeser dari yang diinginkan. Dengan demikian, hasil akhirnya akan diperoleh fabrikasi antenna yang sesuai memenuhi kriteria yang diinginkan.

Melalui berbagai tahapan dalam merancang antenna ini, akhirnya diperoleh antenna yang dapat bekerja sesuai spesifikasi yang diinginkan. Hal ini ditunjukkan dengan pengukuran parameter port tunggal yang menunjukkan hasil yang diinginkan.

6.6.2 Pengukuran Parameter *Mutual Coupling*

Pengukuran *mutual coupling* antenna menunjukkan nilai yang besar pada daerah frekuensi kerja. Hal ini terkait dengan kondisi *matched* dari tiap-tiap elemen antenna. Apabila suatu antenna berada pada kondisi *matched* antenna tersebut akan meradiasikan gelombang elektromagnetik dengan baik. Dengan demikian, medan yang dihasilkan pada kondisi tersebut merupakan medan yang paling kuat dibandingkan dengan kondisi yang kurang *matched*. Kuatnya medan yang dihasilkan oleh antenna ini yang memberikan pengaruh pada antenna lain yang sedang bekerja pula di sekitarnya. Akibatnya, nilai *mutual coupling* antara keduanya memiliki nilai yang paling besar pada kondisi tersebut, yaitu pada saat antenna pada frekuensi kerja dengan kondisi *matched* yang baik.

Fenomena lain yang dapat diobservasi dari pengukuran *mutual coupling* ini adalah jarak antar elemen yang dilakukan pengukuran mempengaruhi nilai *mutual coupling* yang dihasilkan. Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, *mutual coupling* antenna yang bersebelahan memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *mutual coupling* antara antenna yang berseberangan. Hal ini berarti semakin jauh jarak antar antenna, nilai *mutual coupling* semakin besar, demikian pula sebaliknya. Dengan kuat medan yang sama, pengaruh medan tersebut akan lebih kuat pada antenna yang lebih dekat dibandingkan dengan antenna yang letaknya

lebih jauh. Karena hal inilah nilai *mutual coupling* antara antenna yang berseberangan lebih kecil.

Sementara itu, pengukuran tidak hanya melihat pengaruh satu antenna saja melainkan dua antenna sebagai representasi kondisi nyatanya yakni sebagai dua pemancar dan dua penerima. Sesuai dengan perancangan yang telah disebutkan di awal, antenna pemancar yang dipilih adalah antenna 2 dan 4. Dengan demikian, efek *mutual coupling mutual coupling* yang dapat diamati adalah antenna yang saling bersebelahan.

Efek *mutual coupling* yang dapat diamati pada saat dilakukan pencatutan dua antenna ini menunjukkan nilai antara rentang -23 dB sampai - 25 dB. Nilai ini sedikit lebih kecil dibandingkan dengan kondisi antenna pada saat antenna dicatu satu antenna saja. Dengan demikian, walaupun jumlah antenna yang dicatu lebih banyak, efek *mutual coupling* tidak berubah secara signifikan bahkan lebih baik.

6.6.3 Pengukuran Parameter Pola Radiasi

Berdasarkan plot pola radiasi *E co*, keempat antenna menunjukkan plot pola radiasi yang pada dasarnya mirip dengan mempunyai dua buah *lobe*. Dengan demikian, karakteristik pola radiasi antara antenna satu dengan antenna yang lain dapat dikatakan identik. Jadi, apabila antenna MIMO ini digunakan, kinerja antenna satu dan lainnya tidaklah berbeda jauh. Hal inilah berarti antenna ini telah sesuai dengan perancangannya.

Berdasarkan plot pola radiasi, *main lobe* yang dihasilkan pada sudut rentang sudut antara 0° - 90° dengan *lobe* maksimum berada pada sudut 10° atau 20° . Sementara itu, *back lobe* yang lebih kecil berada pada sudut seberangnya.

Pada dasarnya, pola radiasi untuk antenna mikrostrip berbentuk segitiga asli memiliki pola radiasi dengan dua buah *lobe* sama besar dengan sudut maksimal pada 90° dan 180° . Akan tetapi, pada pola radiasi yang diukur menunjukkan salah satu *lobe* lebih dominan dengan nilai

maksimal yang bergeser. Hal ini dapat terjadi karena antenna ini merupakan penggabungan empat buah antenna berbeda dengan antenna asli yang hanya satu elemen peradiasi. Akibatnya, jarak tempuh medan dari elemen peradiasi ke *ground* juga berbeda antara sisi kanan sisi kiri antenna. Dengan demikian, dihasilkan pola radiasi yang lebih dominan pada salah satu *lobe*. Bergesernya sudut pancaran maksimum dapat terjadi karena adanya penambahan *slot* maupun *stub* yang mengubah distribusi medan pada elemen peradiasi sehingga tidak lagi sama dengan elemen peradiasi segitiga aslinya.

Seperti halnya pada pengukuran E *co*, plot pola radiasi H *co* untuk keempat antenna menunjukkan plot yang pada dasarnya mirip antara pola radiasi antenna satu dengan elemen lainnya. Berbeda dengan pengukuran E *co* yang menunjukkan pergeseran *lobe*, pada pengukuran H *co* ini menghasilkan pola radiasi dengan *lobe* di sekitar 0^0 . Meskipun demikian, nilai maksimum berada pada sudut 10^0 atau 20^0 juga.

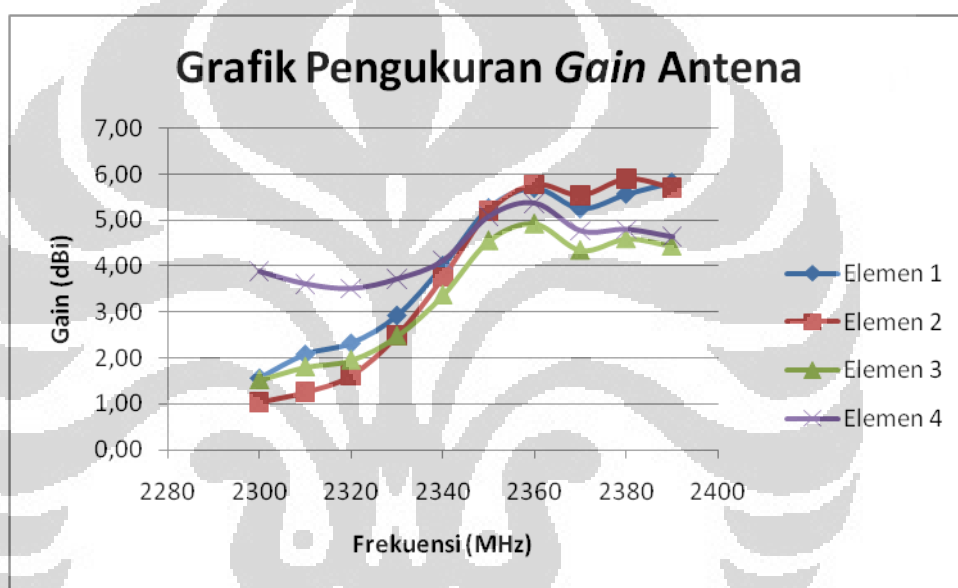
6.6.4 Pengukuran Parameter *Beamwidth*

Dengan melakukan observasi terhadap pola radiasi HPBW yang dihasilkan oleh keempat antenna cukup lebar berkisar antara 100^0 - 115^0 untuk pola radiasi E *co* dan 85^0 - 115^0 untuk pola radiasi H *co*. Namun demikian, *lobe* dan sudut maksimumnya tidak seperti pada elemen peradiasi segitiga aslinya. Hal ini terkait dengan medan yang dihasilkan oleh antenna tidak lagi sama dengan aslinya seperti yang telah disebutkan pada bagian analisi pola radiasi. Oleh karena itu, penempatan antenna harus disesuaikan dengan kondisi tersebut.

6.6.5 Pengukuran Parameter *Gain*

Berdasarkan pengolahan data, *gain* yang dihasilkan keseluruhan antenna memiliki rentang antara 1,04-5,90 dBi sebagaimana turut direpresentasikan pada grafik *gain* terhadap frekuensi (Gambar 5.6). Berdasarkan persamaan Friis, nilai *gain* memang akan meningkat seiring

dengan peningkatan frekuensi. Namun demikian, nilai *gain* ini memiliki rentang yang sangat signifikan khususnya untuk antena 1, 2, dan 3. Hal ini berarti, nilai kondisi *matched* antena turut berpengaruh pada *gain* antena yang dihasilkan. Sebagaimana terlihat pada grafik *return loss*, untuk elemen 1, 2 dan 3, frekuensi awalnya memiliki kondisi *matched* tidak sebaik pada frekuensi-frekuensi tengah hingga akhir. Hal ini sesuai dengan nilai *gain* yang buruk pada awal frekuensi dibandingkan dengan frekuensi kerja tengah hingga akhir.



Gambar 6.7 Grafik *gain* antena terhadap frekuensi

Hal ini turut dibuktikan ketika melihat antena 4 yang memiliki nilai *return loss* yang baik pada frekuensi awal. Pada antena 4 ini terlihat *gain* yang dihasilkan tidak terlalu signifikan perbedaannya antara frekuensi awal dengan frekuensi akhir. Dengan nilai *return loss* yang baik pada awal frekuensi, menghasilkan nilai *gain* yang tidak seburuk antena 1, 2, dan 3. Peningkatan *gain* tetap terjadi seiring peningkatan frekuensi terkait dengan persamaan *Friis* yang telah disebutkan sebelumnya.

6.7 Analisis Kesalahan Umum

Secara garis besar ada beberapa penyebab yang menyebabkan hasil pengukuran parameter antena tidak sesuai dengan hasil simulasi atau dengan kata lain mengalami pergeseran nilai. Penyebab-penyebab itu antara lain :

1. perancangan dengan *HFSS v.11* tidak memperhitungkan tebal tembaga dari substrat yang dipakai, tetapi kenyataannya tembaga pada substrat memiliki ketebalan walaupun kecil, serta ketebalan substrat yang tidak selalu seragam dan sepresisi dengan nilai yang diterapkan pada simulasi
2. bahan substrat memiliki nilai toleransi konstanta dielektrik substrat yang tidak selalu presisi sebesar 4,3 serta adanya nilai toleransi pada *loss tangent* substrat.
3. simulasi tidak memperhitungkan tingkat temperatur dan kelembapan udara, tetapi pada saat pengukuran temperatur dan tingkat kelembapan berpengaruh pada propagasi gelombang dan resistansi udara.
4. proses penyolderan konektor SMA dengan saluran pencatu mikrostrip yang kurang baik
5. adanya rugi-rugi pada kabel penghubung, *port* SMA, tembaga/konduktor pada substrat, konektor pada *network analyzer*, dan *spectrum analyzer*
6. kondisi *chamber* yang tidak benar-benar terisolasi sehingga memungkinkan munculnya gangguan pada saat pengukuran

BAB 7

KESIMPULAN

Setelah melalui proses perancangan antenna dan melakukan pengukuran antenna yang telah difabrikasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Antena mikrostrip MIMO 2x2 telah berhasil dirancang dengan *bandwidth* untuk antena 1, antena 2, antena 3, dan antena 4 masing-masing 105MHz, 108MHz, 110MHz, dan 120 MHz menggunakan referensi *return loss* $< -10\text{dB}$.
2. Antena yang dirancang merupakan antena mikrostrip dengan elemen peradiasi segitiga sama sisi dengan *single layer substrat*. Sementara itu, perancangan antena menggunakan teknik pencatutan saluran mikrostrip langsung, *slot ring* pada elemen peradiasi, stub pada saluran mikrostrip, serta *tuning stub loaded* pada elemen peradiasi.
3. Pengukuran parameter *mutual coupling* menghasilkan nilai S_{12}/S_{21} , S_{13}/S_{31} , S_{14}/S_{41} , S_{23}/S_{32} , S_{24}/S_{42} , S_{34}/S_{43} pada frekuensi kerja sebesar: -22,68 dB, -35,48 dB, -22,58 dB, -22, 21 dB, -32,47 dB, -23,61 dB.
4. Keempat antena memiliki pola radiasi *bidirectional* untuk pola radiasi E *co*, dan pola radiasi *directional* untuk pola radiasi H *co*
5. Untuk pola radiasi E *co*, *beamwidth* antena yang dihasilkan antena 1-4 secara berturut-turut adalah 115° , 100° , 105° , dan 100° . Sementara itu, untuk pola radiasi H *co* adalah 100° , 85° , 90° , 115° .
6. *Gain* maksimum yang dihasilkan antena antena 1-4 secara berturut-turut adalah 5,82 dBi di frekuensi 2.390 MHz, 5,90 dBi di frekuensi 2.380 MHz, 4,92 dBi di frekuensi 2.360 MHz, serta 5,37 dBi di frekuensi 2.360 MHz
7. Dengan parameter-parameter antena yang telah diukur, antena ini telah memenuhi spesifikasi antena WiMAX yang ditetapkan oleh Dirjen Postel.

DAFTAR ACUAN

- [1] <http://id.wikipedia.org/wiki/4G>. [Online]
- [2] <http://id.wikipedia.org/wiki/WiMAX>. [Online]
- [3] http://www.postel.go.id/update/id/baca_info.asp?id_info=1277. [Online]
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX_MIMO. [Online]
- [5] TELEKOMUNIKASI, DIREKTUR JENDERAL POS DAN., *PERSYARATAN TEKNIS ALAT DAN PERANGKAT TELEKOMUNIKASI ANTENA BROADBAND WIRELESS ACCESS (BWA) NOMADIC*. Jakarta : s.n., 2008. 96/DIRJEN/2008.
- [6] , <http://www.wimax.com/general/what-is-wimax>. [Online]
- [7] <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>. [Online]
- [8] http://4.bp.blogspot.com/_ilGsQcnGTY/TQ_bELGaaSI/AAAAAAAAA6M/vpunopArbx4/s1600/Wimax+1.gif. [Online]
- [9] <http://www.wimaxforum.org/resources/frequently-asked-questions/industry-standards-spectrum-and->. [Online]
- [10] <http://www.wimaxmaps.org/>. [Online]
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>. [Online]
- [12] Abdel, Alim O. dan El Naggary, Ahmed., "Performance of MIMO Antenna Techniques in IEEE 802.16E."IEEE Proceeding: ICICT: ITI 5Th International Conference, 2007.
- [13] Balanis, Constantine A., *Antena Theory: Analysis and Design*. USA : John Willey and Sons, 1997.
- [14] Garg, R, et al., *Microstrip Design Handbook*. Norwood,MA : Artech House Inc, 2001.
- [15] Indra Surjati, Eko Tjipto Rahardjo, Djoko Hartanto,, "Increasing Bandwidth Dual Frequency Triangular Microstrip Antenna fed by Coplanar Waveguide."IEEE Conference: Asia-Pacific Communication Conference (APCC), 2006.
- [16] Hall, P.S dan J.R, James., *Handbook of Microstrip Antenna*. London : Peter Peregrinus Ltd, 1989.

- [17] Kumar, R dan Ray, K.P., *Broadband Microstrip Antenna*. Canton Street : Artech House, Inc, 2003.
- [18] Pozar, David M., *Microwave Engineering*. John Willey and Sons, 1997.
- [19] http://digilib.ittelkom.ac.id/index.php?view=article&catid=12%3Aantena&id=267%3Akarakteristik-antena&tmpl=component&print=1&page=&option=com_content&Itemid=14. [Online]
- [20] <http://www.antenna-theory.com/definitions/fractionalBW.php>. [Online]
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_%28waves%29. [Online]
- [22] Wong, Kin-Lu dan Hsu, Wen-Hsiu., "Broadband Triangular Microstrip Antenna with U-Shaped Slot." *IEEE Electronics Letters*, 1997, Vol. 33, hal. 2085-2087.
- [23] Kin-Lu Wong, Shan-Cheng Pan., "Compact triangular microstrip antenna." *IEEE Electronics Letters*, Vol. 33, hal. 433-434.
- [24] Shan-Cheng Pan, Kin-Lu Wong., "Dual Frequency Triangular Microstrip Antenna with a Shorting Pin." *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1997, Vol. 42.
- [25] Jui-Han Lu, Chia-Luan Tang, Kin-Lu Wong., "Single-feed Slotted Equilateral-Triangular Microstrip Antenna for Circular Polarization." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1999, Vol. 47 no.7.
- [26] Surjati, Indra., "Dual Frequency Operation Triangular Microstrip Antenna Using a Pair of Slit." 2005. *IEEE Conference: Asia Pacific Communication Conference (APCC)*.
- [27] Zulkifli, Fitri Yuli dan Rahardjo, Eko Tjipto., "Compact MIMO Microstrip Antenna with Defected Ground for Mutual Coupling Suppression." *Marakesh 2011. Progress In Electromagnetics Research Symposium*.
- [28] Shyh-Tirng fang, Kin-Lu Wong, Tzung-Wern Chiou., "Bandwidth Enhancement of Inset Microstrip." *IEEE Electronics Letters*, 1998, Vol. 34.

DAFTAR PUSTAKA

Balanis, Constantine.A., *Antena Theory : Analysis and Design*, (USA: John Willey and Sons,1997).

Garg, R., Bhartia, P, Bahl, I., Ittipiboon, A., *Microstrip Design Handbook*, (Norwood: Artech House. Inc, MA, 2001).

Hall, P.S dan J.R, James., *Handbook of Microstrip Antenna*. London : Peter Peregrinus Ltd, 1989.

Kumar, R dan Ray, K.P., *Broadband Microstrip Antenna*. Canton Street : Artech House, Inc, 2003.

Pozar, David M., *Microwave Engineering*. John Willey and Sons, 1997.



LAMPIRAN-
DATA HASIL PENGUKURAN

A1. HASIL PENGUKURAN *PORT* TUNGGAL

A1.1. PENGUKURAN *RETURN LOSS*

Frekuensi (MHz)	Elemen 1	Elemen 2	Elemen 3	Elemen 4
2000	-0.62477	-0.62468	-0.62599	-0.55272
2010	-0.65789	-0.66173	-0.66015	-0.57791
2020	-0.68452	-0.68484	-0.68987	-0.59851
2030	-0.70011	-0.71564	-0.71194	-0.61456
2040	-0.72564	-0.73999	-0.73126	-0.63215
2050	-0.77109	-0.78493	-0.77244	-0.6609
2060	-0.79699	-0.81612	-0.8092	-0.69105
2070	-0.83948	-0.87762	-0.86098	-0.73484
2080	-0.88662	-0.9194	-0.90915	-0.77116
2090	-0.94022	-0.98339	-0.964	-0.82265
2100	-0.99306	-1.04474	-1.01721	-0.86524
2110	-1.05682	-1.11734	-1.09357	-0.92697
2120	-1.125	-1.20665	-1.17595	-0.98827
2130	-1.20197	-1.30323	-1.25539	-1.05988
2140	-1.28962	-1.41587	-1.35436	-1.14718
2150	-1.38019	-1.5308	-1.45852	-1.22328
2160	-1.49	-1.67658	-1.58969	-1.32771
2170	-1.61865	-1.85486	-1.75343	-1.45846
2180	-1.78397	-2.06725	-1.94245	-1.63153
2190	-1.99381	-2.35728	-2.18092	-1.85196
2200	-2.23371	-2.66428	-2.45363	-2.09592
2210	-2.52489	-3.04974	-2.7918	-2.4116
2220	-2.87961	-3.54152	-3.23536	-2.85051
2230	-3.34159	-4.15332	-3.773	-3.43569
2240	-3.92492	-4.92585	-4.46394	-4.22123
2250	-4.71104	-5.95005	-5.39994	-5.39319
2260	-5.72114	-7.20748	-6.56726	-7.10441
2270	-7.05656	-8.72463	-8.11086	-9.76282
2280	-8.88098	-10.5327	-10.0659	-14.6368
2290	-11.1977	-12.1282	-12.2526	-27.8371
2300	-13.7557	-12.9057	-13.8023	-20.9206
2310	-15.5289	-12.9073	-14.1148	-14.3451
2320	-15.5807	-12.7257	-13.7715	-11.7533
2330	-14.9397	-12.6884	-13.5991	-10.5702
2340	-15.1469	-13.4845	-14.4842	-10.4726
2350	-16.9746	-15.6442	-17.0197	-11.0619

2360	-21.4527	-20.2977	-22.9513	-12.0647
2370	-24.1295	-23.1838	-22.6865	-12.8224
2380	-16.4224	-16.3767	-14.8658	-12.3833
2390	-11.5435	-11.618	-10.5109	-10.6632
2400	-8.50062	-8.61246	-7.82794	-8.69043
2410	-6.47519	-6.60405	-6.01504	-6.99441
2420	-5.06194	-5.19236	-4.75007	-5.64837
2430	-4.0621	-4.21773	-3.85107	-4.61842
2440	-3.34128	-3.47715	-3.19643	-3.8062
2450	-2.81599	-2.93424	-2.7013	-3.18806
2460	-2.43117	-2.51821	-2.33331	-2.71405
2470	-2.11638	-2.18488	-2.04119	-2.33934
2480	-1.88167	-1.94339	-1.83036	-2.05227
2490	-1.70026	-1.74409	-1.6505	-1.82894
2500	-1.54965	-1.59129	-1.50488	-1.64134

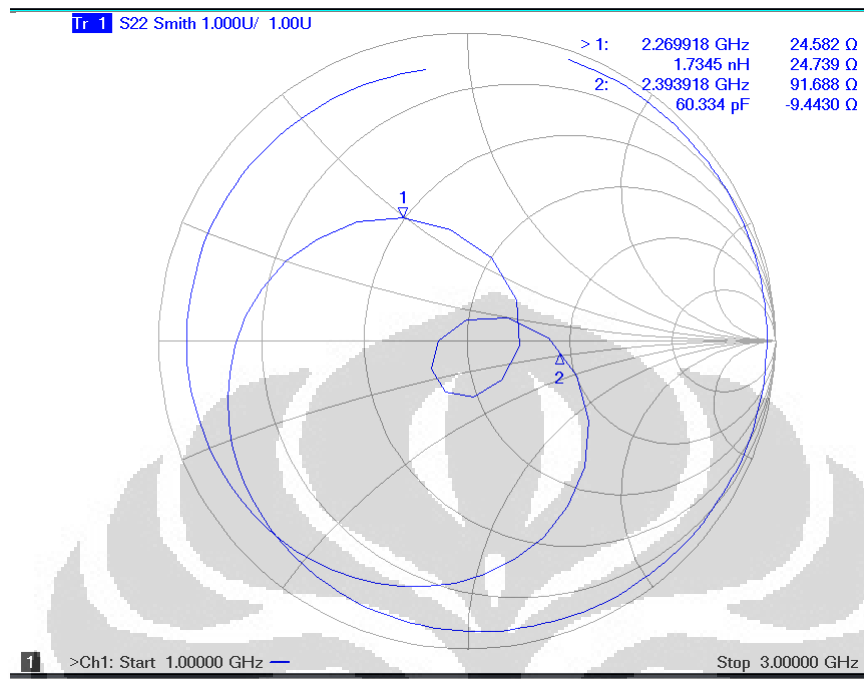
A1.2. PENGUKURAN VSWR

Frekuensi (MHz)	Elemen 1	Elemen 2	Elemen 3	Elemen 4
2000	27.81694	27.82127	27.76272	31.44043
2010	26.41779	26.26493	26.32748	30.07071
2020	25.39117	25.37917	25.19436	29.0363
2030	24.82627	24.28805	24.41429	28.27898
2040	23.95388	23.48975	23.76993	27.49239
2050	22.54378	22.14665	22.50423	26.29769
2060	21.81205	21.30154	21.48342	25.15162
2070	20.70952	19.81113	20.1933	23.65443
2080	19.61036	18.91231	19.1252	22.5416
2090	18.49437	17.68406	18.03893	21.13253
2100	17.51224	16.6479	17.09734	20.09408
2110	16.45803	15.56887	15.90641	18.75824
2120	15.46323	14.41982	14.79507	17.59685
2130	14.47585	13.35476	13.86186	16.4106
2140	13.49518	12.29647	12.85257	15.16501
2150	12.61298	11.37753	11.93851	14.22445
2160	11.68748	10.39359	10.95828	13.10946
2170	10.76332	9.401119	9.940927	11.93904
2180	9.771943	8.442957	8.98047	10.6788
2190	8.751091	7.414595	8.007149	9.415701
2200	7.819897	6.571284	7.127037	8.328563

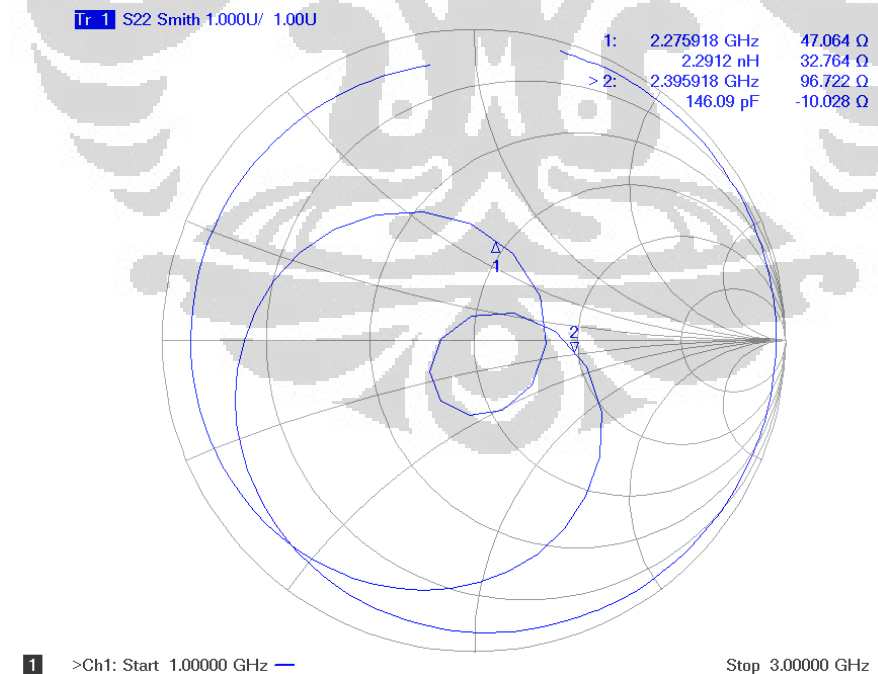
2210	6.928593	5.754542	6.275905	7.249653
2220	6.087847	4.972938	5.431281	6.14886
2230	5.262615	4.262013	4.6764	5.122028
2240	4.501076	3.62067	3.97686	4.196021
2250	3.777417	3.032892	3.319987	3.323885
2260	3.145413	2.54698	2.770039	2.580036
2270	2.595729	2.155781	2.295209	1.962883
2280	2.123579	1.846634	1.91477	1.455261
2290	1.760511	1.657833	1.645465	1.084559
2300	1.516409	1.585037	1.512944	1.197667
2310	1.401889	1.584892	1.490367	1.474497
2320	1.399022	1.600964	1.51523	1.696965
2330	1.43625	1.604334	1.528289	1.841449
2340	1.423788	1.537187	1.465205	1.855029
2350	1.330101	1.395541	1.328109	1.777147
2360	1.184835	1.213935	1.1533	1.664268
2370	1.132565	1.148949	1.158421	1.592341
2380	1.35562	1.35783	1.440803	1.632776
2390	1.720137	1.711801	1.849674	1.828779
2400	2.204155	2.179664	2.367412	2.162992
2410	2.805933	2.75599	3.002564	2.616447
2420	3.528429	3.444688	3.74786	3.183166
2430	4.354215	4.199365	4.584547	3.849618
2440	5.263099	5.062529	5.49594	4.636871
2450	6.222914	5.976563	6.482654	5.510048
2460	7.192028	6.946719	7.489848	6.452669
2470	8.248821	7.992804	8.549751	7.470779
2480	9.26817	8.976157	9.525999	8.503992
2490	10.24976	9.99384	10.55684	9.533341
2500	11.23986	10.94733	11.57251	10.61539

A1.3. PENGUKURAN IMPEDANSI MASUKAN

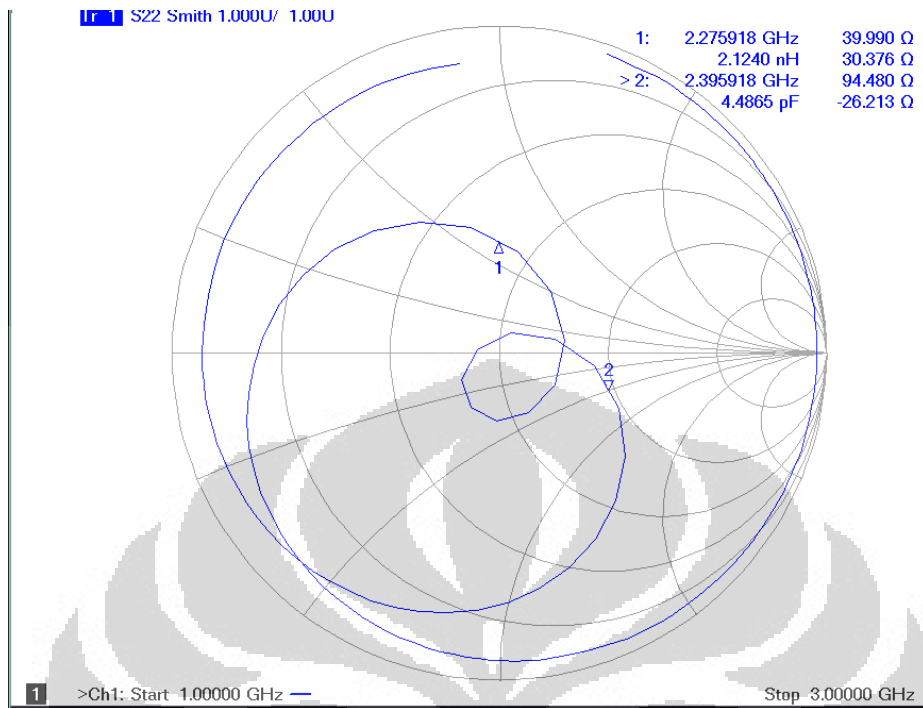
a. Elemen 1



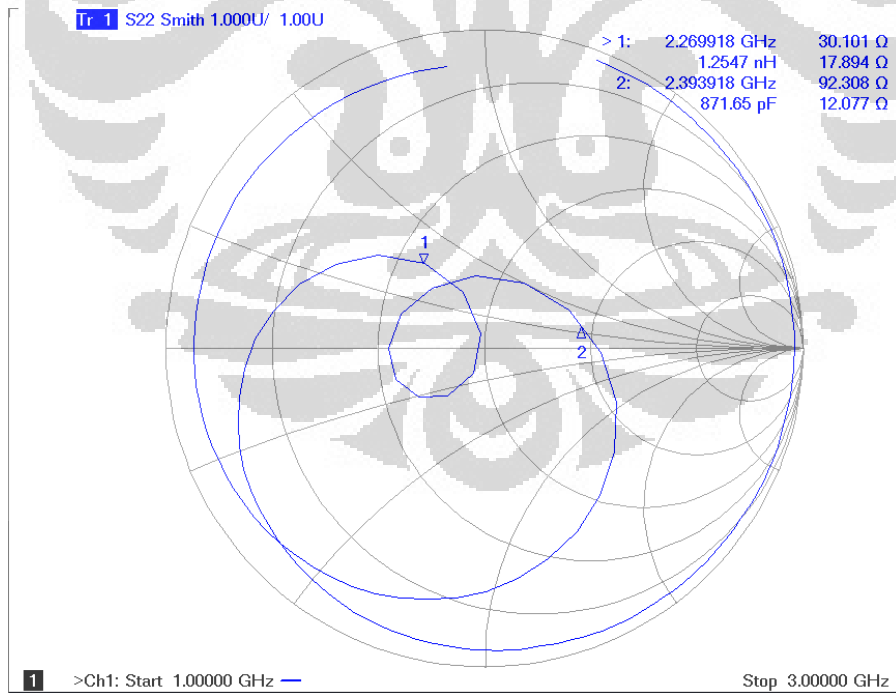
b. Elemen 2



c. Elemen 3



d. Elemen 4



A2. HASIL PENGUKURAN POLA RADIASI

A. Intensitas Daya Relatif Antena Untuk Bidang E-Co

Sudut (°)	Elemen 1		Elemen 2		Elemen 3		Elemen 4	
	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi
0	-50.3	-0.8	-51.4	-1.1	-51	-1.5	-49.9	-1.2
10	-49.7	-0.2	-50.7	-0.4	-49.9	-0.4	-48.7	0
20	-49.5	0	-50.3	0	-49.5	0	-48.8	-0.1
30	-49.7	-0.2	-50.3	0	-49.8	-0.3	-49.2	-0.5
40	-50	-0.5	-50.9	-0.6	-50.2	-0.7	-49.5	-0.8
50	-50.5	-1	-51.6	-1.3	-51	-1.5	-49.9	-1.2
60	-50.4	-0.9	-51.8	-1.5	-51.3	-1.8	-50.1	-1.4
70	-50.8	-1.3	-52.2	-1.9	-51.3	-1.8	-50	-1.3
80	-51.2	-1.7	-52.6	-2.3	-51.6	-2.1	-49.8	-1.1
90	-51.5	-2	-53	-2.7	-51.6	-2.1	-50.2	-1.5
100	-52.1	-2.6	-54.8	-4.5	-52.3	-2.8	-51.3	-2.6
110	-52.7	-3.2	-55.5	-5.2	-53.9	-4.4	-52.3	-3.6
120	-53.8	-4.3	-55.9	-5.6	-55.4	-5.9	-53.6	-4.9
130	-55	-5.5	-56.8	-6.5	-55.9	-6.4	-55.4	-6.7
140	-56.9	-7.4	-57.9	-7.6	-57.7	-8.2	-56.2	-7.5
150	-61.3	-11.8	-60.5	-10.2	-60.1	-10.6	-57.6	-8.9
160	-65	-15.5	-63.2	-12.9	-63.2	-13.7	-57.4	-8.7
170	-69.4	-19.9	-59.7	-9.4	-63	-13.5	-58.3	-9.6
180	-65.4	-15.9	-57	-6.7	-57.7	-8.2	-62.6	-13.9
190	-59.4	-9.9	-55.7	-5.4	-55.9	-6.4	-60.2	-11.5
200	-56.1	-6.6	-53.8	-3.5	-54.2	-4.7	-57.2	-8.5
210	-54	-4.5	-52.9	-2.6	-52.4	-2.9	-54.9	-6.2
220	-52.5	-3	-51.9	-1.6	-51.6	-2.1	-53.1	-4.4
230	-51.3	-1.8	-51.4	-1.1	-51.3	-1.8	-52.1	-3.4
240	-51	-1.5	-51.3	-1	-50.8	-1.3	-51.6	-2.9
250	-51.4	-1.9	-51.3	-1	-51.8	-2.3	-52.1	-3.4
260	-51.3	-1.8	-51.9	-1.6	-52.5	-3	-52.5	-3.8
270	-51.5	-2	-52.4	-2.1	-53.5	-4	-53.9	-5.2
280	-53.7	-4.2	-53	-2.7	-54.6	-5.1	-56.4	-7.7
290	-55.8	-6.3	-54.8	-4.5	-56.7	-7.2	-60	-11.3
300	-58.2	-8.7	-57.3	-7	-60.6	-11.1	-69	-20.3
310	-64	-14.5	-61	-10.7	-68.3	-18.8	-65.8	-17.1
320	-67.2	-17.7	-62.7	-12.4	-67.6	-18.1	-59.5	-10.8

330	-62.8	-13.3	-60.2	-9.9	-60.7	-11.2	-54.9	-6.2
340	-55.5	-6	-57.4	-7.1	-56.7	-7.2	-52.9	-4.2
350	-53	-3.5	-54.6	-4.3	-54.4	-4.9	-51.1	-2.4

Ket : Normalisasi adalah nilai rata-rata tertinggi dikurang nilai rata-rata

B. Intensitas Daya Relatif Antena Bidang H-Co

Sudut (°)	Elemen 1		Elemen 2		Elemen 3		Elemen 4	
	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi	Data (dB)	Normalis asi
0	-50	-1.7	-49.4	-0.9	-49.4	-0.5	-47	0
10	-48.3	0	-49.4	-0.9	-49.5	-0.6	-47	0
20	-48.7	-0.4	-48.5	0	-48.9	0	-47.3	-0.3
30	-49.5	-1.2	-49.6	-1.1	-49.4	-0.5	-48.2	-1.2
40	-49.7	-1.4	-50.7	-2.2	-51	-2.1	-49.1	-2.1
50	-49.5	-1.2	-50.5	-2	-50.7	-1.8	-49.1	-2.1
60	-49.4	-1.1	-50.8	-2.3	-50.4	-1.5	-49	-2
70	-50.1	-1.8	-50.7	-2.2	-51.4	-2.5	-49.2	-2.2
80	-51.9	-3.6	-53.9	-5.4	-53	-4.1	-50.8	-3.8
90	-54.3	-6	-56	-7.5	-56	-7.1	-53.6	-6.6
100	-56.8	-8.5	-56.7	-8.2	-57.7	-8.8	-55.7	-8.7
110	-59.9	-11.6	-57	-8.5	-57	-8.1	-56.7	-9.7
120	-60.3	-12	-57.4	-8.9	-57.4	-8.5	-57.6	-10.6
130	-61.3	-13	-57.6	-9.1	-57.4	-8.5	-58.3	-11.3
140	-63.2	-14.9	-57.7	-9.2	-56	-7.1	-57.4	-10.4
150	-59.9	-11.6	-56	-7.5	-53.4	-4.5	-55.8	-8.8
160	-56	-7.7	-53.8	-5.3	-52.3	-3.4	-55.6	-8.6
170	-53.2	-4.9	-51.8	-3.3	-52.8	-3.9	-56.9	-9.9
180	-55.4	-7.1	-53.4	-4.9	-56.9	-8	-55.6	-8.6
190	-57.6	-9.3	-57.3	-8.8	-58.2	-9.3	-54.7	-7.7
200	-57	-8.7	-60	-11.5	-59	-10.1	-58.8	-11.8
210	-58.5	-10.2	-61.9	-13.4	-59.4	-10.5	-66.3	-19.3
220	-62.9	-14.6	-62.9	-14.4	-61.4	-12.5	-70.3	-23.3
230	-67.6	-19.3	-69.7	-21.2	-63	-14.1	-62.3	-15.3
240	-62.3	-14	-64.5	-16	-60.2	-11.3	-60.2	-13.2
250	-60	-11.7	-61.4	-12.9	-60.6	-11.7	-58.9	-11.9
260	-58.7	-10.4	-56.6	-8.1	-59.5	-10.6	-62.6	-15.6

270	-57.5	-9.2	-59.2	-10.7	-59.4	-10.5	-56.3	-9.3
280	-56.8	-8.5	-55.9	-7.4	-57.7	-8.8	-53.5	-6.5
290	-54.4	-6.1	-54.5	-6	-55	-6.1	-52.3	-5.3
300	-51.7	-3.4	-53.5	-5	-53.7	-4.8	-50.9	-3.9
310	-50.4	-2.1	-52.6	-4.1	-52.4	-3.5	-50.2	-3.2
320	-51.8	-3.5	-54	-5.5	-52.7	-3.8	-50.5	-3.5
330	-52	-3.7	-54	-5.5	-53.5	-4.6	-50.6	-3.6
340	-50.7	-2.4	-52.9	-4.4	-52.9	-4	-49.2	-2.2
350	-50	-1.7	-50.7	-2.2	-50.4	-1.5	-48.7	-1.7

Ket : Normalisasi adalah nilai rata-rata tertinggi dikurang nilai rata-rata



A3. DATA HASIL PENGUKURAN GAIN

Metode yang digunakan dalam pengukuran *gain* pada penelitian ini menggunakan metode *gain standard reference antenna method*. Antena-antena yang digunakan adalah sebagai berikut.:

Antena AUT = Antena uji

Antena Ref = Antena dipole

A3 = Antena lain yang tidak diketahui gainnya

Frekuensi (MHz)	Elemen 1			Elemen 2		
	S21 AUT (dB)	S21 REF	MAUT	S21 AUT	S21 REF	MAUT
2300	-45.057	-43.474	1.000001	-45.584	-43.474	1.000001
2310	-44.405	-43.336	1.000901	-45.231	-43.336	1.001334
2320	-44.352	-43.525	1.000333	-45.058	-43.525	1.003712
2330	-44.033	-43.811	1.00005	-44.471	-43.811	1.000545
2340	-43.463	-44.321	1.003369	-43.713	-44.321	1.000419
2350	-43.329	-45.441	1.003088	-43.398	-45.441	1.002612
2360	-43.794	-46.336	1.000011	-43.714	-46.336	1.000073
2370	-44.546	-46.644	1.000434	-44.252	-46.644	1.000001
2380	-45.076	-47.491	1.000672	-44.741	-47.491	1.000282
2390	-45.081	-47.747	1.00012	-45.193	-47.747	1.000076

Frekuensi (MHz)	Elemen 3			Elemen 4		
	S21 AUT (dB)	S21 REF	MAUT	S21 AUT	S21 REF	MAUT
2300	-45.102	-43.474	1.000182	-42.744	-43.474	1.00008
2310	-44.682	-43.336	1.000083	-42.876	-43.336	1.000597
2320	-44.72	-43.525	1.000529	-43.165	-43.525	1.000153
2330	-44.48	-43.811	1.000037	-43.241	-43.811	1.000031
2340	-44.096	-44.321	1.000086	-43.35	-44.321	1.001685
2350	-44.035	-45.441	1.000106	-43.503	-45.441	1.001877
2360	-44.564	-46.336	1.000003	-44.114	-46.336	1.000069
2370	-45.451	-46.644	1.001755	-45.029	-46.644	1.000838
2380	-46.051	-47.491	1.005603	-45.845	-47.491	1.004686
2390	-46.463	-47.747	1.001818	-46.261	-47.747	1.00164