

**PERANCANGAN *TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC* (TEM)
CELL TIPE TERTUTUP MENGGUNAKAN PCB *DOUBLE*
*LAYER***

(Skripsi)

Oleh

RENDHYTYA BOY VRAJA

1515031013



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

PERANCANGAN *TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC (TEM) CELL* TIPE TERTUTUP MENGGUNAKAN PCB *DOUBLE LAYER*

Oleh

RENDHYTYA BOY VRAJA

Penggunaan metode elektromagnetik menjadi salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan peluahan sebagian (*partial discharge*) pada suatu bahan isolasi. Penggunaan metode ini memerlukan sebuah sensor elektromagnetik untuk menangkap gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh sumber *partial discharge*. Sensor yang digunakan pada metode ini harus memiliki tingkat sensitivitas yang baik, sehingga perlu dilakukan pengujian sensitivitas sensor elektromagnetik. Pengujian ini harus dilakukan diruangan dengan medan elektromagnetik seragam dan tidak terpengaruh medan elektromagnetik dari luar. Ruangan ini disebut dengan *anechoic chamber* dengan dimensi yang besar.

Penelitian ini membuat sebuah *Transverse Electromagnetic (TEM) cell* tipe tertutup menggunakan PCB *double layer* yang dapat digunakan untuk melakukan pengujian sensitivitas sensor elektromagnetik dengan dimensi maksimum sebesar 15x15cm². *TEM cell* ini didesain dengan impedansi 50 ohm yang mengikuti impedansi peralatan pada umumnya dan memiliki frekuensi kerja mencapai 1 GHz. Untuk mengetahui desain impedansi *TEM cell* sudah sesuai (sebesar 50 ohm) maka dilakukan pengujian nilai *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)*.

Dari hasil pengujian yang dilakukan, nilai VSWR terbesar berada pada frekuensi 359 MHz yaitu sebesar 1,794 sedangkan untuk nilai VSWR tekecil berada pada frekuensi 577 MHz yaitu sebesar 1,035. Secara keseluruhan *TEM cell* yang telah didesain memiliki nilai VSWR dibawah 2,0 untuk frekuensi mencapai 1 GHz. Kemudian untuk pengujian *TEM cell* menggunakan sensor elektromagnetik, diperoleh respon sensor berupa gelombang yang beresilasi ketika diberikan sinyal pulsa yang menyerupai sinyal *partial discharge*.

Kata kunci : *Partial Discharge*, Sensor Elektromagnetik, *Anechoic Chamber*, *Transverse Electromagnetic (TEM) Cell*, *Voltage Standing Wave Ratio*.

ABSTRACT

CLOSED TYPE TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC (TEM) CELL DESIGN USING DOUBLE LAYER PCB

By

RENDHYTYA BOY VRAJA

The use of electromagnetic method is one of the methods that can be used to detect a partial discharge on an insulating material. The use of this method requires an electromagnetic sensor to capture electromagnetic waves emitted by the partial discharge source. Because the sensor used on this method must have a good sensitivity, the test of electromagnetic sensor sensitivity is needed. The test must be done in a room with uniform electromagnetic field and is not affected by different electromagnetic field from outside. This room is called as anechoic chamber with large dimension.

This study creates a closed type of Transverse Electromagnetic (TEM) cell that can be used to test the sensitivity of electromagnetic sensors with a maximum dimension of $15 \times 15 \text{cm}^2$. This TEM cell is designed with impedance of 50 ohm which is in line with the equipment impedance in general and has a working frequency up to 1 GHz. To find out the impedance design of TEM cell is appropriate, the test of Voltage Wave Standing Ratio (VSWR) value was conducted.

The result of the test showed that the highest value of VSWR was 1,794 on the frequency of 359 MHz, while the lowest value of VSWR was 1,035 on the frequency of 577 MHz. In overall, the VSWR value of TEM cell that had been designed was below 2,0 for the frequency up to 1 GHz. Furthermore, from the test TEM cell using electromagnetic sensor, it showed a sensor response in a form of wave which was oscillated when a pulse signal that resembled a partial discharge signal was given.

Key words :Partial Discharge, Electromagnetic Sensors, Anechoic Chamber,
Transverse Electromagnetic (TEM) Cell, Voltage Standing Wave Ratio

**PERANCANGAN *TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC (TEM) CELL*
TIPE TERTUTUP MENGGUNAKAN PCB *DOUBLE LAYER***

Oleh

RENDHYTYA BOY VRAJA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Program Studi Teknik Elektro
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Proposal Skripsi : **PERANCANGAN TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC (TEM) CELL TIPE TERTUTUP MENGGUNAKAN PCB DOUBLE LAYER**

Nama Mahasiswa : **Rendhytya Boy Vraja**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1515031013

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



1. Komisi Pembimbing

Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.
NIP. 1971130 199903 1 003

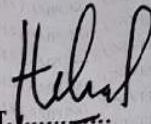
Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.
NIP. 19700528 199803 2 003


2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.
NIP : 1971130 199903 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. 

Sekretaris : Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. 

**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Henry Binsar H Sitorus, S.T., M.T** 

Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.Sc. Ph.D.
NIP. 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 26 Juni 2019

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini, menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Perancangan *Transverse Electromagnetic (TEM) Cell* Tipe Tertutup Menggunakan PCB *Double Layer*" merupakan hasil karya sendiri dan bukan hasil karya orang lain. Semua hasil yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 02 Agustus 2019
Yang membuat pernyataan,



Rendhyta Boy Vraja
NPM. 1515031013

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan Pringsewu pada tanggal 10 September 1997. Penulis merupakan buah hati dari pasangan Bapak Syafarudin dan Ibu Syaina. Penulis memulai Pendidikan sekolah dasar di SDN 06 Mulya Asri, kemudian melanjutkan Pendidikan ke SMPN 01 Tulang Bawang Tengah dan lulus pada tahun 2012. Kemudian penulis melanjutkan Pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMAN 01 Tumijajar, Tulang Bawang Barat dan lulus pada tahun 2015.

Penulis melanjutkan Pendidikan di Teknik Elektro Universitas Lampung pada tahun 2015 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Fakultas Teknik Universitas Lampung yang dimanahkan di Departemen Kaderisasi dan Pengembangan Organisasi. Selain mengikuti organisasi penulis juga berkesempatan untuk menjadi Asisten Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik dan menjadi asisten beberapa praktikum yaitu, Praktikum Fisika Dasar, Praktikum Rangkaian Listrik, Praktikum Instrumentasi dan Pengukuran.

Penulis pernah melakukan kerja praktik di PT. PERTAMINA *GEOTHERMAL ENERGY AREA ULUBELU* yang merupakan sebuah pembangkit panas bumi

dengan karya “Analisis *Voltage Drop* pada setiap Saluran Menuju *Cluster* di PT. PERTAMINA *GEOHERMAL ENERGY AREA ULUBELU*”. Penulis juga pernah menjadi Koordinator Desa Sinar Harapan, Talang Padang pada kegiatan KKN Periode I 2018 – “Mengembangkan Pariwisata dan Memberantas Desa Teringgal”. Penulis juga pernah mendapatkan dana kewirausahaan dari UNILA dalam Program Mahasiswa Wirausaha unuk meningkatkan jiwa *entrepreneurship* penulis.



Kupersembahkan karyaku

Kedua orang tuaku tercinta


Papa Syafarudin dan Mama Syaina

Kakak dan Adikku tersayang

*Andhytha Anggriana, S.E., dan
Alvin Zalya Oraja*

Perempuanku terkasih

Dilla Arvita Yuma



*Seluruh Dosen, teman – teman seperjuangan dan
almamater.*

MOTTO

Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji **Allah** adalah benar dan sekali-kali janganlah orang-orang yang tidak meyakini itu menggelisahkan kamu.

(Q.S Ar-Rum 60)

Manusia mengharapkan sesuatu, tetapi **Allah** bermaksud melakukan yang lain.

(Khalid Bin Walid)

Keberhasilan, kesuksesan, kemenangan, juara, prestasi apapun itu namanya hanya dapat diperoleh ketika persiapan yang telah kita siapkan matang-matang bertemu dengan yang namanya kesempatan.

(Rendhytya Boy Vraja-1997)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perancangan *Transverse Electromagnetic (TEM) Cell* Tipe Tertutup Menggunakan *PCB Double Layer*”. Selama menjalani pengerjaan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung dan pembimbing utama atas bimbingan, saran, motivasi dan kesabaran kepada penulis selama penyelesaian skripsi.
3. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T., selaku pembimbing pendamping atas bimbingan, pengarahan serta kesabaran selama kepada penulis selama penyelesaian skripsi.
4. Bapak Dr. Henry Binsar H. Sitorus, S.T., M.T., selaku penguji utama atas bimbingan serta masukan dalam penyelesaian skripsi.

5. Bapak FX Arinto Setyawan, S.T., M.T., selaku pembimbing akademik yang telah menuntun penulis dari awal perkuliahan hingga mendapat gelar Sarjana Teknik.
6. Seluruh Dosen Teknik Elektro dan Informatika atas bimbingan dan kesabarannya dalam mendidik penulis.
7. Papa dan Mama tercinta yang selalu memberikan do'a, dorongan mental dan motivasi agar selalu istiqomah dalam menuntut ilmu.
8. Kakak Dhytha dan Alvin tersayang yang selalu memberikan semangat untuk dapat segera menyelesaikan tugas akhir.
9. Wanita terkasih Dilla Arvita Yuma yang telah ikhlas dan ridho untuk menjadi tujuan hidup penulis.
10. Pimpinan Tim Ekspedisi Merah Periode 2015-2019 : Dwi Aziz Rifai, Fajar Farmanto, Helmi, Malik Maulana, M. Bayu Saputra, M. Ismatullah, Muhlisin, Rizky Azhari dan Septian Boby P atas ilmu berorganisasi yang telah diberikan.
11. Seluruh teman teman *Electrical and Informatic Engineering* 2015 atas kebersamaan yang diberikan selama masa perkuliahan.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu serta memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.

Bandar Lampung, Agustus
Penulis,

Rendhytya Boy Vraja

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Manfaat Penelitian.....	2
1.4. Perumusan Masalah.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Hipotesis	3
1.7. Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Fenomena Perambatan Gelombang Elektromagnetik	6
2.1.1. Kesesuaian Elektromagnetik (<i>Electromagnetic Compatibility</i>).....	6
2.1.2. Peluahan Sebagian (<i>Partial Discharge</i>).....	7
2.2. Modus Perambatan Elektromagnetik	8
2.3. Konduktor Paralel (<i>Strip Line</i>)	9

2.4. <i>Transverse Electromagnetic (TEM) Cell</i>	11
2.5. <i>Voltage Standing Wave Ratio</i>	15
III. METODE PENELITIAN	19
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2. Alat dan Bahan	19
3.3. Prosedur Kerja	20
3.4. Tahap Perancangan Alat.....	22
3.5. Diagram Alir Perancangan Alat	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1. Perancangan <i>Transverse Electromagnetic (TEM) Cell</i> Tipe Tertutup	26
4.1.1. Perhitungan Dimensi TEM <i>Cell</i> Tipe Tertutup.....	26
4.1.2. Perhitungan Beban/Terminasi TEM <i>Cell</i> Tipe Tertutup.....	28
4.1.3. Pembuatan Desain TEM <i>Cell</i> Tipe Tertutup.....	29
4.2. Perakitan <i>Transverse Electromagnetic (TEM) Cell</i> Tipe Tertutup	30
4.3. Pengujian <i>Transverse Electromagnetic (TEM) Cell</i> Tipe Tertutup	32
4.3.1. Pengujian Nilai <i>Voltage Wave Standing Ratio (VSWR)</i>	34
4.3.2. Pengujian TEM <i>Cell</i> Menggunakan Sensor Elektromagnetik	36
V. KESIMPULAN DAN SARAN	41
5.1. Kesimpulan.....	41
5.2. Saran.....	41

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Ukuran TEM <i>cell</i> tipe tertutup.....	28
Tabel 4.2. Spesifikasi RF <i>vector impedance analyzer</i>	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Aspek dasar kesesuaian medan (<i>electromagnetic compatibility</i>).....	7
Gambar 2.2. Bahan isoalsi diantara elektroda berbeda tegangan.....	7
Gambar 2.3. Konduktor paralel.....	10
Gambar 2.4. <i>Transverse electromagnetic</i> (TEM) <i>cell</i> tipe terbuka yang didesain oleh Crawford	11
Gambar 2.5. TEM <i>cell</i> tipe tertutup menggunakan bahan alumunium	12
Gambar 2.6. Dua jenis desain septum TEM <i>cell</i>	13
Gambar 2.7. TEM <i>cell</i> tipe terbuka menggunakan bahan PCB	13
Gambar 2.8. Desain dan penentuan dimensi dari TEM <i>cell</i> tipe tertutup	14
Gambar 2.9. Proses terjadinya <i>voltage standing wave ratio</i>	16
Gambar 3.1. Diagram pengujian nilai VSWR dari TEM <i>cell</i>	21
Gambar 3.2. Diagram pengujian TEM <i>cell</i> menggunakan sensor elektromagneti	21
Gambar 3.3. Diagram alir penelitian.....	24
Gambar 4.1. Desain ukuran dari TEM <i>cell</i> tipe tertutup.....	28
Gambar 4.2. Desain TEM <i>cell</i> dalam 3 dimensi	29
Gambar 4.3. Desain TEM <i>cell</i> dalam 2 dimensi tampak dari bagian (a) samping, (b) depan dan (c) atas.....	30
Gambar 4.4. Bagian septum TEM <i>cell</i> tipe tertutup menggunakan PCB <i>double layer</i>	31
Gambar 4.5. Bagian <i>shielding</i> bentuk persegi TEM <i>cell</i> tipe tertutup menggunakan PCB <i>double layer</i>	31
Gambar 4.6. Bagian <i>shielding</i> bentuk segitiga TEM <i>cell</i> tipe tertutup menggunakan PCB <i>double layer</i>	32

Gambar 4.7. <i>Transverse electromagnetic (TEM) cell</i> tipe tertutup meng - gunakan <i>PCB double layer</i>	32
Gambar 4.8. <i>RF vector impedance analyzer N1201SA</i>	33
Gambar 4.9. Kalibrasi <i>RF vector impedance analyzer N1201SA</i>	34
Gambar 4.10.Rangkaian pengujian nilai <i>VSWR</i> menggunakan <i>RF vector impedance analyzer</i>	35
Gambar 4.11.Hasil pengujian nilai <i>VSWR</i> menggunakan <i>RF vector impedance analyzer</i>	36
Gambar 4.12.Sensor elektromagnetik jenis <i>monopole</i>	36
Gambar 4.13.Diagram blok pengujian <i>TEM cell</i> menggunakan sensor elektro- magnetik jenis <i>monopole</i>	37
Gambar 4.14.Rangkaian pengujian <i>TEM cell</i> menggunakan sensor elektro- magnetik jenis <i>monopole</i>	38
Gambar 4.15.Respon sensor elektromagnetik jenis <i>monopole</i>	39
Gambar 4.16.Gelombang keluaran dari <i>function generator</i> yang menyerupai sinyal <i>partial discharge</i>	40

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transverse Electromagnetic (TEM) Cell merupakan sebuah perangkat yang dapat menghasilkan ruang dengan medan elektromagnet yang seragam. *TEM cell* dapat dipergunakan untuk melakukan berbagai pengujian perangkat elektronika yang membutuhkan ruang medan elektromagnetik yang serbasama. Salah satu pengujian yang dapat dilakukan adalah pengujian tingkat sensitivitas sensor elektromagnet. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon sensor terhadap sinyal pulsa tertentu yang diberikan. Kemampuan sensor dalam menangkap sinyal pulsa ini juga menunjukkan kemampuan sensor menangkap sinyal *partial discharge* yang terjadi pada suatu bahan isolasi.

Penelitian ini mengusulkan desain sebuah *TEM cell* tipe tertutup menggunakan *PCB double layer* yang dapat dipergunakan sebagai ruang untuk melakukan pengujian tingkat sensitivitas sensor elektromagnet. *TEM cell* yang dirancang akan diuji dalam dua tahapan. Tahap pertama *TEM cell* akan diuji nilai *Voltage Standing Wave Ratio*, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah *TEM cell* telah dirancang sesuai dengan impedansi 50 Ohm yang diinginkan. Kemudian pada tahap kedua *TEM cell* akan diuji

menggunakan sensor elektromagnet. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah TEM *cell* mampu mentransfer sinyal pulsa tertentu yang dikirimkan dari *function generator*. Sinyal ini lah yang nantinya akan direspon oleh sensor elektromagnet.

TEM *cell* didesain untuk dapat memuat sebuah sensor elektromagnet dengan ukuran maksimum $15 \times 15 \text{cm}^2$ dan memiliki frekuensi kerja mencapai 1GHz. Kemudian dalam proses perakitan TEM *cell* bahan PCB *double layer* dipilih karena mampu menangkal medan elektromagnetik dari luar dan juga mempermudah dalam proses perakitan.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Membuat sebuah TEM *cell* tipe tertutup menggunakan PCB *double layer* dengan frekuensi kerja mencapai 1GHz dan dapat digunakan untuk pengujian sensitivitas sensor elektromagnet terhadap sinyal pulsa yang dibangkitkan menyerupai sinyal *partial discharge*.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat membuat sebuah *transverse electromagnetic* (TEM) *cell* tipe tertutup yang dapat digunakan untuk menggantikan peran dari *anechoic chambers* dalam pengujian sensitivitas sensor dengan ukuran maksimum $15 \times 15 \text{cm}^2$. Selain digunakan untuk pengujian sensitivitas sensor elektromagnet, TEM *cell* juga dapat digunakan

dalam pengujian yang berkaitan dengan EMC dan sebagai media pembelajaran tentang gelombang berjalan.

1.4. Perumusan Masalah

Membuat sebuah TEM *cell* tipe tertutup yang dapat digunakan untuk pengujian sensitivitas sensor elektromagnet ataupun pengujian EMC dengan impedansi yang sesuai dengan peralatan pengukuran pada laboratorium.

1.5. Batasan Masalah

Adapun hal yang dibahas pada penulisan tugas akhir dibatasi pada :

1. TEM *cell* tipe tertutup didesain untuk mampu memuat sebuah sensor elektromagnet dengan dimensi maksimum sebesar 15x15cm².
2. TEM *cell* tipe tertutup didesain dengan nilai *Voltage Wave Standing Ratio* (VSWR) dibawah 5.
3. Pengujian sensitivitas sensor elektromagnet menggunakan sensor dengan tipe *monopole*.

1.6. Hipotesis

TEM *cell* tipe tertutup dengan menggunakan bahan PCB *double layer* dapat bekerja dengan frekuensi mencapai 1GHz dan dapat digunakan sebagai media untuk melakukan pengujian sensitivitas sensor.

1.7. Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan penulisan dan pemahaman mengenai materi tugas akhir ini, maka tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bab, yaitu :

BAB I. PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, tujuan, manfaat, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang teori-teori yang mendukung mengenai perancangan *Transverse Electromagnetic (TEM) cell* tipe tertutup yang dapat digunakan untuk pengujian sensitivitas sensor elektromagnetik dalam pendeteksian keberadaan *partial discharge*.

BAB III. METODE PENELITIAN

Berisi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, garis besar metode yang diusulkan, serta diagram alir metode yang diusulkan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil penelitian, pembahasan, dan perhitungan kinerja metode yang diusulkan.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Memuat simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian, dan saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Peluahan sebagian (*partial discharge*) merupakan salah satu fenomena perambatan gelombang elektromagnetik pada suatu bahan isolasi. Secara umum, proses peluahan dapat dikelompokkan dalam tiga jenis yaitu peluahan korona (*corona discharge*), peluahan permukaan (*surface discharge*) dan peluahan dalam (*internal discharge*) [1]. Apa bila fenomena ini dibiarkan secara terus - menerus, maka bahan isolasi tersebut akan mengalami peluahan sempurna atau tembus listrik (*breakdown*).

Partial discharge dapat dideteksi keberadaannya, hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya *breakdown*. Pendeteksian *partial discharge* salah satunya dapat dilakukan dengan menggunakan sensor elektromagnet yang digunakan untuk menangkap sinyal dari sumber *partial discharge*. Sensor yang digunakan dalam metode pendeteksian *partial discharge* harus memiliki tingkat sensitivitas yang baik. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui respon dari sensor terhadap sinyal *partial discharge* adalah pengujian dalam ruang medan magnetik terkendali dan tidak terpengaruh terhadap medan elektromagnetik dari luar atau *Electromagnetic Interference* (EMI) [2]. Ruang ini disebut dengan *anechoic chamber* yang biasanya memiliki ukuran dalam orde meter dan biaya yang mahal.

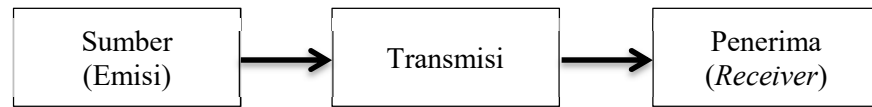
Transverse electromagnetic (TEM) cell dapat digunakan untuk menggantikan peranan dari *anechoic chamber* untuk pengujian sensor elektromagnet dengan ukuran yang kecil. Karena tidak semua peralatan yang akan diujikan memiliki ukuran yang besar, seperti halnya sensor elektromagnetik yang akan digunakan untuk mendeteksi *partial discharge* pada *transformator* yang rata-rata memiliki ukuran kurang dari $15 \times 15 \text{ cm}^2$. TEM *cell* ini didesain sedemikian rupa mengikuti impedansi dari peralatan laboratorium yang digunakan dengan melakukan pengujian nilai VSWR.

2.1. Fenomena Perambatan Gelombang Elektromagnet

2.1.1. Kesesuaian Elektromagnetik (*Electromagnetic Compatibility*)

Peralatan–peralatan elektronika seperti komputer, radio telepon genggam, *handphone* dalam pengoperasiannya menghasilkan gelombang elektromagnetik. Hal ini dapat mengakibatkan gangguan antar peralatan elektronika. Gangguan terjadi ketika *noise* elektromagnetik yang dihasilkan dari peralatan elektronika mengganggu sinyal yang dibangkitkan dari peralatan lainnya (EMI).

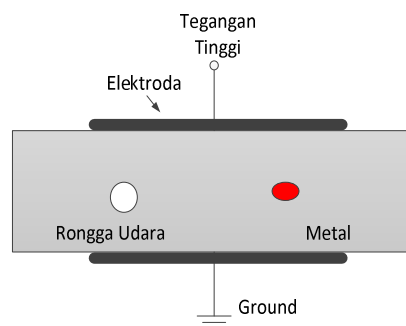
Dengan demikian, peralatan elektronika harus memiliki kemampuan untuk bekerja secara normal dalam lingkungan elektromagnetik tanpa menghasilkan *interference* terhadap peralatan lain. Hal ini yang disebut dengan kesesuaian elektromagnetik atau *electromagnetic compatibility* (EMC). Dalam EMC terdapat tiga aspek dasar yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Emisi dari sumber akan menghasilkan *interference* atau *noise* yang dapat menyebabkan penerima tidak bekerja secara normal.



Gambar 2.1 Aspek dasar kesesuaian medan (*electromagnetic compatibility*)

2.1.2. Peluhan Sebagian (*Partial Discharge*)

Peristiwa peluhan (*discharge*) terjadi pada bahan isolasi yang terletak diantara dua buah elektroda yang memiliki beda tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Bahan isolasi ini akan mendapatkan tekanan medan listrik. Tekanan medan listrik ini akan mengakibatkan terjadinya pelepasan muatan pada bahan isolasi [3].



Gambar 2.2 Bahan isolasi diantara dua elektroda yang berbeda tegangan

Ketika peluhan yang terjadi tidak menghubungkan kedua elektroda dan beda tegangan antara kedua elektroda tetap ($V \neq 0$) maka peluhan ini disebut dengan peluhan sebagian (*partial discharge*). Jika peluhan yang terjadi telah menghubungkan kedua elektroda dan beda tegangan antara kedua elektroda mendekati nol ($V = 0$) maka peluhan ini disebut dengan tembus listrik (*breakdown*).

Sumber *partial discharge* akan menghasilkan sinyal elektromagnetik dengan spektrum frekuensi yang bergantung pada jenis sumber *partial discharge* dan medium perambatannya [4]. Pada elektroda berbahan metal dan tajam yang menusuk sistem isolasi akan menghasilkan gelombang pulsa dengan waktu muka gelombang kurang dari 0.9ns pada medium isolasi minyak [5]. Sedangkan kontak isolasi yang tidak sempurna menghasilkan gelombang pulsa dengan waktu muka mencapai 17ns [5]. Gelombang pulsa dengan waktu muka paling lambat dihasilkan oleh sumber *corona discharge* dengan waktu muka mencapai 50ns [6]. Sehingga, rentang frekuensi sinyal elektromagnetik yang dihasilkan pada proses peluahan sebagian berada dalam orde puluhan MHz sampai di atas 1GHz.

2.2. Modus Perambatan Elektromagnetik

Sinyal elektromagnetik merambat melalui media dengan membawa kedua komponen magnetik dan elektrik. Dua komponen ini saling tegak lurus terhadap satu sama lain. Pola medan yang dihasilkan dalam perambatan terbagi menjadi tiga modus [7].

1. Modus *Transverse Electric* (TE)

Pada modus TE komponen medan listrik bergerak searah dengan arah perambatan gelombangnya. Pada modus ini terjadi ketika kondisi $E_z = 0$ dan $H_z \neq 0$. Salah satu contoh penggunaan *transverse electric* adalah pada pemodelan sirkuit untuk permasalahan arus eddy dalam cincin magnetik yang dilakukan oleh Jiayi He [8].

2. Modus *Transverse Magnetic* (TM)

Pada modus TM komponen medan magnetis bergerak searah dengan arah perambatan gelombangnya. Pada modus ini terjadi ketika kondisi $H_z = 0$ dan $E_z \neq 0$. Contoh penggunaan *transverse magnetic* adalah pada pemodelan jalur transmisi piramidal [9].

3. Modus *Transverse Electric and Magnetic* (TEM)

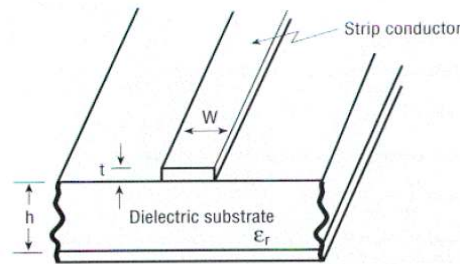
Pada modus TEM kedua komponen medan listrik dan magnetis bergerak searah dengan arah perambatan gelombangnya. Pada modus ini terjadi ketika kondisi $E_z = 0$ dan $H_z = 0$. Penggunaan *transverse electric and magnetic* dalam kehidupan sangatlah beragam. Diantaranya digunakan untuk mengevaluasi perisai medan listrik dan magnetik pada papan perisai dan juga dapat digunakan untuk menguji sensitivitas sensor serta kesesuaian medan dari peralatan elektronik [10].

2.3. Konduktor Paralel (*Strip Line*)

Sinyal elektromagnetik dari sumber *partial discharge* merambat dalam modus TEM (*transverse electromagnetic*). Sehingga sensor yang akan diuji tingkat sensitivitas harus menggunakan media yang menghasilkan modus perambatan TEM. Contoh konstruksi yang paling sederhana untuk menghasilkan modus TEM adalah konduktor paralel seperti yang ditunjukkan gambar 2.3. Penempatan konduktor ini disesuaikan untuk memperoleh nilai impedansi yang diinginkan. Pada umumnya konduktor paralel akan didesain dengan impedansi 50 ohm.

Impedansi dari dua konduktor paralel dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad 1$$



Gambar 2.3 Konduktor paralel [7]

Apabila karakteristik nilai impedansi Z_0 diketahui, maka untuk menentukan rasio konduktor paralel ($\frac{W}{h}$) dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

1. Kondisi rasio $\frac{W}{h} < 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad 2$$

2. Kondisi rasio $\frac{W}{h} > 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad 3$$

Untuk mencari nilai A dan B menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad 4$$

$$B = \frac{Z_s \pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad 5$$

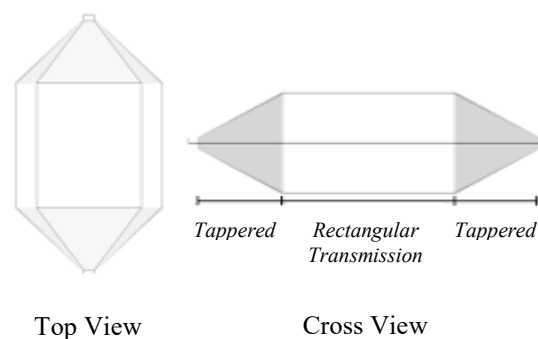
dimana :

- Z_s = impedansi ruang terbuka (Udara ≈ 377 ohm)
- ϵ_r = konstanta dielektrik
- w = lebar bahan konduktor
- h = jarak antar konduktor [7]

2.4. *Transverse Electromagnetic (TEM) Cell*

Transverse electromagnetic (TEM) cell bekerja berdasarkan prinsip kerja konduktor paralel atau *strip line*. Perangkat elektronika yang akan diuji, diletakkan di antara *strip line*. Sampai saat ini TEM cell masih terus dikembangkan. Peneliti yang pertama kali menggagas pengadaan TEM cell adalah M.L Crawford pada tahun 1973 [11]. Pada mulanya TEM cell didesain hanya dengan dua konduktor sejajar, kemudian berkembang menjadi TEM cell terbuka seperti yang ditunjukkan gambar 2.4.

TEM cell yang didesain oleh Crawford ini beroperasi menggunakan impedansi 50 ohm. Kedua ujung bagian TEM cell dihubungkan menggunakan konektor *coaxial*. TEM cell dapat digunakan untuk pengujian keseragaman medan listrik, EMC, efek radiasi pada makhluk hidup, pengujian sensor elektromagnetik dan lain-lain.



Gambar 2.4 *Transverse electromagnetic (TEM) cell* tipe terbuka pertama yang didesain oleh Crawford [11]

TEM *cell* tipe terbuka ini sangat rentan terhadap interferensi sinyal elektromagnetik dari luar. Kemudian pada tahun 1974 M.L Crawford mulai mengembangkan TEM *cell* tipe tertutup.

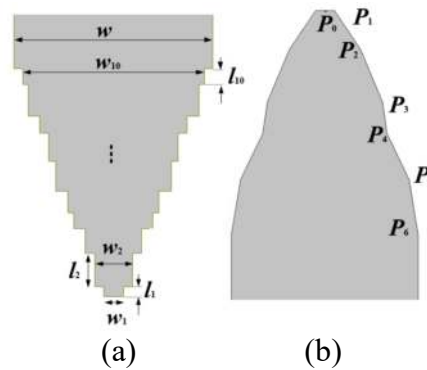
Transverse electromagnetic (TEM) *cell* pada pengujian elektromagnetik sampai saat ini masih dikembangkan dan dimodifikasi. Penggunaan TEM *cell* untuk pengujian sensitivitas sensor telah dibahas oleh peneliti terdahulu seperti pengujian medan dekat yang dihasilkan komponen rangkaian *Printed Circuit Board* (PCB) menggunakan TEM *cell* tipe tertutup yang dilakukan oleh Yeong Cho yang ditunjukkan gambar 2.5 [12]. TEM *cell* yang didesain oleh Yeong menggunakan bahan alumunium. TEM *cell* ini mampu bekerja sampai dengan frekuensi 1GHz dengan nilai *return loss* sebesar 24dB ketika menggunakan *coupler* dan 27dB ketika salah satu *port* tanpa menggunakan *coupler*.



Gambar 2.5 TEM *cell* tipe tertutup menggunakan bahan alumunium [12]

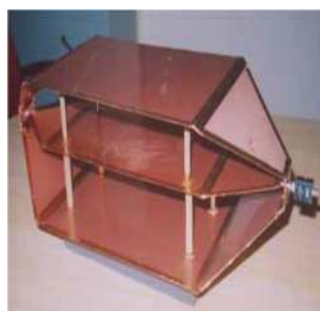
Masoud Arezoomand melakukan pengembangan dari TEM *cell* dengan memodifikasi bentuk septum. Arezoomand membuat dua desain yaitu *multi step* dan *piecewise linier* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 [13]. TEM *cell* ini didesain untuk berkerja sampai dengan frekuensi 1GHz. Untuk TEM *cell* dengan menggunakan *multi step* nilai VSWR maksimum berkisar

di 1,35 sedangkan untuk TEM *cell* dengan menggunakan *piecewise linier* nilai VSWR maksimum berkisar di 1,2.



Gambar 2.6 Dua jenis desain septum TEM *cell* (a) *multi step*
(b) *piecewise* [13]

Pembuatan TEM *cell* tipe terbuka yang dilakukan oleh Sandeep pada gambar 2.7 [14] didesain dengan menggunakan bahan PCB. TEM *cell* ini mampu bekerja sampai dengan frekuensi 1GHz dengan nilai VSWR maksimum sekitar 1,8 untuk rentang frekuensi 1 sampai 400 MHz dan 2,5 untuk rentang frekuensi dari 400 sampai 1000 MHz.



Gambar 2.7 TEM *cell* tipe terbuka menggunakan bahan PCB [14]

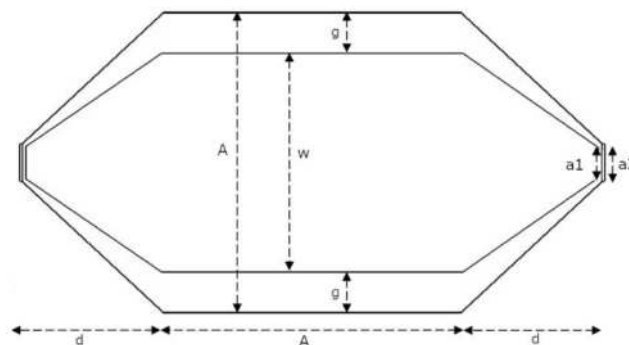
TEM *cell* didesain sedemikian rupa untuk mendapatkan impedansi yang sesuai dengan impedansi peralatan laboratorium. Untuk TEM *cell* tipe

terbuka perhitungan dalam menentukan impedansi yang diinginkan menggunakan persamaan 1 pada *strip line*, karena pada dasarnya prinsip kerja dari TEM *cell* mengadopsi dari prinsip kerja *strip line*. Sedangkan untuk TEM *cell* tipe tertutup perhitungan dalam menentukan impedansi menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Z_0 = \frac{Z_s}{4 \left[\frac{A}{B} + \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{B} \right) \right) \right] - \frac{C}{\epsilon_0}} \quad 6$$

dimana :

- Z_0 = impedansi TEM *cell* yang akan didesain (ohm)
- Z_s = impedansi ruang terbuka (Udara ≈ 377 ohm)
- g = jarak antara bagian *septum* dengan *shielding*
- A = lebar bahan konduktor/TEM *cell*
- B = tinggi bahan konduktor/TEM *cell* [15]



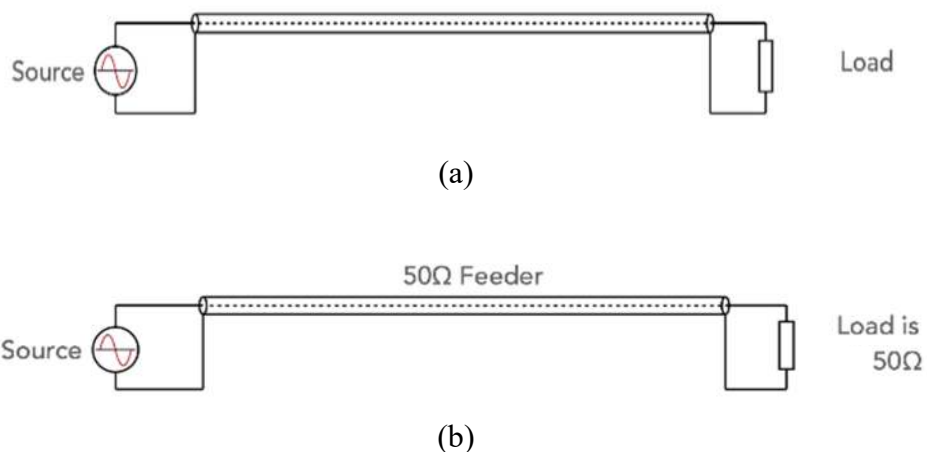
Gambar 2.8 Desain dan penentuan dimensi dari TEM *cell* tipe tertutup [15]

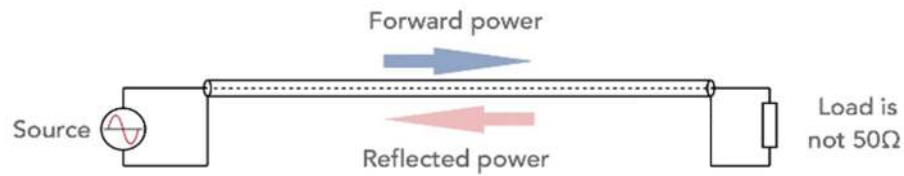
Gambar 2.8 menunjukkan penentuan dimensi dari TEM *cell* tipe tertutup. Huruf A menunjukkan dimensi bagian *shielding* dari TEM *cell*, dimensi ini mewakili panjang dan lebar dari daerah uji. Huruf B menunjukkan tinggi keseluruhan dari TEM *cell*. Huruf w menunjukkan lebar bagian *septum* dan g menunjukkan jarak antara bagian *shielding* dan *septum* dari TEM *cell*. Untuk ukuran dari huruf A, B dan g dapat diperoleh dari persamaan 6,

sedangkan huruf w dapat diperoleh dengan pengurangan dari ukuran A dengan g . Kemudian huruf a_1 dan a_2 merupakan bagian TEM cell yang akan dihubungkan dengan bagian *inner* dan *outer connector*. Untuk ukuran a_1 dan a_2 mengikuti jenis dan ukuran *connector* yang digunakan. Huruf d merupakan panjang dari *shielding* yang berbentuk segitiga, pada umumnya sudut dari TEM cell dengan bentuk persegi menggunakan sudut 45° .

2.5. Voltage Standing Wave Ratio

Voltage standing wave ratio (VSWR) merupakan perbandingan antara gelombang yang dikirimkan dan gelombang yang dipantulkan. Gelombang yang dipantulkan ini dapat merusak bentuk gelombang yang dikirimkan. Kedua gelombang ini akan membentuk sebuah gelombang berdiri (*standing wave*). Semakin besar nilai VSWR maka semakin besar kemungkinan gelombang yang dikirimkan akan rusak yang berarti perangkat, sensor maupun antenna dapat dikatakan buruk.





(c)

Gambar 2.9 Proses terjadinya *voltage standing wave ratio*

Gambar 2.9(a) menunjukkan sebuah sumber tegangan AC yang dihubungkan dengan beban melalui sebuah saluran atau *feeder*. Pada saat kondisi impedansi beban yang akan di-*supply* sesuai (*matching*) dengan impedansi saluran yang digunakan seperti yang ditunjukkan gambar 2.9(b) maka gelombang dari sumber akan diteruskan secara menyeluruh. Artinya tidak terdapat gelombang yang dipantulkan. Tetapi pada kondisi seperti yang ditunjukkan gambar 2.9(c) yaitu saat impedansi beban tidak sesuai (*not matching*) dengan saluran maka tidak semua gelombang akan diteruskan, namun terdapat gelombang yang dipantulkan. Gelombang ini lah yang dapat merusak bentuk gelombang yang dikirimkan.

Berikut merupakan persamaan untuk menghitung besarnya nilai VSWR [9]:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V^+ + V^-}{V^+ - V^-} \quad 7$$

dimana :

V^+ = Gelombang tegangan yang ditransmisikan

V^- = Gelombang tegangan yang dipantulkan

Nilai VSWR bergantung pada besarnya nilai koefisien refleksi yang disimbolkan dengan $|r|$. Nilai koefisien refleksi yang ideal adalah nol, yang

artinya tidak terdapat gelombang yang akan dipantulkan. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung nilai koefisien refleksi :

$$|\Gamma| = \frac{V_R}{V_T} = \frac{P_R}{P_T} = \frac{V^-}{V^+} \quad 8$$

dimana :

V^+ = Gelombang tegangan yang ditransmisikan

V^- = Gelombang tegangan yang dipantulkan

V_R = Tegangan yang dipantulkan

V_T = Tegangan yang ditransmisikan

P_R = Daya yang dipantulkan

P_T = Daya yang ditransmisikan

Besarnya nilai koefisien refleksi juga dapat ditentukan dengan menggunakan besarnya impedansi dari saluran dan beban, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$|\Gamma| = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad 9$$

dimana :

Z_L = Impedansi saluran (Ω)

Z_0 = Impedansi beban (Ω)

Dengan mensubstitusikan persamaan 7 dan 8 maka diperoleh persamaan untuk memperoleh nilai VSWR sebagai berikut :

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad 10$$

dimana :

$|\Gamma|$ = Koefisien refleksi

Dengan menggunakan persamaan 10 untuk mencari nilai VSWR, maka dapat disimpulkan pada saat nilai dari koefisien refleksi sebesar 0 atau tidak terdapat gelombang yang dipantulkan maka nilai VSWR sebesar 1. Nilai

VSWR ini merupakan nilai yang ideal atau sering disebut *perfectly matched load*. Sedangkan pada saat nilai koefisien refleksi sebesar 1 atau seluruh gelombang dipantulkan maka nilai VSWR sebesar tak terhingga (∞) [14].

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dan pembuatan tugas akhir dilaksanakan selama 5 bulan mulai Januari 2019 sampai Mei 2019, bertempat di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Komputer pribadi (PC)
2. *Printed Circuit Board (PCB) double layer*
3. *Connector BNC female to BNC female*
4. *Connector T BNC 1 male to 2 BNC female*
5. *N connector female*
6. *N connector male to BNC female*
7. Kabel *pigtail BNC male to SMA male RG58*
8. Kabel *BNC male to BNC male RG58*
9. Terminasi 50 Ohm
10. *Tap copper foil*

11. Timah/tenol
12. *RF vector impedance analyzer N1201SA*
13. Osiloskop digital
14. *Function generator*
15. *Antena monopole 2 GHz*

Adapun perangkat kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Gerinda
2. Tang rivet
3. Bor elektrik
4. Solder
5. *Crimping tools*

3.3. Prosedur Kerja

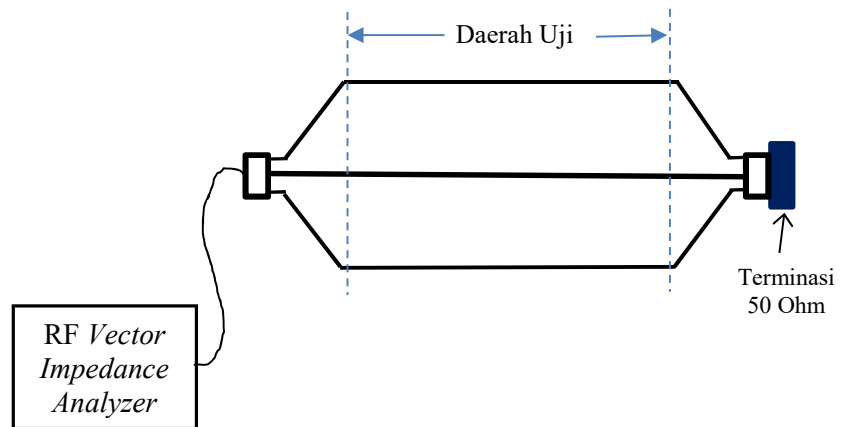
Langkah–langkah kerja yang dilakukan pada perancangan model sistem adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Literatur

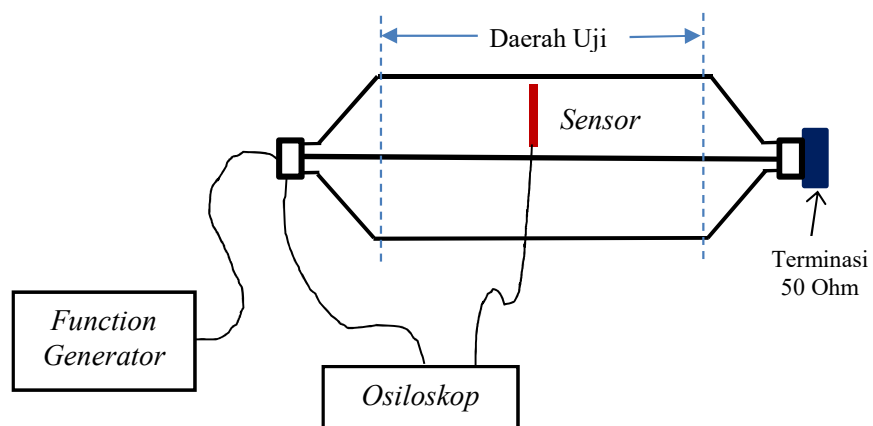
Pengumpulan literatur merupakan tahapan awal dimana penulis mempelajari berbagai sumber referensi baik dari skripsi, buku, jurnal , dan makalah ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian. Khususnya penulis mempelajari sistem kerja dari perancangan TEM *cell* untuk digunakan sebagai media pengujian sensitivitas sensor elektromagnetik. Selain itu penulis juga *me-review* penelitian sebelumnya sebagai batasan dalam melakukan penelitian.

2. Perancangan Diagram Pengujian

Perancangan diagram pengujian bertujuan untuk mempermudah realisasi dalam pembuatan perangkat TEM *cell*.



Gambar 3.1. Diagram pengujian nilai VSWR dari TEM *cell*



Gambar 3.2. Diagram pengujian TEM *cell* menggunakan sensor elektromagnetik

3. Implementasi pembuatan perangkat TEM *cell* tipe tertutup dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut :

- a. Merancang rangkaian dari TEM *cell* tipe tertutup dan menentukan komponen yang dibutuhkan.

- b. Merangkai bahan menggunakan alat yang dibutuhkan menjadi perangkat TEM *cell* tipe tertutup.
- c. Melakukan pengujian nilai VSWR pada TEM *cell* tipe tertutup.
- d. Melakukan pengujian TEM *cell* tipe tertutup sebagai media untuk melakukan pengujian tingkat sensitivitas sensor elektromagnetik.

4. Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui keberhasilan dari alat yang telah dibuat dengan melakukan pengambilan data terhadap parameter yang telah ditentukan.

5. Analisa dan Kesimpulan

Analisa dilakukan terhadap data yang telah diperoleh dari hasil pengujian dan kemudian dilakukan pengambilan kesimpulan dari hasil analisa.

3.4. Tahap Perancangan Alat

Dalam tahapan ini dilakukan realisasi dari rancangan TEM *cell* tipe tertutup yang telah dibuat. Namun jika terdapat fungsi yang tidak bekerja maka akan dilakukan peninjauan kembali terhadap desain alat, baik berupa pengaturan bentuk atau penggantian komponen.

Berikut merupakan beberapa proses yang dilakukan dalam tahapan pembuatan alat :

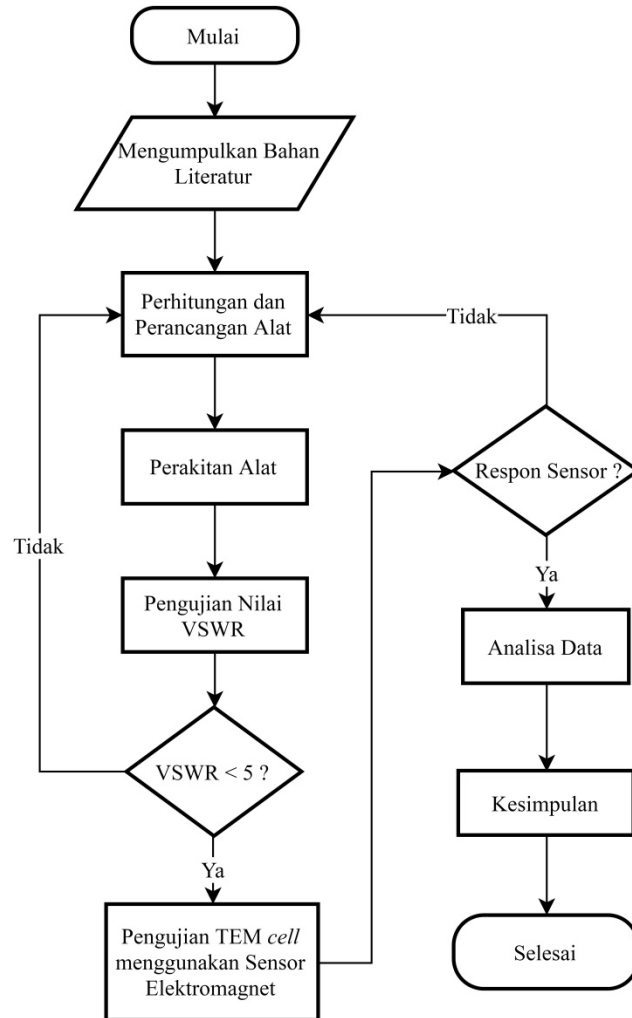
1. Melakukan perhitungan untuk dapat menentukan desain dan ukuran dari masing-masing bagian TEM *cell* tipe tertutup.
2. Membuat desain TEM *cell* tipe tertutup dan menentukan komponen yang dibutuhkan.
3. Merangkai alat dan bahan menjadi perangkat TEM *cell* tipe tertutup.
4. Melakukan pengujian nilai VSWR pada TEM *cell* tipe tertutup menggunakan RF *vector impedance analyzer* N1201SA.
5. Melakukan pengujian TEM *cell* sebagai media pengujian sensitivitas sensor elektromagnet dengan menggunakan *function generator* dan osiloskop digital.

3.5. Diagram Alir Perancangan Alat

Diagram alir perancangan alat ditunjukkan pada Gambar 3.3. Diagram alir dimulai dengan pencarian literatur dan memahaminya untuk menentukan spesifikasi dan desain dari alat yang akan dibuat. Apabila spesifikasi dan desain dirasa tidak memungkinkan, maka pencarian literatur kembali dilakukan hingga menemukan spesifikasi dan desain yang diinginkan.

Setelah menentukan spesifikasi dan desain yang tepat, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan guna penentuan dimensi dari alat yang akan dibuat, kemudian dilanjutkan dengan perakitan dan pengujian nilai VSWR alat. Apabila pengujian alat tidak berhasil maka evaluasi kembali studi literatur. Namun, apabila pengujiannya berhasil maka dilanjutkan untuk pengujian TEM *cell* menggunakan sensor elektromagnet. Apabila pengujian alat tidak berhasil maka evaluasi kembali studi literatur. Namun, apabila

pengujiannya berhasil maka dilanjutkan untuk menganalisa data hasil dan memberikan kesimpulan dari penelitian yang berhasil dibuat.



Gambar 3.3. Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Transverse Electromagnetic (TEM) Cell tipe tertutup yang telah dibuat menggunakan PCB *double layer* memiliki nilai *Voltage Wave Standing Ratio (VSWR)* dibawah 2 untuk rentang frekuensi mencapai 1GHz. TEM *cell* juga mampu digunakan sebagai media untuk melakukan pengujian sensor elektromagnetik jenis *monopole*.

5.2. SARAN

Adapun saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Pengujian sensitivitas sensor menggunakan jenis sensor elektromagnetik yang bervariasi dan juga melakukan modifikasi pada desain septum pada TEM *Cell*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Frederick. H. Kreuger, *Industrial high voltage*, Delft University Press, 1991.
- [2] Martin Judd and Owen Farish, “A Pulsed GTEM System for UHF Sensor Calibration”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998.
- [3] Chih-Ju Chou and Chien-Hsun Chen, “Measurement and Analysis of Partial Discharge of High and Medium Voltage Power Equipment”, *The 7th IEEE International Symposium on Next-Generation Electronics*, 2018.
- [4] Martin D. Judd, Li Yang, and Ian B. B. Hunter; “Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2005.
- [5] Martin D. Judd and O. Farish; “High Bandwidth Measurement of Partial Discharge Current Pulses”, *The International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, 1998.
- [6] Sinaga, H.H., B.T. Phung, and T.R. Blackburn; “Design of Ultra High Frequency Sensors for Detection of Partial Discharges”, *16th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2009)*, 2009.
- [7] Sinaga, H.H., and Sitorus, H.B.H, “Design of TEM Cell to Test the Electromagnetic Sensor”, *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*, 2017.
- [8] Jiayi He, Yonggang Guan and Weidong Liu, “A Circuit Model of Transverse Electric Eddy Current Problem in Magnetic Rings”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015.
- [9] Dohoon Kim, Hyo J Eom and Seong Ook Park, “TM Modes on Pyramidal Transmission Line”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012.

- [10] Hyuntae Jang, et.al, “Electric and Magnetic Field Shielding Evaluation of Board Level Shield Can Using TEM Cell”, *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS)*, 2015.
- [11] M.L. Crawford, “Measurement of EM Radiation from Electronic Equipment Using TEM Transmission Cells”, *NBS International Report*, 1973.
- [12] Gyu Yeong Cho and Wee Sang Park, “On the Validity of Approximate Formulas for Correlating TEM Cell and Near-Field Transmission Measurement”, *IEEE Transaction on Electromagnetic Compability*, 2015.
- [13] Masoud Azoomand, M. K. Meybodi and Narges Noori, “Design of TEM Cell Using Both Multi Step and Piecewise Linier Tapering”, *8th International Symposium on Telecommunications*, 2016.
- [14] Sandeep M. Satav and Vivek Agarwal, “Do-it-Yourself Fabrication of an Open TEM Cell for EMC Pre-Comppliance”, *IEEE*, 2008.
- [15] C. Ifode and S. Miclaus, “Design and Validation of a TEM Cell Used for Radiofrequency Dosimetric Studies”, *IEEE Progres in Electromagnetics Research*, 2012.