

BAB I Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Bahan isolasi adalah bahan yang dipakai untuk memisahkan bagian-bagian yang berbeda tegangan [1]. Sistem isolasi diperlukan pada peralatan tegangan tinggi agar tidak terjadi hubung singkat satu dengan yang lain [2]. Pada bahan isolasi, inti atom mengikat kuat elektronnya, sehingga elektron tidak bebas bergerak didalam bahan tersebut sehingga tidak terjadinya proses aliran listrik [3]. Meskipun demikian, bahan isolasi rentan ketika terkena medan listrik yang terkonsentrasi, dimana pada suatu titik pada bahan isolasi terjadi kuat medan listrik yang tinggi maka akan mengakibatkan gagal isolasi dibagian medan listrik yang terkonsentrasi tersebut. Peluhan pada sebagian bahan ini dinamai dengan peluhan sebagian (PS) [4]. Energi akibat PS sangat kecil, namun kejadiannya berulang disetiap siklus tegangan sumber. Akibatnya didalam isolasi tersebut akan muncul penjaran bunga api yang membentuk pohon listrik yang akhirnya menjembatani keseluruhan isolasi yang menghubungkan bagian yang bertegangan yang dikenal dengan gagal isolasi [5].

Berdasarkan IEC (*International Electrotechnical Commission*) 60270, PS adalah pelepasan listrik lokal yang menjembatani sebagian pada isolasi antara konduktor yang dikenal dengan peluhan sebagian. PS disebabkan adanya medan listrik yang tidak merata, dimana pada suatu titik bagian isolasi mengalami peningkatan kuat medan listrik [6]. PS dapat dibagi menjadi peluhan permukaan, peluhan dalam dan korona [7]. PS disebabkan bahan isolasi memiliki kecacatan. Cacat itu dapat timbul dalam bentuk celah udara, ketidakmurnian, dan tonjolan pada permukaan antara lapisan konduktor dan isolasi, akibatnya pada bagian yang cacat tersebut dapat menimbulkan medan listrik yang tinggi [8]. Ketika bahan isolasi padat mengandung cacat diterapkan suatu tegangan maka yang pertama sekali mengalami kegagalan yaitu gas yang terdapat pada celah udara didalam bahan tersebut, sehingga pada bahan isolasi padat atau isolasi polimer terjadi PS [9]. Akibatnya akan terjadi penuaan isolasi polimer dan menyebabkan timbulnya pohon listrik. Ketika pohon listrik telah menjembatani isolasi, maka akan terjadi kegagalan isolasi [10]. Untuk menjaga keandalan operasi dari suatu peralatan listrik, maka pendeteksian,

pembacaan dan pengukuran PS diperlukan untuk memantau kondisi dari bahan isolasi [11].

Salah satu metode pendeteksian PS adalah metode konvensional berdasarkan standar internasional IEC 60270. Berdasarkan IEC 60270 pendeteksian konvensional ini dipakai sebagai metode standar pengukuran PS [12]. Metode ini memiliki keterbatasan saat pengukuran secara langsung di lapangan karena tingkat gangguan yang dihasilkan oleh lingkungan sekitar peralatan listrik relatif tinggi, akibatnya analisa data PS yang didapat akan mengalami kesulitan karena sinyal gangguan akan ikut terdeteksi dengan sinyal hasil pengukuran [7].

Sistem pengukuran PS membutuhkan alat ukur dengan spesifikasi yang sesuai karena gelombang PS merupakan gelombang pulsa yang kecil dengan frekuensi tinggi. Salah satu metode pengukuran PS yang dipakai pada penelitian ini adalah kumparan Rogowski [13]. Kumparan Rogowski memiliki sensitivitas yang baik pada frekuensi tinggi dan strukturnya mudah dipasang pada isolasi listrik [14]. Kumparan Rogowski adalah induktor khusus yang sering digunakan untuk mengukur arus bolak-balik dan arus transien, terutama frekuensi arus tinggi seperti arus peluahan gas, arus plasma, dan arus petir [13].

Sejak 1912, kumparan Rogowski telah digunakan untuk mendeteksi dan mengukur arus, terutama arus-arus besar seperti gelombang arus dalam plasma, elektron *beam*, medan radiasi tinggi, dan masalah di jaringan kabel tegangan menengah [15]. Ada tiga tipe utama kumparan Rogowski yaitu kumparan Rogowski *magnetic-cored*, kumparan Rogowski *toroidal air-cored*, dan kumparan *Printed Circuit Board (PCB)* [16]. Kumparan Rogowski memiliki kelebihan dalam mengukur PS yaitu tidak jenuh karena medianya udara, bersifat linier karena tidak ada bahan magnetik, rangkaian sederhana, ekonomis, dan kumparan tidak menyimpan arus dari rangkaian yang dipasang dalam kondisi impedansi yang sama [16].

Komponen utama dari kumparan Rogowski adalah tembaga yang dililitkan pada suatu bahan non-magnetik berbentuk silinder bulat [17]. Lilitan memiliki pengaruh besar terhadap keefektifan dalam pengukuran PS. Lilitan akan merasakan induksi elektromagnetik dari kabel penghantar tempat pemasangan sensor sehingga

ketika terjadi PS, kumparan Rogowski akan ikut merasakannya lalu ditampilkan dalam osiloskop [18].

Pada penelitian sebelumnya telah dirancang kumparan Rogowski berbentuk silinder bulat [19]. Kemudian penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan kumparan Rogowski berbentuk setengah silinder bulat [20]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan hasil yang hampir sama dengan detektor PS yang ada di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas. Sedangkan, pada penelitian ini menggunakan kumparan Rogowski dengan bahan inti non-magnetik yang lebih fleksibel dengan pemakaian bahan plastik Polivinil klorida (PVC) yang termasuk dalam senyawa polar yang memiliki ikatan dipol dan Polietilena (PE) yang termasuk dalam senyawa nonpolar. Bahan inti ini berfungsi sebagai tempat melilitkan kawat tembaga. Selain itu, pemakaian bahan inti ini bertujuan untuk mempermudah pemasangan sensor pada saat dilakukan pengambilan data penelitian dan melihat bagaimana efektifitas pembacaan PS dari pemakaian kedua bahan inti tersebut. Selain perbedaan bahan inti dari kumparan Rogowski yang digunakan, jumlah lilitan dari kumparan juga diteliti. Diharapkan hasilnya mendekati dengan sensor PS yang telah diteliti di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas.

1.2 Perumusan Masalah

Salah satu kendala dengan sensor peluahan sebagian di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas adalah mobilitas dan fleksibilitas jika dipasang di lapangan. Untuk mengatasi kekurangan tersebut pengembangan sensor sejenis masih sangat diperlukan yaitu dengan menggunakan sensor induktif seperti kumparan Rogowski.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah menganalisis sistem pengukuran PS menggunakan sensor kumparan Rogowski yang lebih efektif dari penelitian sebelumnya yaitu dengan pemakaian bahan inti plastik PVC dan plastik PE, sehingga sensor akan lebih fleksibel dan mudah di pasang pada suatu isolasi kabel. Diharapkan

hasilnya mendekati sensor PS yang telah diteliti sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian dan penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan luaran berupa:

- a. Dapat membuat sistem pengukuran PS yang maksimal menggunakan kumparan Rogowski.
- b. Membuat kinerja kumparan Rogowski lebih efektif sehingga kumparan Rogowski dapat digunakan untuk mempermudah perawatan peralatan tegangan tinggi.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian dan penulisan tugas akhir ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

- a. Pengamatan imitasi pulsa peluahan sebagian yang disensor oleh kumparan Rogowski dan diakuisisi oleh osiloskop DPO 5104, 2 channel, produksi Tektronik.
- b. Analisis data yang didapatkan diolah menggunakan program LabView dan Microsoft Office Excel 2016.
- c. Penempatan sensor kumparan Rogowski pada kabel pentanahan.

1.6 Ruang Lingkup Penelitian

1. Pembuatan Kumparan Rogowski

Sensor kumparan Rogowski yang dibuat pada penelitian ini memakai bahan plastik PVC dan PE sebagai bahan inti sensor, kemudian akan dililitkan kawat tembaga dengan variasi 5 lilitan, 10 lilitan, dan 20 lilitan.

2. Pengujian Sensor di Laboratorium

Pengujian yang dilakukan berupa pengujian sensor kumparan Rogowski yang diteliti dengan melakukan pengujian sensor terhadap respon frekuensi dan respon magnitude di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas.

3. Studi dan Pengujian Perangkat lunak LabView

Mempelajari tentang perangkat lunak yang digunakan yaitu LabView serta fitur-fiturnya, diagram blok dan algoritma pemrograman yang digunakan.

4. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data-data hasil pengujian yang dilakukan. Data yang didapatkan berupa file-file pembacaan osiloskop yang disimpan pada Personal Computer (PC). Kemudian diolah dan dianalisis melalui perangkat lunak LabView dan Microsoft Office Excel 2016.

5. Analisis Hasil Pengujian sensor yang Didapatkan

Analisis hasil pengujian sensor dilakukan dengan bantuan perangkat lunak LabView dan Microsoft Office Excel 2016 dengan mengolah data-data yang didapatkan selama pengujian.

1.7 Sistematika Penelitian

BAB I Pendahuluan

Berisikan tentang latar belakang penulisan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, metodologi penulisan, sistematika penulisan dan penelitian dari tugas akhir ini.

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab II ini diterangkan teori-teori dan hasil kajian dari penelitian lain yang terkait dengan penelitian peluahan sebagian dan pengujian pengukuran peluahan sebagian menggunakan kumparan Rogowski.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisikan informasi seputar metodologi penelitian yang digunakan berupa metoda penelitian, diagram alir penelitian, peralatan dan bahan penelitian yang digunakan serta bantuan perangkat lunak yang digunakan.

BAB IV Hasil Dan Pembahasan

Bab ini berisikan tentang data-data hasil pengujian sensor kumparan Rogowski yang dibuat beserta pembahasan dari data yang didapatkan.

BAB V Penutup

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dari penelitian dan pengujian yang dilakukan terhadap data-data sensor serta saran untuk pembaca dan peneliti selanjutnya yang berminat meneliti lebih lanjut.



BAB II Tinjauan Pustaka

2.1 Umum

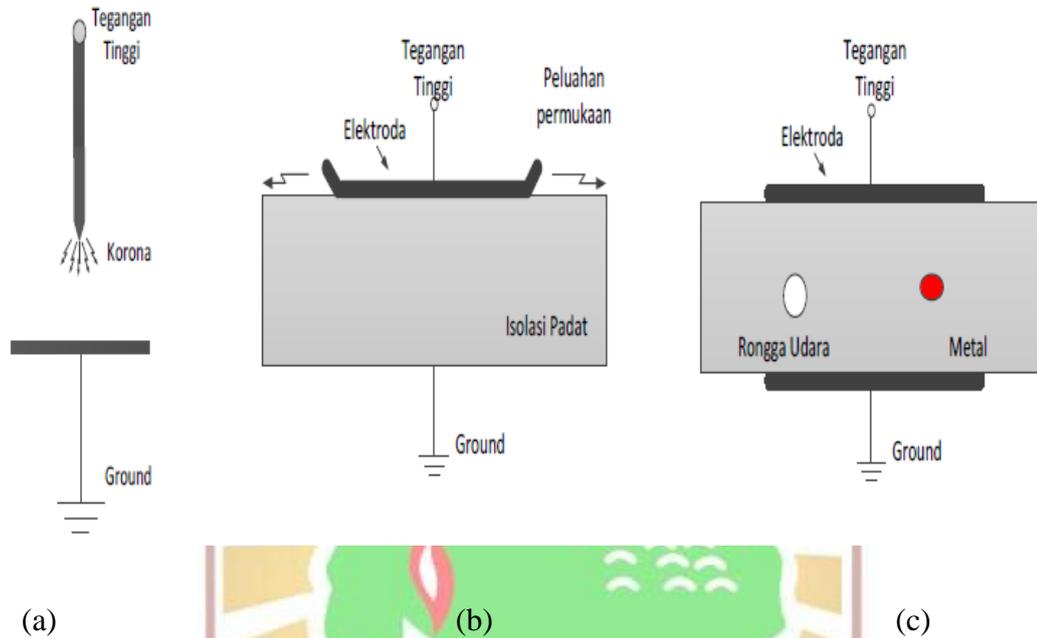
Peluahan sebagian merupakan peristiwa peluahan listrik lokal yang menghubungkan sebagian isolasi diantara dua konduktor. Peristiwa ini ditandai dengan pelepasan atau loncatan muatan listrik pada sebagian kecil sistem isolasi peralatan listrik dan tidak menjembatani ruang antara dua konduktor secara sempurna. Peluahan sebagian dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair, dan bahan isolasi gas.

Berdasarkan lokasi terjadinya, peluahan sebagian dapat dikategorikan sebagai peluahan permukaan, peluahan di dalam bahan isolasi, dan korona [7]. Peluahan permukaan pada permukaan bahan isolasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.b. Peluahan didalam bahan isolasi terjadi akibat adanya ketidaksempurnaan pada bagian dalam bahan isolasi (Gambar 2.1.c). Ketidaksempurnaan bahan dapat berupa adanya rongga udara atau adanya partikel kontaminan seperti serpihan logam atau bahan-bahan konduktif lainnya. Sedangkan korona merupakan peluahan sebagian yang terjadi di bagian yang runcing pada konduktor metal yang terjadi pada isolasi udara (Gambar 2.1.a).

Berdasarkan penjelasannya, peluahan sebagian dapat dinyatakan sebagai pulsa dengan durasi waktu yang sangat singkat. Durasi pulsa yang terjadi bergantung pada jenis sumber peluahan sebagian. Peluahan sebagian akibat adanya serpihan logam pada bagian dalam isolasi padat menghasilkan pulsa dengan durasi yang sangat cepat ~ 0.9 ns dan peluahan permukaan menghasilkan pulsa dengan durasi sekitar 17 ns dan korona menghasilkan pulsa dengan durasi paling lambat, yakni ~ 50 ns.

Melalui pemakaian alat ukur yang sesuai seperti osiloskop, gelombang pulsa yang dihasilkan pada proses peluahan sebagian dapat dideteksi dan direkam. Karena pulsa yang dihasilkan oleh sumber yang berbeda memiliki durasi yang berbeda-beda, maka gelombang yang direkam oleh osiloskop juga akan berbeda pula. Sehingga

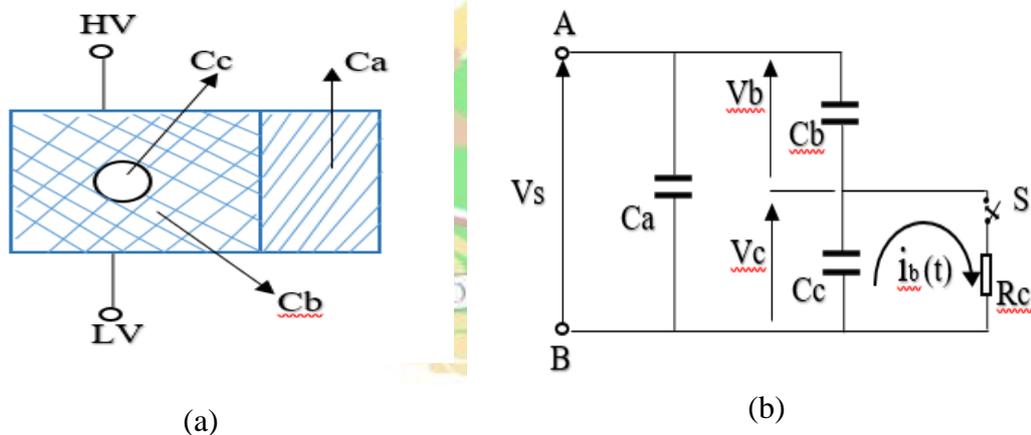
memungkinkan untuk membedakan jenis sumber peluahan sebagian melalui gelombang yang direkam.



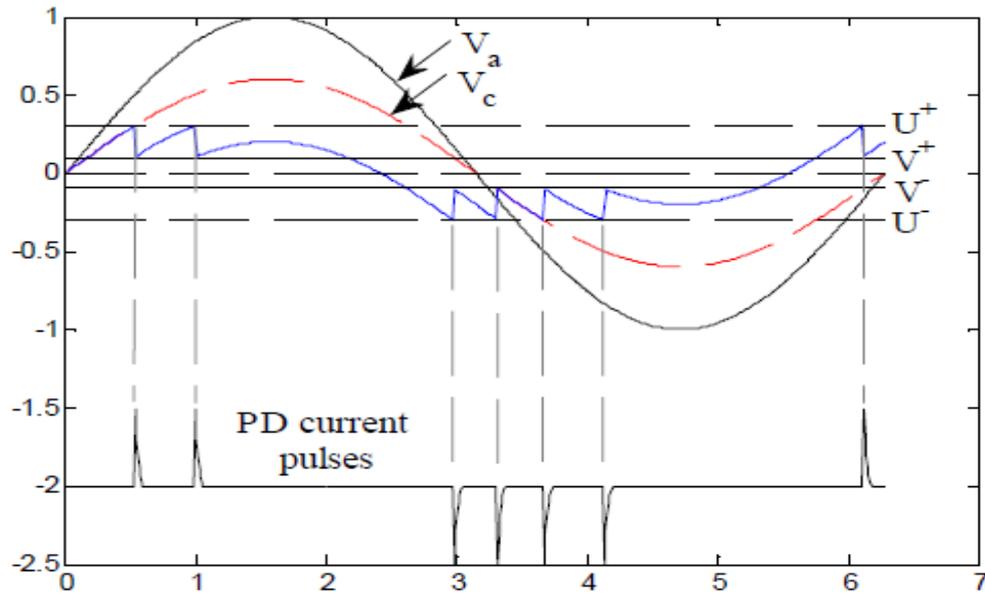
(a) (b) (c)
Gambar 2.1 Jenis-Jenis sumber peluahan sebagian (a) Peluahan korona, (b) Peluahan permukaan, dan (c) Peluahan rongga [7]

Pengujian PS berkaitan dengan nilai kualitas dan kuantitas. Nilai kualitas dianalisa dari kecenderungan data yang diperoleh dari karakteristik bahan pada pengujian tertentu. Sedangkan nilai kuantitas merupakan nilai nominal PS yang mempunyai dimensi piko Coloumb (pC). Kedua nilai ini harus memenuhi standar pada pengujian, sehingga kualitas peralatan tersebut baru bisa dilakukan penilaian. Pendeteksian peluahan sebagian yang terjadi pada level tegangan tertentu disebut sebagai tegangan ambang (*Inception Voltage*) dan tidak terjadi pada level tegangan tertentu disebut dengan tegangan punah (*Extinction voltage*). Apabila tegangan pada sumber yang diterapkan adalah sinusoidal maka Tegangan Ambang dan Tegangan Punah terjadi seperti dijelaskan pada gambar 2.3. Selain itu adanya banyak sinyal gangguan yang terdeteksi pada detektor sebagai gangguan, bisa menimbulkan kesalahan persepsi dan berkurangnya sensitifitas pengukuran dalam pengujian. Interpretasi yang benar mengenai karakteristik PS dalam peralatan yang diuji bergantung kepada pengalaman peneliti dalam melakukan pengujian [6].

Gambar 2.2 merupakan gambar pendeteksian dan pengukuran peluahan sebagian dengan menggunakan rangkaian kopling langsung. Pada Gambar 2.2.a adalah rangkaian ekuivalen isolasi. Gambar 2.2.a menjelaskan bahwa terdapat rongga pada bagian isolasi. Rongga pada bagian isolasi diakibatkan karena ketidaksempurnaan bahan isolasi. Sementara pada Gambar 2.2.b merupakan rangkaian ekuivalen kapasitor yang merepresentasikan isolasi pada Gambar 2.2.a. Saat terhubung dengan sumber tegangan maka akan mengalir muatan ke seluruh kapasitor. Rongga pada isolasi direpresentasikan sebagai C_b . Kapasitor C_b akan mendapatkan muatan sampai muatan penuh. Setelah muatan penuh, maka muatan akan dilepaskan menuju kapasitor C_c . Pada saat pelepasan muatan oleh C_b menuju C_c , maka terjadi kekosongan muatan pada kapasitor C_b . Hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan tegangan pada kapasitor C_c dan C_a . Dalam waktu yang cepat, terjadi perpindahan muatan untuk menstabilkan tegangan pada kapasitor C_c . Besar muatan yang dikirim menuju kapasitor C_c inilah yang disebut dengan *apparent charge*. *Apparent charge* saat terjadi peluahan dapat diukur dengan cara memasang alat ukur pada terminal sumber tegangan.



Gambar 2.2 Model Fisis Isolasi yang Memiliki Celah Udara (a) dan Model Kapasitor (b) [21]



Gambar 2.3 Karakteristik PS (Grafik Tegangan Terapan, Tegangan Rongga dan Arus PS) [22]

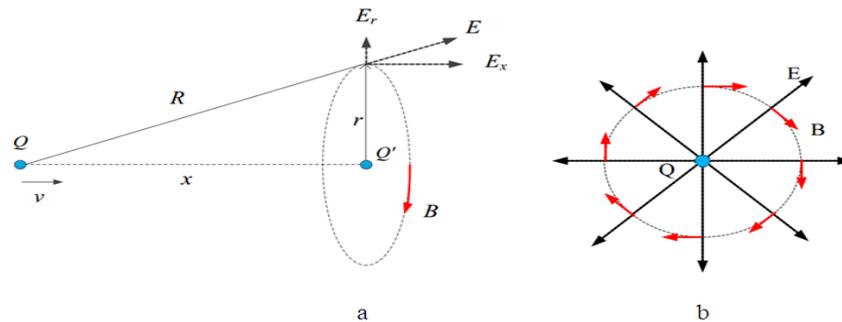
Dimana V_a = Tegangan Terapan (Sumber) V^+ = Tegangan Ambang
 V_c = Tegangan pada Rongga i = Grafik Arus Keluaran

V_c merupakan kurva tegangan pada rongga apabila tidak terjadi peluahan di dalam rongga. Kenaikan tegangan V_a menyebabkan V_c juga menjadi naik hingga mencapai nilai V^+ kemudian terjadi lompatan muatan. Lompatan muatan menyebabkan jatuhnya tegangan V_c sampai pada titik tertentu dimana perbedaan potensial tidak bisa untuk memindahkan muatan. V_c kembali meningkat sejalan dengan kenaikan tegangan terapan V_a hingga mencapai nilai V^+ dimana tegangan terapan terjadi kembali. Dalam hal ini peluahan terjadi selama periode naik positif (+) pada tegangan sinusoidal. Sama halnya dengan periode naik negatif (-) peluahan terjadi apabila tegangan rongga mencapai nilai V^- . Bentuk gelombang seperti gambar 2.3 terjadi apabila terdapat satu rongga tunggal pada bahan isolasi. Hal ini dapat berpengaruh berupa kelompok pulsa negatif dan positif terhadap arus keluaran akibat kenaikan atau penurunan tegangan secara sinusoidal.

2.2 Radiasi Gelombang Elektromagnetik

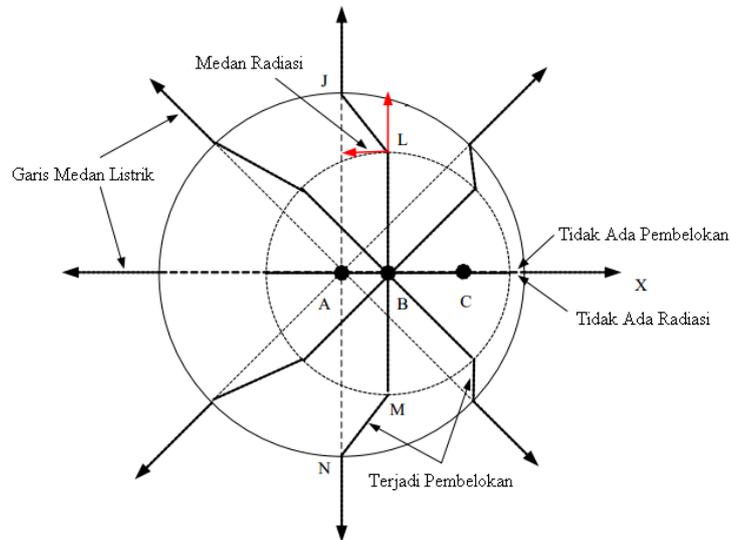
Peluahan sebagian merupakan gejala awal penyebab kerusakan isolasi. Terdapat beberapa jenis PS yaitu peluahan permukaan, rongga dan korona. PS merupakan proses pergerakan muatan yang dipengaruhi oleh medan listrik dan

medan magnet. Muatan listrik yang tidak bergerak (Q) hanya memiliki medan listrik (E). Ketika muatan tersebut bergerak (Q'), maka akan menghasilkan medan listrik (E) dan medan magnet (B) yang arahnya tegak lurus satu dengan yang lain (Gambar 2.4.a). Muatan yang bergerak konstan akan menghasilkan medan listrik dan medan magnet. Arah medan magnet dan medan listrik akan selalu tegak lurus selama muatan bergerak konstan (Gambar 2.4.b).



Gambar 2.4 Arah pergerakan medan listrik dan medan magnet [23]

Ketika muatan listrik dipercepat atau diperlambat akibat adanya gaya luar yang diterima, maka muatan listrik tersebut akan menghasilkan medan elektromagnetik. Ketika muatan bergerak konstan, maka garis medan listrik dan medan magnetik yang dihasilkan akan membentuk garis yang tidak terputus karena garis tersebut dihasilkan oleh muatan yang sama. Ketika muatan dipercepat mendekati kecepatan cahaya, maka garis medan listrik akan mengalami pembelokan karena keterlambatan garis medan memperbaharui posisinya atau dengan kata lain garis medan listrik mengalami keterlambatan penyesuaian arah garis medan dari garis medan sebelumnya. Akibat keterlambatan proses penyesuaian arah medan tersebut, maka dihasilkan radiasi medan listrik dan medan magnetik atau lebih dikenal sebagai radiasi elektromagnetik seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Peristiwa radiasi gelombang elektromagnetik [19]

Proses PS merupakan proses pergerakan muatan listrik yang dipercepat dan diperlambat oleh medan listrik disekitarnya. Sehingga besarnya medan elektromagnetik yang dihasilkan akan bergantung pada jumlah muatan listrik. Besar medan elektromagnetik tersebut dapat dihitung dengan menurunkan persamaan Biot-Savart:

$$E_t = \frac{NQ\mu_0[\alpha]\sin\theta}{4\pi\rho} \quad (2.1)$$

Dimana N adalah jumlah elektron, Q adalah besar muatan, μ_0 adalah permeabilitas medium, merupakan faktor *retardation*, ρ adalah faktor percepatan elektron dan θ adalah sudut pengamatan.

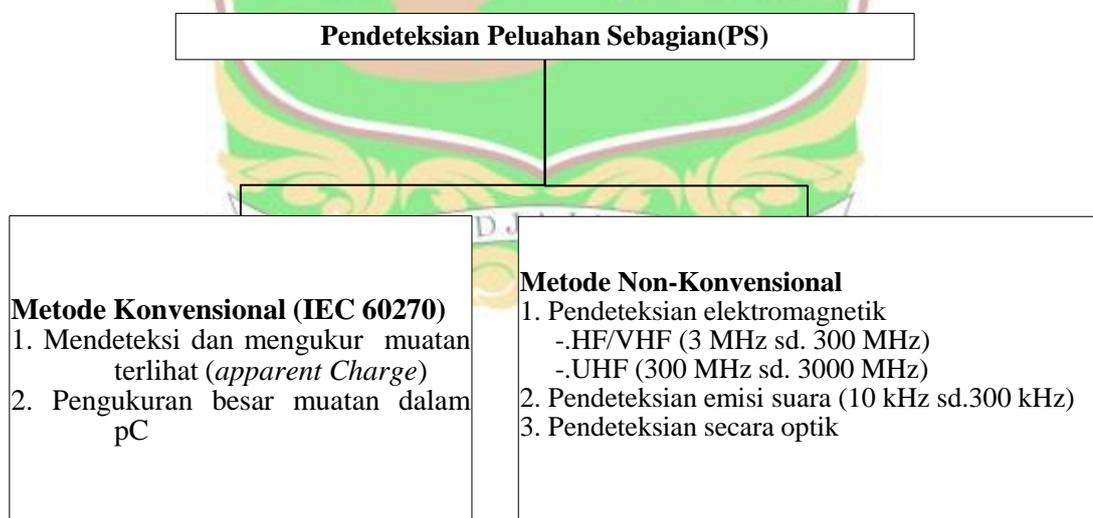
Gelombang elektromagnetik yang dihasilkan saat terjadinya PS dapat dideteksi dengan menggunakan sensor yang dirancang berdasarkan jenis sumber PS itu sendiri. Adapun faktor yang mempengaruhi besar sinyal elektromagnetik sesuai persamaan 2.1 adalah sebagai berikut:

1. Jumlah elektron saat terjadinya peluahan.
2. Percepatan elektron karena pengaruh kuat medan disekitarnya.
3. Permeabilitas media.
4. Sudut dan jarak pengamatan dari percepatan elektron

2.3 Metode Pendeteksian Peluahan Sebagian

Metode pendeteksian peluahan sebagian dapat dibedakan atas dua kelompok yaitu konvensional dan non konvensional. Pendeteksian dengan menggunakan metode konvensional atau dikenal dengan standar IEC 60270 mendeteksi peluahan dengan metode kopling langsung. Alat ukur pada metode IEC 60270 dihubungkan dengan rangkaian kapasitor untuk mengukur ekuivalen muatan yang dihasilkan oleh proses peluahan. Dengan metode konvensional, besar sudut fasa dan kuantitas lainnya dapat dideteksi dan diukur. Namun metode ini memiliki kelemahan mendasar yakni besarnya gangguan yang juga akan terukur ketika pengukuran dilakukan di lapangan terbuka. Hal ini dapat terjadi karena sinyal gangguan di lingkungan terbuka cenderung memiliki frekuensi yang sama dengan sistem pengukuran IEC 60270.

Metode non konvensional terdiri atas beragam jenis, diantaranya metode *dissolved gas analysis (DGA)*, *acoustic detection*, *chemical detection* dan elektromagnetik. Secara garis besar, semua metode yang tidak mengikuti prosedur IEC 60270 dianggap sebagai metode non konvensional. Metode non konvensional lainnya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.6 Metode pendeteksian peluahan sebagian [7].

Metode konvensional menurut standar (IEC 60270) dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian kopling langsung. Rangkaian kopling langsung memiliki kelebihan yaitu dapat mendeteksi dan mengukur muatan terlihat dari peluahan

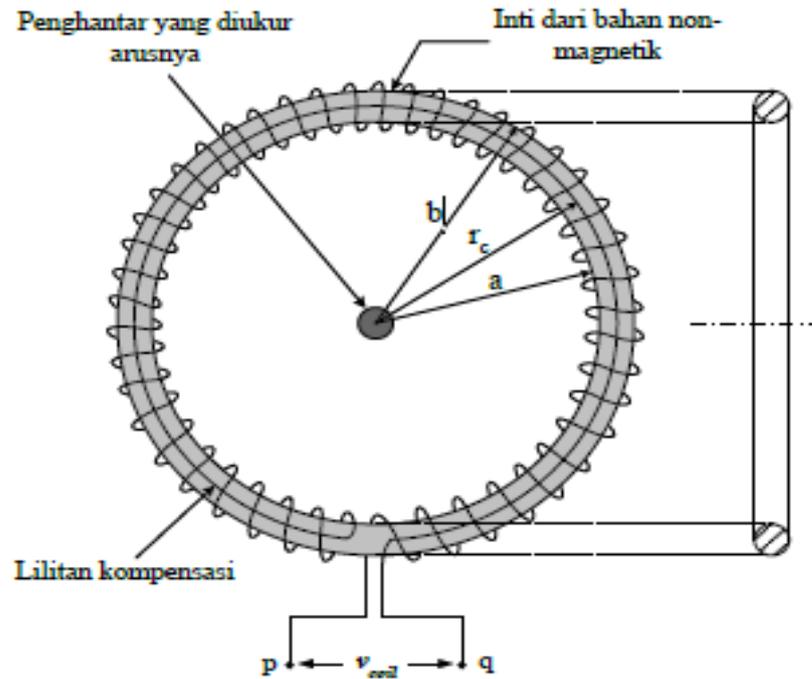
sebagian dan hasil pengukurannya dapat dikalibrasi. Rangkaian kopling langsung dapat dilakukan dengan memasang kapasitor secara paralel terhadap sumber tegangan.

Salah satu metode pendeteksian peluahan lain yang digunakan adalah metode elektromagnetik. Metode elektromagnetik merupakan metode pendeteksian non konvensional [7]. Metode ini didasarkan pada prinsip pendeteksian induksi elektromagnetik yang dihasilkan pada proses peluahan sebagian. Sinyal elektromagnetik yang dihasilkan oleh peluahan, dideteksi dan ditangkap dengan menggunakan sensor yang sesuai. Metode ini telah dipergunakan untuk mendeteksi peluahan sebagian pada gardu induk gas SF₆.

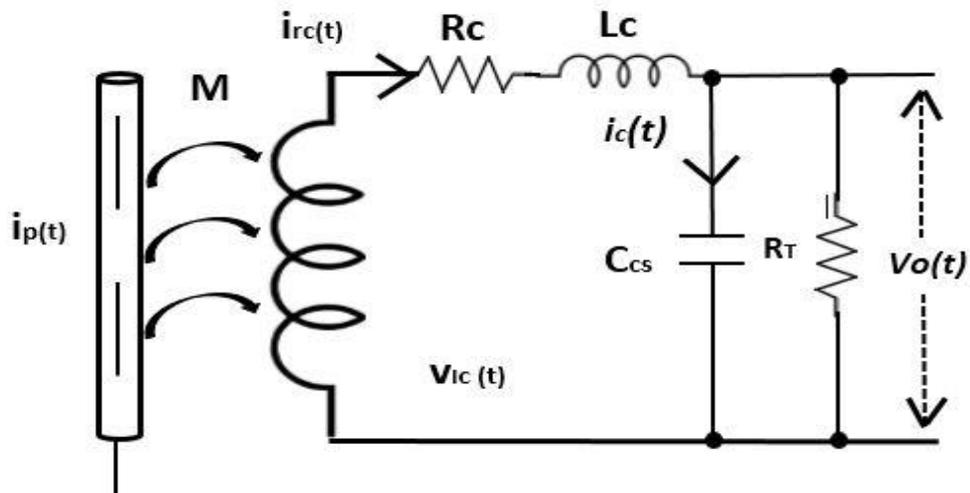
2.4 Kumparan Rogowski

Kumparan Rogowski ditemukan oleh Walter Rogowski pada tahun 1912 [24]. Konstruksi kumparan Rogowski yang digunakan pada penelitian ini diperlihatkan pada gambar 2.5. Konstruksi tersebut dinamakan kumparan Rogowski dengan satu-lapis belitan [25]. Belitan tersebut dililitkan di sepanjang inti toroid. Inti toroid terbuat dari bahan non-magnetik. Medan magnet di sekitar kumparan Rogowski dapat menginduksikan tegangan pada belitan tersebut sehingga akan mempengaruhi ketelitian pengukuran arus. Tegangan induksi tersebut dikompensasi oleh lilitan tunggal yang berada di tengah-tengah belitan [24].

Karena menggunakan inti dari bahan non-magnetik, karakteristik magnetisasi kumparan Rogowski adalah linier, tidak mengalami efek saturasi dan tidak mempunyai efek histeresis, sehingga arus bolak-balik yang diukur dapat dipetakan secara sempurna pada ujung-ujung kumparan Rogowski. Karakteristiknya yang linier tersebut telah mendasari pemilihan kumparan Rogowski sebagai sensor arus bolak-balik. Hal lain yang mendasari pemilihannya adalah konstruksi sensor dan rangkaian pengkondisi sinyalnya sederhana dan dapat direalisasikan menggunakan alat dan bahan yang dapat diperoleh dengan mudah, sehingga menghasilkan suatu transduser yang berbiaya murah namun tetap mempunyai akurasi yang tinggi.



Gambar 2.5 Konstruksi kumparan rogowski dengan penampang toroid berbentuk lingkaran, penghantar yang akan diukur arusnya diletakkan di tengah-tengah kumparan [19]



Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen [26]

Arus listrik yang mengalir pada penghantar di tengah-tengah toroid akan menghasilkan medan magnet. Berdasarkan hukum faraday, induksi tegangan adalah sebanding dengan turunan arus yang mengalir melalui kumparan dan dapat dilihat pada persamaan 2.2, dimana M , pada persamaan 2.3 adalah mutual induktansi antara lilitan pada sensor dengan konduktor primer [27].

$$v_{\text{coil}} = M \frac{di}{dt} \quad 2.2$$

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} NW \ln \frac{b}{a} \quad 2.3$$

$$\mu = \mu_0(1 + \kappa) \quad 2.4$$

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad 2.5$$

Keterangan :

N = jumlah lilitan

W = tinggi (m)

B = diameter luar (m)

A = diameter dalam (m)

μ_0 = permeabilitas udara (H/m) = $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$

κ = susceptibilitas volume bahan inti

μ = permeabilitas absolut (H/m)

μ_r = permeabilitas relatif bahan inti

V_{coil} = besar tegangan yang dibaca sensor (v)

2.5 Bahan Inti Kumparan Rogowski

Bahan inti merupakan bahan non-magnetik yang berfungsi sebagai media pemasangan lilitan tembaga yang juga akan berpengaruh terhadap efektifitas pembacaan sinyal PS oleh sensor kumparan Rogowski. Pada penelitian ini memakai dua variasi bahan inti non-magnetik yaitu Polivinilklorida (PVC) dan polietilena (PE).

2.5.1 Polivinilklorida (PVC)

Polivinilklorida (PVC) adalah polimer yang tersusun atas monomer vinil klorida. PVC merupakan polimer dengan sifat dasar yang menguntungkan, contoh tidak mudah terbakar, murah, dan fleksibel [28]. PVC digunakan sebagai bahan pembungkus kabel, piringan hitam, pipa, tongkat, dan pelapis lantai. PVC adalah salah satu polimer yang paling serbaguna dan dipakai dalam produksi saat ini [29].

Secara tidak sengaja PVC ditemukan pada tahun 1835 oleh Henri Victor Regnault dan Eugen Baumann pada tahun 1872. Pada awal abad ke 20, seorang ahli kimia dari Rusia, bernama Fritz Klatte dan Ivan Ostromislensky dari perusahaan kimia Griesheim-Elektron Jerman mencoba menerapkan penggunaan PVC untuk produk komersial. PVC bisa dibuat lebih elastis dan fleksibel dengan menambahkan *plasticizer*, umumnya *ftalat*. PVC yang fleksibel umumnya dipakai sebagai bahan pakaian, perpipaan, atap, dan insulasi kabel listrik.

PVC diproduksi dengan cara polimerisasi monomer vinil klorida ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$) dan 57% massanya adalah klor (Cl). Produk proses polimerisasi adalah PVC murni. Sebelum PVC menjadi produk akhir, biasanya membutuhkan konversi dengan menambahkan *heat stabilizer*, *UV stabilizer*, pelumas, *plasticizer*, bahan penolong proses, pengatur termal, pengisi, bahan penahan api, *biosida*, bahan pengembang, dan pigmen pilihan.



Gambar 2.7 Plastik PVC [30].



2.5.2 Polietilena (PE)

Polietilena (PE) adalah polimer yang terdiri dari rantai panjang monomer etilena (IUPAC: etena). Polietilena pertama kali disintesis oleh ahli kimia Jerman bernama Hans von Pechmann yang melakukannya secara tidak sengaja pada tahun 1939 ketika sedang memanaskan diazometana. Ketika koleganya, Eugen Bamberger dan Friedrich Tschirner mencari tahu tentang substansi putih, berkilau, mereka mengetahui bahwa yang ia buat mengandung rantai panjang $-CH_2-$ dan menamakannya polimetilena. Molekul etena (C_2H_4) adalah $CH_2=CH_2$. Dua grup CH_2 bersatu dengan ikatan ganda. Polietilena dibentuk melalui proses polimerisasi dari etena.



Gambar 2.8 Kantong plastik yang dibuat dari polietilena [31]

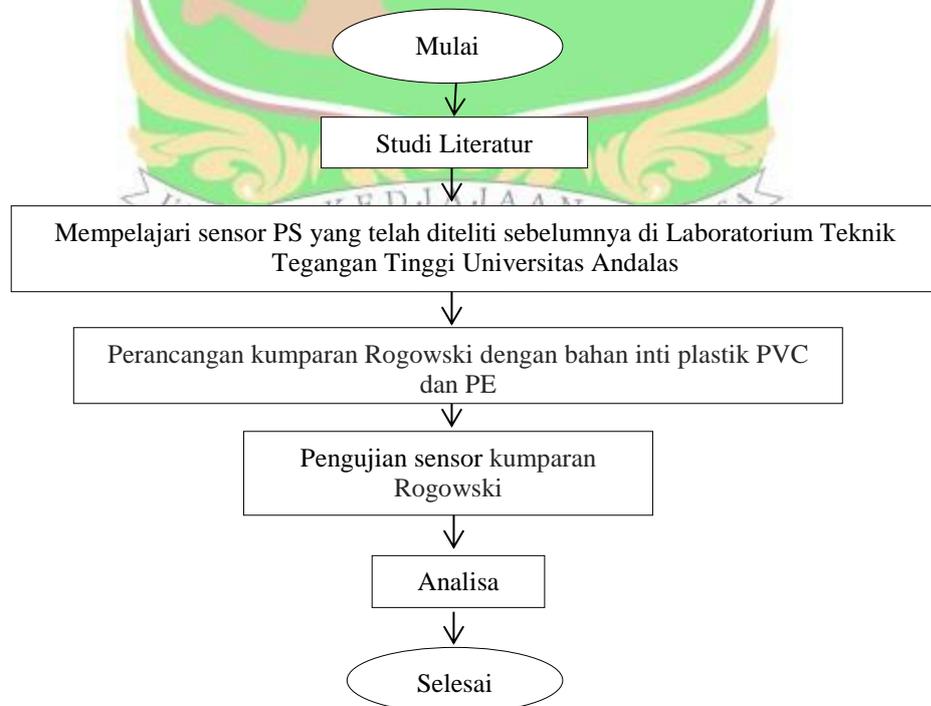
BAB III Metode Penelitian

3.1 Pendahuluan

Pada bab ini diuraikan secara lengkap tahapan penelitian, diagram alir penelitian, diagram alir perancangan sensor, peralatan penunjang dan perangkat lunak penunjang.

3.2 Diagram Alir Penelitian

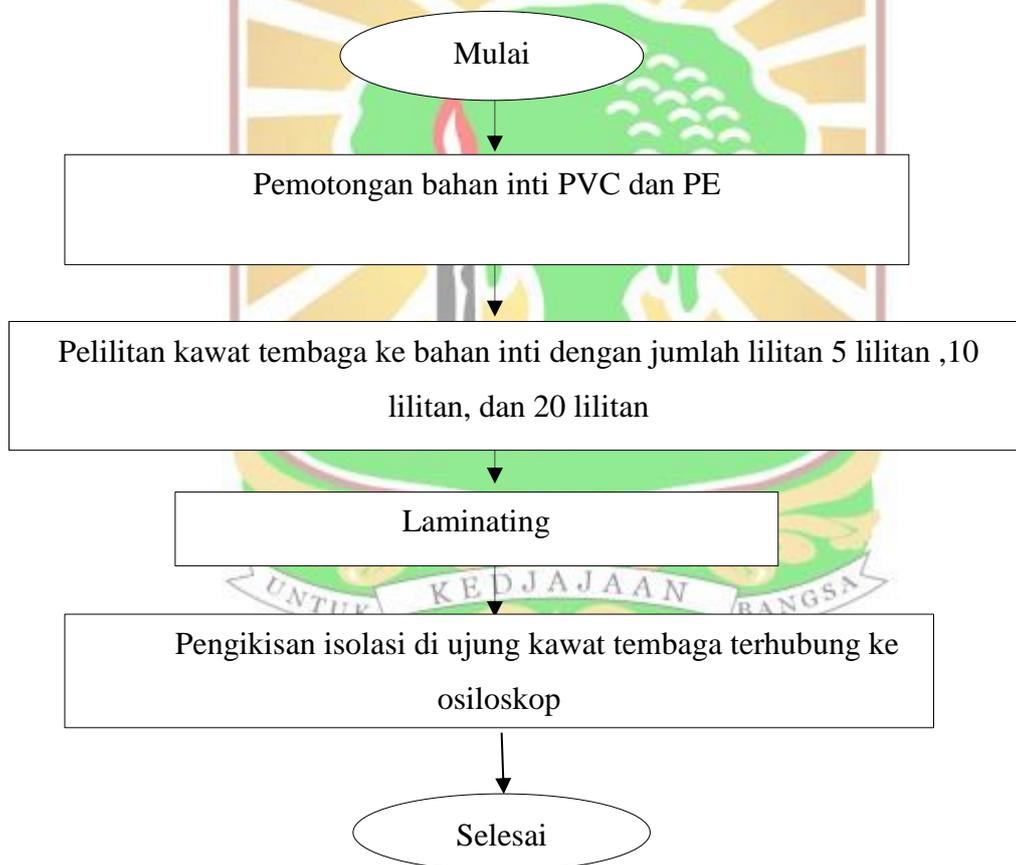
Gambar 3.1 menjelaskan diagram alir dalam penelitian ini, penelitian dimulai dengan studi literatur yaitu mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini, seperti fenomena PS, pengukuran PS secara umum dan pengukuran PS menggunakan metode gelombang elektromagnetik, serta mempelajari kumparan Rogowski sebagai topik dalam penelitian ini dan mempelajari sensor kumparan Rogowski yang telah diteliti sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas. Setelah itu dilakukan perancangan sensor yang diajukan dalam penelitian ini dan dilakukan kalibrasi sensor melalui uji respon magnitudo dan respon frekuensi agar dapat diketahui sensitifitas sensor terhadap pengujian sinyal PS. Selanjutnya data yang didapat akan dianalisa serta ditarik kesimpulan.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3 Diagram Alir Perancangan Sensor Kumparan Rogowski

Gambar 3.3 memperlihatkan diagram alir dari perancangan sensor kumparan Rogowski. Sensor ini terdiri dari dua bagian yaitu inti non-magnetik dan lilitan berupa kawat tembaga yang melilit bahan inti. Bahan inti sensor terbuat dari bahan plastik Polivinilklorida (PVC) dan plastik Polietilena (PE). Bahan inti ini kemudian dililit dengan kawat tembaga yang dililitkan sebanyak 5 lilitan, 10 lilitan, dan 20 lilitan pada tiap bahan inti. Selanjutnya dilakukan proses laminating, agar pemasangan lilitan pada bahan inti dapat terpasang dengan erat. Selanjutnya dilakukan pengikisan isolasi pada ujung kawat tembaga yang akan terhubung ke osiloskop, tujuannya agar visualisasi pembacaan sinyal PS oleh sensor kumparan Rogowski dapat ditampilkan dengan baik melalui osiloskop.

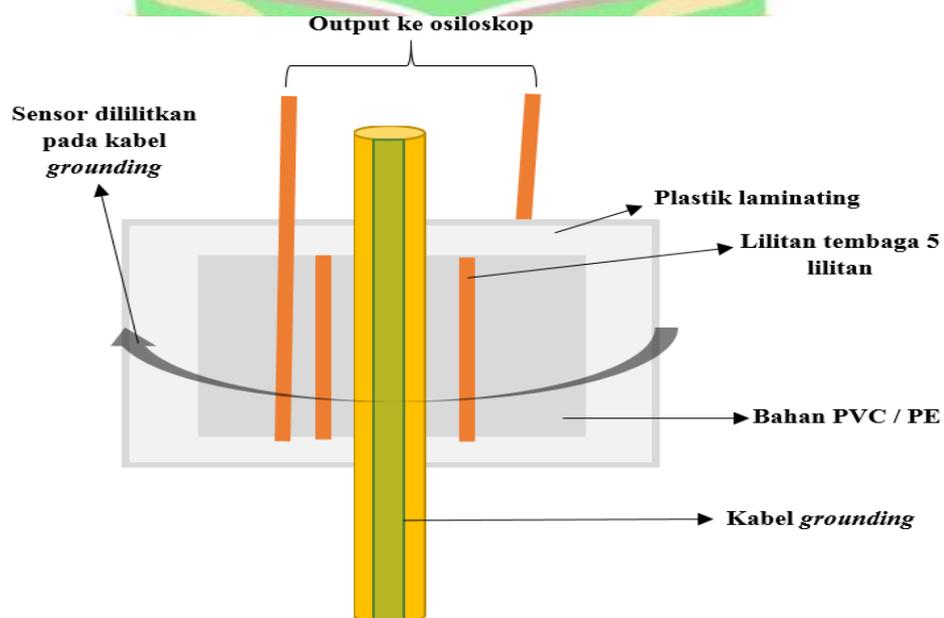


Gambar 3.2 Diagram alir dari perancangan sensor kumparan Rogowski

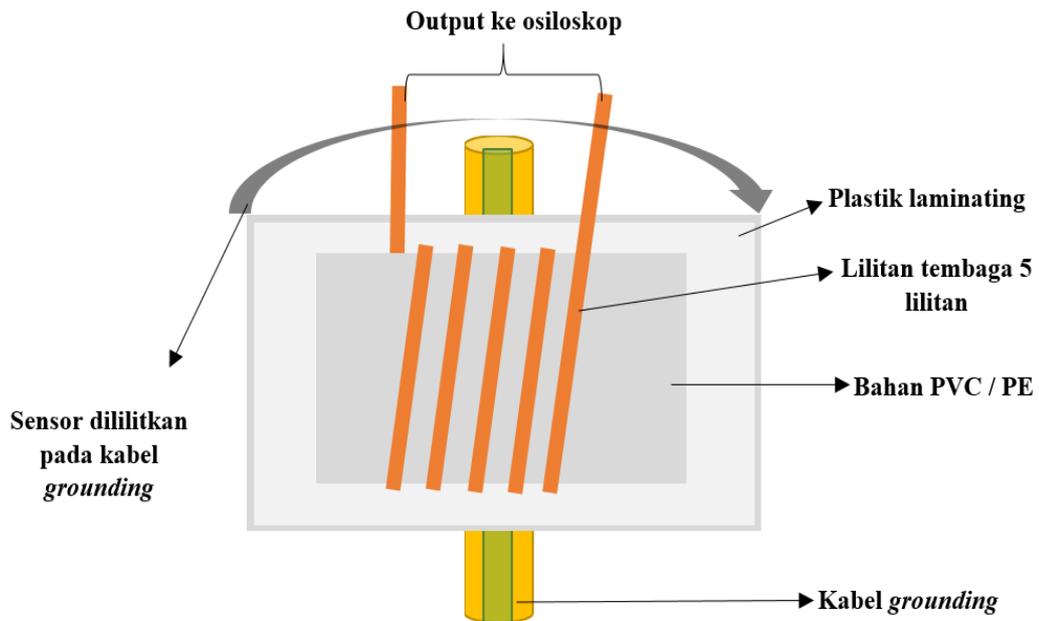
3.4 Perancangan Kumparan Rogowski

Gambar 3.2 dan 3.3 merupakan rancangan sketsa kumparan Rogowski, dimana pada rancangan ini, memakai bahan dari plastik Polivinilklorida (PVC) dan plastik Polietilen (PE) sebagai inti non-magnetik dengan ukuran lembaran bahan

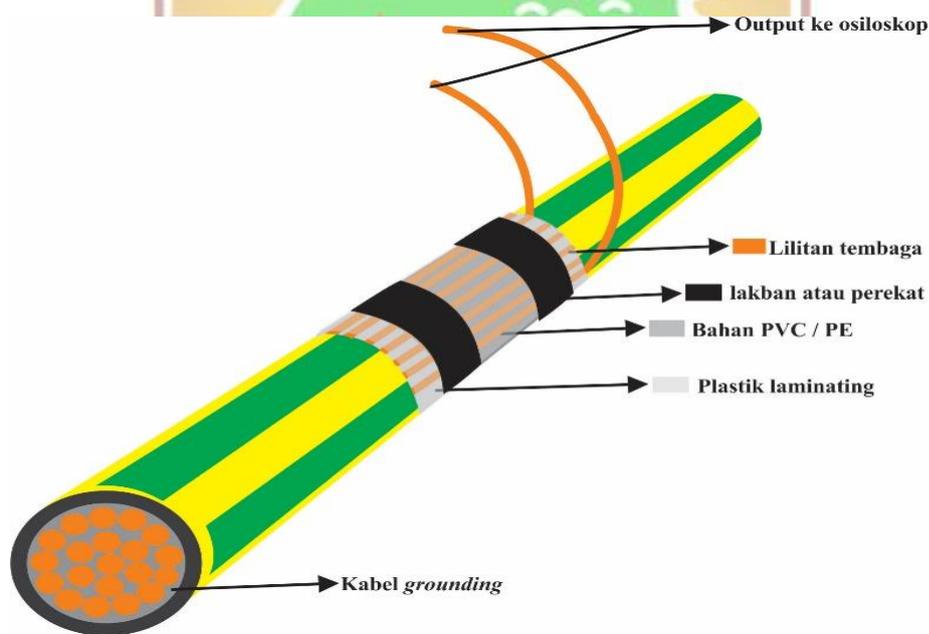
yaitu panjang sebesar 7,5 cm dan lebar sebesar 5 cm, dimana ukuran ini disesuaikan dengan ukuran sensor kumparan rogowski yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya. Pada perancangannya, kawat tembaga yang berfungsi sebagai penangkap sinyal PS di pasang dengan cara melilitkan ke bahan PVC dan PE dengan diameter kawat 0,25 mm. Pemasangannya dengan variasi 5 lilitan, 10 lilitan, dan 20 lilitan dari masing-masing bahan PVC dan PE, sehingga dari perancangan ini akan dihasilkan 6 buah kumparan Rogowski. Keluaran kawat tembaga yang akan terhubung ke osiloskop dilakukan pengikisan isolasi pada ujungnya, hal ini bertujuan agar osiloskop dapat menampilkan sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski dengan baik. Pada diameter dalam sensor kumparan Rogowski sebaiknya dibuat sekecil mungkin dan batasnya tergantung pada ketebalan kabel yang melewati sensor sehingga pada penelitian ini diameter dalam yang digunakan yaitu 1 cm dan diameter luar yang digunakan pada penelitian ini sebesar 1,1 cm. Semakin besar panjang dan diameter luar sensor maka fluks yang dihasilkan oleh lilitan juga semakin besar, tapi tetap harus mempertimbangkan panjang kawat untuk lilitan yang digunakan karena dengan panjang dan diameter luar sensor yang berbeda maka penggunaan kawat untuk lilitan juga berbeda [27]. Selanjutnya dilakukan proses laminating sebagai pelapis sensor agar belitan tembaga lebih terpasang erat terhadap bahan inti non-magnetik. Sehingga pengujian sensor kumparan Rogowski dapat dilakukan dengan baik.



Gambar 3.3 Tampilan dalam kumparan rogowski



Gambar 3.4 Tampilan luar kumparan Rogowski



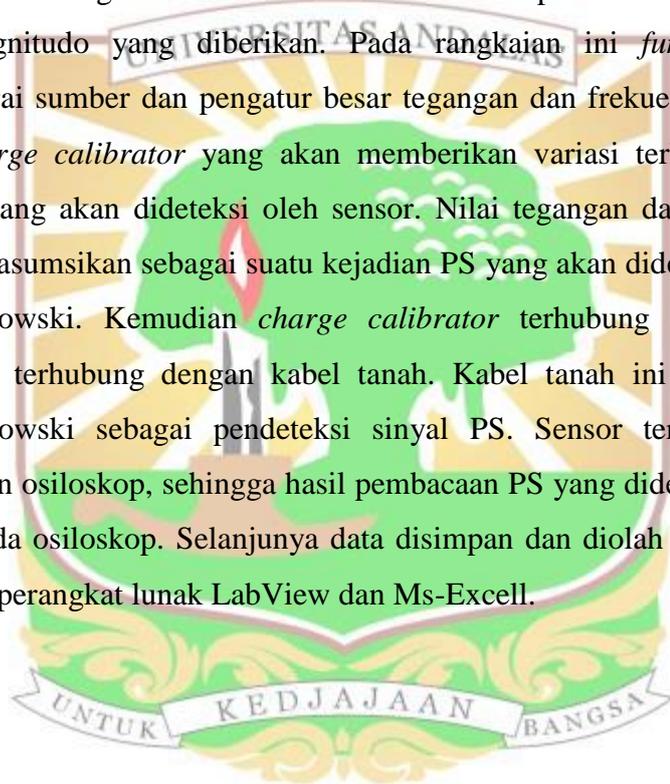
Gambar 3.5 Tampilan pemasangan kumparan Rogowski pada kabel pentanahan

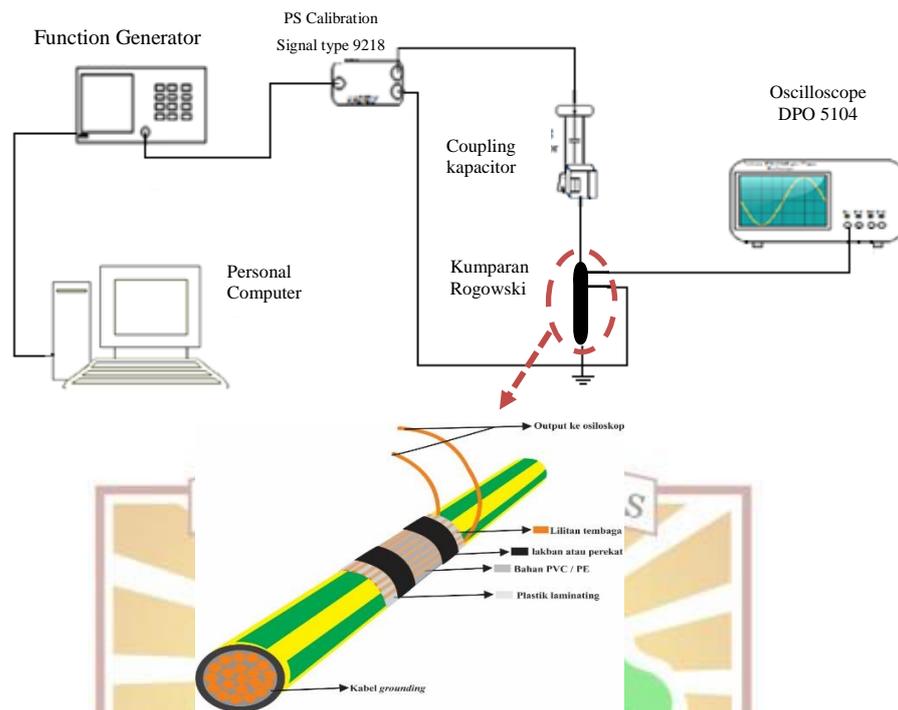
3.5 Pengujian Sensor Kumparan Rogowski

Pada penelitian ini bentuk pengujian terhadap sensor kumparan Rogowski dilakukan dengan respon frekuensi dan respon magnitudo dari gelombang peluahan sebagian. Pertama sinyal PS dibangkitkan melalui *function* generator yang akan digunakan sebagai sinyal penguji sensitifitas sensor kumparan Rogowski. Sinyal PS akan dideteksi oleh kumparan Rogowski yang telah dipasang pada kabel pentanahan.

Sebuah osiloskop dengan spesifikasi yang tinggi digunakan dalam proses pengambilan data PS dibantu oleh perangkat lunak LabView yang telah terinstal pada Personal Computer (PC). Sistem pengukuran peluahan sebagian yang dirancang dalam penelitian ini adalah pengukuran PS dengan memanfaatkan kejadian PS yang menghasilkan induksi elektromagnetik sehingga induksinya dapat dirasakan oleh kumparan Rogowski dan bentuk sinyalnya dapat divisualisasikan di osiloskop dan kemudian dilakukan pengukuran dan dianalisa.

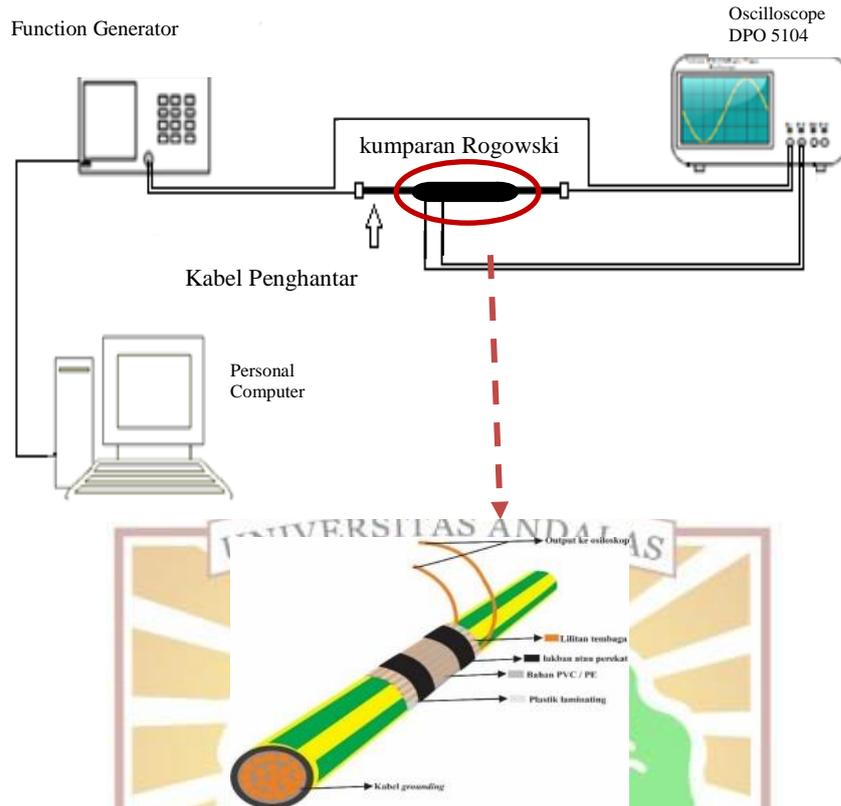
Gambar 3.6 Rangkaian pengujian sensor terhadap respon magnitudo, tujuannya untuk mengetahui sensitifitas sensor kumparan Rogowski terhadap perubahan magnitudo yang diberikan. Pada rangkaian ini *function generator* berfungsi sebagai sumber dan pengatur besar tegangan dan frekuensi yang menjadi input bagi *charge calibrator* yang akan memberikan variasi terhadap perubahan besar muatan yang akan dideteksi oleh sensor. Nilai tegangan dan frekuensi yang dibangkitkan diasumsikan sebagai suatu kejadian PS yang akan dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski. Kemudian *charge calibrator* terhubung dengan *coupling capacitor* yang terhubung dengan kabel tanah. Kabel tanah ini dipasang sensor kumparan Rogowski sebagai pendeteksi sinyal PS. Sensor tersebut terhubung langsung dengan osiloskop, sehingga hasil pembacaan PS yang dideteksi oleh sensor akan tampil pada osiloskop. Selanjutnya data disimpan dan diolah melalui PC yang telah terpasang perangkat lunak LabView dan Ms-Excell.





Gambar 3.6 Rangkaian pengujian sensor terhadap respon magnitudo

Gambar 3.7 merupakan rangkaian pengujian sensor terhadap respon frekuensi, tujuannya yaitu untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi PS dengan memberikan variasi frekuensi, sehingga dapat diketahui skala frekuensi seberapa sensor bisa mendeteksi sinyal PS. Pada pengujian ini tegangan dan frekuensi yang dibangkitkan diasumsikan sebagai suatu kejadian PS yang dibangkitkan oleh *function generator*. Kejadian PS yang terjadi tersebut akan dirasakan oleh sensor kumparan Rogowski yang dipasang pada kabel tanah. Sensor kumparan Rogowski terhubung dengan osiloskop melalui CH2 yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan yang dirasakan oleh kumparan Rogowski akan ditampilkan pada osiloskop sehingga dapat terlihat bentuk gelombang serta nilai dari tegangan yang didapatkan. Nilai dan gelombang yang terbaca pada osiloskop akan disimpan PC menggunakan perangkat lunak LabView, perangkat lunak ini berfungsi pengontrol jalannya rangkaian pengujian, menampilkan hasil pengujian, dan menyimpan hasil pengujian. Setelah itu data yang didapat akan diolah pada Microsoft Office Excel 2016.



Gambar 3.7 Rangkaian pengujian sensor terhadap respon frekuensi

3.5 Uraian Peralatan

3.5.1 *Function Generator*

Function generator berfungsi untuk mengatur tegangan input transformator agar didapatkan variasi nilai output transformator seperti yang diinginkan.

3.5.2 *Coupling kapasitor*

Coupling kapasitor berfungsi sebagai penghubung *function generator* yang mengalirkan tegangan untuk pengujian PS menuju osiloskop sebagai wadah untuk membaca hasil pengukuran PS.

3.5.3 Osiloskop DPO 5104

Osiloskop TDS 5104 merupakan osiloskop yang sudah dilengkapi *OS Windows 7* didalamnya dan dilengkapi dengan perangkat lunak LabView 2012 sehingga dapat meningkatkan efisiensi pengukuran tanpa menggunakan tambahan PC. Osiloskop ini digunakan untuk menampilkan gelombang pulsa peluahan sebagian

yang terjadi serta merekan aktifitas PS. Osiloskop ini terhubung dengan probe tegangan P6015A dan output dari pembacaan PS detektor.

3.5.4 Kumparan Rogowski

Kumparan Rogowski berfungsi sebagai sensor pengukuran PS. Gambar 3.3 dan 3.4 memperlihatkan rancangan kumparan Rogowski yang akan dipakai dalam pengukuran PD pada penelitian ini. Dimana kumparan Rogowski akan dipasang pada kabel pentanahan. Pada kumparan Rogowski ini dilakukan pengujian sinyal PS dengan variasi jumlah lilitan dari bahan PVC dan PE sehingga dapat di analisa variasi terbaik dalam pengukuran PD.

3.5.5 Perangkat Lunak LabView

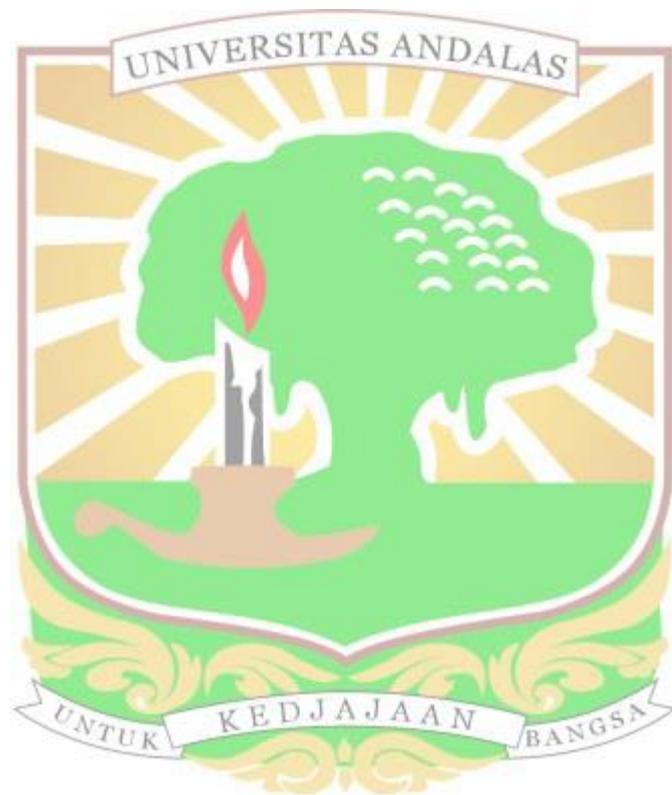
Perangkat lunak LabView digunakan sebagai perangkat lunak pembantu untuk merekam dan pengolahan data PS dalam pengujian ini. LabView merupakan perangkat lunak dengan basis algoritma rangkaian. Pada penelitian ini perangkat lunak yang digunakan adalah LabView 2012.

3.6 Pengambilan Data Kalibrasi Sensor Kumparan Rogowski

Pada rangkaian pengukuran PS yang telah dirancang, pengambilan data dilakukan dengan pemakaian perangkat lunak LabView 2012 yang telah terpasang pada PC atau laptop. Perangkat lunak ini terhubung dengan alat ukur osiloskop sehingga data dapat disimpan dan dapat dianalisa pada PC atau laptop. Pada saat pengukuran, sensor kumparan Rogowski dipasang pada kabel pentanahan dan terhubung seri dengan kabel pentanahan *coupling* kapasitor pengukuran PS Haefely, sehingga data pulsa PS dapat dibaca dan divisualisasikan melalui osiloskop yang terhubung dengan sensor kumparan Rogowski dan disimpan melalui perangkat lunak LabView 2012.

Data yang diambil yaitu data pembacaan pulsa PS terhadap respon magnitudo dan respon frekuensi menggunakan kumparan Rogowski dengan beberapa variasi lilitan dari masing-masing bahan PVC dan PE. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sensitifitas sensor terhadap pengukuran PS sehingga bisa didapatkan variasi yang cocok terhadap pengukuran PS. Selanjutnya data yang telah

tersimpan melalui perangkat lunak LabView akan diolah melalui Microsoft Office Excel 2016.



BAB IV Hasil dan Pembahasan

4.1 Pendahuluan

Pengukuran PS diawali dengan merancang 6 buah sensor kumparan Rogowski dengan variasi bahan inti yaitu Polivinilklorida (PVC) dan Polietilena (PE), dimana setiap bahan inti divariasikan jumlah lilitan tembaga sebanyak 5 lilitan, 10 lilitan, dan 20 lilitan. Setelah itu, sensor ini akan dikalibrasi dengan sistem pengukuran PS milik Haefely Instrument yang ada di laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas untuk melihat karakteristik sinyal PS dari keluaran sensor yang telah dibuat. Tujuannya agar bisa didapatkan variasi sensor kumparan Rogowski yang paling baik dalam pengukuran PS. Selanjutnya untuk menganalisa hasil kalibrasi sensor digunakan bantuan perangkat lunak LabView dan Microsoft Office Excel 2016.

4.2 Perancangan Sensor Kumparan Rogowski

Perancangan kumparan Rogowski ini diawali dengan proses pembuatan sensor yang sesuai dengan yang telah dirancang yaitu variasi bahan inti non-magnetik PE dan PVC. Dimana di setiap bahan inti dililitkan tembaga yang dipasang seragam dengan variasi 5 lilitan, 10 lilitan, dan 20 lilitan, maka dihasilkan 6 buah sensor kumparan Rogowski. Kumparan Rogowski tersebut di pasang pada kabel pentanahan. Setelah itu dilakukan proses kalibrasi magnitudo dan frekuensi dengan peralatan pengukuran PS milik Haefely Instrument yang ada di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas, sehingga didapatkan sensor dengan bahan inti non-magnetik dan jumlah lilitan yang terbaik dalam pengukuran PS. Hal ini dilakukan untuk menemukan komposisi terbaik dan paling sederhana sehingga didapatkan sensor pengukuran PS yang lebih fleksibel, efektif dan sederhana dalam pengukuran PS. Tabel 4.1 memperlihatkan spesifikasi dari sensor kumparan Rogowski yang dirancang:

Tabel 4.1 Spesifikasi sensor kumparan Rogowski	
Jari-jari dalam (a)	0,5 cm
Jari-jari luar (r)	0,55 cm
Jumlah lilitan (N)	5, 10, 20
Jarak antara lilitan	0,6 cm, untuk 5 lilitan 0,4 cm, untuk 10 lilitan 0,2 cm, untuk 20 lilitan
Permeabilitas udara (μ)	$4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{H}{m}$
Tinggi (W)	7,5 cm
Bahan inti	PE, PVC
Suseptibilitas magnetik bahan inti	PE = -9.67×10^{-6} PVC = -10.71×10^{-6}
Diameter kawat tembaga	0,25 mm

Adapun variasi sensor kumparan Rogowski yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Variasi bahan inti dan jumlah lilitan sensor kumparan Rogowski yang telah dirancang	
Gambar Sensor kumparan Rogowski	Keterangan
	PE 5 (Polietilena 5 lilitan)
	PE 10 (Polietilena 10 lilitan)

		PE 20 (Polietilena 20 lilitan)
		PVC 5 (Polivinilklorida 5 lilitan)
		PVC 10 (Polivinilklorida 10 lilitan)
		PVC 20 (Polivinilklorida 20 lilitan)

4.3 Kalibrasi Sensor kumparan Rogowski

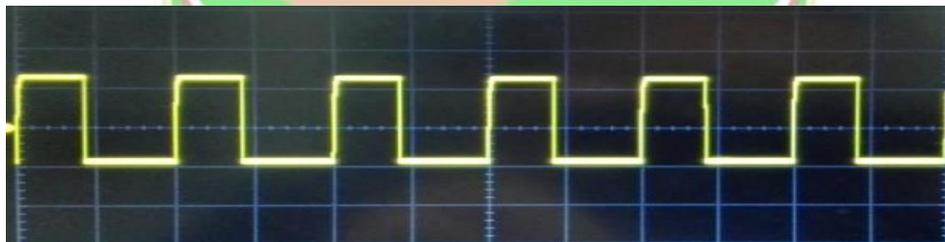
Sensor kumparan Rogowski yang telah dibuat, dilakukan proses kalibrasi terlebih dahulu. Kalibrasi ini bertujuan untuk membuat suatu sistem pengukuran PS yang sederhana namun mendekati dengan sistem pengukuran PS yang telah diteliti sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas . Pada penelitian ini sensor kumparan Rogowski dikalibrasi dengan sistem pengukuran PS yang dimiliki oleh Haefely Instrument. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan PS *Signal Calibration type 9218* milik Haefely. Gambar 4.1 memperlihatkan bentuk gelombang masukan yang dibangkitkan oleh *function generator* sebagai sumber pulsa PS, dimana nilai tegangan dan frekuensi yang dibangkitkan diasumsikan sebagai suatu kejadian PS yang akan dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski. Sinyal PS yang terdeteksi oleh sensor ini, selanjutnya akan dilakukan variasi

terhadap besaran magnitudo dan frekuensi, sehingga dapat dilihat sensitifitas dari sensor kumparan Rogowski mendeteksi sinyal PS terhadap masukan yang diberikan.

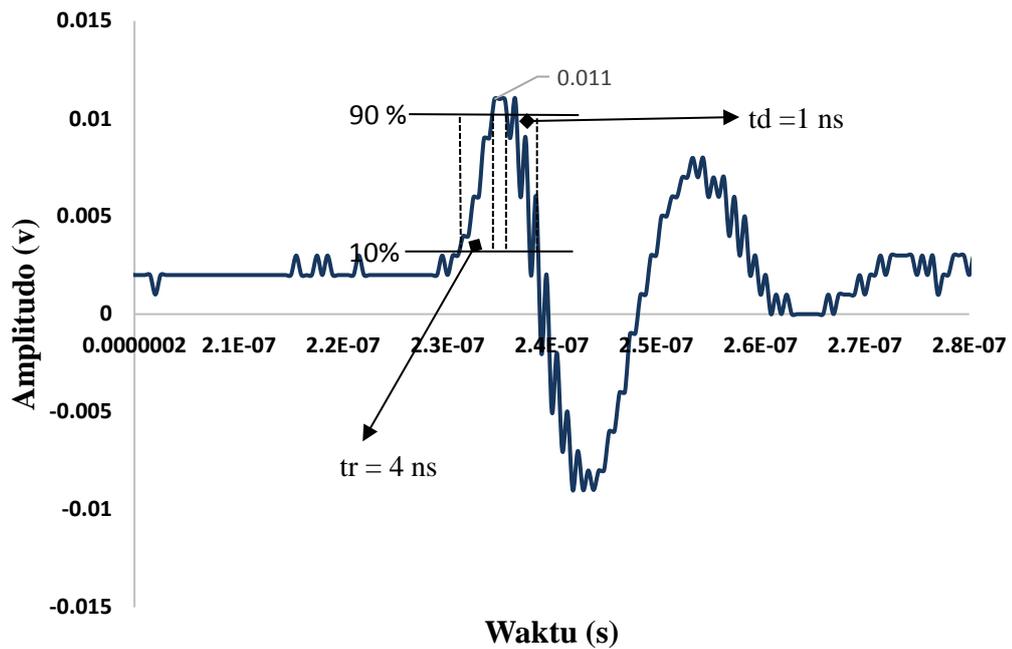
Aktifitas peluahan sebagian merupakan gelombang impuls yang memiliki frekuensi yang tinggi, yaitu sekitar 3 – 300 MHz. Gelombang impuls merupakan gelombang yang memiliki karakteristik *rise time* (t_r) dan *time decay* (t_d) yang sangat singkat yaitu dalam ukuran nano sekon (ns). Gambar 4.2 memperlihatkan sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski dengan inti polietilena (PE) dan Gambar 4.3 memperlihatkan sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski inti polivinilklorida (PVC). Bentuk gelombang PS yang dideteksi sensor pada penelitian ini hampir sama dengan bentuk gelombang PS hasil pendeteksian sensor PS yang diteliti pada penelitian sebelumnya yang merupakan sistem pengukuran PS portable, dimana hasil pengujiannya dianggap telah memiliki keakuratan yang sama dengan sistem pengukuran PD Haefely seperti yang terlihat pada gambar 4.4 [32]. Namun, sinyal PS yang terdeteksi mengalami osilasi, hal ini disebabkan karena rangkaian tersusun atas komponen R L C. Pada pengujian ini sensor yang dipakai yaitu PVC 5 dan PE 5.

Gambar 4.2 dan 4.3 menampilkan karakteristik sinyal PS yang dideteksi sensor kumparan Rogowski, dimana *time rise* (t_r) adalah waktu naik antara 10% dan 90% dari puncak dan *time decay* (t_d) yaitu waktu peluahan antara 90% dari amplitudo di bagian depan pulsa dan 10% dari puncak ke ekor gelombang [32]. Pada pendeteksian sensor kumparan Rogowski dengan inti PE didapatkan nilai t_r sebesar 4 ns dan t_d sebesar 1ns. Sedangkan pendeteksian sinyal PS oleh sensor kumparan Rogowski inti PVC didapatkan nilai t_r sebesar 12,6 ns dan t_d sebesar 10,5 ns. Nilai puncak dari gelombang impuls PS akan dideteksi sebagai satu kejadian PS. Pendeteksian nilai puncak ini dilakukan pada osiloskop DPO 5104 yang digunakan dengan menggunakan fitur *peak detect*. Pada penelitian sensor PS yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan nilai *rise time* sebesar 0,16 ns dan *time decay* sebesar 0,16 ns [32]. Jika dibandingkan dengan karakteristik sinyal PS yang didapatkan dari sensor kumparan Rogowski, nilai *rise time* dan *time decay* ini jauh lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh waktu gelombang pulsa masukan dari *function generator* melewati sensor PS berbeda, sehingga didapatkan perbedaan karakteristik gelombang impuls yang didapatkan.

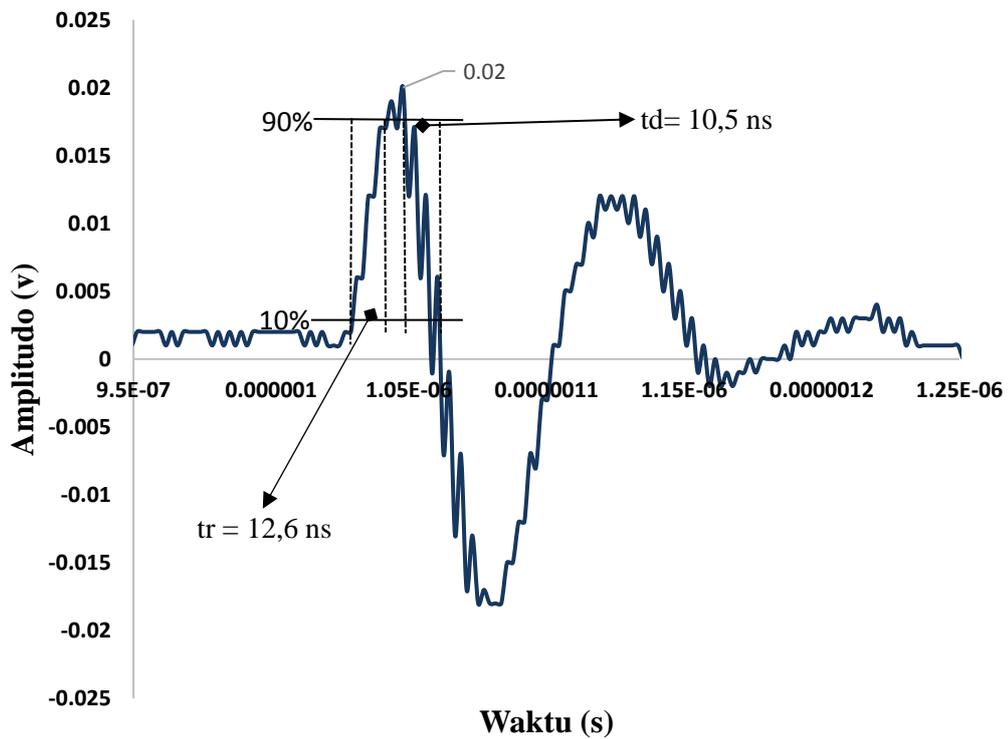
Gambar 4.2 dan 4.3 memperlihatkan bahwa pendeteksian sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski inti PVC memiliki sensitifitas yang lebih baik dibandingkan dengan sensor kumparan Rogowski inti PE. Hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai pembacaan amplitudo yang dideteksi oleh sensor, dimana amplitudo yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski inti PVC sebesar 0,02 mV dan inti PE sebesar 0,011 mV. Hal ini disebabkan karena PVC termasuk dalam senyawa polar yang memiliki ikatan dipol dan PE yang termasuk dalam senyawa non polar. Selain itu, bahan PVC memiliki kemampuan termagnetisasi lebih baik daripada PE. Hal ini dapat dilihat dari perbandingan nilai suseptibilitas magnetik dari kedua bahan inti ini. Suseptibilitas magnetik ini menunjukkan tingkat kemagnetan suatu bahan dalam respons terhadap medan magnet yang diterapkan. Merupakan parameter yang terkait erat pada permeabilitas suatu bahan, dimana nilai suseptibilitas magnetik berbanding lurus terhadap nilai permeabilitas relatif suatu bahan (persamaan 2.4) dan berbanding lurus terhadap besarnya tegangan keluaran oleh sensor kumparan Rogowski (persamaan 2.2). Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetiknya, nilai suseptibilitas magnetik PVC sebesar -10.71×10^{-6} dan PE sebesar -9.67×10^{-6} [33]. Oleh sebab itu, Berdasarkan bahan inti dapat dikatakan sensitifitas sensor kumparan Rogowski dengan bahan inti PVC lebih baik dibandingkan dengan bahan inti PE ketika terjadi PS.



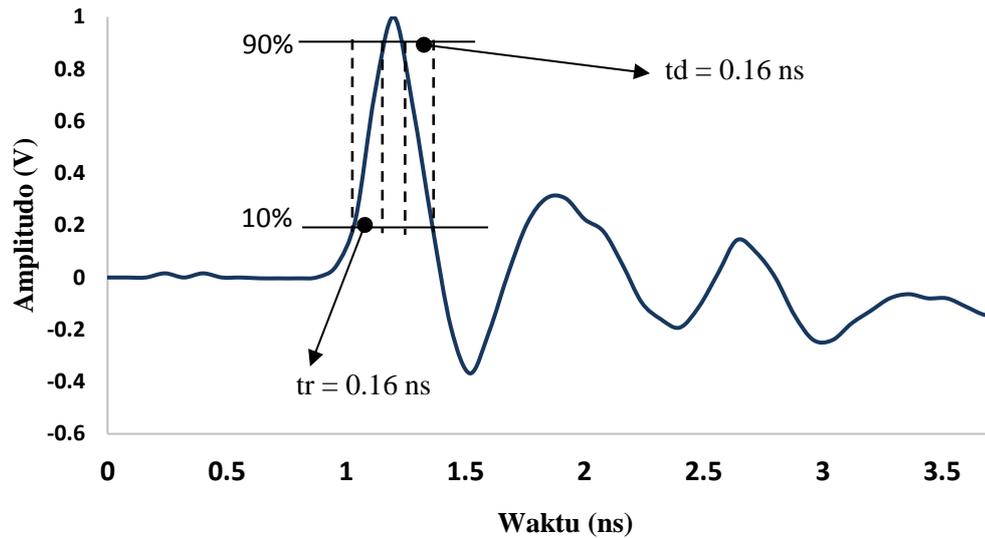
Gambar 4.1 Gelombang yang dibangkitkan melalui *function generator*



Gambar 4.2 Sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski dengan inti polietilena (PE)



Gambar 4.3 Sinyal PS yang dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski inti polivinilklorida (PVC)



Gambar 4.4 Sinyal PS yang dideteksi oleh sensor sensor PS induktif yang telah diteliti sebelumnya [32].

4.3.1 Kalibrasi Sensor Kumbaran Rogowski dalam Peluahan Muatan (Pico Coulomb)

Untuk mengetahui sensitifitas dari sensor sebelum melakukan pengukuran PS, sensor kumbaran Rogowski di kalibrasi terlebih dahulu untuk menyesuaikan kemampuan sensor dengan sensor yang telah diteliti sebelumnya. Kalibrasi magnitude dilakukan dengan menggunakan *Low Voltage Calibration Signal Coupler (FC) Type 9218* milik Haefely Instrument dengan menginputkan gelombang pulsa yang dibangkitkan oleh *function generator* dengan variasi tegangan mulai dari $-20 V_{pp}$ sampai $20 V_{pp}$ dan masukan frekuensi sebesar 10 MHz. Tegangan dan frekuensi yang dibangkitkan diasumsikan sebagai kejadian PS.

Kalibrasi magnitude ini dilakukan pada enam jenis variasi kumbaran Rogowski yaitu bahan inti PE dan PVC dengan variasi jumlah lilitan 5, 10, dan 20. Tujuannya adalah untuk mendapatkan variasi sensor kumbaran Rogowski terbaik dari keenam sensor yang telah dibuat untuk digunakan pada pengukuran PS. Tujuan dari kalibrasi dalam peluahan muatan ini adalah melihat respon dari sensor kumbaran Rogowski terhadap kenaikan magnitudo PS yang terjadi. Pada rangkaian kalibrasi sensor kumbaran Rogowski respon magnitude, gelombang pulsa dibangkitkan oleh *function generator* langsung menuju *Low Voltage Calibration Signal Coupler (FC) Type 9218*, disini tegangan akan dikalibrasi dalam nilai muatan pico coulomb, dimana

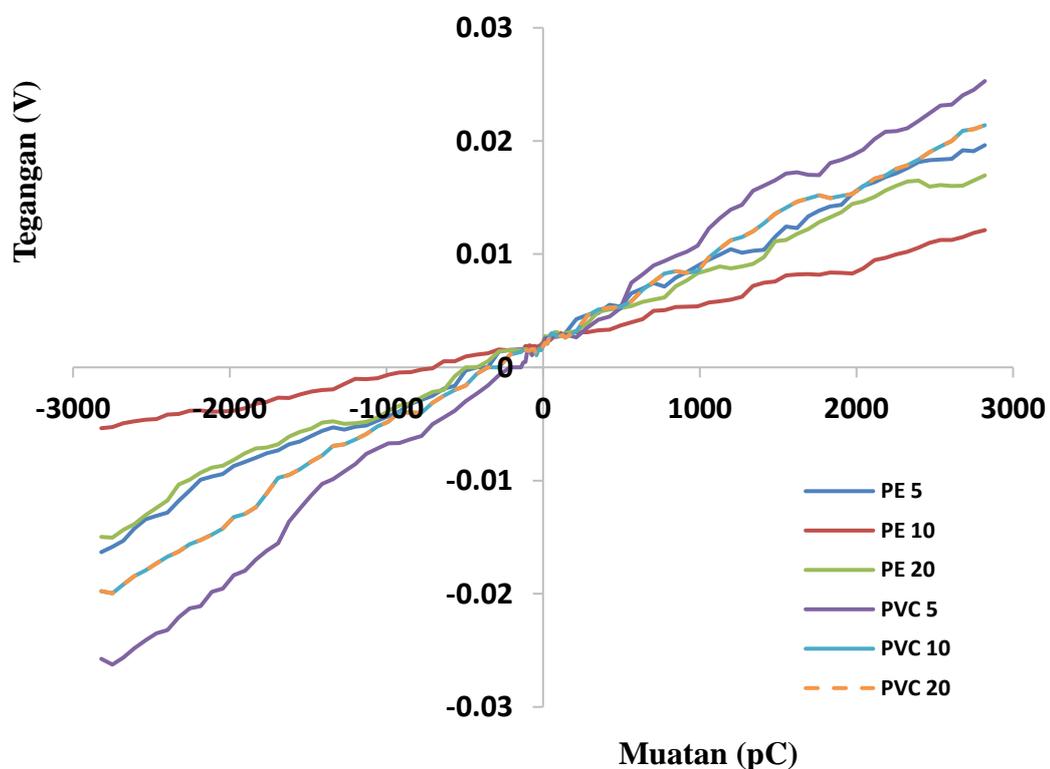
tegangan keluaran *function generator* dikalikan dengan 141 pico coulomb dan keluarannya dalam bentuk muatan yang telah dikalibrasi menuju *coupling* kapasitor, dimana sensor kumparan Rogowski dipasang pada kabel keluaran *coupling* kapasitor yang hasilnya diukur dan divisualisasikan pada CH1 di osiloskop. Hasil kalibrasi ini disimpan dan diolah pada Personal Computer (PC) yang terhubung ke rangkaian dengan bantuan perangkat lunak LabView dan Microsoft Office Excel 2016 yang telah terpasang didalamnya.

Gambar 4.5 memperlihatkan grafik respon dari 6 sensor kumparan Rogowski pada proses kalibrasi magnitudo. Hasil dari kalibrasi ini didapatkan dengan memasang sensor kumparan Rogowski pada kabel penghantar keluaran *coupling* kapasitor yang outputnya dibaca melalui osiloskop dan dimunculkan pada PC yang telah terinstal perangkat lunak LabView. Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa respon sensor kumparan Rogowski terhadap kenaikan magnitudo PS yang terjadi bersifat linear tetapi terdapat perbedaan dalam nilai magnitudo yang didapatkan pada setiap sensor. Dalam pengukuran PS, sifat linear dari sensor inilah yang dibutuhkan, sensor dengan kelinearitasan yang tinggi akan menentukan sensitifitas sensor dalam pengukuran PS, karena pada kenyataan dilapangan yang terjadi saat pengukuran magnitudo kejadian PS yang terjadi tidaklah konstan, melainkan berubah ubah tergantung sumber tegangannya. Sensor yang dirancang harus memiliki respon yang linier mengikuti perubahan magnitudo PS yang terjadi. Pada dasarnya, linieritas ini dapat dapat dilihat pada persamaan 2.2, dimana tegangan yang dibaca oleh sensor berbanding lurus terhadap perubahan muatan terhadap waktu. Oleh sebab itu, ketika muatan yang dihasilkan oleh PS semakin besar dan mengalir melalui konduktor yang telah dipasang sensor kumparan Rogowski, maka sensor akan merasakan induksi elektromagnetik yang akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan rogowski. Besarnya ggl dipengaruhi oleh perubahan fluks magnetik yang melewati sensor. Oleh sebab itu, semakin besar muatan yang melewati sensor maka semakin besar pula tegangan yang akan dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski. Sehingga, ketika digambarkan dalam bentuk grafik muatan terhadap tegangan, maka akan membentuk grafik yang linier.

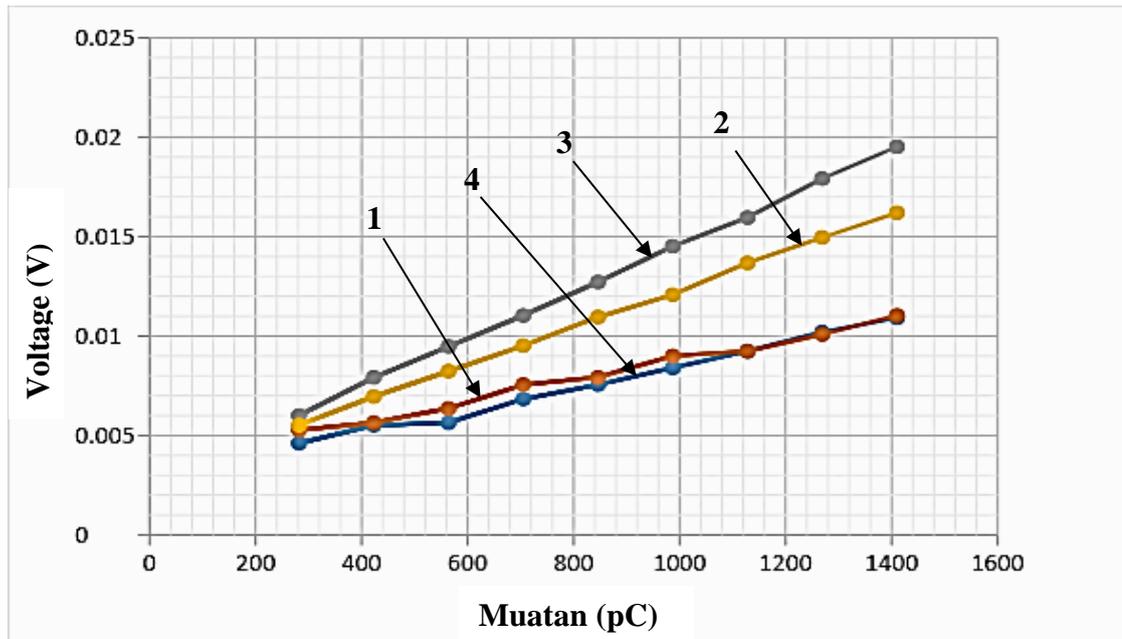
Gambar 4.6 memperlihatkan grafik kalibrasi sensor kumparan Rogowski dalam nilai muatan (pC) yang diteliti sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan

Tinggi Universitas Andalas, dimana juga membentuk grafik yang linier terhadap perubahan nilai muatan (pC). Oleh sebab itu, dapat dikatakan kalibrasi magnitudo pada penelitian kali ini sama dengan penelitian sebelumnya dalam segi bentuk grafik yang dihasilkan dan mendekati dengan sensor PS yang telah di teliti sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas, dimana pada penelitian sebelumnya diteliti tentang sensor Kumparan rogowski setengah silinder dengan variasi diameter lilitan [20].

Berdasarkan variasi bahan inti, dapat dilihat bahwa sensor bahan inti PVC dengan jumlah lilitan 5 (PVC 5) memiliki respon yang paling baik terhadap kenaikan magnitudo PS dengan nilai puncak 16,956 mV pada input muatan sebesar 2820 pC dan diikuti oleh PVC 10 dan PVC 20. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa sensor kumparan Rogowski berbahan inti PVC lebih sensitif dibandingkan dengan bahan inti PE karena nilai magnitudo yang didapatkan lebih tinggi dari PE. Sehingga dapat disimpulkan bahwa bahan inti memiliki pengaruh terhadap sensitifitas pembacaan nilai PS. Namun, dalam segi jumlah lilitan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sensitifitas sensor yang dibuat pada penelitian kali ini.



Gambar 4.5 Grafik kalibrasi sensor kumparan Rogowski dalam nilai muatan (pC)



Keterangan : Variasi Diameter Lilitan

1 = 1,1 mm ; 2 = 0,75 mm ; 3 = 0,4 mm; 4 = 0,25 mm

Gambar 4.6 Grafik kalibrasi sensor kumparan Rogowski dalam nilai muatan (pC) yang diteliti sebelumnya [20]

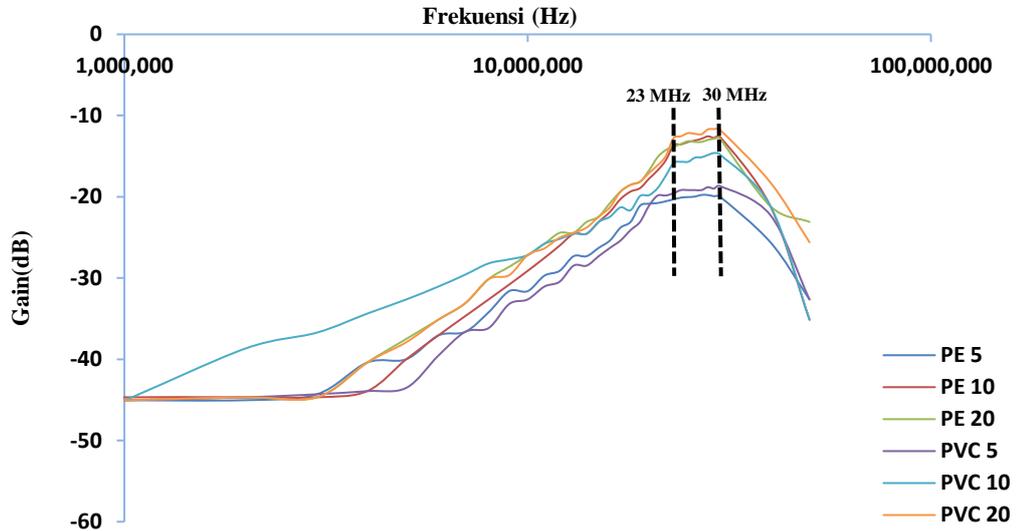
4.3.2 Respon Sensor Kumparan Rogowski Terhadap Frekuensi Sinyal PS

Kalibrasi sensor kumparan Rogowski terhadap respon frekuensi dilakukan dengan tujuan untuk mengukur cakupan frekuensi kerja dari sensor. Hal ini disebabkan karena fenomena PS biasanya terjadi dalam frekuensi yang tinggi, sehingga dibutuhkan pengujian terhadap respon frekuensi ini. Dalam menentukan cakupan frekuensi pada sensor kumparan Rogowski dilakukan dengan memberi input tegangan sinusoidal sebesar 10 V_{pp} dari *function* generator dengan variasi frekuensi mulai dari 10 KHz – 50 MHz. Masukan ini dideteksi oleh sensor kumparan Rogowski lalu direkam dan dianalisa menggunakan perangkat lunak LabView. Pada pengujian respon frekuensi ini, kabel pentanahan tempat pemasangan sensor dilewatkan sinyal PS dengan frekuensi yang telah diatur pada *function* generator, dimana masukan dari *function* generator akan ditampilkan pada osiloskop pada CH1 sedangkan sensor kumparan Rogowski yang dipasang pada kabel pentanahan akan merasakan induksi dari arus yang melewati kabel pentanahan dan hasil pendeteksiannya akan ditampilkan pada osiloskop pada CH2, kemudian data disimpan dan diolah melalui PC dengan bantuan perangkat lunak LabView.

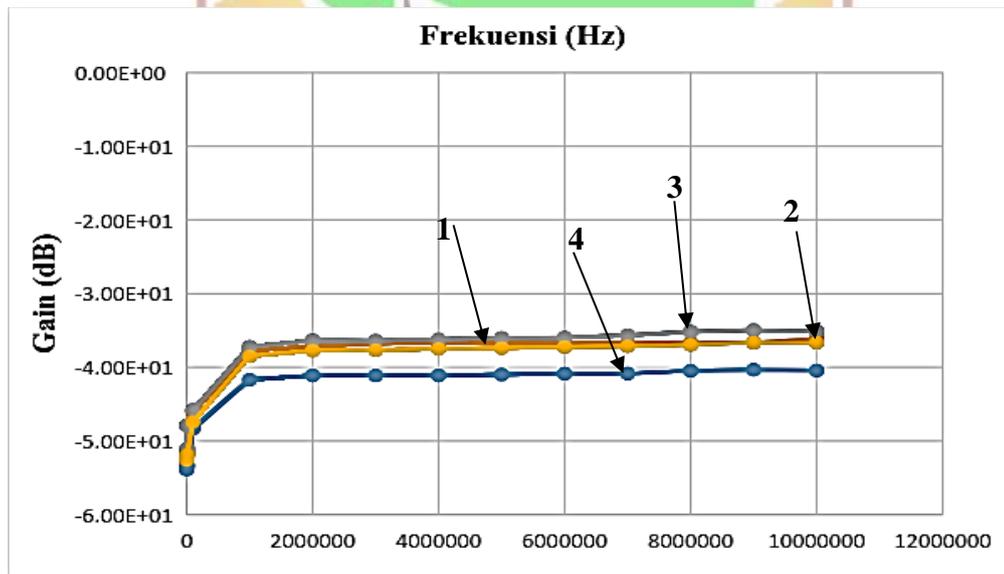
Gambar 4.6 memperlihatkan grafik *gain* dari respon masing-masing sensor kumparan Rogowski yang telah dibuat terhadap variasi nilai frekuensi yang diinputkan, dimana nilai *gain* didapatkan dengan persamaan $(-20) \text{Log} (V_{out}/V_{in})$, dimana V_{out} merupakan keluaran tegangan variasi frekuensi dari kumparan Rogowski dan V_{in} merupakan keluaran tegangan variasi frekuensi dari *function* generator. Berdasarkan gambar dapat dilihat bahwa variasi sensor kumparan Rogowski yang telah dibuat menghasilkan grafik frekuensi yang berbeda-beda, namun tetap menghasilkan *gain* yang konstan pada cakupan frekuensi yang sama karena pada pengujian ini yang perlu dilihat cakupan frekuensi yang konstan. Tujuannya untuk mengetahui cakupan frekuensi yang dibutuhkan sensor untuk pengukuran PS karena pada cakupan frekuensi tersebut sensor PS dapat mendeteksi suatu kejadian PS. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa nilai *gain* mulai stabil pada cakupan frekuensi 23 MHz - 30 MHz, sehingga dapat dikatakan bahwa sensor ini dapat dijadikan suatu alat pendeteksi PS dengan menggunakan metoda frekuensi tinggi yaitu antara 23 MHz – 30 MHz, karena pada rentang frekuensi tersebut nilai *gain* (dB) dari sensor menunjukkan nilai yang konstan. Artinya frekuensi kejadian PS di dalam rentang 23 MHz – 30 MHz dapat direspon oleh sensor ini dengan baik dan mengubahnya ke dalam besaran magnitudo PS yang maksimal. Pada gambar 4.8 dapat dilihat grafik respon frekuensi kumparan Rogowski pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan grafik yang dihasilkan, dapat dikatakan memiliki kesamaan grafik yang dihasilkan pada penelitian sebelumnya di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas. Oleh sebab itu, dapat dikatakan bahwa sensor kumparan rogowski pada penelitian kali ini sudah mendekati dengan sensor PS yang telah di teliti sebelumnya tentang sensor Kumparan rogowski setengah silinder dengan variasi diameter lilitan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Andalas [20]. Namun, berdasarkan cakupan frekuensinya, pada penelitian sebelumnya didapatkan cakupan frekuensi mulai dari 2 MHz - 10 MHz. Sedangkan pada penelitian ini antara 23 MHz – 30 MHz. Hal ini disebabkan dari segi dimensi dan bahan yang berbeda dari kedua jenis sensor yang diteliti.

Berdasarkan grafik respon frekuensi ini dapat dilihat bahwa sensor kumparan Rogowski PVC 20 lilitan, memiliki respon yang paling baik dibandingkan dengan lima sensor kumparan rogowski lainnya karena nilai *gain* konstan yang didapatkan paling besar dibandingkan sensor yang lainnya. Oleh sebab itu, dapat dikatakan

sensor kumparan Rogowski dengan bahan inti PVC memiliki sensitifitas yang lebih baik dari pada bahan inti PE dan juga dapat dikatakan bahwa semakin banyak jumlah lilitan maka sensitifitas sensor kumparan Rogowski terhadap respon frekuensi akan semakin baik.



Gambar 4.7 Grafik respon frekuensi sensor kumparan Rogowski



Keterangan : Variasi Diameter Lilitan

1 = 1,1 mm; 2 = 0,75 mm; 3 = 0,4 mm; 4 = 0,25 mm

Gambar 4.8 Grafik respon frekuensi sensor kumparan Rogowski yang telah diteliti sebelumnya