

UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN FILTER *CAVITY* SILINDRIS YANG
DIBEBANI DIELEKTRIK PORCELAIN UNTUK APLIKASI
WiMAX PADA FREKUENSI 2,3 GHz**

SKRIPSI

MUHAMAD TAJUDIN

0405030575

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI, 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN FILTER *CAVITY* SILINDRIS YANG
DIBEBANI DIELEKTRIK PORCELAIN UNTUK APLIKASI
WiMAX PADA FREKUENSI 2,3 GHz**

SKRIPSI

**Diajukan untuk melengkapi
sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik**

MUHAMAD TAJUDIN

04 05 03 0575

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
JUNI, 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Muhamad Tajudin

NPM : 0405030575

Tanda Tangan :

Tanggal : 14 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Muhamad Tajudin
NPM : 0405030575
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Filter *Cavity* Silindris yang
Dibebani Dielektrik Porselein untuk Aplikasi
WiMAX pada Frekuensi 2,3 GHz.

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Eko Tjipto Rahardjo, M.Sc

()

Penguji : Dr. Fitri Yuli Zulkifli, ST, M.Sc.

()

Penguji : Ir. Arifin Djauhari MT

()

Ditetapkan di :

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi tugas mata kuliah Skripsi di Departemen Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih saya kepada:

1. Prof. Ir. Eko Tjipto Rahardjo, Msc, PhD, selaku dosen pembimbing pertama yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Ir. Fitri Yuli Zulkifi, M.Sc, selaku dosen pembimbing kedua yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
3. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
4. Rekan-rekan AMRG yang selalu mendorong untuk kemajuan riset.
5. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu

Depok, 14 Juni 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Muhamad Tajudin
NPM : 0405030575
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Rancang Bangun Filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porcelain untuk Aplikasi WiMAX pada Frekuensi 2,3 GHz.

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 memublikasikan tanpa meminta izin dari 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 :

Yang Menyatakan

(Muhamad Tajudin)

ABSTRAK

Nama : Muhamad Tajudin
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Rancang Bangun Filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porcelain untuk Aplikasi WiMAX pada Frekuensi 2,3 GHz.

Aplikasi-aplikasi nirkabel, termasuk WiMAX, sangat rentan terhadap interferensi yang disebabkan oleh frekuensi lain yang berdekatan. Untuk menghindari interferensi yang disebabkan oleh aplikasi-aplikasi lain yang memiliki frekuensi kerja berdekatan dibutuhkanlah filter.

Ada berbagai jenis filter dengan kelebihan dan kekurangannya. Dalam skripsi ini, filter *cavity* dipilih karena memiliki *insertion loss* yang kecil, memiliki unjuk kerja tinggi, dan dapat digunakan pada aplikasi yang berdaya besar seperti pada WiMAX *base station*.

Karena itu, pada skripsi ini telah dirancang filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porcelain untuk aplikasi WiMAX pada frekuensi 2,3 GHz. Filter tersebut diharapkan mampu bekerja pada frekuensi 2,3 - 2,4 GHz dengan bandwidth sekitar 100 MHz, ripple $\leq 0,5$ dB, dan insertion loss ≤ 4 dB. Pada simulasi, kriteria tersebut sudah terpenuhi. Tetapi setelah proses fabrikasi, bandwidth yang diperoleh sebesar 90 MHz (2,51 GHz – 2,6 GHz), serta adanya peningkatan *ripple* dan *insertion loss*.

Kata kunci: filter *cavity*, filter, dielectric, resonator, WiMAX

ABSTRACT

Nama : Muhamad Tajudin
Program Studi : Electrical Engineering
Judul : Porcelain Dielectric Loaded Cylindrical *Cavity* Filter Design for WiMAX Application at 2.3 GHz.

Wireless applications, including WiMAX, are very susceptible to interference caused by other neighboring frequencies. To avoid interference caused by other applications that have a close working frequency of the system, filter is needed.

There are various types of filters with have advantages and disadvantages. In this thesis, cavity filter was chosen because it has small insertion loss, high performance, and it can be used in high power applications such as on WiMAX bases station.

In this thesis the design of the porcelain dielectric loaded cylindrical *cavity* filters for WiMAX applications at 2.3 GHz frequency has been accomplished. Filters are expected to work at a frequency of 2.3 - 2.4 GHz with a bandwidth of about 100 MHz, ripple ≤ 0.5 dB, and insertion loss ≤ 4 dB. In the simulation, these criteria are fulfilled. But after the fabrication process, bandwidth obtained is 90 MHz (2.51 GHz - 2.6 GHz), increased ripple and insertion loss.

Key words: filter *cavity*, filter, dielectric, resonator, WiMAX

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG | 1 |
| 1.2 TUJUAN PENULISAN..... | 2 |
| 1.3 BATASAN MASALAH..... | 2 |
| 1.4 SISITEMATIKA PENULISAN | 3 |
| BAB 2 FILTER <i>CAVITY</i> | 4 |
| 2.1 FILTER..... | 4 |
| 2.1.1 <i>Low-Pass Filter</i> | 7 |
| 2.1.2 <i>High-Pass Filter</i> | 7 |
| 2.1.3 <i>Bandpass Filter</i> | 8 |
| 2.1.4 <i>BandStop Filter</i> | 8 |
| 2.2 FILTER <i>CAVITY</i> | 9 |
| 2.2.1 Resonator <i>Cavity</i> | 9 |
| 2.2.2 Resonator <i>Cavity</i> Segi Empat..... | 10 |
| 2.2.3 Resonator <i>Cavity</i> Silindris..... | 11 |
| 2.3 BAHAN DIELEKTRIK..... | 13 |
| BAB 3 SIMULASI DAN PERANCANGAN FILTER <i>CAVITY</i> | 14 |
| 3.1 UMUM..... | 14 |
| 3.2 PERLENGKAPAN YANG DIGUNAKAN..... | 14 |

| | |
|---|----|
| 3.3 PERANCANGAN RESONATOR <i>CAVITY</i> SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN..... | 15 |
| 3.3.1 Karakterisasi Resonator <i>Cavity</i> Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain..... | 16 |
| 3.4 PERANCANGAN FILTER <i>CAVITY</i> SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN TINGKAT 2..... | 19 |
| 3.4.1 Karakterisasi Filter <i>Cavity</i> Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 2..... | 19 |
| 3.4.2 Hasil Akhir Perancangan Filter <i>Cavity</i> Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 2 | 22 |
| 3.5 PERANCANGAN FILTER <i>CAVITY</i> SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN TINGKAT 4..... | 26 |
| 3.5.1 Karakterisasi Filter <i>Cavity</i> Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 4..... | 26 |
| 3.5.2 Hasil Akhir Perancangan Filter <i>Cavity</i> Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 4 | 26 |
| 3.6 PERBANDINGAN HASIL SIMULASI PERANCANGAN 2 POLE DENGAN 4 POLE FILTER <i>CAVITY</i> SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN..... | 28 |
| 3.7 METODA FABRIKASI DAN PENGUKURAN..... | 28 |
| 3.7.1 Metoda Fabrikasi..... | 29 |
| 3.7.1.1 Metoda Fabrikasi Porelain | 29 |
| 3.7.1.2 Metoda Fabrikasi <i>Cavity</i> | 29 |
| 3.7.2 Metoda Pengukuran | 29 |
| BAB 4 HASIL FABRIKASI DAN ANALISIS HASIL PENGUKURAN | 31 |
| 4.1 HASIL FABRIKASI..... | 31 |
| 4.1.1 Perbandingan dengan Ukuran Simulasi | 33 |
| 4.2 HASIL PENGUKURAN | 34 |
| 4.2.1 Perbandingan dengan Hasil Simulasi..... | 36 |
| 4.3 ANALISA | 36 |
| BAB 5 KESIMPULAN..... | 38 |
| DAFTAR ACUAN | 39 |

| | |
|---------------------|-----|
| DAFTAR PUSTAKA..... | 40 |
| LAMPIRAN..... | xiv |



DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | karakteristik ideal empat tipe filter dasar..... | 4 |
| Gambar 2.2 | Profil atenuasi sebenarnya <i>low-pass filter</i> | 5 |
| Gambar 2.3 | Profil atenuasi umum dari <i>bandpass filter</i> | 6 |
| Gambar 2.4 | Respon frekuensi pada <i>Low-pass filter</i> | 7 |
| Gambar 2.5 | Respon frekuensi <i>high-pass filter</i> | 7 |
| Gambar 2.6 | Respon frekuensi <i>bandpass filter</i> | 8 |
| Gambar 2.7 | Respon frekuensi <i>bandstop filter</i> | 8 |
| Gambar 2.6 | Resonator <i>Cavity</i> segi Empat..... | 10 |
| Gambar 2.7 | Resonator <i>Cavity</i> silindris..... | 11 |
| Gambar 3.1 | Resonator cavity silindris (a) tanpa dielektrik dan (b) dengan dielektrik..... | 15 |
| Gambar 3.2 | Resonator cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain | 17 |
| Gambar 3.3 | Karakterisasi jari-jari dielektrik porselain..... | 18 |
| Gambar 3.4 | Karakterisasi tinggi dielektrik porselain..... | 18 |
| Gambar 3.5 | Lebar celah (iris) pada filter cavity silindris tingkat 2..... | 20 |
| Gambar 3.6 | Karakterisasi lebar celah..... | 20 |
| Gambar 3.7 | Feed pada filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat | 21 |
| Gambar 3.8 | Karakterisasi posisi feed | 22 |
| Gambar 3.9 | Karakterisasi panjang feed..... | 22 |
| Gambar 3.10 | Bentuk akhir dari perancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2..... | 23 |
| Gambar 3.11 | Hasil akhir simulasi perancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 | 23 |
| Gambar 3.12 | Distribusi medan E pada filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 (a) tampak samping (b) tampak atas..... | 24 |
| Gambar 3.13 | Distribusi medan H pada filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 (a) tampak samping (b) tampak | |

| | |
|---|----|
| atas..... | 25 |
| Gambar 3.14 Bentuk akhir dari perancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 | 27 |
| Gambar 3.15 Hasil akhir simulasi perancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4..... | 27 |
| Gambar 3.16 Perbandingan hasil simulasi perancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 dan 4..... | 28 |
| Gambar 3.17 Ilustrasi pengukuran dengan Network Analyzer | 30 |
| Gambar 4.1 Proses fabrikasi cavity (a) plat alumunium 505, (b) hasil bubut..... | 31 |
| Gambar 4.2 Proses fabrikasi porselain (a), (b) proses pembakaran, dan (c) porcelain..... | 31 |
| Gambar 4.3 Hasil fabrikasi filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2..... | 32 |
| Gambar 4.4 Hasil pengukuran variasi dielektrik porcelain pada filter cavity tingkat 2..... | 34 |
| Gambar 4.5 Hasil pengukuran variasi panjang feed pada filter cavity tingkat 2..... | 35 |
| Gambar 4.6 Hasil pengukuran filter cavity..... | 35 |
| Gambar 4.7 Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi..... | 36 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 4.1 | Perbandingan ukuran desain simulasi dengan hasil fabrikasi | 33 |
| Tabel 4.2 | Perbandingan ukuran dimensi porcelain selama proses fabrikasi | 33 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan teknologi komunikasi telah mengubah bagaimana manusia menjalani kehidupan sehari-hari. Saat ini, teknologi komunikasi nirkabel telah berkembang dari layanan yang tidak dikenal menjadi teknologi yang dapat digunakan untuk melayani hampir setengah dari penduduk dunia. Demikian pula dengan komputer yang saat ini memegang peranan penting dalam aktivitas sehari-hari, dan internet yang telah mengubah orientasi di dalam belajar, bekerja, berkomunikasi, dan bermain[1]

Peningkatan teknologi manufaktur semikonduktor dan elektronik serta pertumbuhan internet dan telekomunikasi selular memungkinkan jaringan nirkabel untuk berkembang menjadi teknologi akses internet pita lebar yang akan membuat perubahan dasar dalam penggunaan internet dengan membawa internet ke pada pengguna. Untuk dapat menyediakan dan menjadikan *mobile internet access* ada dimana-mana diperlukan konsep *mobile cellular*[2].

Salah satu teknologi nirkabel yang saat ini sedang berkembang dan dapat memenuhi kebutuhan dan kriteria tersebut adalah WiMAX. WiMAX atau *worldwide Interoperability for Microwave Access* merupakan teknologi nirkabel yang memiliki *bandwidth* yang lebar dan *bit rate* yang besar. WiMAX dicetuskan oleh *WiMAX Forum* yang dibentuk pada April 2001, untuk mempromosikan interoperabilitas dan penyesuaian standar IEEE 802.16, yang secara resmi bernama *WirelessMAN* [3]. WiMAX Forum menetapkan 2 *band* frekuensi utama pada *certification profile* untuk *Fixed WiMAX* (*band* 3.5 GHz dan 5.8 GHz), sementara untuk *Mobile WiMAX* ditetapkan 4 *band* frekuensi pada *system profile release-1*, yaitu *band* 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.3 GHz dan 3.5 GHz [4].

Aplikasi-aplikasi nirkabel, termasuk WiMAX, sangat rentan terhadap interferensi yang disebabkan oleh frekuensi lain yang berdekatan. Untuk menghindari interferensi yang disebabkan oleh aplikasi-aplikasi lain yang memiliki frekuensi kejaran berdekatan, dibutuhkanlah sebuah alat yang mampu

melewatkan frekuensi yang diinginkan dan tidak melewatkan frekuensi yang tidak diinginkan dengan memberikan atenuasi yang cukup besar. Alat tersebut adalah filter.

Filter memiliki beberapa parameter utama yang menentukan karakteristik dari filter tersebut. Parameter-parameter diantaranya adalah *insertion loss*, *ripple*, *bandwidth*, *shape faktor*, *rejection*, dan *quality factor*. Ada berbagai jenis filter dengan kelebihan dan kekurangannya. Dalam skripsi ini, filter *cavity* dipilih karena memiliki *insertion loss* yang kecil, memiliki unjuk kerja tinggi, dan dapat digunakan pada aplikasi dengan daya besar. Dalam skripsi ini diusulkan rancang bangun dari filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain untuk aplikasi WiMAX pada frekuensi 2,3 GHz. Filter tersebut diharapkan mampu bekerja pada frekuensi 2,3 - 2,4 GHz dengan *bandwidth* sekitar 100 MHz, *ripple* $\leq 0,5$ dB, dan *insertion loss* ≤ 4 dB.

1.2 TUJUAN PENULISAN

Tujuan dari skripsi ini adalah melakukan rancang bangun filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain untuk aplikasi mobile WiMAX pada frekuensi 2,3 GHz (2,3 - 2,4 GHz). Pada rentang frekuensi tersebut diharapkan mempunyai *bandwidth* sekitar 100 MHz, *ripple* $\leq 0,5$ dB, dan *insertion loss* ≤ 4 dB.

1.3 BATASAN MASALAH

Permasalahan utama pada *base station* WiMAX adalah daya yang digunakan cukup besar. Sehingga untuk aplikasi *base station* WiMAX diperlukan filter yang memiliki unjuk kerja tinggi dan mampu menangani suhu dan daya yang cukup tinggi. Filter yang memenuhi criteria tersebut adalah filter *cavity*.

Permasalahan yang akan dibahas pada skripsi ini dibatasi pada penelitian rancang bangun filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain untuk aplikasi mobile WiMAX pada frekuensi 2.3 GHz, yang diharapkan memiliki *bandwidth* sekitar 100 MHz, *ripple* $\leq 0,5$ dB, dan *insertion loss* ≤ 4 dB.

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan skripsi ini akan dibagi dalam lima bagian besar, yaitu :

Bab 1 Pendahuluan

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

Bab 2 Filter *Cavity*

Bagian ini akan berisi tentang bahasan teori dasar mengenai filter, resonator, khususnya resonator *cavity* silindris, dan penggunaannya sebagai filter.

Bab 3 Simulasi Dan Perancangan Filter *Cavity*

Bagian ini memberikan penjelasan mengenai perlengkapan yang dibutuhkan dalam perancangan, material yang digunakan, penentuan ukuran *cavity* dan dielektrik, penentuan posisi dan panjang *feed*, prosedur perancangan, hasil simulasi dengan menggunakan *HFSS v.11*. Pada bagian akhir juga akan dibahas metode yang digunakan dalam melakukan fabrikasi dan pengukuran parameter filter.

Bab 4 Hasil Fabrikasi dan Analisis Hasil Pengukuran

Bagian ini berisi tentang hasil fabrikasi dan hasil pengukuran parameter filter beserta analisisnya. Hasil analisis merupakan dasar untuk pembentukan kesimpulan pada penelitian ini.

Bab 5 Penutup

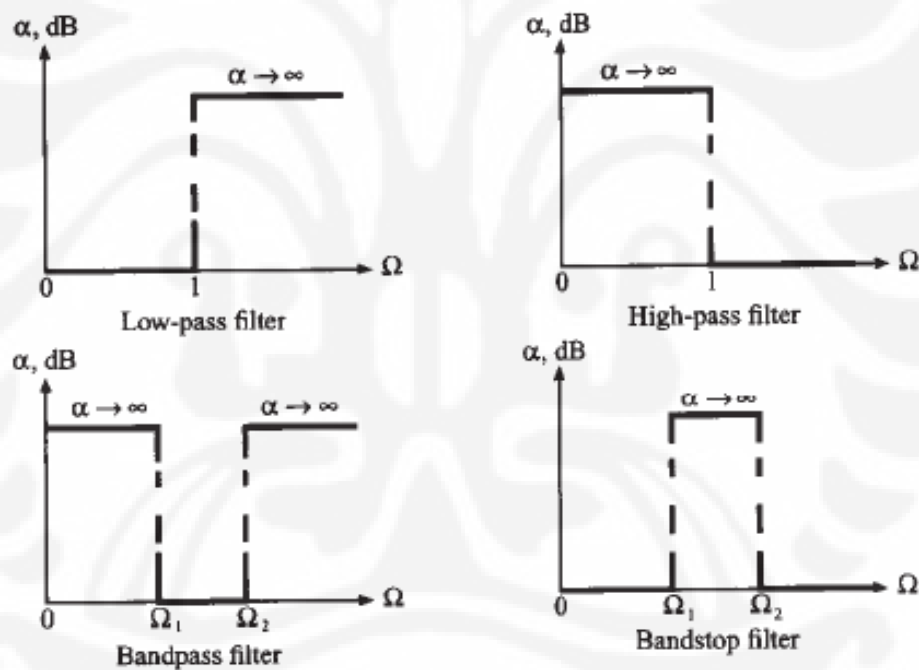
Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan isi skripsi.

BAB 2

FILTER CAVITY

2.1 FILTER

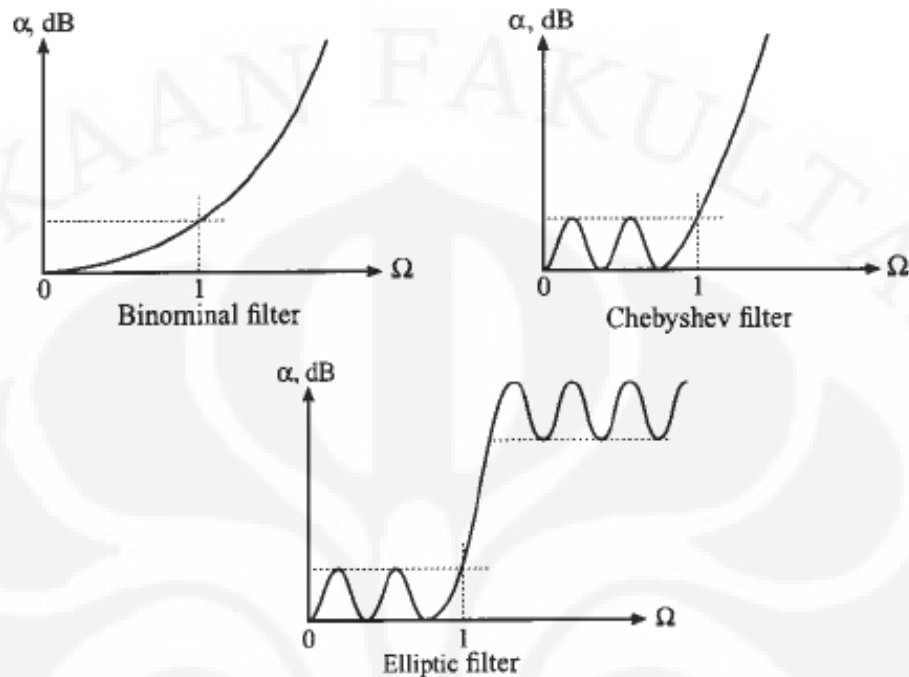
Filter adalah suatu alat yang sering digunakan dalam industri komunikasi yang berguna untuk memisahkan sinyal informasi dari sinyal-sinyal lain yang tidak diinginkan seperti interferensi, *noise* dan distorsi. Filter akan secara selektif memilih frekuensi tertentu yang akan dilewatkan pada sistem dan memberikan atenuasi yang besar pada frekuensi yang tidak diinginkan. Filter sering digunakan pada peralatan transmisi, penerima, sampai pada peralatan pengukuran [5-7].



Gambar 2.1 karakteristik ideal empat tipe filter dasar[5]

Gambar 2.1 menunjukkan karakteristik ideal dari empat tipe filter dasar, yaitu *low-pass*, *high-pass*, *bandpass*, dan *bandstop*. Dengan α merupakan atenuasi dalam dB, $\Omega = \omega/\omega_c$ sebagai frekuensi yang telah dinormalisasi, dan ω_c menunjukkan frekuensi *cut-off* untuk *low-pass* dan *high-pass* filter dan frekuensi tengah untuk *bandpass* dan *bandstop filter*. Sedangkan untuk profil atenuasi sebenarnya untuk *low-pass filter* ditunjukkan oleh gambar 2.2 yang biasa disebut

binomial (butterworth), chebychev, dan elliptic (cauer).



Gambar 2.2 Profil atenuasi sebenarnya *low-pass* filter[5]

Parameter-parameter utama yang memegang peranan penting dalam menganalisa *trade-off* suatu filter adalah sebagai berikut:

1. *Insertion Loss*

Idealnya, sebuah filter yang dimasukkan kedalam rangkaian RF akan menunjukkan tidak ada daya yang hilang pada *passband*. Dengan kata lain memiliki 0 *insertion loss*. *Insertion loss* mengukur seberapa besar penurunan respon amplitudo daya dari garis 0 dB.

2. *Ripple*

Kedataran sinyal dari *passband* bisa diukur dengan melihat besarnya *ripple*. *Ripple* adalah perbedaan antara maksimum dan minimum respon amplitudo pada *passband* dalam dB.

3. *Bandwidth*

Bandwidth dari suatu *bandpass filter* didefinisikan sebagai perbedaan antara frekuensi atas dan frekuensi bawah ($f_L - f_U$) pada saat respon amplitudo-nya 3dB di atas respon *passband*.

4. *Shape factor*

Shape factor ini di definisikan sebagai ketajaman dari respon filter dengan mengambil rasio antara *bandwidth* pada 60 -dB dengan *bandwidth* pada 3-dB.

5. *Rejection*

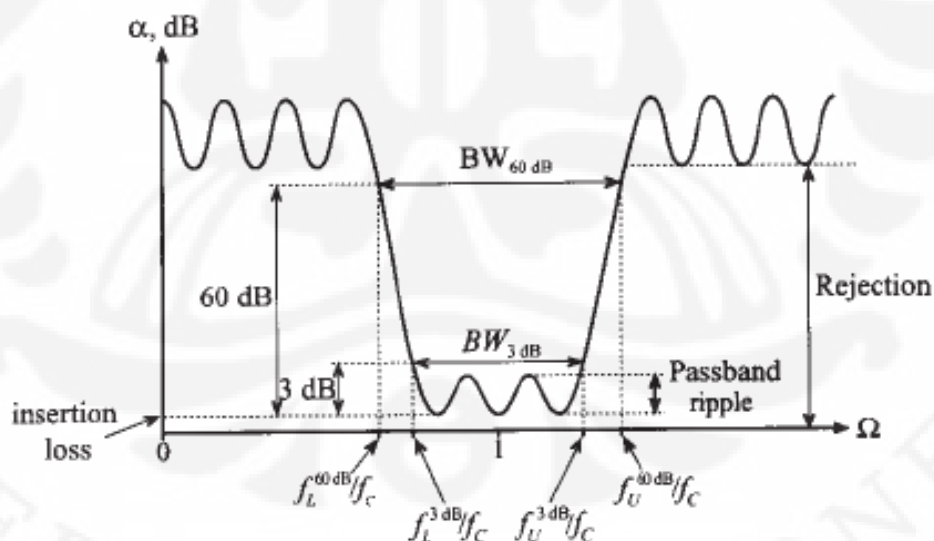
Pada filter ideal akan didapatkan tingkat atenuasi tak hingga untuk frekuensi yang tidak diinginkan. Praktisi biasanya menetapkan 60 dB sebagai *rejection rate*.

6. Faktor kualitas (Q)

Faktor kualitas didefinisikan sebagai besarnya rasio dari energi yang disimpan dan energi yang hilang per satuan waktu.

$$Q = \omega \frac{(\text{energi tersimpan rata-rata})}{(\text{energi hilang perperioda})} \quad (2-1)$$

Gambar 2.3 mengilustrasikan parameter-parameter utama dari profil atenuasi pada *bandpass filter*.

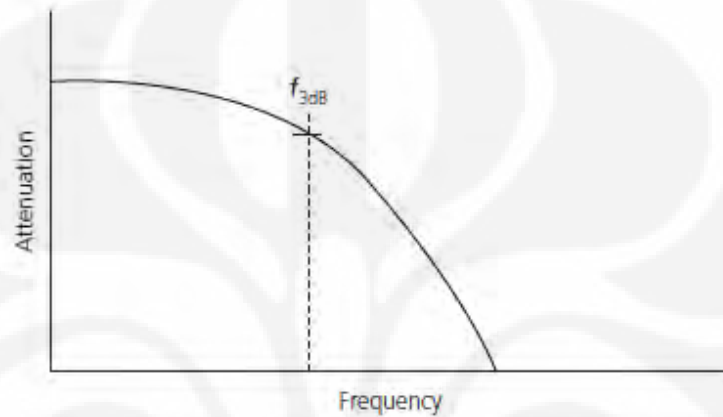


Gambar 2.3 Profil atenuasi umum dari *bandpass filter*[5]

Berdasarkan selektivitas dari filter, filter dibagi menjadi beberapa jenis yaitu *Low-pass filter*, *High-pass filter*, *Band-pass filter*, dan *Band-stop filter*.

2.1.1 Low-Pass Filter

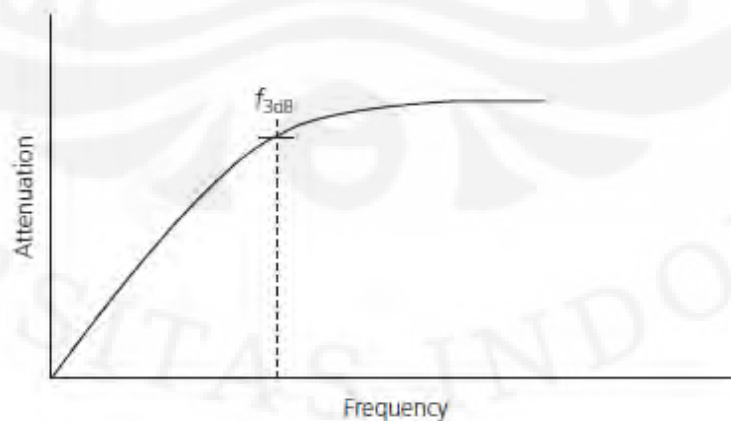
Low-pass filter digunakan untuk membatasi frekuensi yang lebih tinggi dari suatu sinyal. *Low-pass filter* akan melewatkan frekuensi rendah atau dengan kata lain memberikan atenuasi yang tinggi pada frekuensi tinggi dan melewatkan sinyal dengan frekuensi yang rendah. Grafik respon filter *Low-pass* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Respon frekuensi pada *Low-pass* filter[6]

2.1.2 High-Pass Filter

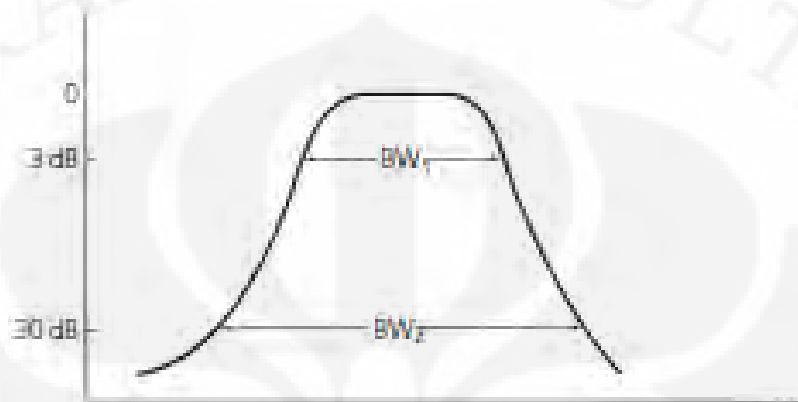
High-pass filter ini merupakan kebalikan dari *low-pass filter*. Seperti terlihat pada Gambar 2.5, *high-pass filter* digunakan untuk membatasi frekuensi yang lebih rendah dari suatu sinyal. *High-pass filter* akan melewatkan frekuensi tinggi sampai tak terbatas.



Gambar 2.5 Respon frekuensi *high-pass* filter[6]

2.1.3 Bandpass Filter

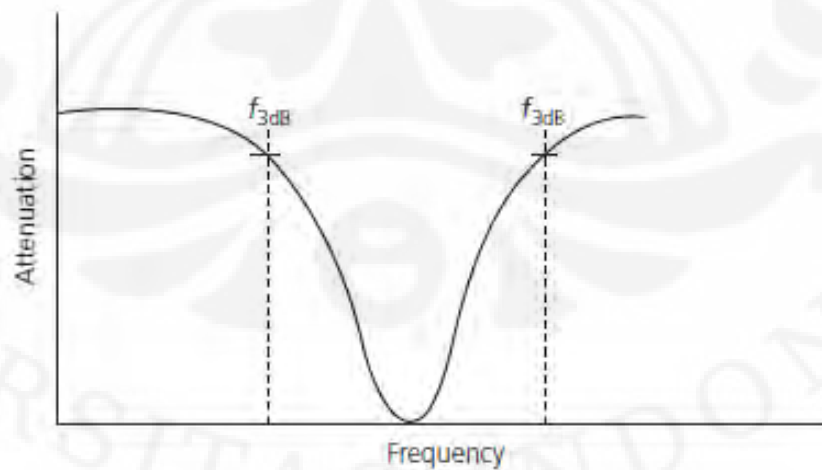
Bandpass filter adalah rangkaian yang melewatkan frekuensi pada daerah tertentu dan meredam frekuensi di luar daerah tersebut. *Bandpass filter* merupakan penggabungan dari *lowpass filter* dan *highpass filter*. Grafik respon filter *bandpass* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Respon frekuensi *bandpass* filter [6]

2.1.4 BandStop Filter

Bandstop filter bekerja dengan meredam frekuensi pada daerah tertentu dan melewatkan frekuensi di luar daerah tersebut. *Bandstop filter* akan meredam frekuensi diantara frekuensi-frekuensi *passband*. Grafik respon filter *bandstop* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Respon frekuensi *bandstop* filter [6]

2.2 FILTER CAVITY

Ada beberapa jenis filter dengan kelebihan dan kekurangannya. Dalam skripsi ini, filter *cavity* dipilih karena memiliki *insertion loss* yang kecil, memiliki unjuk kerja yang bagus, dan dapat digunakan pada aplikasi yang berdaya besar. Karena itu, filter *cavity* sangat cocok digunakan untuk aplikasi pada *base station*. Filter *cavity* dapat dibuat dari beberapa resonator *cavity* yang digabung bersamaan.

2.2.1 Resonator Cavity

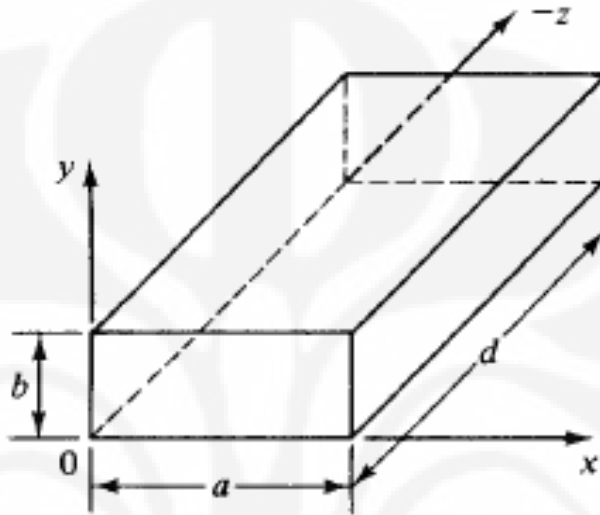
Secara umum, resonator *cavity* adalah sebuah konduktor tertutup yang dapat menyimpan energi gelombang elektromagnetik. Energi medan magnet dan medan listrik yang disimpan akan menentukan nilai ekuivalen dari induktansi dan kapasitansi, sedangkan energi yang terdisipasi pada dinding konduktor akan menentukan nilai ekuivalen dari resistansi. Inilah yang menyebabkan resonator *cavity* juga dapat dikategorikan sebagai salah satu jenis rangkaian resonan dan dapat digunakan sebagai filter [7].

Pada frekuensi di atas 1.000 MHz, rangkaian resonan lain halnya akan memiliki nilai koefisien faktor Q yang relatif kecil, oleh karena itu dengan menggunakan dinding konduktor, nilai koefisien faktor Q bisa sangat tinggi. Resonator *cavity* dapat dibentuk dari *waveguide* yang ditutup ke dua ujungnya dengan menggunakan bahan konduktor, *waveguide* yang ditutup salah satu ujungnya saja akan menyebabkan adanya radiasi pada ujung lainnya yang terbuka sehingga jika ujung lainnya ditutup akan membentuk suatu kotak tertutup atau biasa dinamakan *cavity* [7].

Secara teori, resonator mempunyai jumlah mode resonan yang tak hingga, dan masing-masing mode memiliki nilai frekuensi resonan tertentu. Jika diberikan suatu sinyal dengan frekuensi tertentu ke dalam *cavity*, yang sama dengan frekuensi resonansi, maka nilai amplitudo maksimum dari gelombang berdiri akan muncul dan energi maksimum yang tersimpan dalam medan listrik dan medan magnet akan sama. Mode yang mempunyai nilai resonansi terkecil biasa dinamakan mode dominan [7].

2.2.2 Resonator *Cavity* Segi Empat

Medan elektromagnetik di dalam *cavity* harus memenuhi persamaan Maxwell, geometri dari resonator *cavity* segi empat dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Resonator *Cavity* segi Empat[7]

Persamaan gelombang pada Resonator *Cavity* segi Empat harus memenuhi kondisi batas dari tangensial nol dari E pada keempat dinding *cavity*. Ini diperlukan untuk memilih fungsi harmonik pada sumbu z untuk memenuhi kondisi pada dinding lainnya di kedua ujung. Persamaan ini dapat dipenuhi jika [7]:

$$H_z = H_{0z} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (TE_{mnp}) \quad (2-2)$$

Dimana: $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah periodik setengah gelombang pada sumbu x .

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah periodik setengah gelombang pada sumbu y .

$p = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah periodik setengah gelombang pada sumbu z .

dan,

$$E_z = E_{0z} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (TM_{mnp}) \quad (2-3)$$

Dimana: $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$p = 0, 1, 2, 3, \dots$

Persamaan pemisah untuk mode TE dan TM dapat ditulis [7]:

$$k^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2 \quad (2-4)$$

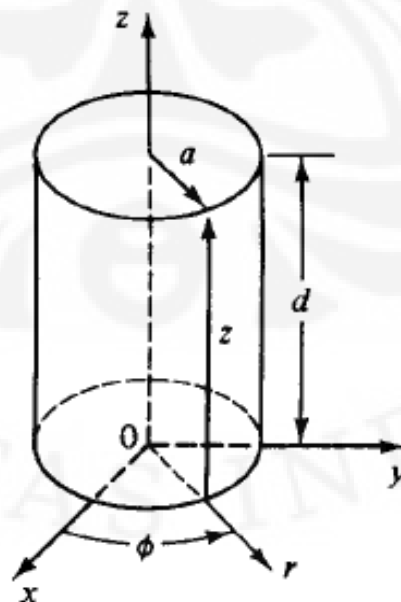
Untuk *lossless* dielektrik, $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$, oleh karena itu frekuensi resonan dapat dirumuskan dengan persamaan [7]:

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (TE_{mnp}, TM_{mnp}) \quad (2-5)$$

Untuk $a > b < d$, mode dominan dari resonator ini adalah mode TE_{101} .

2.2.3 Resonator Cavity Silindris

Resonator *cavity* silindris adalah *waveguide* silindris dengan kedua ujungnya ditutup oleh dinding konduktor (Gambar 2.9). Fungsi gelombang dalam circular resonator harus memenuhi persamaan Maxwell.



Gambar 2.9 Resonator Cavity silindris[7]

Sama seperti persamaan gelombang pada resonator *cavity* segi empat, pada resonator *cavity* silindris persamaan gelombang harus memenuhi kondisi batas dari tangensial nol dari E pada keempat dinding *cavity*. Ini diperlukan untuk memilih fungsi harmonik pada sumbu z untuk memenuhi kondisi pada dinding lainnya di kedua ujung. Persamaan ini dapat dipenuhi jika [7]:

$$H_z = H_{0z} J_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \cos(n\phi) \sin \left(\frac{q\pi z}{d} \right) \quad (TE_{npq}) \quad (2-6)$$

Dimana: $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah periodik setengah gelombang pada ϕ .

$p = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah pembuat nol pada medan di radial.

$q = 0, 1, 2, 3, \dots$ menunjukkan jumlah setengah gelombang pada sumbu aksial.

J_n = fungsi Bessel tingkat pertama.

H_{0z} = Amplitudo dari medan magnet.

Dan,

$$E_z = E_{0z} J_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \cos(n\phi) \cos \left(\frac{q\pi z}{d} \right) \quad (TM_{npq}) \quad (2-7)$$

Dimana: $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$p = 0, 1, 2, 3, \dots$

E_{0z} = Amplitudo dari medan listrik

Persamaan lain untuk TE dan TM masing-masing adalah [7]:

$$k^2 = \left(\frac{X'_{np}}{a} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d} \right)^2 \quad (\text{mode TE}) \quad (2-8)$$

$$k^2 = \left(\frac{X_{np}}{a} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d} \right)^2 \quad (\text{mode TM}) \quad (2-9)$$

Untuk *lossless* dielektrik, $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$, oleh karena itu frekuensi resonansi dapat dirumuskan dengan persamaan [7]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{X'_{np}}{a} \right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d} \right)^2} \quad (\text{TE}) \quad (2-10)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{X_{np}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d}\right)^2} \quad (\text{TM}) \quad (2-11)$$

Mode dominan dari resonator jenis ini adalah TM_{110} dimana pada saat $2a > d$, dan TM_{111} pada saat $d \geq 2a$.

2.3 BAHAN DIELEKTRIK

Suatu bahan dielektrik yang mempunyai nilai permitivitas yang tinggi dan memiliki faktor kualitas (Q) yang tinggi dapat digunakan untuk menyimpan suatu energi. Salah satu karakteristik dari keramik dielektrik yang paling penting adalah nilai permitivitas (ε_r). Permitivitas relative dari sebuah material akan menunjukkan seberapa besar penyimpanan energi oleh bahan dielektrik tersebut pada saat beda potensial di lewatkan kepadanya. Nilai permitivitas yang tinggi akan meminiaturisasi rangkaian gelombang pendek dikarenakan panjang gelombang pada bahan dielektrik berbanding terbalik dengan akar kuadrat dari nilai permitivitas dari dielektrik itu sendiri seperti ditunjukkan pada persamaan[8]:

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2-12)$$

Dimana λ_d adalah panjang gelombang pada dielektrik sedangkan λ_0 adalah panjang gelombang di ruang hampa. Nilai permitivitas dari suatu material akan menentukan kecepatan relative dari sinyal elektrik yang melintasi bahan dielektrik tersebut.

Pada skripsi ini, bahan dielektrik yang digunakan untuk meminiaturisasi filter *cavity* adalah porcelain. Walaupun bahan dielektrik porcelain memiliki permitivitas relative yang tidak terlalu besar, bahan ini dipilih karena mudah didapatkan di Indonesia, mudah difabrikasi, dan harganya jauh lebih murah bila dibandingkan dengan bahan dielektrik lainnya yang biasa digunakan pada rangkaian gelombang pendek.

BAB 3

SIMULASI DAN PERANCANGAN FILTER CAVITY

3.1 UMUM

Pada skripsi ini akan dirancang filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain untuk aplikasi WiMAX pada frekuensi 2,3 GHz. Filter tersebut diharapkan mampu bekerja pada frekuensi 2,3 – 2,4 GHz dengan *bandwidth* sekitar 100 MHz, *ripple* $\leq 0,5$ dB, dan *insertion loss* ≤ 1 dB. Keramik porselain sebagai bahan dielektrik yang digunakan pada simulasi memiliki permitivitas 5,7 dan nilai *loss tangent* 0. Walaupun porselain memiliki nilai relatif permitivitas (ϵ_r) yang rendah, porselain tetap dipilih karena bahan ini mudah didapatkan di Indonesia, mudah difabrikasi, dan harganya jauh lebih murah bila dibandingkan dengan bahan dielektrik lainnya yang biasa digunakan.

Ada beberapa tahapan didalam perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain, tahapan pertama adalah merancang resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain. Perancangan dilakukan dengan menentukan terlebih dahulu ukuran dari resonator *cavity* silindris dan ukuran dari bahan dielektrik, dalam hal ini adalah porselain, yang dibebani ke dalam resonator *cavity* silindris. Tahapan selanjutnya adalah merancang filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain dengan menggunakan resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang telah diperoleh sebelumnya. Filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang dirancang pada skripsi ini, disusun dari dua dan empat buah resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain.

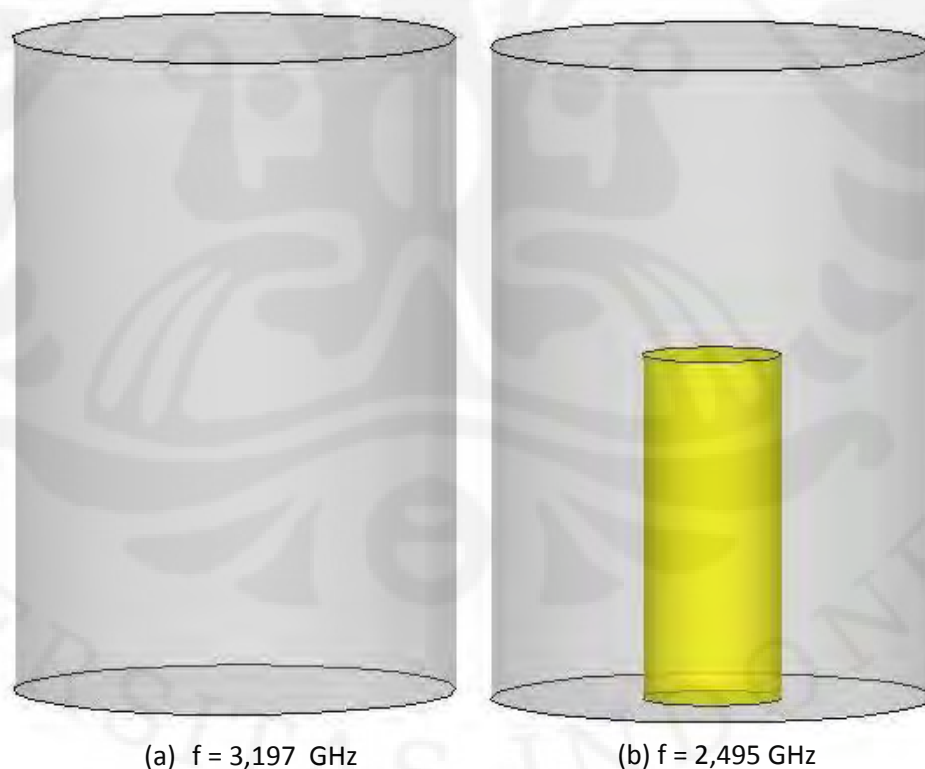
3.2 PERLENGKAPAN YANG DIGUNAKAN

Perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain adalah perangkat lunak Ansoft HFSS v.11.

3.3 PERANCANGAN RESONATOR CAVITY SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN

Langkah awal dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain adalah mendapatkan nilai dari ukuran-ukuran pada resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain. Resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tersebut harus memiliki frekuensi resonansi yang sedikit lebih tinggi dari frekuensi tengah filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang akan dirancang.

Resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain adalah resonator *cavity* silindris yang dibebani material dielektrik berupa keramik porselain. Besar ukuran jari-jari dan tinggi dari resonator *cavity* silindris dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2-10. Untuk mensimulasikan frekuensi resonansi pada mode dominan dari ukuran resonator *cavity* silindris tersebut digunakan *eigenmode solution type* pada *HFSS v.11*.



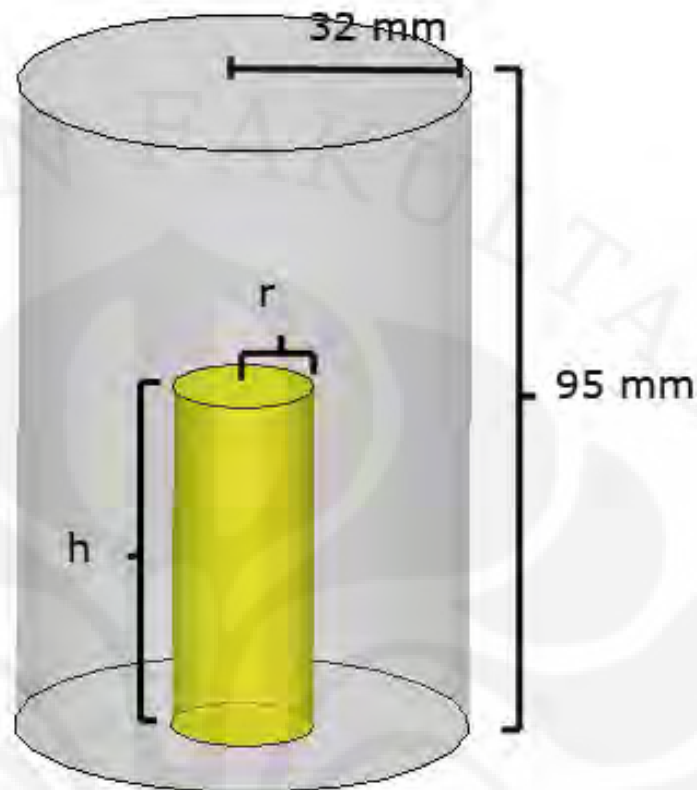
Gambar 3.1 Resonator *cavity* silindris (a) tanpa dielektrik dan (b) dengan dielektrik

Dengan membebani bahan dielektrik di dalam resonator *cavity* silindris, bisa didapatkan resonator dengan frekuensi resonansi yang lebih rendah tanpa mengubah besarnya ukuran dari resonator *cavity* silindris sebelum dibebani oleh bahan dielektrik. Pada Gambar 3.1 dapat dilihat perbandingan frekuensi resonansi antara resonator *cavity* silindris tanpa dibebani bahan dielektrik dengan resonator *cavity* silindris yang dibebani oleh bahan dielektrik porselain. Frekuensi resonansi dari masing-masing resonator *cavity* silindris adalah 3,197 GHz untuk resonator tanpa bahan dielektrik, dan 2,495 GHz untuk resonator dengan bahan dielektrik porselain yang memiliki tinggi 50 mm dan jari-jari 10 mm.

Sehingga untuk mendapatkan resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang mempunyai frekuensi resonansi yang sama dengan resonator *cavity* silindris, ukuran dari resonator *cavity* silindris sebelum dibebani oleh material dielektrik porselain harus diperkecil. Dengan kata lain, bahan dielektrik dapat digunakan untuk meminiaturisasi filter.

3.3.1 Karakterisasi Resonator *Cavity* Silindris Yang Dibebani Dielektrik Porselain

Untuk mengetahui pengaruh dari ukuran-ukuran yang digunakan dan untuk mendapatkan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain sesuai dengan yang diinginkan, maka diperlukanlah karakterisasi. Karakterisasi pada rancangan resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain dilakukan dengan memvariasikan besarnya ukuran dari bahan dielektrik porselain. Karakterisasi ukuran dari bahan dielektrik porselain meliputi variasi jari-jari (r) dan tinggi (h) dari bahan dielektrik porselain yang digunakan. Gambar 3.2 memperlihatkan ukuran dari resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang digunakan pada simulasi untuk mengarakterisasi pengaruh perubahan dimensi dari bahan dielektrik terhadap frekuensi resonansi dari resonator.

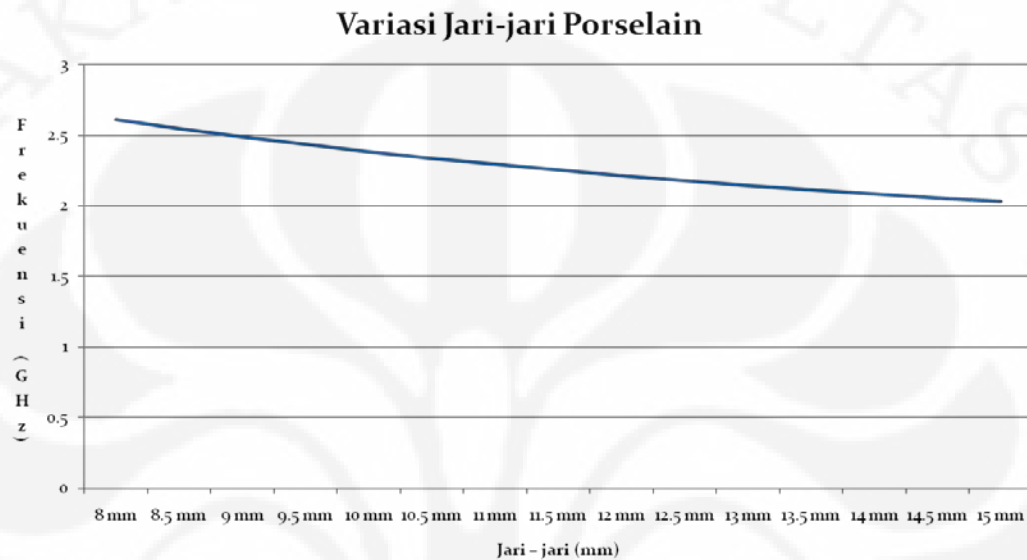


Gambar 3.2 Resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain

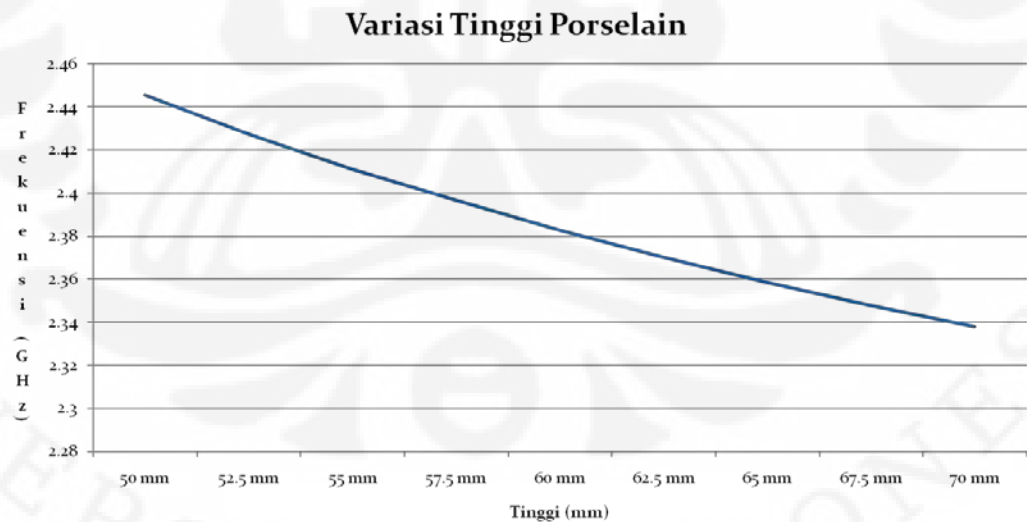
Pada karakteristik variasi jari-jari (r) bahan dielektrik porselain, ukuran dari resonator *cavity* silindris serta jenis dan tinggi dari bahan dielektrik porselain dibuat tetap. Dengan besar jari-jari resonator *cavity* silindris 32 mm dan tinggi 95 mm, serta bahan dielektrik porselain yang digunakan memiliki nilai permitivitas relatif (ϵ_r) sebesar 5,7 dan tinggi (h) 60 mm. Gambar 3.3 memperlihatkan hubungan antara besarnya jari-jari dari bahan dielektrik pada rancangan resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain dengan besarnya frekuensi resonan yang didapat. Semakin besar jari-jari porselain, maka nilai dari frekuensi resonan akan semakin rendah.

Selanjutnya untuk karakteristik variasi tinggi (h) bahan dielektrik porselain, ukuran dari *cavity* silindris resonator serta jenis dan jari-jari (r) dari bahan dielektrik porselain juga dibuat tetap. Dengan besar jari-jari resonator *cavity* silindris 32 mm dan tinggi 95 mm, serta bahan dielektrik porselain yang digunakan memiliki nilai permitivitas relatif (ϵ_r) sebesar 5,7 dan jari-jari (r) 10

mm. Gambar 3.4 memperlihatkan hubungan antara besarnya tinggi dari bahan dielektrik pada rancangan resonator *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain dengan besarnya frekuensi resonan yang didapat. Semakin besar tinggi porselain, maka nilai dari frekuensi resonan akan semakin rendah.



Gambar 3.3 Karakterisasi jari-jari dielektrik porselain



Gambar 3.4 Karakterisasi tinggi dielektrik porselain

Dari karakteristik yang dilakukan terhadap jari-jari dan tinggi dari bahan dielektrik, didapatkan hubungan yang berbanding terbalik antara nilai dari

frekuensi resonan dengan ukuran yang meliputi besarnya jari-jari dan tinggi dari bahan dielektrik. Setelah dilakukan karakterisasi tersebut didapatkan nilai optimum untuk ukuran resonator cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain adalah dengan ukuran panjang jari-jari cavity 32 mm, tinggi cavity 95 mm, bahan dielektrik yang digunakan adalah porselain ($\epsilon_r = 5,7$), besar jari-jari dari bahan dielektrik 10 mm, dan tinggi dari bahan dielektrik 50 mm.

3.4 PERANCANGAN FILTER CAVITY SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN TINGKAT 2

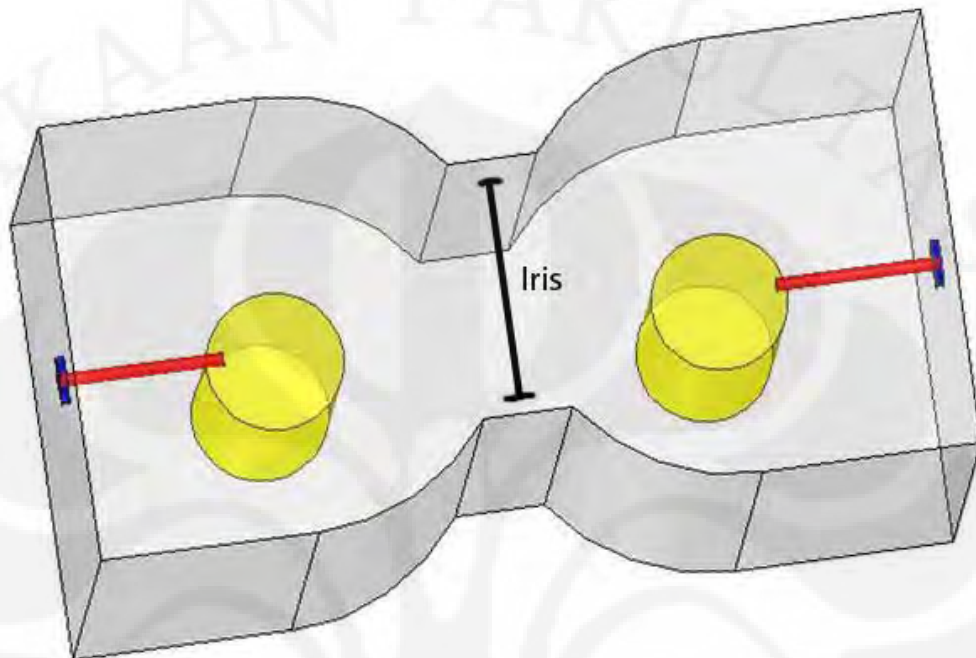
Setelah mendapatkan ukuran dari resonator cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain, filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 bisa dibuat dengan menggabungkan dua buah resonator cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain. Untuk mensimulasikan rancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 digunakan *Ansoft HFSS v.11* dengan *driven terminal solution type*.

3.4.1 Karakterisasi Filter Cavity Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 2

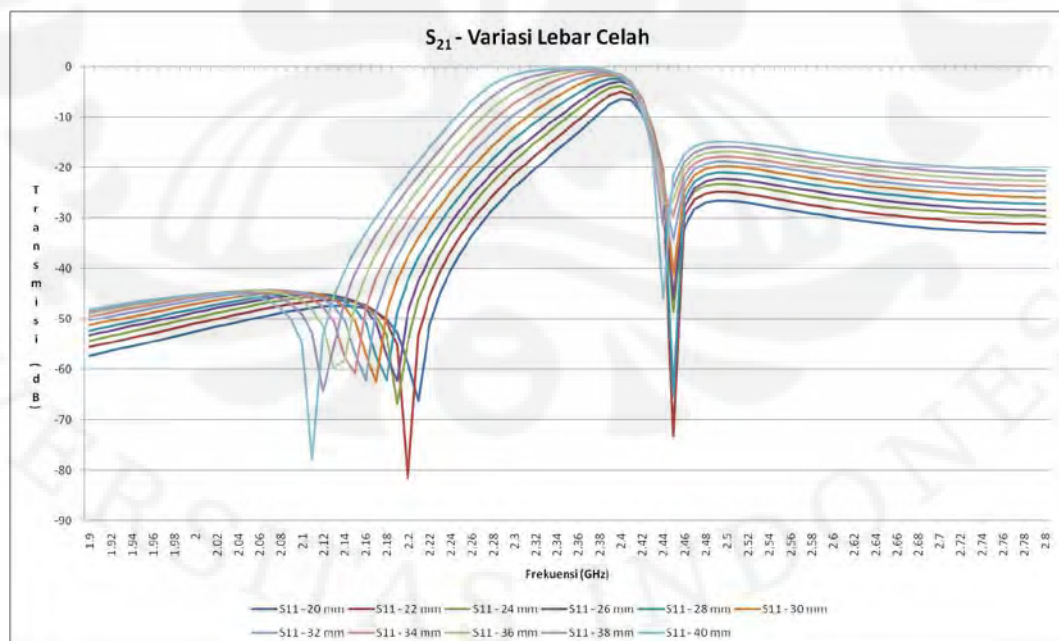
Karakterisasi yang dilakukan pada filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 meliputi pengkarakterisasian dengan memvariasikan ukuran dari lebar celah, posisi *feed*, dan panjang *feed*. Gambar 3.5 memperlihatkan lebar celah (*iris*) pada rancangan filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Lebar celah divariasikan dari 20 mm sampai dengan 40 mm dengan ukuran dari jari-jari cavity 32 mm, tinggi cavity 95 mm, jari-jari bahan dielektrik porselain 10 mm, dan tinggi bahan dielektrik porselain 50 mm dibuat tetap.

Pada Gambar 3.6 terlihat bahwa semakin besar ukuran lebar celah pada filter cavity silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 akan menyebabkan nilai dari *low frequency cut-off* semakin turun ke frekuensi yang lebih rendah. Dengan nilai dari *high frequency cut-off* yang relatif tetap, maka *bandwidth* filter akan bertambah besar sebanding dengan perubahan lebar celah.

Akan tetapi, selain memperbesar bandwidth peningkatan lebar celah juga akan menyebabkan nilai transmisi (S_{21}) pada *rejection band* meningkat.

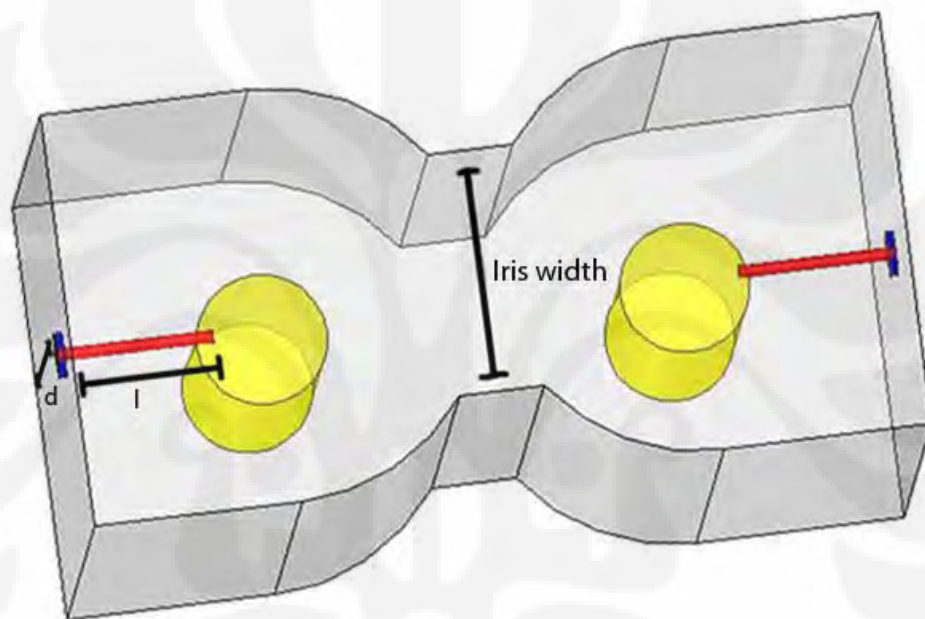


Gambar 3.5 Lebar celah (iris) pada filter *cavity* silindris tingkat 2



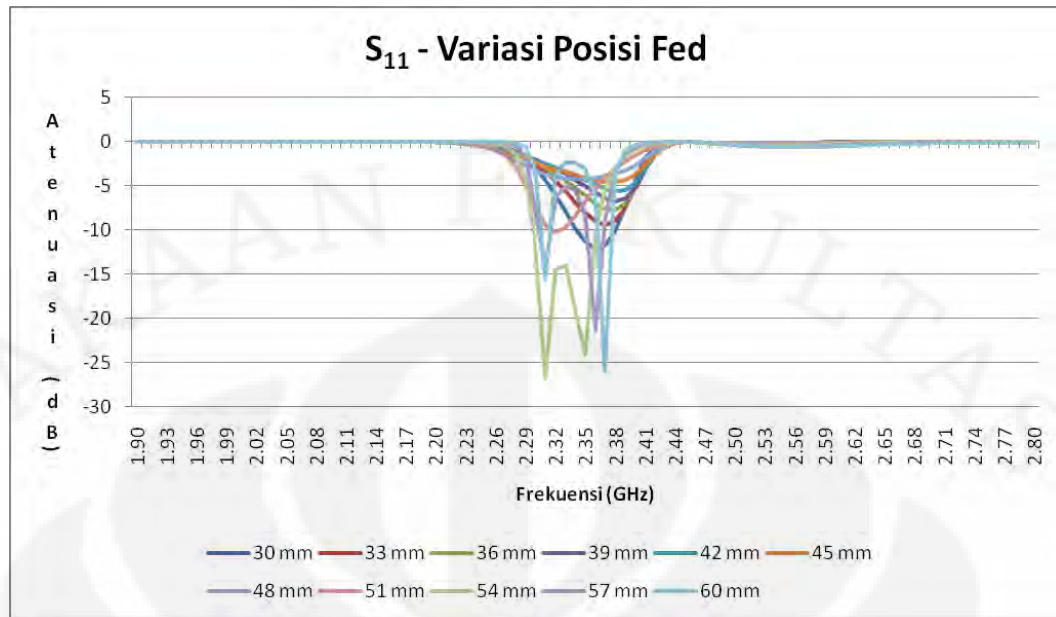
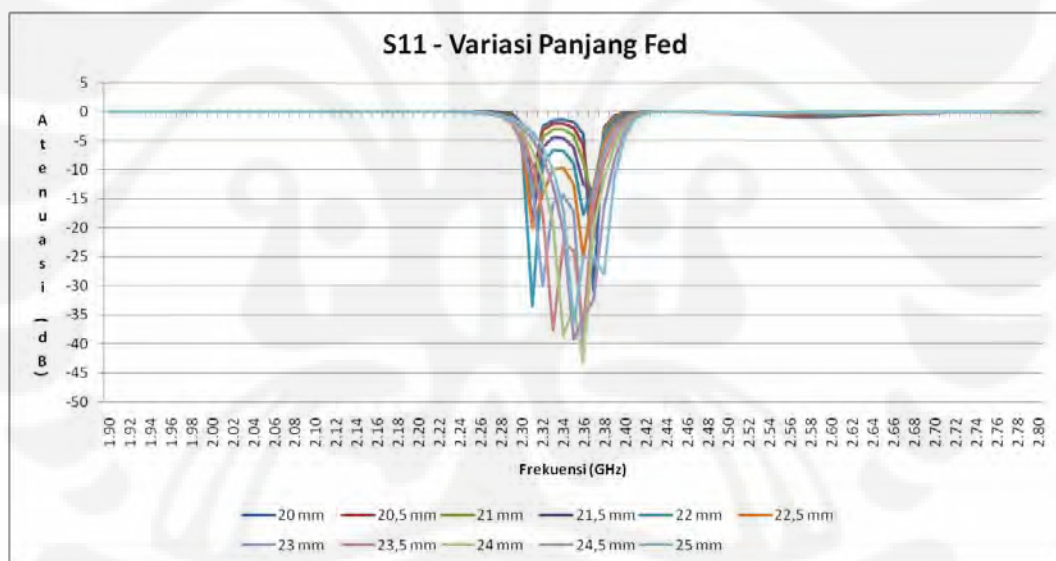
Gambar 3.6 Karakterisasi lebar celah

Gambar 3.7 memperlihatkan posisi (d) dan panjang (l) dari *feed* yang akan dikarakterisasi pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Posisi *feed* divariasikan dengan ukuran dari jari-jari *cavity* 32 mm, tinggi *cavity* 95 mm, lebar celah 37,5 mm, jari-jari bahan dielektrik porselain 10 mm, dan tinggi bahan dielektrik porselain 50 mm dibuat tetap. Karakterisasi posisi *feed* dilakukan dengan ukuran dari panjang *feed* 22 mm, sedangkan karakterisasi panjang *feed* dilakukan dengan posisi *feed* 59 mm.



Gambar 3.7 *Feed* pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2

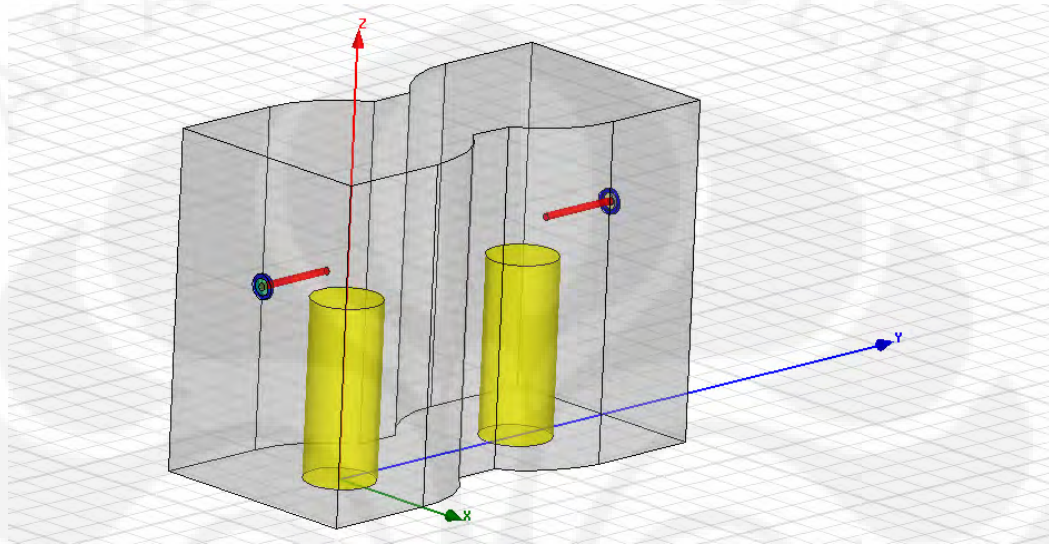
Gambar 3.8 menunjukkan hasil dari karakteristik posisi *feed* dari 30 mm sampai 60 mm, sedangkan hasil karakteristik panjang *feed*, dari 20 mm sampai 24,5 mm, ditunjukkan oleh Gambar 3.9. Dari Gambar 3.8 dan Gambar 3.9, tidak terlihat hubungan yang linear seperti pada karakteristik sebelumnya, dan dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa posisi dan ukuran dari *feed* akan mempengaruhi kondisi *matching*.

Gambar 3.8 Karakterisasi posisi *feed*Gambar 3.9 Karakterisasi panjang *feed*

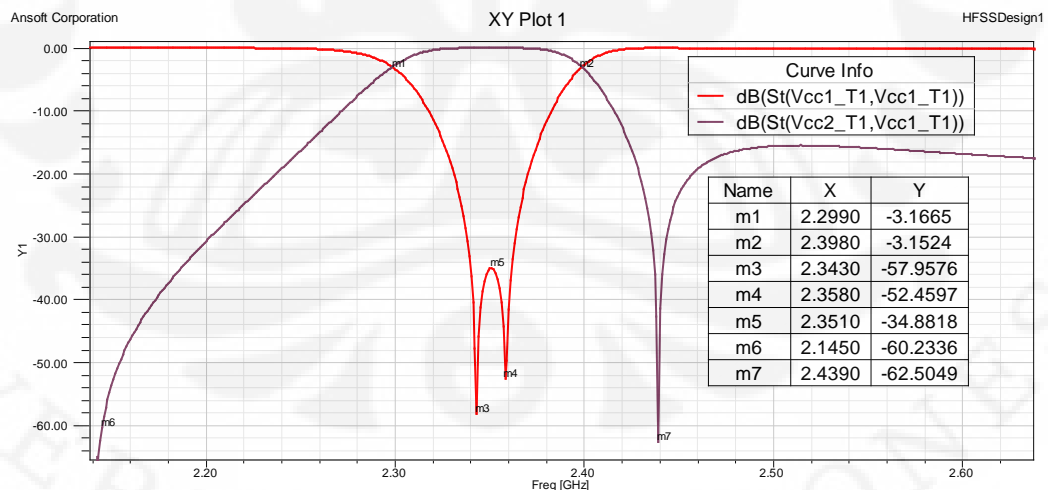
3.4.2 Hasil Akhir Perancangan Filter *Cavity* Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 2

Setelah dilakukan iterasi dan analisis karakteristik ukuran dari dimensi-dimensi baik pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 maupun pada resonator *cavity* silindris, bisa didapatkan ukuran yang optimal untuk filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Ukuran dari ukuran tersebut adalah jari-jari *cavity* 32 mm, tinggi *cavity* 95 mm, lebar

celah 37,5 mm, bahan dielektrik yang digunakan adalah porselain ($\epsilon_r = 5,7$), besar jari-jari bahan dielektrik 10 mm, tinggi bahan dielektrik 50 mm, posisi *feed* 59 mm, dan panjang *feed* 24 mm. Bentuk akhir dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 dapat dilihat pada Gambar 3.10.



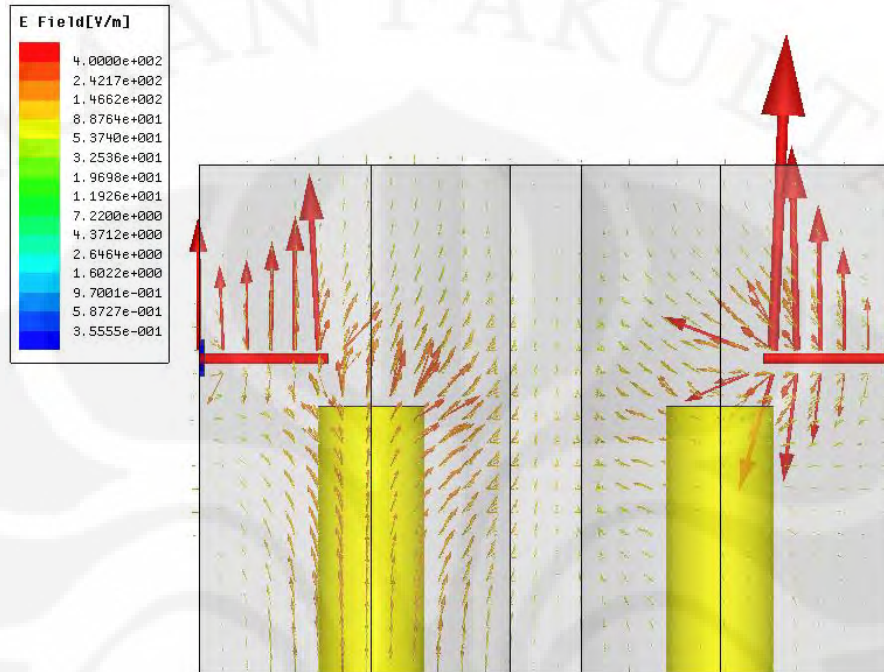
Gambar 3.10 Bentuk akhir dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2



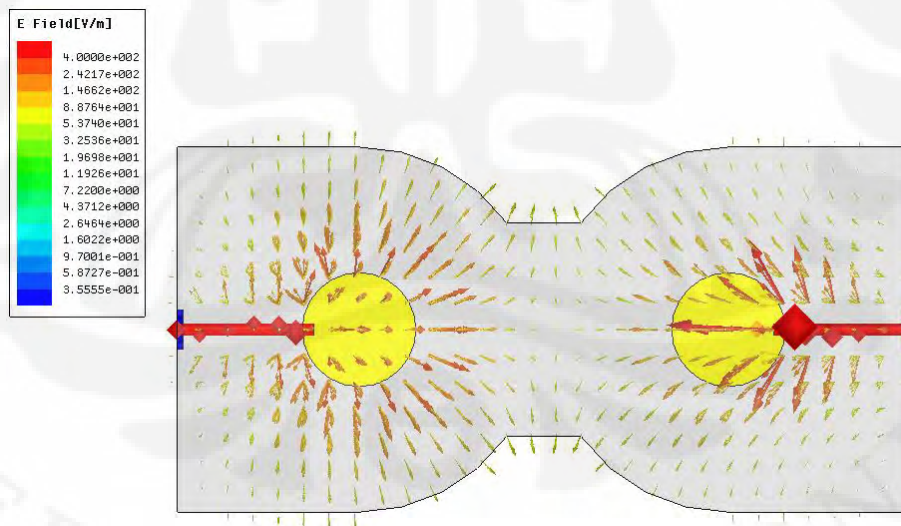
Gambar 3.11 Hasil akhir simulasi perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2

Pada Gambar 3.11 dapat dilihat bahwa nilai dari parameter-parameter utama adalah sebagai berikut : *bandwidth* 3dB 99 MHz (2,299 – 2,398 GHz) ,

ripple 0,006094 dB, *shape factor* 3, dan *insertion loss* 5.143×10^{-6} dB. Untuk distribusi medan E dan H dapat dilihat pada Gambar 3.12 dan 3.13.

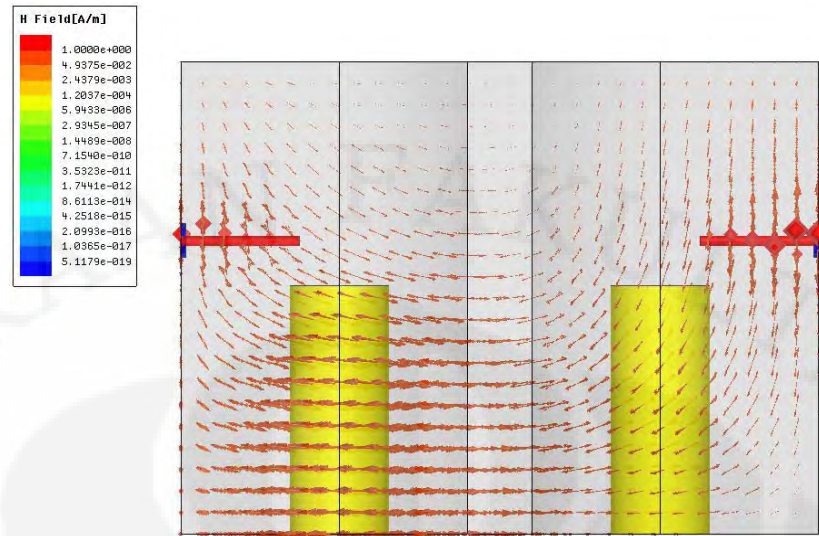


(a)

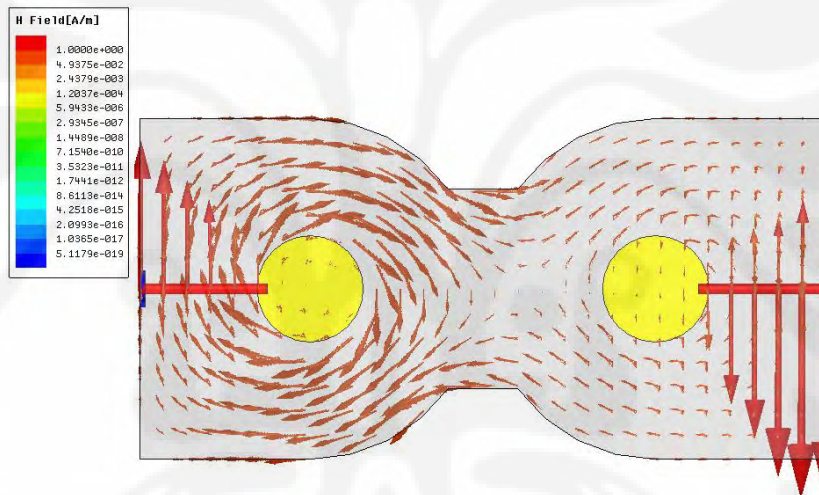


(b)

Gambar 3.12 Distribusi medan E pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 (a) tampak samping (b) tampak atas



(a)



(b)

Gambar 3.13 Distribusi medan H pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 (a) tampak samping (b) tampak atas

Gambar 3.12 memperlihatkan distribusi medan E pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Sedangkan Gambar 3.13 memperlihatkan distribusi medan H pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Parameter-parameter tersebut telah memenuhi harapan yang diinginkan seperti yang telah dijabarkan sebelumnya.

3.5 PERANCANGAN FILTER CAVITY SILINDRIS YANG DIBEBANI DIELEKTRIK PORSELAIN TINGKAT 4

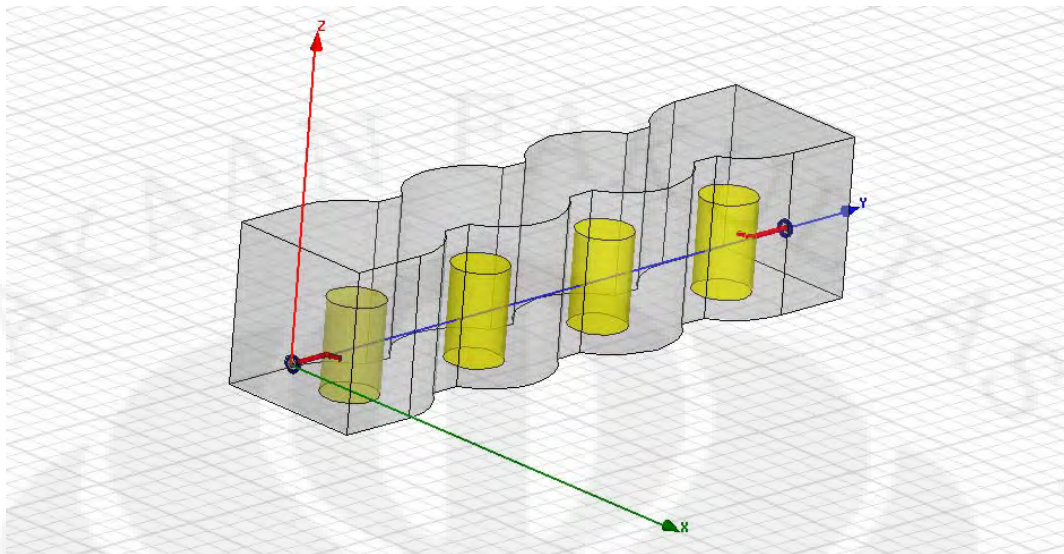
Tujuan dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 adalah untuk mendapatkan filter dengan parameter-parameter utama yang lebih baik. Untuk mendapatkan ukuran dari rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4, dilakukan karakterisasi seperti ketika melakukan karakterisasi pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Simulasi pada perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 dilakukan dengan menggunakan *driven terminal solution type* dari Ansoft HFSS v.11.

3.5.1 Karakterisasi Filter Cavity Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 4

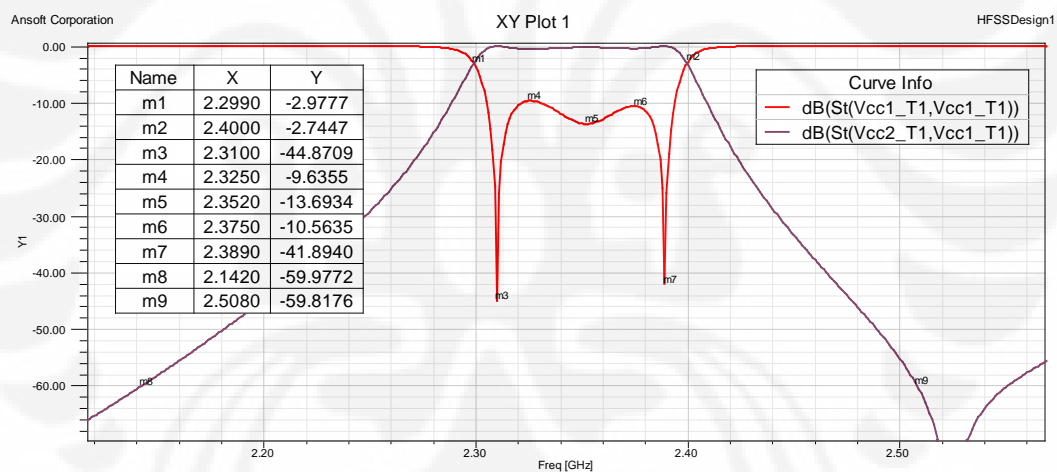
Proses karakterisasi dan hasil dari karakterisasi dari filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 hampir sama dengan proses karakterisasi pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2. Agar bisa didapatkan ukuran yang optimal dari dimensi pada perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4, karakterisasi perlu dilakukan kembali.

3.5.2 Hasil Akhir Perancangan Filter Cavity Silindris yang Dibebani Dielektrik Porselain Tingkat 4

Setelah dilakukan analisa karakterisasi didapatkan ukuran dari filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain yang optimal untuk saat ini. Ukuran-ukuran tersebut adalah jari-jari *cavity* 32 mm, tinggi *cavity* 65 mm, lebar celah 36 mm, bahan dielektrik yang digunakan masih porselain dengan permitivitas relatif (ϵ_r) = 5,7, jari-jari 11,5 mm, tinggi 38 mm, posisi *feed* 18,5 mm, dan untuk panjang *feed* dilakukan pelekungan karena keterbatasan ukuran dari *cavity*, besar sudut kelengkungannya adalah $17,5^\circ$. Bentuk akhir dari rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Bentuk akhir dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4

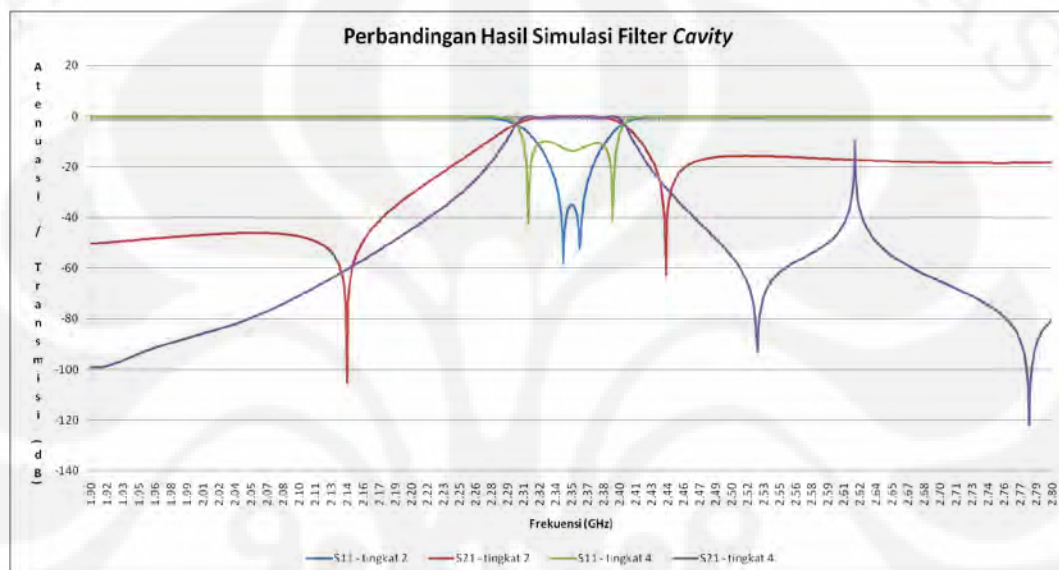


Gambar 3.15 Hasil akhir simulasi perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4

Pada Gambar 3.15 dapat dilihat bahwa nilai dari parameter-parameter utama adalah sebagai berikut : *bandwidth* 3dB 101 MHz (2,299 – 2,400 GHz) , *ripple* 0,502447 dB , *shape factor* 4,6147, dan *insertion loss* $1,546 \times 10^{-5}$ dB. Parameter-parameter tersebut dapat dikatakan memenuhi harapan yang diinginkan seperti yang telah dijabarkan sebelumnya.

3.6 PERBANDINGAN HASIL SIMULASI PERANCANGAN 2 POLE DENGAN 4 POLE FILTER CAVITY SILINDRIS YANG DIBEKANI DIELEKTRIK PORSELAIN

Perbandingan hasil simulasi perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 dengan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 dapat dilihat pada Grafik 3.16.



Gambar 3.16 Perbandingan hasil simulasi perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 dan 4

Dari Gambar 3.16 terlihat bahwa filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 memiliki nilai *insertion loss* dan *ripple* yang lebih baik dari filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4. Tetapi untuk nilai *shape factor*, filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 4 lebih unggul dari filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2.

3.7 METODA FABRIKASI DAN PENGUKURAN

Setelah rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain selesai di simulasikan, langkah selanjutnya adalah memfabrikasi dan melakukan pengukuran. Pada skripsi ini, rancangan simulasi yang akan difabrikasi dan diukur adalah filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2.

3.7.1 Metoda Fabrikasi

Pada saat memfabrikasi hal-hal yang harus diperhatikan adalah bahan yang digunakan, konduktor dan dielektrik, dan proses pembuatan, pembentukan, dan penyusunan bahan-bahan tersebut agar sesuai dengan rancangan yang telah dibuat.

3.7.1.1 Metoda Fabrikasi Porselain

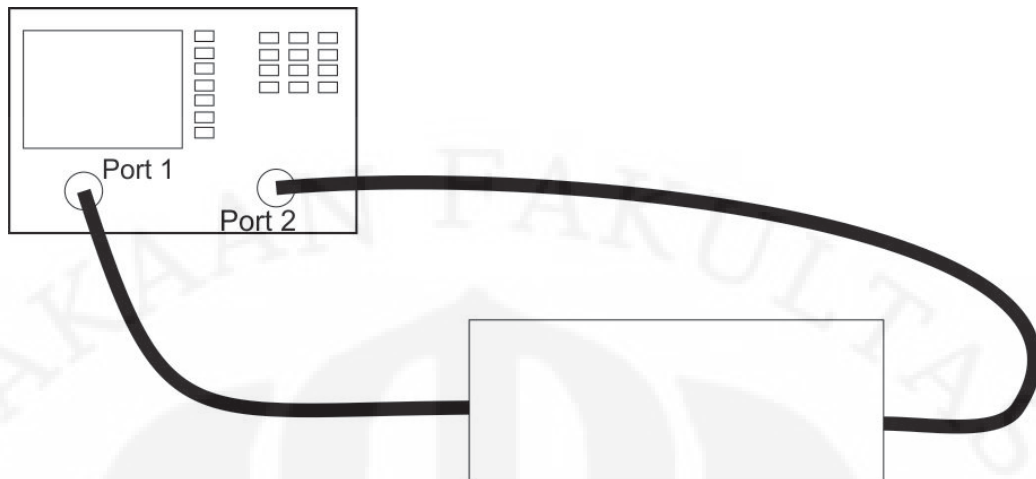
Porselain yang digunakan dalam filter *cavity* ini tersusun dari tiga bahan utama. Bahan yang pertama adalah kaolin atau *alumino-silicate* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yang berfungsi memberikan sifat plastis dan setelah tercampur pada suhu tertentu menjadi padat dan kuat tanpa kehilangan bentuk. Bahan selanjutnya adalah potassium feldspar ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) yang berfungsi sebagai pengikat dan memberikan fase gelas di dalam porselain. Bahan yang ketiga adalah kuarsa (SiO_2) yang berfungsi memberikan kekuatan pada porselain. Ketiga bahan tersebut dicampur dengan komposisi kaolin : feldspar : kuarsa adalah 75 : 25 : 25. Campuran tersebut kemudian dibentuk sesuai dengan ukuran dan dibakar dengan *furnance* pada suhu 1200°C .

3.7.1.2 Metoda Fabrikasi Cavity

Cavity dibuat di dalam Aluminium dengan bentuk dan ukuran rongga sesuai dengan simulasi. Aluminium yang digunakan adalah aluminium 505 dengan ukuran 10,5 cm x 16 cm x 12,5 cm (Gambar 4.4) yang mempunyai berat jenis sebesar $2,7 \text{ gr/cm}^3$. Untuk membuat rongga di dalam aluminium tersebut digunakan mesin bubut (lathe machine).

3.7.2 Metoda Pengukuran

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran S-parameter dengan menggunakan Network Analyzer. Untuk mendapatkan nilai S-parameter (S_{11} dan S_{21}) pengukuran dilakukan dengan menghubungkan port 1 pada Network Analyzer dengan salah satu konektor N pada filter *cavity* silindris dan menghubungkan port 2 Network Analyzer pada konektor lainnya seperti pada Gambar 3.17.



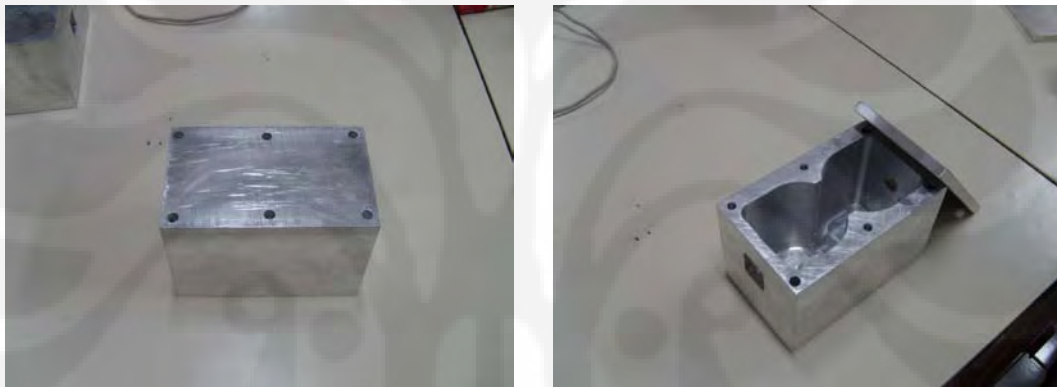
Gambar 3.17 Ilustrasi pengukuran dengan Network Analyzer

BAB 4

HASIL FABRIKASI DAN ANALISIS HASIL PENGUKURAN

4.1 HASIL FABRIKASI

Pada skripsi ini, rancangan simulasi yang akan difabrikasi hanyalah filter *cavity* silindris yang di bebani di elektrik porselain tingkat 2. Pada Gambar 4.1 terlihat bentuk *cavity* dan posisi *feed* pada aluminium 505. Pembentukan *cavity* dan *feed* dilakukan melalui proses bubut.



(a)

(b)

Gambar 4.1 Proses fabrikasi *cavity* (a) plat aluminium 505, (b) hasil bubut



(a)

(b)



Gambar 4.2 Proses fabrikasi porselain (a), (b) proses pembakaran, dan (c) porcelain

Sedangkan Gambar 4.2 memperlihatkan proses pembakaran porselain. Setelah dicetak dan dikeringkan, porselain dibakar pada suhu 1200°C selama 1 jam. Setelah mendapatkan *cavity* dan keramik porselain, langkah selanjutnya adalah memberikan *feed* dan meletakkan porselain di dalam *cavity*. Gambar 4.3 adalah hasil rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2 setelah selesai disimulasikan dan melalui proses fabrikasi.



Gambar 4.3 Hasil fabrikasi filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2

Pada saat memfabrikasi terdapat beberapa kesalahan yang disebabkan oleh keterbatasan alat dan pengerjaan yang kurang baik. Keterbatasan tersebut terjadi pada proses pembentukan *cavity* pada aluminium dengan mesin bubut, dan proses pencetakan dan pembakaran bahan dielektrik porselain.

4.1.1 Perbandingan dengan Ukuran Simulasi

Perbandingan antara ukuran simulasi dengan ukuran hasil fabrikasi dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa terdapat perbedaan ukuran antara desain simulasi dengan hasil fabrikasi dari dimensi pada filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porselain tingkat 2.

Tabel 4.1 Perbandingan ukuran desain simulasi dengan hasil fabrikasi

| Ukuran | | Simulasi | Fabrikasi |
|---------------|-----------|----------|-----------|
| <i>Cavity</i> | Jari-jari | 32 mm | 35,2 mm |
| | Tinggi | 95 mm | 95,5 mm |
| | Celah | 37,5 mm | 39,8 mm |
| <i>feed</i> | Posisi | 59 mm | 59,5 mm |
| Porselain | Jari-jari | 10 mm | 10,55 mm |
| | Tinggi | 50 mm | 56,5 mm |

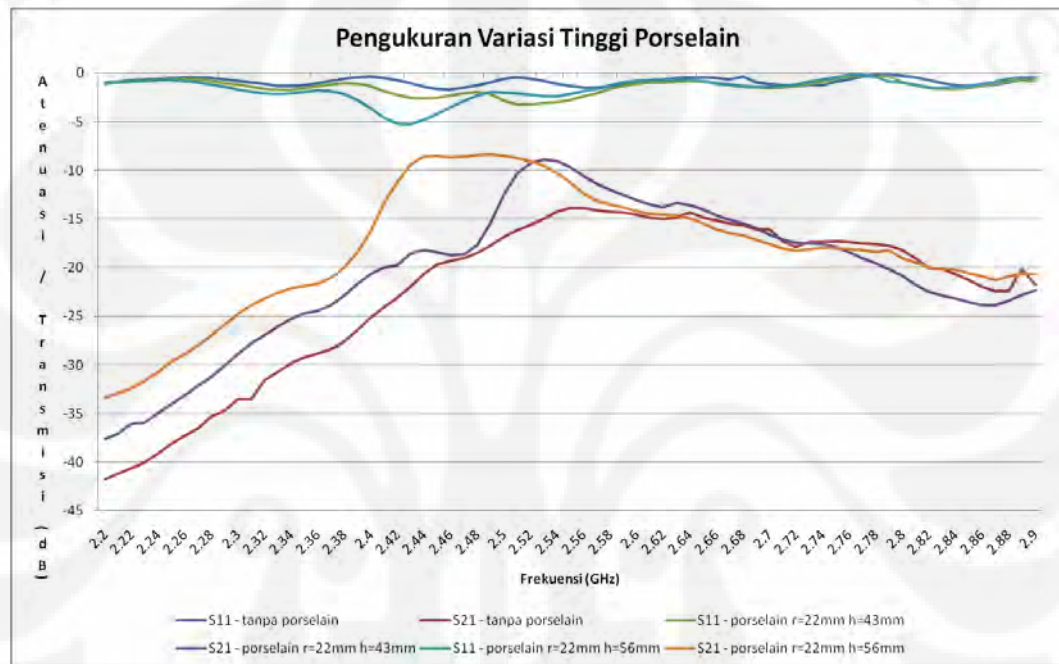
Perbedaan ukuran pada dimensi *cavity* dan posisi *feed* disebabkan karena kesalahan pada proses bubut, sedangkan perbedaan ukuran pada dimensi porselain disebabkan karena adanya penyusutan selama proses pengeringan dan pembakaran. Sehingga untuk memperoleh ukuran dari dimensi-dimensi tersebut bukanlah suatu hal yang sederhana. Tabel 4.2 memperlihatkan perbandingan ukuran dari dimensi porselain selama proses fabrikasi. Perbedaan ukuran tersebut dapat menyebabkan perubahan parameter-parameter utama dan unjuk kerja dari filter *cavity*.

Tabel 4.2 Perbandingan ukuran dimensi porselain selama proses fabrikasi

| no. | cetakan | | sebelum dibakar | | setelah dibakar | |
|-----|---------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | r | h | r | h | r | h |
| 1 | 22,1 mm | 59,4 mm | 21,1 mm | 56,5 mm | 19,2 mm | 51,1 mm |
| 2 | 22,1 mm | 54,9 mm | 21,2 mm | 52,5 mm | 19,25 mm | 47,95 mm |
| 3 | 22,1 mm | 49,95 mm | 21,1 mm | 47,55 mm | 19,2 mm | 44,15 mm |

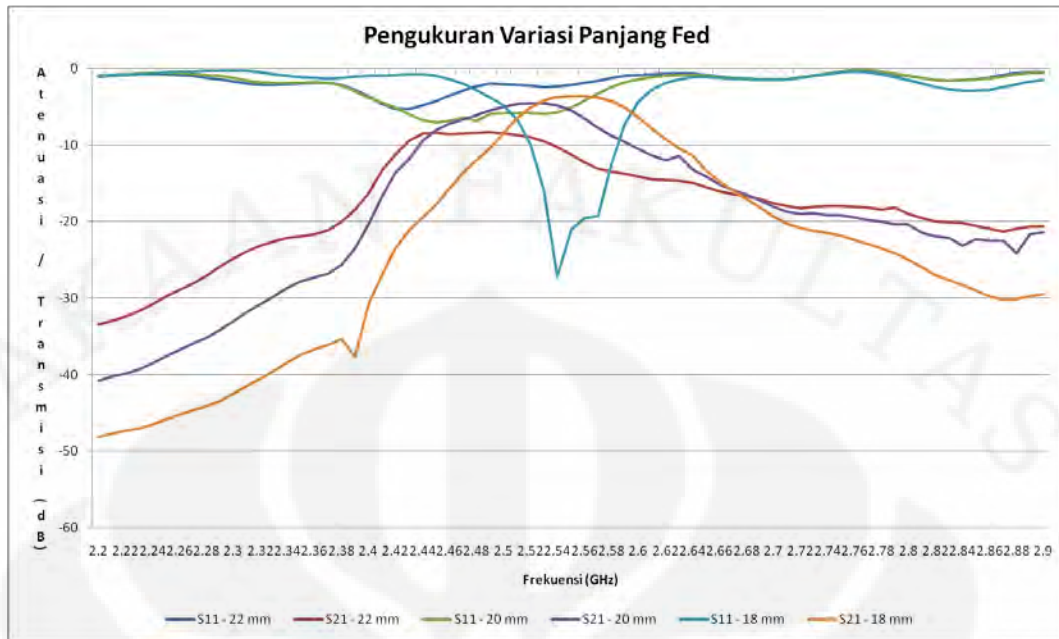
4.2 HASIL PENGUKURAN

Hasil dari pengukuran S_{11} dan S_{21} , dengan menggunakan *network analyzer*, dari filter *cavity* silindris yang di bebani dielektrik porcelain tingkat 2 setelah melalui proses fabrikasi dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5. Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa dengan membebani dielektrik porcelain ke dalam filter *cavity*, frekuensi resonan dari filter akan menjadi lebih rendah.



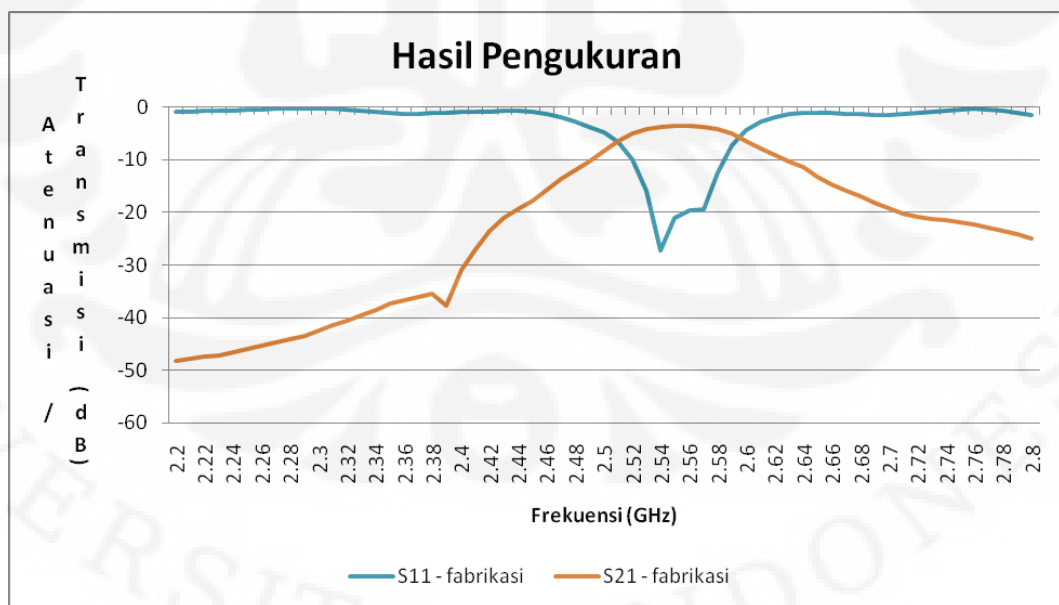
Gambar 4.4 Hasil pengukuran variasi dielektrik porcelain pada filter *cavity* tingkat 2

Sedangkan pada Gambar 4.5, terlihat bahwa perubahan panjang *feed* akan mempengaruhi kondisi *matching* dari filter *cavity*. Untuk dimensi dari *cavity* dan posisi *feed*, tidak dilakukan variasi pada pengukuran dikarenakan biaya yang diperlukan untuk membuat *cavity* cukup besar. Sehingga pada skripsi ini koreksi yang masih dapat dilakukan adalah pada ukuran dimensi porcelain dan panjang *feed*.



Gambar 4.5 Hasil pengukuran variasi panjang *feed* pada filter *cavity* tingkat 2

Hasil dari pengukuran S_{11} dan S_{21} , dengan menggunakan *network analyzer*, dari filter *cavity* silindris yang di bebani di elektrik porselain tingkat 2 yang terbaik sampai saat ini diperlihatkan pada Gambar 4.6.

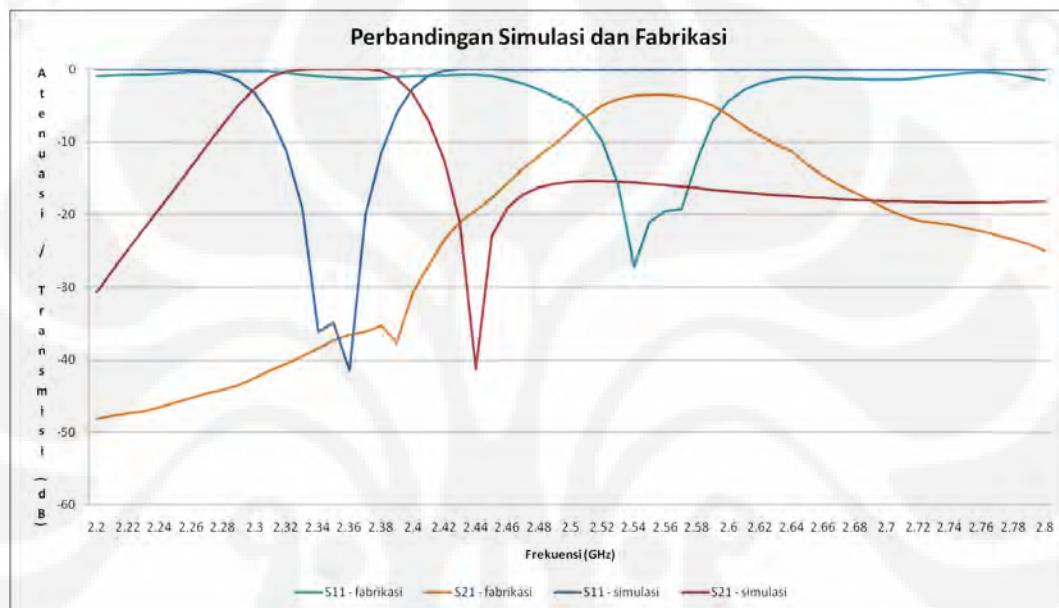


Gambar 4.6 Hasil pengukuran filter *cavity*

Nilai dari parameter-parameter utama adalah sebagai berikut : *bandwidth* 3dB 90 MHz (2,51 – 2,6 GHz) , *ripple* 0,235 dB, dan *insertion loss* 3,745 dB.

4.2.1 Perbandingan dengan Hasil Simulasi

Perbandingan hasil simulasi dan fabrikasi dari perancangan filter *cavity* silindris yang dibebani di elektrik porselain tingkat 2 dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dari Gambar 4.7 terlihat bahwa terjadi pergeseran frekuensi resonansi, penurunan nilai *insertion loss*, peningkatan *return loss*, dan perubahan *shape factor* hasil fabrikasi filter *cavity* tingkat 2 dibandingkan dengan hasil simulasi.



Gambar 4.7 Perbandingan hasil pengukuran dan simulasi

4.3 ANALISA

Pada desain dan simulasi filter *cavity* pada Gambar 3.13, hasil yang diperoleh cukup baik dengan nilai dari parameter-parameter utama adalah sebagai berikut: *bandwidth* 3dB 101 MHz (2,299 – 2,400 GHz), *ripple* 0,502447 dB, *shape factor* 4,6147, dan *insertion loss* $1,546 \times 10^{-5}$ dB. Parameter-parameter tersebut dapat dikatakan memenuhi harapan yang diinginkan seperti yang telah dijabarkan sebelumnya.

Sedangkan setelah dilakukan fabrikasi dan pengukuran terdapat perbedaan, seperti pada gambar 4.7. Ini dikarenakan banyaknya hal yang harus dilakukan dalam waktu yang terbatas, sehingga hasil yang didapatkan belum optimal. Nilai terbaik sementara dari parameter-parameter utama filter hasil fabrikasi adalah sebagai berikut: *bandwidth* 3dB 90 MHz (2,51 – 2,6 GHz), *ripple* 0,235 dB, dan *insertion loss* 3,745 dB. Secara garis besar ada beberapa penyebab yang

menyebabkan hasil pengukuran filter *cavity* berbeda dengan hasil simulasi atau dengan kata lain mengalami pergeseran nilai. Penyebab-penyebab itu antara lain :

1. Ukuran dimensi dari *cavity* berbeda dengan simulasi, seperti pada Tabel 4.1.

Perbedaan tersebut akan mempengaruhi hal-hal sebagai berikut:

- a. Perubahan ukuran jari-jari dan tinggi dari *cavity* yang di buat di dalam aluminium akan mempengaruhi pergeseran frekuensi resonan dan perubahan pada nilai faktor kualitas (Q) pada filter *cavity*.
 - b. Perubahan ukuran lebar celah akan menyebabkan perubahan lebar bandwidth dari filter *cavity*.
 - c. Perubahan posisi *feed* akan mempengaruhi matching impedansi pada filter *cavity*.
2. Aluminium yang di gunakan untuk di jadikan *cavity* mempunyai nilai konduktivitas kecil, yang berarti nilai resistansi akan menjadi besar sehingga insertion loss filter *cavity* menjadi sangat besar
3. Ukuran jari-jari, tinggi dan nilai permitivitas (ϵ_r) dari bahan dielektrik porselain tidak sesuai dengan simulasi, seperti pada Tabel 4.1. Hal tersebut akan mempengaruhi:
- a. Perubahan dari ukuran jari-jari, tinggi dan nilai permitivitas (ϵ_r) dari bahan dielektrik porselain akan mempengaruhi pergeseran frekuensi resonan dari filter *cavity*.
 - b. perubahan pada nilai permitivitas (ϵ_r) dari bahan dielektrik porselain juga akan mempengaruhi dari faktor kualitas (Q) dari filter *cavity*.
4. Penggunaan ukuran bubuk campuran untuk membuat keramik porselain (kaolin, feldspar, dan kuarsa) yang tidak terlalu halus, pencampuran yang kurang merata, dan proses pencetakan yang kurang baik, menyebabkan nilai loss tangent cukup besar, sehingga bandwidth yang di lewatkan akan menjadi lebih besar. Hal ini juga menyebabkan nilai dari faktor kualitas (Q) menurun.

Untuk memperoleh kembali parameter-parameter utama, bisa dilakukan koreksi pada filter *cavity* dengan mengubah ukuran dimensi-dimensi porcelain, *cavity*, dan mengatur *feed* agar match dengan sistem.

BAB 5

KESIMPULAN

1. Filter *cavity* memiliki *insertion loss* yang kecil, memiliki unjuk kerja yang bagus, dan dapat digunakan pada aplikasi yang berdaya besar seperti pada *base station*.
2. Bahan dielektrik yang digunakan untuk meningkatkan nilai *Q factor* dan meminimalkan rancangan adalah porcelain. Bahan dielektrik porcelain dipilih karena sudah didapatkan di Indonesia, sudah diproduksi, dan harganya jauh lebih murah bila dibandingkan dengan bahan dielektrik lainnya yang biasa digunakan untuk membebani filter *cavity*.
3. *Q factor* yang besar akan menyebabkan selektivitas filter meningkat dan *bandwidth* menyempit. Untuk mendapatkan filter dengan *bandwidth* yang besar dan selektivitas yang baik, bisa dilakukan dengan menambah jumlah resonator.
4. Untuk mendapatkan hasil rancangan yang optimal perlu dilakukan karakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan dalam perancangan meliputi : ukuran *cavity*, jari-jari dan tinggi dielektrik porcelain, lebar celah, serta posisi dan panjang dari *feed*.
5. Setelah diperoleh hasil simulasi yang optimal, filter *cavity* dapat difabrikasi dan diukur. Fabrikasi yang dilakukan pada skripsi ini hanyalah fabrikasi dari rancangan filter *cavity* silindris yang dibebani dielektrik porcelain tingkat 2 dan parameter yang diukur adalah S_{11} dan S_{21} .
6. Terdapat perbedaan pada pengukuran hasil fabrikasi dengan desain simulasi dikarenakan adanya kesalahan pada proses fabrikasi. Sehingga filter hasil fabrikasi mengalami pergeseran frekuensi kerja memiliki *bandwidth* sekitar 90 MHz (2,51 – 2,6 GHz), *ripple* 0,235 dB, dan *insertion loss* 3,745 dB.
7. Untuk memperoleh kembali parameter-parameter utama, bisa dilakukan koreksi pada filter *cavity* dengan mengubah ukuran dimensi-dimensi porcelain, *cavity*, dan mengatur *feed* agar *match* dengan sistem.

DAFTAR ACUAN

- [1] Andrews Jeffrey G., Arunabha Ghosh, dan Rias Muhamed, *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, 2007.
- [2] Katz Marcos D., Frank H.P. Fitzek, *WiMAX Evolution Emerging Technologies and Applications*, John Willey and Sons, 2009.
- [3] Mobile Communication Laboratory, WiMAX, <http://mobilecommlab.or.id/>.
- [4] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org>.
- [5] Ludwig Reinhold, Bretchko Pavel, *RF Circuit Design Teory and Application*, Prentice Hall, 2000.
- [6] Bowick Chris, Blyler John, dan Ajluni Cheryl, *RF Circuit Design*, Second Edition, Newnes, 2008.
- [7] Pozar David M., *Microwave Engineering*, Second Edition, John Willey and Sons, 1998.
- [8] Sebastian Mailaldil T., *Dielectric Material for Wireless Communication*, Elsevier, 2008.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrews Jeffrey G., Arunabha Ghosh, dan Rias Muhamed, *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*, (Prentice Hall, 2007).
- Bowick, Chris., *RF Circuit Design*, (Nownes, 2002)
- Collin, Robert E., *Foundations for Microwave Engineering*, (John Willey and Sons, 1992).
- Katz Marcos D., Frank H.P. Fitzek, *WiMAX Evolution Emerging Technologies and Applications*, (John Willey and Sons, 2009).
- Liao, Samuel Y., *Microwave Devices and Circuits*, (Prentice Hall, 1998).
- Ludwig Reinhold, Bretchko Pavel, *RF Circuit Design Teory and Application*, (Prentice Hall, 2000).
- Marcuvitz N., *Waveguide Handbook*, (1986).
- Pozar, David.M., *Microwave Engineering*, (USA: John Willey and Sons,1998).
- Sebastian Mailaldil T., *Dielectric Material for Wireless Communication*, (Elsevier, 2008).
- Ulaby, Fawwaz T., *Fundamentals of applied Electromagnetics*, (USA: Prentice Hall, 2001).

LAMPIRAN

A. Pengukuran Variasi Tinggi Porselain

| Frekuensi (GHz) | Tanpa Keramik | | 43mm | | 56mm | | Keramik 43mm | |
|-----------------|---------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------------|---------|
| | S11 | S21 | S11 | S21 | S11 | S21 | S11 | S21 |
| 2.2 | -0.937 | -41.772 | -1.013 | -37.613 | -1.073 | -33.406 | -1.119 | -38.775 |
| 2.21 | -0.83 | -41.198 | -0.907 | -37.092 | -0.967 | -32.919 | -0.875 | -38.216 |
| 2.22 | -0.706 | -40.673 | -0.789 | -36.024 | -0.855 | -32.427 | -0.782 | -37.772 |
| 2.23 | -0.615 | -40.011 | -0.706 | -35.957 | -0.791 | -31.678 | -0.714 | -37.771 |
| 2.24 | -0.541 | -39.114 | -0.648 | -35.007 | -0.76 | -30.723 | -0.735 | -36.275 |
| 2.25 | -0.446 | -38.132 | -0.587 | -34.032 | -0.748 | -29.72 | -0.61 | -35.348 |
| 2.26 | -0.408 | -37.305 | -0.584 | -33.125 | -0.805 | -28.927 | -0.636 | -34.491 |
| 2.27 | -0.411 | -36.543 | -0.635 | -32.206 | -0.93 | -28.06 | -0.77 | -33.681 |
| 2.28 | -0.512 | -35.33 | -0.8 | -31.282 | -1.174 | -27.04 | -0.919 | -32.764 |
| 2.29 | -0.639 | -34.664 | -0.98 | -30.099 | -1.438 | -25.861 | -1.093 | -31.605 |
| 2.3 | -0.781 | -33.544 | -1.192 | -28.876 | -1.715 | -24.747 | -1.277 | -30.355 |
| 2.31 | -0.922 | -33.501 | -1.37 | -27.817 | -1.94 | -23.854 | -1.507 | -29.234 |
| 2.32 | -1.127 | -31.587 | -1.584 | -26.942 | -2.114 | -23.157 | -1.659 | -28.296 |
| 2.33 | -1.291 | -30.709 | -1.713 | -26.083 | -2.172 | -22.554 | -1.611 | -27.39 |
| 2.34 | -1.315 | -29.835 | -1.679 | -25.284 | -2.075 | -22.122 | -1.483 | -26.578 |
| 2.35 | -1.226 | -29.202 | -1.546 | -24.721 | -1.946 | -21.892 | -1.251 | -26.072 |
| 2.36 | -1.041 | -28.855 | -1.324 | -24.436 | -1.813 | -21.683 | -0.927 | -25.832 |
| 2.37 | -0.823 | -28.419 | -1.147 | -23.878 | -1.828 | -21.091 | -0.735 | -25.466 |
| 2.38 | -0.574 | -27.612 | -1.041 | -22.899 | -2.168 | -19.98 | -0.526 | -24.715 |
| 2.39 | -0.391 | -26.42 | -1.092 | -21.678 | -2.745 | -18.404 | -0.59 | -23.078 |
| 2.4 | -0.355 | -25.154 | -1.341 | -20.671 | -3.575 | -16.325 | -0.827 | -23.33 |
| 2.41 | -0.484 | -24.112 | -1.799 | -19.988 | -4.558 | -13.37 | -1.258 | -23.525 |
| 2.42 | -0.737 | -23.111 | -2.233 | -19.803 | -5.2 | -11.257 | -1.747 | -24.207 |

| | | | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 2.43 | -1.034 | -21.942 | -2.515 | -18.587 | -5.242 | -9.427 | -1.946 | -27.234 |
| 2.44 | -1.376 | -20.712 | -2.613 | -18.223 | -4.821 | -8.559 | -2.371 | -23.054 |
| 2.45 | -1.636 | -19.722 | -2.546 | -18.421 | -4.225 | -8.475 | -3.666 | -13.544 |
| 2.46 | -1.706 | -19.323 | -2.307 | -18.767 | -3.532 | -8.652 | -7.629 | -7.287 |
| 2.47 | -1.494 | -19.019 | -2.029 | -18.692 | -2.858 | -8.541 | -6.429 | -5.754 |
| 2.48 | -1.269 | -18.483 | -1.927 | -17.664 | -2.298 | -8.405 | -3.736 | -6.285 |
| 2.49 | -0.905 | -17.702 | -2.144 | -15.392 | -1.96 | -8.345 | -2.461 | -6.586 |
| 2.5 | -0.578 | -16.842 | -2.822 | -12.566 | -2.042 | -8.487 | -1.991 | -6.734 |
| 2.51 | -0.423 | -16.154 | -3.187 | -10.365 | -2.111 | -8.748 | -1.851 | -6.899 |
| 2.52 | -0.547 | -15.615 | -3.168 | -9.258 | -2.26 | -9.005 | -2.012 | -6.994 |
| 2.53 | -0.821 | -14.986 | -3.054 | -8.917 | -2.378 | -9.511 | -2.282 | -7.001 |
| 2.54 | -1.112 | -14.295 | -2.926 | -9.073 | -2.352 | -10.242 | -2.464 | -7.105 |
| 2.55 | -1.299 | -13.884 | -2.705 | -9.677 | -2.162 | -11.252 | -2.445 | -7.651 |
| 2.56 | -1.457 | -13.906 | -2.376 | -10.56 | -1.843 | -12.323 | -2.219 | -8.561 |
| 2.57 | -1.455 | -14.112 | -2.023 | -11.407 | -1.61 | -13.104 | -1.967 | -9.512 |
| 2.58 | -1.381 | -14.267 | -1.633 | -12.042 | -1.237 | -13.471 | -1.597 | -10.354 |
| 2.59 | -1.136 | -14.365 | -1.3 | -12.528 | -0.959 | -13.799 | -1.355 | -11.101 |
| 2.6 | -0.934 | -14.574 | -1.079 | -13.041 | -0.807 | -14.151 | -1.212 | -11.64 |
| 2.61 | -0.746 | -14.883 | -0.947 | -13.534 | -0.739 | -14.451 | -0.876 | -12.014 |
| 2.62 | -0.625 | -15.002 | -0.923 | -13.828 | -0.698 | -14.586 | -0.71 | -12.435 |
| 2.63 | -0.481 | -14.864 | -0.827 | -13.392 | -0.657 | -14.635 | -0.664 | -12.479 |
| 2.64 | -0.418 | -14.325 | -0.781 | -13.6 | -0.69 | -14.924 | -0.561 | -12.828 |
| 2.65 | -0.419 | -14.843 | -0.889 | -14.087 | -0.845 | -15.497 | -0.667 | -13.505 |
| 2.66 | -0.478 | -15.201 | -1.073 | -14.649 | -1.052 | -16.07 | -0.846 | -14.236 |
| 2.67 | -0.632 | -15.488 | -1.217 | -15.081 | -1.201 | -16.436 | -0.981 | -14.805 |
| 2.68 | -0.362 | -15.598 | -1.344 | -15.47 | -1.317 | -16.695 | -1.105 | -15.259 |
| 2.69 | -0.907 | -16.054 | -1.487 | -15.926 | -1.427 | -17.09 | -1.25 | -15.835 |
| 2.7 | -1.118 | -16.047 | -1.529 | -16.598 | -1.43 | -17.607 | -1.292 | -16.548 |

| | | | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 2.71 | -1.262 | -17.312 | -1.488 | -17.15 | -1.356 | -18.002 | -1.259 | -17.139 |
| 2.72 | -1.332 | -17.905 | -1.319 | -17.437 | -1.159 | -18.291 | -1.096 | -17.146 |
| 2.73 | -1.271 | -17.354 | -1.091 | -17.515 | -0.918 | -18.115 | -0.871 | -17.37 |
| 2.74 | -1.241 | -17.395 | -0.816 | -17.604 | -0.651 | -17.941 | -0.597 | -17.249 |
| 2.75 | -0.902 | -17.321 | -0.541 | -17.91 | -0.398 | -17.94 | -0.316 | -17.747 |
| 2.76 | -0.601 | -17.364 | -0.297 | -18.446 | -0.207 | -18.081 | -0.698 | -17.404 |
| 2.77 | -0.293 | -17.491 | -0.251 | -19.061 | -0.211 | -18.21 | -0.425 | -17.554 |
| 2.78 | -0.129 | -17.591 | -0.387 | -19.587 | -0.39 | -18.406 | -0.169 | -17.657 |
| 2.79 | -0.102 | -17.735 | -0.259 | -20.135 | -0.877 | -18.204 | -0.417 | -17.711 |
| 2.8 | -0.224 | -18.196 | -0.964 | -20.853 | -0.934 | -19.004 | -0.663 | -18.114 |
| 2.81 | -0.405 | -19.021 | -1.227 | -21.754 | -1.214 | -19.503 | -1.029 | -18.644 |
| 2.82 | -0.698 | -20.054 | -1.499 | -22.51 | -1.487 | -19.997 | -1.325 | -19.054 |
| 2.83 | -1.028 | -20.177 | -1.618 | -22.915 | -1.567 | -20.135 | -1.45 | -19.127 |
| 2.84 | -1.264 | -20.649 | -1.584 | -23.193 | -1.471 | -20.216 | -1.411 | -19.173 |
| 2.85 | -1.304 | -21.262 | -1.522 | -23.574 | -1.364 | -20.594 | -1.344 | -19.277 |
| 2.86 | -1.328 | -21.957 | -1.328 | -23.87 | -1.132 | -20.886 | -1.141 | -19.446 |
| 2.87 | -1.204 | -22.407 | -1.073 | -23.876 | -0.857 | -21.272 | -0.861 | -19.363 |
| 2.88 | -0.962 | -22.407 | -0.794 | -23.441 | -0.561 | -20.909 | -0.527 | -18.875 |
| 2.89 | -0.618 | -20.192 | -0.706 | -22.827 | -0.464 | -20.658 | -0.371 | -18.231 |
| 2.9 | -0.397 | -21.776 | -0.754 | -22.394 | -0.491 | -20.689 | -0.35 | -17.792 |

B. Pengukuran Variasi Panjang *Feed*

| Frekuensi (GHz) | 22 mm | | 20 mm | | 18 mm | |
|-----------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | S11 | S21 | S11 | S21 | S11 | S21 |
| 2.2 | -1.073 | -33.406 | -0.916 | -40.817 | -0.934 | -48.152 |
| 2.21 | -0.967 | -32.919 | -0.839 | -40.256 | -0.904 | -47.654 |
| 2.22 | -0.855 | -32.427 | -0.753 | -39.87 | -0.836 | -47.368 |

| | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 2.23 | -0.791 | -31.678 | -0.652 | -39.304 | -0.769 | -47.06 |
| 2.24 | -0.76 | -30.723 | -0.597 | -38.534 | -0.7 | -46.513 |
| 2.25 | -0.748 | -29.72 | -0.563 | -37.598 | -0.565 | -45.855 |
| 2.26 | -0.805 | -28.927 | -0.621 | -36.731 | -0.471 | -45.179 |
| 2.27 | -0.93 | -28.06 | -0.715 | -35.974 | -0.384 | -44.611 |
| 2.28 | -1.174 | -27.04 | -0.829 | -35.204 | -0.365 | -44.102 |
| 2.29 | -1.438 | -25.861 | -0.977 | -34.209 | -0.368 | -43.423 |
| 2.3 | -1.715 | -24.747 | -1.251 | -33.023 | -0.336 | -42.479 |
| 2.31 | -1.94 | -23.854 | -1.545 | -31.833 | -0.381 | -41.423 |
| 2.32 | -2.114 | -23.157 | -1.771 | -30.791 | -0.557 | -40.482 |
| 2.33 | -2.172 | -22.554 | -1.878 | -29.768 | -0.808 | -39.521 |
| 2.34 | -2.075 | -22.122 | -1.88 | -28.63 | -1.02 | -38.424 |
| 2.35 | -1.946 | -21.892 | -1.855 | -27.841 | -1.171 | -37.353 |
| 2.36 | -1.813 | -21.683 | -1.797 | -27.318 | -1.299 | -36.603 |
| 2.37 | -1.828 | -21.091 | -1.871 | -26.803 | -1.327 | -36.081 |
| 2.38 | -2.168 | -19.98 | -2.245 | -25.62 | -1.246 | -35.328 |
| 2.39 | -2.745 | -18.404 | -2.977 | -23.478 | -1.113 | -37.699 |
| 2.4 | -3.575 | -16.325 | -3.813 | -20.35 | -1.014 | -30.802 |
| 2.41 | -4.558 | -13.37 | -4.425 | -16.805 | -0.955 | -26.999 |
| 2.42 | -5.2 | -11.257 | -5.114 | -13.631 | -0.88 | -23.465 |
| 2.43 | -5.242 | -9.427 | -6.01 | -11.811 | -0.758 | -21.081 |
| 2.44 | -4.821 | -8.559 | -6.765 | -9.388 | -0.78 | -19.434 |
| 2.45 | -4.225 | -8.475 | -7.017 | -8.032 | -1.012 | -17.716 |
| 2.46 | -3.532 | -8.652 | -6.833 | -7.205 | -1.447 | -15.668 |
| 2.47 | -2.858 | -8.541 | -6.375 | -6.666 | -2.019 | -13.659 |
| 2.48 | -2.298 | -8.405 | -6.845 | -6.109 | -2.807 | -11.944 |
| 2.49 | -1.96 | -8.345 | -5.936 | -5.474 | -3.814 | -10.269 |
| 2.5 | -2.042 | -8.487 | -5.804 | -4.942 | -4.879 | -8.365 |

| | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|
| 2.51 | -2.111 | -8.748 | -5.806 | -4.631 | -6.652 | -6.475 |
| 2.52 | -2.26 | -9.005 | -5.865 | -4.521 | -9.868 | -5.041 |
| 2.53 | -2.378 | -9.511 | -5.925 | -4.549 | -15.915 | -4.14 |
| 2.54 | -2.352 | -10.242 | -5.695 | -4.805 | -27.164 | -3.697 |
| 2.55 | -2.162 | -11.252 | -5.054 | -5.481 | -21.032 | -3.58 |
| 2.56 | -1.843 | -12.323 | -4.141 | -6.551 | -19.574 | -3.587 |
| 2.57 | -1.61 | -13.104 | -3.222 | -7.725 | -19.302 | -3.745 |
| 2.58 | -1.237 | -13.471 | -2.442 | -8.734 | -12.461 | -4.212 |
| 2.59 | -0.959 | -13.799 | -1.787 | -9.609 | -7.242 | -5.081 |
| 2.6 | -0.807 | -14.151 | -1.388 | -10.498 | -4.351 | -6.369 |
| 2.61 | -0.739 | -14.451 | -1.145 | -11.328 | -2.779 | -7.855 |
| 2.62 | -0.698 | -14.586 | -0.992 | -11.952 | -1.93 | -9.212 |
| 2.63 | -0.657 | -14.635 | -0.871 | -11.457 | -1.413 | -10.397 |
| 2.64 | -0.69 | -14.924 | -0.847 | -13.164 | -1.168 | -11.301 |
| 2.65 | -0.845 | -15.497 | -0.958 | -14.139 | -1.143 | -13.25 |
| 2.66 | -1.052 | -16.07 | -1.138 | -15.102 | -1.241 | -14.739 |
| 2.67 | -1.201 | -16.436 | -1.261 | -15.85 | -1.316 | -15.955 |
| 2.68 | -1.317 | -16.695 | -1.365 | -16.464 | -1.391 | -16.991 |
| 2.69 | -1.427 | -17.09 | -1.46 | -17.192 | -1.48 | -18.101 |
| 2.7 | -1.43 | -17.607 | -1.454 | -18.021 | -1.472 | -19.283 |
| 2.71 | -1.356 | -18.002 | -1.368 | -18.666 | -1.41 | -20.255 |
| 2.72 | -1.159 | -18.291 | -1.166 | -18.964 | -1.21 | -20.845 |
| 2.73 | -0.918 | -18.115 | -0.92 | -18.933 | -0.999 | -21.171 |
| 2.74 | -0.651 | -17.941 | -0.652 | -19.213 | -0.765 | -21.45 |
| 2.75 | -0.398 | -17.94 | -0.401 | -19.175 | -0.564 | -21.842 |
| 2.76 | -0.207 | -18.081 | -0.211 | -19.478 | -0.434 | -22.365 |
| 2.77 | -0.211 | -18.21 | -0.214 | -19.79 | -0.515 | -22.902 |
| 2.78 | -0.39 | -18.406 | -0.387 | -20.041 | -0.781 | -23.434 |

| | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 2.79 | -0.877 | -18.204 | -0.671 | -20.326 | -1.173 | -24.076 |
| 2.8 | -0.934 | -19.004 | -0.928 | -20.327 | -1.558 | -24.961 |
| 2.81 | -1.214 | -19.503 | -1.242 | -21.466 | -2.019 | -25.99 |
| 2.82 | -1.487 | -19.997 | -1.494 | -21.944 | -2.42 | -26.951 |
| 2.83 | -1.567 | -20.135 | -1.593 | -22.093 | -2.729 | -27.658 |
| 2.84 | -1.471 | -20.216 | -1.544 | -23.111 | -2.868 | -28.254 |
| 2.85 | -1.364 | -20.594 | -1.434 | -22.274 | -2.933 | -28.995 |
| 2.86 | -1.132 | -20.886 | -1.279 | -22.511 | -2.781 | -29.722 |
| 2.87 | -0.857 | -21.272 | -1.021 | -22.507 | -2.494 | -30.192 |
| 2.88 | -0.561 | -20.909 | -0.725 | -24.143 | -2.081 | -30.122 |
| 2.89 | -0.464 | -20.658 | -0.607 | -21.631 | -1.747 | -29.718 |
| 2.9 | -0.491 | -20.689 | -0.612 | -21.357 | -1.524 | -29.413 |

C. Hasil Akhir Pengukuran

| Frekuensi (GHz) | S11 | S21 |
|-----------------|--------|---------|
| 2.2 | -0.934 | -48.152 |
| 2.21 | -0.904 | -47.654 |
| 2.22 | -0.836 | -47.368 |
| 2.23 | -0.769 | -47.06 |
| 2.24 | -0.7 | -46.513 |
| 2.25 | -0.565 | -45.855 |
| 2.26 | -0.471 | -45.179 |
| 2.27 | -0.384 | -44.611 |
| 2.28 | -0.365 | -44.102 |
| 2.29 | -0.368 | -43.423 |
| 2.3 | -0.336 | -42.479 |
| 2.31 | -0.381 | -41.423 |

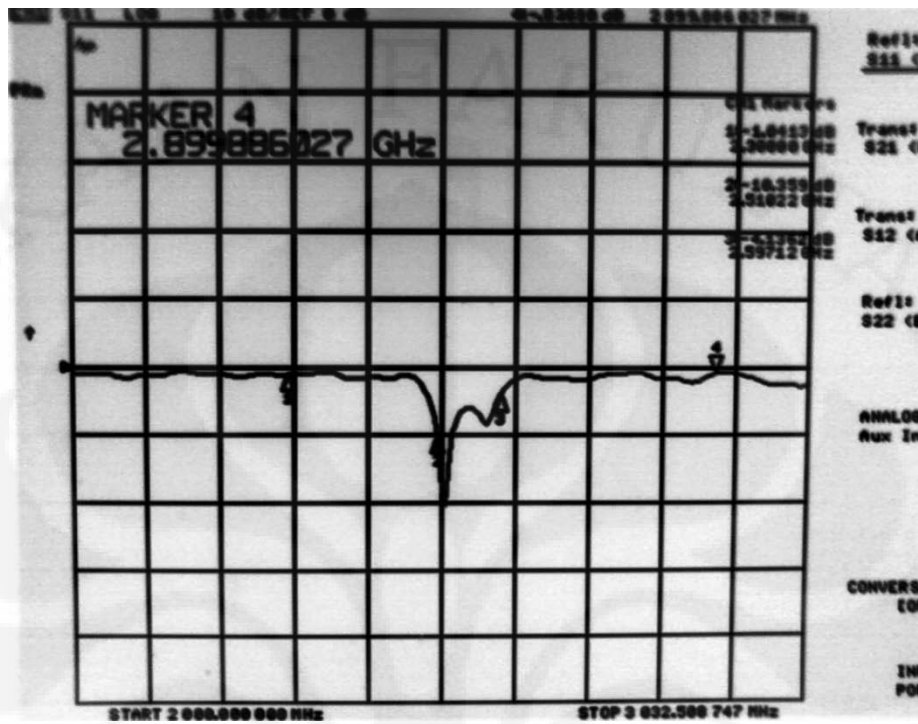
| | | |
|------|--------|---------|
| 2.35 | -1.171 | -37.353 |
| 2.36 | -1.299 | -36.603 |
| 2.37 | -1.327 | -36.081 |
| 2.38 | -1.246 | -35.328 |
| 2.39 | -1.113 | -37.699 |
| 2.4 | -1.014 | -30.802 |
| 2.41 | -0.955 | -26.999 |
| 2.42 | -0.88 | -23.465 |
| 2.43 | -0.758 | -21.081 |
| 2.44 | -0.78 | -19.434 |
| 2.45 | -1.012 | -17.716 |
| 2.46 | -1.447 | -15.668 |
| 2.47 | -2.019 | -13.659 |

| | | |
|------|---------|---------|
| 2.32 | -0.557 | -40.482 |
| 2.33 | -0.808 | -39.521 |
| 2.34 | -1.02 | -38.424 |
| 2.51 | -6.652 | -6.475 |
| 2.52 | -9.868 | -5.041 |
| 2.53 | -15.915 | -4.14 |
| 2.54 | -27.164 | -3.697 |
| 2.55 | -21.032 | -3.58 |
| 2.56 | -19.574 | -3.587 |
| 2.57 | -19.302 | -3.745 |
| 2.58 | -12.461 | -4.212 |
| 2.59 | -7.242 | -5.081 |
| 2.6 | -4.351 | -6.369 |
| 2.61 | -2.779 | -7.855 |
| 2.62 | -1.93 | -9.212 |
| 2.63 | -1.413 | -10.397 |
| 2.64 | -1.168 | -11.301 |
| 2.65 | -1.143 | -13.25 |
| 2.66 | -1.241 | -14.739 |
| 2.67 | -1.316 | -15.955 |
| 2.68 | -1.391 | -16.991 |
| 2.69 | -1.48 | -18.101 |
| 2.7 | -1.472 | -19.283 |

| | | |
|------|--------|---------|
| 2.48 | -2.807 | -11.944 |
| 2.49 | -3.814 | -10.269 |
| 2.5 | -4.879 | -8.365 |
| 2.71 | -1.41 | -20.255 |
| 2.72 | -1.21 | -20.845 |
| 2.73 | -0.999 | -21.171 |
| 2.74 | -0.765 | -21.45 |
| 2.75 | -0.564 | -21.842 |
| 2.76 | -0.434 | -22.365 |
| 2.77 | -0.515 | -22.902 |
| 2.78 | -0.781 | -23.434 |
| 2.79 | -1.173 | -24.076 |
| 2.8 | -1.558 | -24.961 |
| 2.81 | -2.019 | -25.99 |
| 2.82 | -2.42 | -26.951 |
| 2.83 | -2.729 | -27.658 |
| 2.84 | -2.868 | -28.254 |
| 2.85 | -2.933 | -28.995 |
| 2.86 | -2.781 | -29.722 |
| 2.87 | -2.494 | -30.192 |
| 2.88 | -2.081 | -30.122 |
| 2.89 | -1.747 | -29.718 |
| 2.9 | -1.524 | -29.413 |

D. Gambar Pengukuran Akhir

a. S_{11}



b. S_{12}

