

**STUDI ISOLASI MINYAK RANDU DENGAN PENAMBAHAN
FENOL PADA MEDAN LISTRIK HOMOGEN DAN NON-
HOMOGEN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**FRENGKY ADI LESTARI
NIM. 115060301111011-63**

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2015**

LEMBAR PERSETUJUAN

**STUDI ISOLASI MINYAK RANDU DENGAN PENAMBAHAN FENOL PADA
MEDAN LISTRIK HOMOGEN DAN NON- HOMOGEN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

FRENGKY ADI LESTARI

NIM. 115060301111011-63

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 6 Oktober 2015

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Moch. Dhofir, Drs., Ir., M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001

Mahfudz Shidiq, Ir., M.T.
NIP. 19580609 198703 1 003

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI ISOLASI MINYAK RANDU DENGAN PENAMBAHAN FENOL DALAM
MEDAN LISTRIK HOMOGEN DAN NON- HOMOGEN**

SKRIPSI

KOSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

FRENGKY ADI LESTARI

NIM.115060301111011 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi

Pada tanggal 6 Oktober 2015

Dosen Penguji

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 195610201989031001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya bagi Allah Subhanahu Wa Taala, Rabb alam semesta. Dialah Allah, Tuhan Yang Maha Satu, Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Dialah Sebaik baik Penolong dan Sebaik baik Pelindung. Shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad Rasulullah Shallallahu Alaihi Wa Salam, Sang pembawa kabar gembira dan sebaikbaik suri tauladan bagi yang mengharap Rahmat dan Hidayah-Nya.

Sungguh hanya melalui Pertolongan dan Perlindungan Allah SWT semata sehingga dapat terselesaikan skripsi ini. Dengan seizin Allah SWT, di kesempatan yang baik ini dihaturkan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya atas bantuan sehingga terselesainya skripsi ini kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., ST., Msc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran dan motivasinya.
4. Bapak Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT. selaku dosen pembimbing dan Ka. Lab Teknik Tegangan Tinggi yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
5. Bapak Mahfudz Shidiq, Ir., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
6. Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala alat serta sarana dan prasarana yang dimanfaatkan dalam melakukan penelitian ini.
7. Keluarga tercinta, kedua orang tua Sunardi dan Sunarsih yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir.
8. Keluarga besar angkatan 2011 "INVERTER" atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.
9. Keluarga besar laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 2010, 2011 dan 2012. Serta sahabat terdekat saya

Dini Ludfira Aisyah yang telah memberikan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Sekiranya Allah SWT mencatat amal baik kepada semua pihak yang turut membantu menyelesaikan skripsi ini. Akhirnya, dapat di sadari bersama bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Allahu Amîn.

Malang, Oktober 2015

Penulis

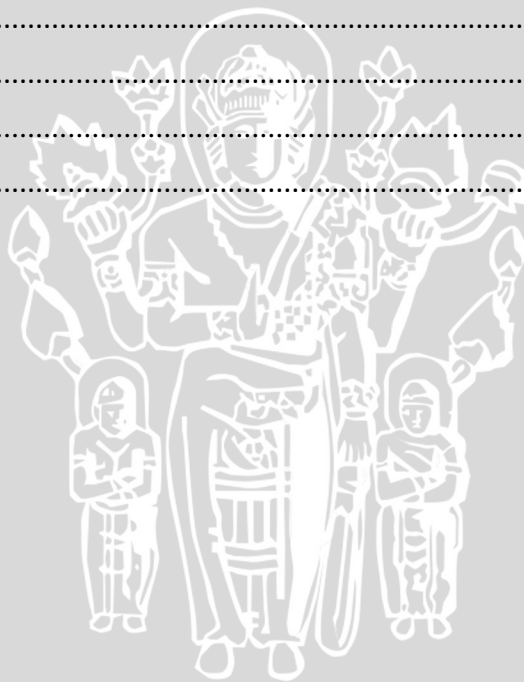


DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	ix
RINGKASAN	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Dielektrik Cair.....	4
2.2 Sifat-sifat Dielektrik.....	5
2.2.1 Pengukuran Tegangan Tembus (Kekuatan Dielektrik).....	6
2.2.2 Pengukuran Arus Konduksi Tegangan Searah.....	7
2.3 Sifat Elektrik.....	8
2.4 Rugi Daya dalam Dielektrik.....	9
2.5 Minyak Isolasi.....	10
2.6 Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Elektroda Homogen dan Non-Homogen....	14
2.7 Teori Kegagalan Zat Cair.....	16
2.7.1 Kegagalan elektronik.....	17
2.7.3 Kegagalan bola cair dalam zat cair.....	19
2.7.3 Kegagalan Butiran Padat dalam Zat isolasi Cair.....	19
2.8 Minyak Randu.....	21
2.9 Fenol.....	23
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Studi Literatur.....	26
3.2 Persiapan Alat.....	26
3.2.1 Fungsi Peralatan.....	26
3.3 Pengujian Objek Uji.....	27
3.3.1 Persiapan Kontaminan.....	28
3.2.1 Persiapan elektroda uji.....	28

3.3.3	Persiapan Kotak Uji.....	29
3.4	Rangkaian Pengujian.....	30
3.4.1	Rangkaian Pengujian Arus Bocor Dan Tegangan Tembus Pada Pengujian Tegangan Tinggi Bolak-Balik (AC).....	30
3.4.2	Rangkaian Pengujian Arus Konduksi, Resistivitas Dan Permittivitas Minyak Randu.....	31
3.5	Pengukuran Dengan Model Penambahan fenol (C ₆ H ₅ OH).....	33
3.6	Kondisi Pengujian.....	34
3.6.1	Kondisi Pengujian Minyak Randu Murni.....	34
3.6.2	Kondisi Pengujian dengan Fenol.....	35
3.7	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non-Homogen Pada Pengujian Minyak randu.....	35
3.7.1	Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non-Homogen dalam Pengujian Minyak Randu.....	36
3.8	Analisis Data.....	37
3.9	Kesimpulan dan Saran.....	37
	BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1	Umum.....	38
4.2	Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor.....	38
4.2.1	Pengaruh Minyak Randu Murni Terhadap Arus Konduksi.....	38
4.2.2	Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Arus Bocor.....	43
4.3	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor Pada Minyak Randu.....	46
4.3.1	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Konduksi Pada Minyak Randu.....	46
4.3.3	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Bocor Pada Minyak Randu.....	49
4.4	Pengaruh Minyak Randu Terhadap Tegangan Tembus.....	58
4.4.1	Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Tegangan Tembus.....	58
4.4.2	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standart, Bola-bola dan Jarum Piring.....	59
4.4.2.1	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standart.....	59
4.4.2.3	Pengaruh Penambahan Fenol terhadap tegangan tembus minyak randu pada Susunan Elektroda Jarum-Piring.....	62
4.5	Permittivitas Minyak Randu.....	64
4.6	Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dalam Pengujian Minyak Randu.....	65

4.6.1	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-bola Pada Minyak randu Murni dan Penambahan Fenol	65
4.6.1.1	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-Bola Pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 2,5 mm	65
4.6.1.2	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-Bola Pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 4 mm	69
4.6.2	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol	71
4.6.2.1	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 2,5 mm	71
4.6.2.2	Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 4 mm	74
4.7	Pengaruh Fenol terhadap Minyak Randu Menurut Analisis Secara Ilmiah	77
BAB V PENUTUP		79
5.1	Kesimpulan.....	79
5.2	Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA		81
LAMPIRAN		89



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 suatu bahan isolasi diantara dua elektroda.....	6
Gambar 2.2 Elektroda standar sesuai VDE 0370	7
Gambar 2.3 Arus konduksi pada susunan elektroda plat sejajar	8
Gambar 2.4 susunan elektroda (SE) dengan variasi bentuk geometris sebagai objek uji ...	15
Gambar 2.5 Teori kegagalan pemurnian padat.....	17
Gambar 2.6 Teori kegagalan gelembung pada zat cair	18
Gambar 2.7 Teori kegagalan bola cair dalam zat cair	19
Gambar 2.8 Kegagalan Butiran Padat dalam Zat isolasi Cair	20
Gambar 2.9 Pohon randu penghasil biji randu	21
Gambar 2.10 Struktur dari fenol (C ₆ H ₅ OH)	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis Penelitian.....	25
Gambar 3.2 Bagan Persiapan Kontaminan.....	28
Gambar 3.3 Elektroda bola-bola.....	29
Gambar 3.4 Elektroda Jarum-piring	29
Gambar 3.5 Kotak uji	29
Gambar 3.6 Rangkaian Pengujian Arus Bocor dan Tegangan Tembus Pada Pengujian AC.....	30
Gambar 3.7 Diagram alir pengujian arus bocor dan tegangan tembus pada pengujian Tegangan Tinggi Bolak-Balik (AC)	31
Gambar 3.8 Rangkaian pengukuran arus konduksi pada minyak randu murni dan penambahan fenol.....	32
Gambar 3.9 <i>Chambers</i> (kotak uji) di dalam pengujian arus konduksi, resistivitas dan permitivitas dengan menggunakan pengukuran Tegangan Tinggi Searh (DC)	32
Gambar 3.10 Diagram alir untuk pengujian arus konduksi, resistivitas dan permitivitas pada Minyak Randu	33
Gambar 3.11 Diagram Alir simulasi distribusi medan listrik pada pengujian minyak randu menggunakan program Femm 4.2	36
Gambar 3.12 Diagram alir perhitungan dan simulasi faktor efisiensi medan listrik pada pengujian medan homogen dan non-homogen pada minyak randu	37
Gambar 4.1 Grafik Hubungan arus konduksi sebagai fungsi tegangan dengan jarak sela berbeda pada pengujian tegangan tinggi DC	41
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Resistivitas minyak randu murni sebagai fungsi tegangan dengan jarak sela berbeda pada pengujian tegangan tinggi DC	43
Gambar 4.3 Pengujian Minyak Randu Murni terhadap arus konduksi dengan penambahan volume pada tegangan tinggi DC	43

Gambar 4.4 Grafik Hubungan Arus Bocor terhadap tegangan pada susunan elektroda standart, bola-bola, dan jarum-piring.....	44
Gambar 4.5 Grafik fungsi arus konduksi terhadap tegangan dengan penambahan fenol ...	47
Gambar 4.6 Kondisi pengujian minyak randu dengan penambahan fenol.....	48
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Fungsi Resistivitas terhadap tegangan konstan pada penambahan fenol.....	49
Gambar 4.8 Karakteristik arus bocor terhadap tegangan pada elektroda standart	50
Gambar 4.9 Grafik penambahan fenol fungsi arus bocor terhadap tegangan pada elektroda bola-bola	53
Gambar 4.10 Grafik Penambahan Fenol pada Fungsi Arus Bocor terhadap tegangan pada Elektroda Jarum-Piring	56
Gambar 4.11 Grafik Penambahan Fenol Pada Fungsi tegangan tembus terhadap fenol dengan menggunakan elektroda standart	59
Gambar 4.12 pengujian pada elektroda standart	60
Gambar 4.13 Grafik penambahan fenol fungsi tegangan tembus terhadap fenol pada elektroda bola-bola	61
Gambar 4.14 Pengujian tegangan tembus pada susunan elektroda bola-bola.....	62
Gambar 4.15 Grafik penambahan fenol fungsi tegangan tembus pada elektroda jarum-piring	63
Gambar 4.16 Tampak elektroda jarum piring setelah pengujian tegangan tembus.....	64
Gambar 4.17 Jarak sela dan luas elektroda pada pengujian arus konduksi minyak Randu	65
Gambar 4.18 Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak murni.....	66
Gambar 4.19 Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm	66
Gambar 4.20 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (<i>magnitude of field intensity</i> , E) dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola pada jarak sela 2,5 mm.....	68
Gambar 4.21 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (<i>magnitude of field intensity</i>), E pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm	69
Gambar 4.22 simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada minyak randu dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm	70
Gambar 4.23 Perencanaan simulasi pada susunan elektroda jarum-piring pada jarak sela 2,5 mm pada Minyak Randu Murni.....	72
Gambar 4.24 Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm pada Minyak Randu Murni.....	72
Gambar 4.25 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (<i>magnitude of field intensity</i> , E) elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm.....	73

Gambar 4.26 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity, |E|*) pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm 75

Gambar 4.27 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity, |E|*) pada penambahan fenol minyak randu susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm..... 76

Gambar 4.28 Reaksi kimia minyak randu dengan fenol 77

Gambar 4.29 Kondisi Pencampuran fenol dengan minyak randu yang tampak lebih jernih..... 78



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi standart SPLN 49 tahun 1982 tentang minyak isolasi baru.....	11
Tabel 2.2 Memaparkan komposisi Asam Lemak di dalam Biji pohon Randu dan persentasenya.....	21
Tabel 2.3 Memaparkan sifat kimia dari komposisi keseluruhan minyak biji randu	22
Tabel 3.1 Komposisi penambahan fenol pada susunan elektroda standart	34
Tabel 3.2 Komposisi Penambahan Fenol pada Susunan Elektroda Bola- Bola dan Jarum-Piring	34
Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Arus Konduksi Minyak Randu Murni pada tegangan tinggi DC.....	39
Tabel 4.2 Data perbandingan Arus konduksi terhadap tegangan menurut <i>trendline</i>	42
Tabel 4.3 Data Hasil pengujian Arus Bocor Pada Minyak randu Murni dengan menggunakan pengukuran tegangan tinggi AC	44
Tabel 4.4 Data perbandingan Arus bocor terhadap tegangan menurut <i>trendline</i>	45
Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian dengan penambahan fenol terhadap arus konduksi pada Minyak Randu dengan pengujian tegangan tinggi DC.....	46
Tabel 4.6 Data Perbandingan Penambahan Fenol Minyak Randu pada Arus Konduksi dalam pengujian tegangan tinggi DC	47
Tabel 4.7 Data pengujian Arus Bocor pada elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm pada penambahan fenol.....	49
Tabel 4.8 Data <i>trendline</i> pengujian Arus Bocor pada elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm pada penambahan fenol	51
Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian Penambahn Fenol terhadap Arus Bocor pada elektroda bola-bola	52
Tabel 4. 10 Data Analisis <i>Trendline</i> pada Susunan Elektroda bol-bola.....	54
Tabel 4.11 Data Hasil pengujian Penambahn fenol Fungsi Arus Bocor terhadap tegangan pada Elektroda Jarum-Piring	55
Tabel 4.12 Perbandingan nilai Arus Bocor menurut data dengan <i>trendline</i> pada Elektroda Jarum-Piring	57
Tabel 4.13 Data Pengujian tegangan tembus minyak randu murni	58
Tabel 4.14 Data Pengujian Penambahan Fenol pada Tegangan Tembus Elektroda Standart dengan jarak 2.5 mm dengan fenol.....	59
Tabel 4.15 Data pengujian penambahan fenol terhadap tegangan tembus pada elektroda bola-bola	61
Tabel 4.16 Data Penambahn Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Elekktroda Jarum Piring	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Arus Konduksi Pada Minyak Randu Murni.....	82
Lampiran 2 Arus Konduksi Pada Minyak Randu dengan penambahan Fenol.....	86
Lampiran 3 Arus Bocor pada Susunan Berbagai Susunan Elektroda	90
Lampiran 4 Tegangan Tembus pada Susunan Berbagai Susunan Elektroda	101
Lampiran 5 Foto Pengujian	111



RINGKASAN

Frencky Adi Lestari, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2015, *Studi Isolasi Minyak Randu dengan Penambahan Fenol Pada Medan Listrik Homogen dan Non-Homogen*. Dosen Pembimbing : Moch. Dhofir dan Mahfudz Shidiq.

Minyak randu dapat difungsikan sebagai isolasi cair pada peralatan tegangan tinggi. Tetapi minyak randu masih memiliki ketahanan isolasi yang masih rendah, sehingga diperlukan penambahan zat aditif agar minyak randu dapat difungsikan sebagai isolasi pada peralatan tegangan tinggi. Zat aditif tersebut yaitu fenol (C_6H_5OH), fungsi dari fenol itu sendiri sebagai campuran di dalam minyak randu agar minyak randu layak digunakan sebagai isolasi cair pada peralatan tegangan tinggi. Pencampuran fenol dapat dilakukan dengan minyak randu pada suhu $\pm 30^{\circ}C$ agar kandungan minyak randu secara struktur kimia dapat menyatu dengan fenol.

Di penelitian ini, untuk menentukan tingkat tahanan isolasi pada minyak randu murni dan pengaruh fenol dapat di uji secara fisis. Dengan pengujian arus konduksi, arus bocor dan tegangan tembus dapat dilakukan untuk menguji isolasi minyak randu. Arus konduksi digunakan untuk mengetahui tingkat ketahanan isolasi di dalam minyak randu dan arus bocor digunakan untuk mengetahui impedansi minyak randu serta tegangan tembus diuji untuk mengetahui kekuatan dielektrik minyak randu. Pengujian isolasi minyak randu dilakukan dengan 2 kondisi yaitu kondisi minyak randu murni dan kondisi minyak randu ketika dilakukan penambahan fenol. Pada Kondisi penambahan fenol dilakukan dengan variasi fenol 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5; 25 gram dan di uji pada arus konduksi dan tegangan tembus sedangkan arus bocor dengan campuran fenol diuji pada fenol 7,5;15;25 gram. Sehingga di dapatkan perbedaan tahanan isolasi yang objektif sesuai pengujian minyak isolasi.

Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa arus konduksi pada minyak randu murni pada tegangan yang sama dengan penambahan volume minyak randu mempunyai arus konduksi yang sama, sedangkan setelah dilakukan penambahn fenol arus konduksi menjadi lebih kecil. Sedangkan untuk arus bocor pada medan homogen lebih kecil dari susunan elektroda non-homogen sedangkan tegangan tembus pada minyak randu murni lebih rendah dari pada minyak randu dengan campuran fenol. Serta efisiensi pada medan listrik pada susunan elektroda bola-bola memiliki efisiensi medan listrik ≤ 1 atau mendekati nilai 1 sehingga distribusi medan listrik menjadi seragam, sedangkan pada susunan elektroda jarum-piring distribusi medan listrik tidak seragam atau efisiensi medan listrik mendekati nilai 0 atau kurang dari < 1 .

Kata Kunci : Minyak Randu, Fenol, Arus konduksi, Arus bocor, tegangan tembus.

SUMMARY

Frengky Adi Lestari, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, October 2015, Study Isolation Randu Oil with Phenol Addition In Electric Field Homogeneous and Non-homogeneous , Supervisor: Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT. and Mahfudz Shidiq, S.T., M.T.

Randu oil can be used as an insulating liquid at high voltage equipment. But randu oil still have the isolation resistance low, so that the required addition adiftif substance of randu oil can be used as insulation in high voltage equipment. The adiftif substance is phenol (C_6H_5OH), the function of phenol as a mixture in the randu oil for use as an insulating liquid at high voltage equipment. Mixing phenol with randu oil at a temperature of $\pm 30^\circ C$ so that randu oil content results in chemical structure can be fused with phenol.

In this research, to determine the level of insulation resistance in randu oil pure and the effect of phenol can be tested physically. By testing the conduction current, leakage current and breakdown voltage can be test the insulation randu oil. Conduction current is used to determine level of insulation resistance in the randu oil and leakage current is used to determine impedance randu oil and breakdown voltage be tested dielectric strength randu oil. Randu oil insulation is being tested with two conditions is randu oil pure condition and the condition of the randu oil when the addition of phenol. On condition when the addition of phenol variation of 2.5; 5; 7.5; 10; 12.5; 15; 17.5; 20; 22.5; 25 grams and tested on the conduction current and breakdown voltage ,while the leakage current the mixture of phenol tested at 7.5; 15; 25 grams. So the difference in getting an objective appropriate insulation resistance testing of insulating oil.

The results of research can be concluded that the current conduction in randu oil pure at the same voltage with the addition of randu oil volume have the same conduction current, while after addition phenol conduction currents become smaller. As for the leakage current in a homogeneous field is smaller than the non-homogeneous electrode arrangement while breakdown voltage on randu oil pure is lower than the randu oil with a mixture of phenol. As well as the efficiency of the electric field in the electrode arrangement balls have efficiency electric field ≤ 1 or approaches 1 so the electric field distribution becomes uniform, while the composition of the electrode needle-plate electric field distribution is not uniform or the efficiency of the electric field approaches of 0 or less <1 .

Keyword : Randu oil, Phenol, Conduction Current, Leakage Current, Breakdown Voltage

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan ekonomi masyarakat yang setiap tahun meningkat, menyebabkan kebutuhan energi listrik yang meningkat, sehingga pasokan energi listrik di Indonesia harus mampu melayani kebutuhan ekonomi masyarakat. Hal ini, menyebabkan layanan penyedia listrik yang memadai, sehingga energi listrik merupakan kebutuhan primer bagi masyarakat masa kini. Maka dari itu, diperlukan sistem penyediaan listrik meliputi pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang memiliki gangguan sekecil mungkin.

Salah satu yang perlu diperhatikan dalam sistem tenaga listrik adalah isolasi. Isolasi merupakan pemisahan pada bagian peralatan listrik yang memiliki beda potensial (Boggas L Tobing,2012:23). Tujuan dari isolasi yaitu untuk melindungi peralatan listrik agar terhindar dari lompatan api (*flashover*) atau percikan dan menjaga peralatan listrik agar dapat bekerja secara kontinu dan stabilitas dari peralatannya dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama.

Isolasi terdiri dari isolasi padat, cair dan gas. Isolasi tersebut memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda. Pada isolasi cair dapat digunakan sebagai pendingin, proteksi peralatan listrik dan dapat memperbaiki diri sendiri jika terjadi pelepasan muatan listrik. Selain itu isolasi cair memiliki tingkat kerapatan yang lebih dari udara yaitu seribu kalinya dan dapat menyerap dan menghilangkan panas akibat rugi-rugi listrik (Rudy S,2007:137).

Peralatan tegangan tinggi yang menggunakan isolasi cair seperti transformator daya, pemutus tenaga, kabel daya dan kapasitor daya. Isolasi cair tersebut digunakan sebagai pemadam busur api, sebagai media isolasi dan pendingin. Peralatan tegangan tinggi selama ini, masih menggunakan isolasi cair tipe *Sheel Diala B* yang merupakan minyak yang berasal dari minyak bumi dan lebih dari seratus tahun pemakaiannya digunakan sebagai isolasi cair dan sulit terdegradasi. Maka dibutuhkan isolasi cair yang dapat terdegradasi secara sempurna dan bahan organik yang dapat terurai dengan lingkungan yaitu minyak nabat.

Minyak nabati yang digunakan minyak randu yang telah diolah. Tetapi Minyak randu tersebut memiliki tingkat isolasi yang masih rendah dari pada minyak bumi. Untuk itu, diperlukan penambahan zat aditif untuk mengoptimalkan sistem kerja dari minyak randu tersebut.

Zat aditif yang dipakai yaitu fenol (C_6H_5OH) dikarenakan fenol memiliki sifat keasaman yang dapat menetralkan minyak randu sehingga dapat mengoptimalkan sistem kerja isolasi dari minyak isolasi cair.

Sehingga dalam penelitian ini menyajikan tegangan tembus, faktor kebocoran (arus bocor), arus konduksi dengan penambahan zat aditif fenol sehingga minyak randu layak digunakan sebagai media isolasi pada peralatan tegangan tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini yang akan dibahas adalah :

- Bagaimana pengaruh homogenitas medan listrik terhadap arus bocor pada minyak randu murni.
- Bagaimana pengaruh homogenitas medan listrik terhadap arus bocor pada minyak randu dengan fenol.
- Bagaimana pengaruh penambahan fenol pada minyak randu terhadap tegangan tembus dalam medan homogen dan non-homogen.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan skripsi ini dibatasi hal-hal sebagai berikut :

- Objek pengujian dalam penelitian ini adalah minyak randu dengan penambahan fenol.
- Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah elektroda medan homogen dan non homogen.
- Untuk pengujian medan homogen digunakan elektroda bola-bola, sedangkan untuk pengujian medan non-homogen digunakan elektroda jarum piring.
- Untuk pengujian ini, tidak membahas struktur kimia dari minyak randu dan tingkat keasaman minyak randu.
- Untuk pengujian ini, digunakan pengukuran tegangan tinggi bolak-balik (AC) untuk mengukur tegangan tembus dan arus bocor serta tegangan tinggi searah (DC) untuk mengukur arus konduksi. Sedangkan pengukuran tegangan impuls tidak digunakan.
- Untuk pengujian ini, tidak membahas kenaikan suhu, waktu, viskositas di dalam minyak randu.
- Keseragaman medan listrik dianalisis dengan menggunakan FEMM.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini sebagai berikut :

- a. Menganalisis besarnya arus bocor di dalam homogenitas medan listrik pada minyak randu murni.
- b. Menganalisis besarnya arus bocor di dalam homogenitas medan listrik pada minyak randu dengan penambahan fenol.
- c. Menganalisis tegangan tembus pada minyak randu dengan penambahan fenol terhadap medan listrik homogen dan non homogen.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- BAB I** : Menguraikan latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.
- BAB II** : Menguraikan dasar teori yang digunakan sebagai dasar penyelesaian penelitian
- BAB III** : Menguraikan metodologi yang digunakan dalam penyelesaian penelitian ini meliputi studi literatur, perhitungan besar arus konduksi, arus bocor, tegangan tembus, penambahan fenol pada medan listrik homogen dan non-homogen dan menganalisisnya serta kesimpulan dan saran.
- BAB IV** : Menguraikan perhitungan, analisis dan pemahasan terhadap besarnya arus konduksi, arus bocor, resistivitas, tegangan tembus dan keseragaman medan listrik dengan penambahan dan tanpa fenol pada medan listrik homogen dan non homogen
- BAB V** : Menguraikan kesimpulan dari tujuan penelitian yang dibuat serta beberapa saran dari penulis

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dielektrik Cair

Dielektrik cair merupakan salah satu jenis dielektrik yang digunakan sebagai pemisah dua atau lebih elektroda bertegangan sehingga tidak terjadi lompatan listrik antar elektroda. Dielektrik cair difungsikan sebagai media pendingin transformator dan mengurangi rugi-rugi panas yang terjadi. Serta dielektrik cair memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dibandingkan dengan dielektrik gas. Berikut ini adalah jenis-jenis dari dielektrik cair : (Rudy S,2007:145)

a. Minyak Mineral

Minyak mineral merupakan campuran beberapa jenis hidrokarbon yang diperoleh dari minyak alam mentah melalui proses destilasi bertingkat dan rafinasi. Minyak ini memiliki komponen utama berupa parafine, naphthene, aromete dan olefin. Sifat elektrik minyak mineral akan berkurang jika kandungan air meningkat. Pada temperatur 40°C dan kadungan air 40 ppm, kekuatan dielektrik minyak mineral akan berkurang dibandingkan dengan kandungan air yang lebih kecil.

b. Hidrokarbon Murni

Salah satu yang merupakan golongan dari hidrokararbon murni adalah Polysobuten yang merupakan polimerisasi buten dari rantai polyolefin. Bahan pengisi kapasitor biasanya digunakan polysobuten dikarenakan memiliki vikositas yang tinggi.

c. Askarel

Askarel merupakan bahan isolasi yang tidak mudah terbakar. Askarel memiliki permitivitas yang tinggi. Askarel digunakan pada kapasitor dan trafo distribusi, askarel sulit terurai dengan dan tidak ramah lingkungan. Askarel sering dikenal dengan sebutan Polychlorinated Biphenyl.

d. Cairan Silikon

Cairan silikon digunakan sebagai pengganti askarel dan bahan pengisi kapasitor serta trafo distribusi. Cairan silikon memiliki sifat tidak mudah terbakar, tidak beracun dan ramah terhadap lingkungan. Cairan silikon tahan terhadap tekanan termal sampai 300°C.

2.2 Sifat-sifat Dielektrik

Sifat-sifat bahan isolasi ditentukan dari sampel tidak selalu dengan nilai sesungguhnya, sifat bahan isolasi diperoleh dari hasil sebaran statistik sehingga sistem isolasi harus dibuat dengan derajat kebebasan yang besar. (Boggas L Tobing,2012:23)

Fungsi yang paling penting dari suatu bahan isolasi adalah :

1. Mengisolasi antara penghantar, contohnya fasa konduktor dengan fasa pentanahan.
2. Menahan gaya mekanis akibat adanya arus konduktor terisolasi.
3. Menahan tekanan akibat panas dan reaksi kimia.

Sistem isolasi berfungsi untuk memisahkan bagian peralatan yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan, karena ada perbedaan tegangan dengan peralatan yang tidak bertegangan diantara kedua pemisah bagian tersebut akan timbul medan elektrik. Dengan kata lain, bahan yang membentuk isolasi peralatan listrik harus dapat menahan tekanan yang ditimbulkan oleh medan elektrik didalam bagian tersebut.

Peralatan listrik akan mengalami kenaikan suhu selama beroperasi pada kerja normal maupun dalam kondisi gangguan, sehingga bahan isolasi harus memiliki sifat thermal sebagai berikut : (Boggas L tobing,2012:25)

1. Kemampuan menahan panas tinggi (daya tahan panas)
2. Kerentanan terhadap perubahan bentuk pada keadaan panas
3. Konduktivitas panas yang tinggi
4. Koefisien panas yang rendah
5. Tidak mudah terbakar
6. Tahan terhadap busur api

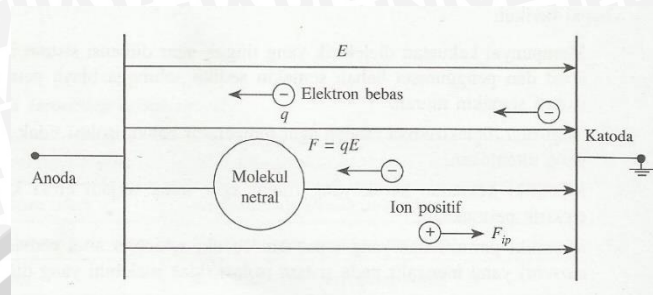
Salah satu tujuan dan pengujian tegangan tinggi adalah meneliti sifat-sifat listrik dielektrik yang digunakan sebagai bahan isolasi dalam melakukan penelitian. Yaitu diantaranya adalah : (Boggas L tobing,2012:27)

- Tegangan tembus (kekuatan Dielektrik)
- Konduktansi

Berikut akan dijelaskan sifat sifat kedua dielektrik tersebut :

2.2.1 Pengukuran Tegangan Tembus (Kekuatan Dielektrik)

Isolasi yang ideal tidak memiliki elektron-elektron bebas, tetapi elektron-elektron tersebut terikat pada inti atom unsur pembentuk bahan isolasi tersebut. Sedangkan konduktor memiliki elektron-elektron bebas.



Gambar 2.1 suatu bahan isolasi diantara dua elektroda
Sumber :Boggas L Tobing,2012:26

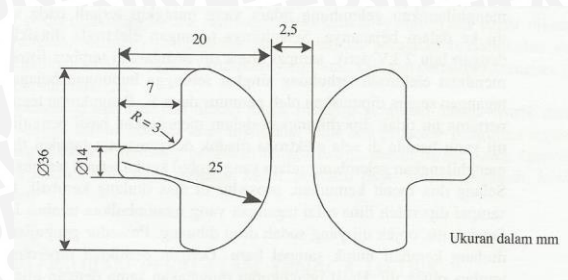
Pada Gambar 2.1 tersebut suatu bahan isolasi ditempatkan di antara dua elektroda piring sejajar, bila elektroda diberi tegangan searah V , maka akan timbul medan elektrik (E) di dalam bahan isolasi yang arahnya dari anoda ke katoda. Medan elektrik ini akan menimbulkan gaya (F) pada elektron bebas yang terdapat pada bahan isolasi. Gaya ini akan membuat elektron bebas bergerak ke anoda. Dalam perjalanan menuju anoda, elektron bebas membentur molekul netral yang menimbulkan ionisasi benturan dan menghasilkan elektron bebas baru dan ion positif. Bila benturan tersebut tidak menimbulkan ionisasi maka benturan akan mengeksitasi elektron yang terikat pada molekul netral. Ukuran beban elektrik didalam bahan isolasi dinyatakan dengan kuat medan elektrik dengan satuan dalam volt/cm.

Jika kuat medan elektrik melebihi kemampuan batas-nya dan berlangsung secara terus menerus dalam jangka waktu yang lama, maka kuat medan elektrik akan mengalami tembus listrik (*electrical breakdown*). Medan elektrik tidak selalu mengakibatkan bahan isolasi mengalami tembus listrik, tetapi ada dua syarat yang harus dipenuhi agar bahan isolasi mengalami tembus listrik yaitu : (Boggas L Tobing,2012:23)

1. Kuat medan elektrik yang diberikan ke bahan isolasi sama dengan atau lebih besar dari pada kekuatan dielektrik bahan isolasi.
2. Lama berlangsungnya medan elektrik sama dengan atau lebih besar dari pada waktu tunda tembus.

Pengujian kekuatan dielektrik dihubungkan dengan kotak uji yang digunakan. Untuk pengujian cairan sederhana, kotak uji yang digunakan sederhana karena sedikit minyak yang digunakan didalam pengujian.

Elektroda- elektroda yang digunakan untuk mengukur tegangan tegangan tembus umumnya adalah elektroda bola-bola standar VDE 0370 dengan jarak sela 2,5 mm dengan diameter 3,6 cm. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Elektroda standar sesuai VDE 0370

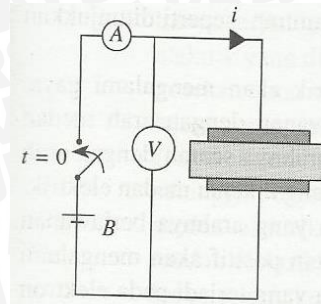
Sumber : SPLN 1982

Kadang-kadang sistem pengukuran menggunakan elektroda plat sejajar juga digunakan pada sistem ini. Elektroda terpisah pada jarak yang sangat kecil dalam pengukuran menggunakan elektroda yang sangat halus dan kehadiran film oksidasi memberikan tanda besarnya tegangan tembus (kekuatan dielektrik) yang diberikan. Karena jarak celah kecil, maka tegangan uji yang diperlukan 50-100 kV, tegangan tembus (kekuatan dielektrik) pada dielektrik cair dalam orde 1 MV/cm. Di dalam pertumbuhan tegangan tembus akan menjadi lebih besar jika gas yang dilarutkan bersifat elektronegatif dan tekanan hidrostatik diperbesar. (Moch.Dhofir,2000:34)

2.2.2 Pengukuran Arus Konduksi Tegangan Searah

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan bahan isolasi yang ditempatkan di antara dua elektroda sejajar merupakan suatu kapasitor. Dan jika kapasitor tersebut termasuk kapasitor murni dan dihubungkan dengan tegangan dc maka akan mengalir arus dc ke kapasitor sehingga muatan kapasitor akan meningkat, yang berakibat tegangan kapasitor naik. Aliran ini disebut aliran pengisian dan akan berhenti ketika tegangan kapasitor sama dengan tegangan sumber dc.

Beda tegangan diantara kedua elektroda tersebut menimbulkan medan elektrik dalam bahan isolasi. Medan elektrik ini, mengerakkan molekul-molekul bahan isolasi sampai semua terpolarisasi. Molekul tersebut akan bergerak cepat dan lamban, molekul yang bergerak cepat akan terpolarisasi dengan cepat gerakan inilah yang menimbulkan arus pengisian.



Gambar 2.3 Arus konduksi pada susunan elektroda plat sejajar
 Sumber : C.L Wadhwa,2007: 169

Konduktivitas bahan isolasi cair dan isolasi padat disebabkan karena konduksi ion sehingga bergantung pada suhu, ketidak murnian dan kandungan air. Konduktivitas (σ) atau resistansi bocor (R_o) dari bahan isolasi ditentukan dengan mengukur arus jika diterapkan tegangan searah yang konstan. Pengukuran σ dapat menunjukkan tingkat kemurnian minyak isolasi. Penguraian pengotor elektrolit menghasilkan ion positif dan negatif. Untuk jenis ion dengan muatana q_1 dengan rapat ion n_1 maka kontribusi rapat arus yang ditimbulkan pada kuat medan magnet E adalah (Kind,1993:144)

$$S_1 = q_1 n_1 v_1 = q_1 n_1 b_1 E \tag{2-1}$$

Keterangan :

S_1 : kerapatan arus

n_1 : kerapatan ion

v_1 : kecepatan ion

b_1 : mobilitas ion

Dengan v_1 dan b_1 adalah kecepatan dan mobilitas ion, maka mobilitas ion akan bernilai konstan. Bilamana terdapat kuat medan tertentu dalam dielektrik maka akan berlaku mekanisme kompensasi yang menyeimbangkan kerapatan berbagai jenis ion hingga tercapai kesetimbangan. Medan elektrik dibuat homogen seperti elektroda pelat sejajar. Jika diterapkan tegangan V untuk medan seluas A dan besar sela s maka nilai σ dapat dihitung dari nilai arus I sebagai berikut : (Kind,1993:145)

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{s}{A} \tag{2-2}$$

Arus yang terukur umumnya berkisar beberapa pikoampere. Untuk itu bisa digunakan galvanometer kumparan putar ataupun pengukur dengan penguat elektronik yang jauh lebih peka.

2.3 Sifat Elektrik

Sifat-sifat elektrik minyak isolasi yang menentukan unjuk kerja minyak sebagai isolasi cair anatra lain adalah sebagai berikut : (Muhaimin,1993:3)



1. Resistivitas

Sesuai dengan fungsinya, bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang mempunyai resistivitas yang tak terhingga. Tetapi pada kenyatannya bahan yang demikian belum bisa diperoleh. Sampai saat ini semua bahan isolasi pada teknik listrik masih mengalirkan arus listrik (walaupun kecil) yang lazim disebut arus bocor. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya. Besarnya resistivitas bahan isolasi sesuai dengan persamaan berikut :

(Muhaimin,1993:3)

$$\rho = \frac{R \cdot A}{s} \quad (2-3)$$

$$R = \frac{V}{I_k} \quad (2-4)$$

Keterangan :

- ρ : Resistivitas Minyak Isolasi (ohm)
- R : Resistansi Isolasi (ohm)
- V : Tegangan Sumber yang diberikan (V)
- A : luas permukaan elektroda (m²)
- s : jarak sela elektroda (m)
- I_k : arus konduksi (ampere)

2. Permittivitas,

Setiap bahan isolasi mempunyai permitivitas yang berbeda. Permittivitas dari minyak transformator 2,2 atau 2,3. Permittivitas minyak isolasi dapat dihitung dari kapasitansi minyak isolasi tersebut dengan persamaan sebagai berikut : (Muhaimin,1993:4)

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot s}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (2-5)$$

Keterangan :

- C : Kapasitansi dari bahan dielektrik (F)
- ϵ_r : Permittivitas bahan dielektrik (F/m)
- s : Jarak antar sela ke kapasitor (m)
- A : Luas permukaan keping kapasitor (m²)
- ϵ_0 : Permittivitas vakum atau konstanta listrik (8,85 x 10⁻¹² F/m)

3. Sudut Kerugian Dielektrik

Pada saat bahan isolasi diberi tegangan bolak-balik, maka terdapat energi yang diserap oleh bahan tersebut. Akibatnya terdapat faktor kapasitif.

2.4 Rugi Daya dalam Dielektrik

Sifat listrik disini merupakan karakteristik minyak terhadap gejala listrik yang diterapkan. Seperti kemampuan mengalirkan arus, faktor disipasi, serta kekuatan dielektrik

minyak dalam menahan tekanan medan listrik. Sifat bahan dielektrik yang selalu terdapat rugi daya. Rugi daya yang dimaksud serta proses penyebabnya adalah sebagai berikut : (Kind,1993:64)

1. Rugi konduksi P_1 akibat konduksi ion ataupun elektron karena nilai konduktivitas (σ) .
2. Rugi Polarisasi P_p akibat polarisasi arah, bidang batas, atau perubahan bentuk.
3. Rugi ionisasi P_i akibat peluahan parsial (*partial discharge*) dalam atau pada suatu susunan isolasi.

Rugi-rugi tersebut menyebabkan pengaruh elektrik tertentu yang dapat dimanfaatkan untuk pengujian tegangan tinggi tanpa merusak. Besaran ukur yang terpenting dan berkaitan dengan rugi yang dimaksud adalah sebagai berikut : (Kind,1993:65)

1. Arus konduksi untuk tegangan searah
2. Faktor disipasi untuk tegangan bolak-balik
3. Karakteristik peluahan parsial untuk tegangan bolak-balik.

Besaran ukur tersebut tergantung pada kondisi pengujian pada umumnya seperti suhu, waktu pengujian, jenis bahan, komposisi bahan, struktur kemurnian, serta kondisi sebelum pengujian.

2.5 Minyak Isolasi

Minyak pada trafo memiliki daya hantar panas yang terjadi pada kumparan dan inti trafo. Sehingga kekuatan elektrik trafo dan umur dari sebuah trafo dipengaruhi oleh minyak isolasi. Spesifikasi minyak isolasi didalam trafo ditentukan sebagai berikut : (Boggas L Tobing,2003:204)

1. Kekuatan elektrik minyak trafo tinggi
2. Daya hantar panas minyak trafo baik
3. Berat jenis minyak trafo rendah, Minyak dengan jenis rendah maka partikel-partikelnya akan melayang-melayang di minyak dan akan mengendap di dasar tangki
4. Memiliki kekentalan yang rendah, minyak yang encer mempercepat dalam mendingkan minyak trafo
5. Memiliki titik tuang yang rendah, minyak dengan titik tuang rendah terjadi pada suhu rendah

6. Mempunyai titik nyala yang rendah, titik nyala yang rendah membuat minyak mudah menguap
7. Tidak merusak material isolasi
8. Unsur kimianya mengakibatkan isolasi dari kumparan pada trafo akan turun dan kumparan trafo akan mengalami korosi harus tetap stabil

Di dalam Menentukan standarisasi dan penggunaan trafo mengacu pada standart penggunaan dan perawatan pada SPLN atau Standart Internasional. Spesifikasi penggunaan dan perawatan trafo di paparkan di dalam standart SPLN 49 tahun 1982 pada penggunaan trafo. Standart tersebut dapat diamati pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi standart SPLN 49 tahun 1982 tentang minyak isolasi baru

No	Sifat	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Metode uji
1	Kejernihan		Jernih		IEC 296
2	Massa Jenis 20°C	g/cm ³	≤ 0,895		IEC 96
3	Viskositas 20°C	cSt	≤ 40	≤ 25	IEC 96
	Kinematika -15°C	cSt	≤ 800	-	IEC 96
	Kinematika -30°C	cSt	-	≤ 800	IEC 96
4	Titik Nyala	°C	≥ 140	≥ 130	IEC 296 A
5	Titik Tuang	°C	≤ -30	≤ -40	IEC 296
6	Angka kenetralan	mg KOH/gr	≤ 0,03		IEC 296
7	Korosi Belerang	-	Tidak korosif		IEC 296
8	Tegangan tembus a. Sebelum diolah b. Sesudah diolah	kV/2.5mm	≥ 30 ≥ 50		IEC 296
9	Faktor kebocoran elektrik	-	≤ 0,05		IEC 250
10	Ketahanan oksidasi a. Angka kenetralan b. kotoran	Mg KOH/gr %	≤ 0,40 ≤ 0,10		IEC 474 & IEC 74

Sumber : SPLN 1982

Dari Tabel 2.1 dapat diamati bahwa untuk sifat-sifat isolasi minyak baru tidak hanya ditentukan dari sifat fisis tetapi juga sifat kimia. Sedangkan untuk sifat fisis seperti tegangan tembus harus lebih besar dari 30 kV, faktor kebocoran elektrik, dan viskositas. Serta untuk sifat kimia yaitu angka kenetralan, ketahanan oksidasi, titik nyala dan titik tuang.

Dan untuk minyak isolasi yang sudah terpakai akan mengandung keasaman yang dapat ditandai dari minyak trafo. Tingkat keasaman ditandai dengan bau yang menyengat, hal ini menyebabkan suhu minyak meninggi sehingga dapat menyumbat lorong-lorong pendingin dan tembus thermal terjadi.

Minyak isolasi adalah campuran dari *hidrokarbon* dan zat-zat aditif lain seperti *isomer* dari *poly-clorinet diphenil*, didalamnya terkandung *parafin, iso-parafin, naphthalenes* dan *aromatics*. Komposisi tersebut disesuaikan dengan penggunaan minyak seperti sebagai minyak isolasi transformator, media dielektrik pada kapasitor, atau media pemadam busur api pada *Circuit Breaker*.

Minyak isolasi harus memiliki karakteristik tertentu agar dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Karakteristik tersebut antara lain : (Wahyu Kuntoro Wibowo,2008:2)

1. Kejernihan Minyak

Warna minyak yang layak digunakan di dalam transformator adalah warna yang jernih dan bersih, selama dioperasikan minyak isolasi akan melarutkan endapan. Semakin besar endapan yang terlarut maka minyak transformator akan memiliki warna yang gelap.

2. Viskositas Kinematik

Tahanan dari cairan untuk mengalir kontinu dan merata tanpa adanya gesekan dan gaya-gaya lain. Semakin rendah viskositas maka konduktivitas termal dari minyak tersebut akan semakin baik.

Viskositas dinamis dalam isolasi cair dinyatakan dalam persamaan:

(Wahyu Kuntoro Wibowo,2008:2)

$$\mu = \frac{2r^2 E}{9v} \rho - \rho_1 \quad (2-6)$$

Dengan :

μ : Viskositas (poise)

r : Jari-jari Bola (cm)

E : Kuat medan listrik (N/kg)

v : Kecepatan bola ukur (cm/s)

ρ : Massa jenis bola ukur (g/cm³)

ρ_1 : Massa jenis isolasi cair (g/cm³)

Untuk Nilai viskositas pada minyak transformator (viskositas kinematik)

dinyatakan dengan persamaan :

(Wahyu Kuntoro Wibowo, 2008 :3)

$$V = \frac{\mu}{\rho_1} \quad (2-7)$$

Dengan :

V : Viskositas kinematik (St)

μ : Viskositas dinamis (Poise)

ρ_1 : Massa jenis isolasi cair (g/cm³)

3. Massa Jenis

Perbandingan antara massa suatu volume cairan pada temperature 15.56°C dengan massa air pada volume dan temperature yang sama. Dan Massa jenis trafo harus lebih rendah dari pada air.

4. Titik Tuang

Temperatur terendah saat minyak dalam keadaan mengalir pada waktu didinginkan dan temperatur dibawah temperatur normal. Minyak isolasi diharuskan memiliki titik tuang yang rendah.

5. Titik Nyala

Minyak di dalam transformator dapat dipanaskan dalam temperatur tertentu sebelum uap yang timbul menjdai api berbahaya. Semakin tinggi titik nyala maka minyak transformator akan lebih baik.

6. Angka Kenetralan

Angka yang menunjukkan penyusun asam minyak isolator dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, hal ini ditunjukkan dengan kecenderungan perubahan secara kimiawi atau indikasi perubahan kimia tambahan.

7. Kemantapan Oksidasi

Asam dalam transformator dapat menyebabkan korosi pada peralatan transformator dan kotoran zat padat menyebabkan transfer panas menjadi terganggu. Asam dan kotoran zat padat ini terbentuk oleh proses oksidasi di dalam minyak transformator.

8. Kandungan Air

Penurunan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak transformator disebabkan oleh kandungan air di dalam minyak transformator. Hal ini akan mempercepat kerusakan isolator, Sehingga kandungan air di dalam minyak transformator harus serendah mungkin.

9. Tegangan Tembus

Minyak isolasi diharapkan memiliki tegangan tembus yang tinggi, tegangan tembus dalam minyak isolasi memiliki kemampuan untuk menahan tegangan elektrik. Kandungan air dan partikel-partikel konduktif dapat menaikkan tingkat tegangan elektrik dan menurunkan tegangan tembus.

10. Faktor kebocoran dielektrik

Tingginya nilai faktor kebocoran dielektrik menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan, dan sebagainya. (Wahyu Kuntoro Wibowo, 2008 :4)

$$E_D > E_C \quad (2-8)$$

Dengan :

E_D : Kuat medan yang dipikul isolator (N/C)

E_C : Kekuatan dielektrik isolator (Kv/cm)

Kekuatan dielektrik minyak isolasi akan berubah bila temperatur dalam minyak isolasi akan meningkat hal ini terjadi dikarenakan panas yang ditimbulkan lebih besar dari panas yang didisipasikannya, sehingga struktur kimia minyak akan berubah.

11. Tahanan Jenis

Tahanan jenis yang rendah menunjukkan adanya pengotor yang bersifat konduktif.

2.6 Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Elektroda Homogen dan Non-Homogen

Besar faktor efisiensi medan listrik (η) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda homogen dan non-homogen dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan menurut Schwaiger sebagai berikut: (Moch.Dhofir,2000:6)

$$\eta = \frac{E_r}{E_m} \quad (2-9)$$

atau

$$E_r = \eta \times E_m \quad (2-10)$$

Keterangan:

η : Efisiensi medan listrik pada susunan elektroda

E_r : Kuat medan listrik rata-rata (kV/cm)

E_m : Kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm)

Pada susunan elektroda keping sejajar, distribusi medan listriknya homogen sehingga besar E_m sama dengan E_r . Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu yang nilainya lebih besar dari kuat medan listrik rata-ratanya. Dengan demikian maka batas nilai faktor efisiensi medan listrik

untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu memenuhi syarat: (Moch.Dhofir,2000:7)

$$\eta \leq 1 \quad (2-11)$$

Besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris dari susunan elektroda, yaitu untuk susunan elektroda yang memberikan distribusi medan listrik homogen semisal susunan pelat datar sejajar maka $\eta = 1$, sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik non homogen seperti jarum-piring, batang-bola, maka nilai $\eta < 1$.

Apabila besar efisiensi medan η diketahui, maka kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus pada dielektrik dalam sela elektroda dapat ditentukan yaitu: (Moch.Dhofir,2000:7)

$$U_d = E_d \times s \times \eta \quad (2-12)$$

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} \quad (2-13)$$

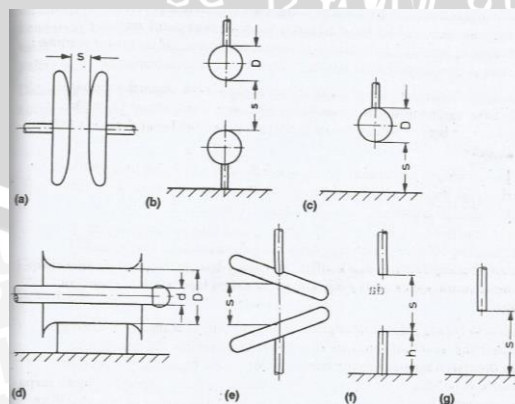
Keterangan:

U_d : Tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

s : Jarak sela antar elektroda (cm)

E_d : Kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus (kV/cm)

Untuk jenis-jenis susunan elektroda yang digunakan di dalam pengujian isolasi minyak dapat diamati pada Gambar 2.4. susunan elektroda yang digunakan di dalam pengujian minyak randu ini, untuk medan homogen digunakan susunan elektroda elektroda standart dan bola-bola, sedangkan untuk medan non-homogen digunakan susunan elektroda jarum-piring. Untuk lebih jelas penggunaan susunan elektroda ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 susunan elektroda (SE) dengan variasi bentuk geometris sebagai objek uji (a) Pelat-pelat, (b) bola-bola, (c) bidang bola, (d) silinder koaksial, (e) silinder silang, (f) batang-batang, (g) bidang-batang

Sumber : Kind, 1993:101

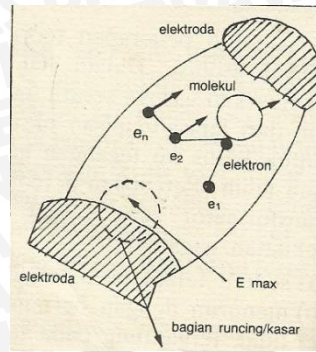
2.7 Teori Kegagalan Zat Cair

Kegagalan pada isolasi cair disebabkan adanya tegangan berlebih pada elektroda-elektroda yang dipisahkan oleh isolasi cair. Pemberian tegangan lebih pada elektroda menyebabkan adanya gelembung-gelembung mikro pada elektroda. Adanya potensial yang tinggi menimbulkan medan yang kuat antar elektroda yang berakibat adanya gelembung-gelembung yang searah dengan medan yang membentuk ikatan jembatan yang menyebabkan terjadinya kegagalan. Kegagalan isolasi cair memiliki unsur sebagai berikut : (Arismunandar,1983:70)

1. Adanya gelembung gas dan butir-butir zat cair
2. Aliran listrik yang besar
3. Lintasan cahaya yang cerah antar elektroda

Teori kegagalan zat cair dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut : (Arismunandar,1983:72)

- a. Teori kegagalan zat murni atau elektronik yang merupakan teori dari kegagalan gas. Artinya proses kegagalan yang terjadi dalam zat cair dianggap serupa dengan teori kegagalan dalam gas.
- b. Teori kegagalan gelembung udara atau kavitasi dimana tak murnian (contohnya pada gelembung udara) mempunyai tegangan tembus yang lebih rendah dari zat cair. Adanya gelembung udara di dalam cairan berakibat awal kegagalan total pada cat cair
- c. Teori kegagalan zat cair, ketidak murniaan di dalam medan listrik (contohnya pada bola-bola cair) merupakan jembatan bertahanan rendah di antara elektroda dan mengakibatkan kegagalan.
- d. Teori kegagalan tak murnian padat, tak murnian (contohnya pada butiran penghantar padat yang ditunjukkan pada Gambar 2.5) dapat menyebabkan pembesaran medan listrik setempat , jika medan dalam zat cair melebihi nilai kritis tertentu di tempat zat cair akan gagal dan berakibat kegagalan total.



Gambar 2.5 Teori kegagalan pemurnian padat
 Sumber : Arismunandar,1983:72

2.7.1 Kegagalan elektronik

Zat cair berkelakuan seperti gas, maka agar terjadi kegagalan zat cair dibutuhkan elektron yang dimasukkan ke dalam zat cair. Bila kuat medan cukup besar, tetapi tidak ada elektron awal maka kegagalan zat cair tidak akan terjadi. Diantara elektroda akan ada medan yang kuat dan medan yang tidak merata yang berbentuk meruncing, maka medan yang terbesar berada di bagian yang meruncing tersebut. Dalam teori ini dinyatakan bahwa elektron-elektron tertentu akan memperoleh energi dari medan yang lebih besar dari pada energi yang hilang karena benturan dengan molekul-molekul.

Elektron yang dihasilkan akan menyebabkan terjadinya arus konduksi dalam zat cair pada kuat medan tinggi. Menurut Schottky arus yang timbul memiliki kerapatan yaitu :
 (Arismunandar, 1983 :73)

$$J = J_t e^{\frac{4.4\sqrt{E}}{T}} \text{ (A/cm}^2\text{)} \tag{2-14}$$

$$\text{Dengan : } J_t = AT^2 e^{-\phi/kT} \tag{2-15}$$

$$E = M E_a \tag{2-16}$$

- Keterangan :
- J : Kerapatan arus konduksi
 - J_t : Kerapatan arus harmonik
 - E_a : Kuat medan yang diterapkan
 - M : Faktor ketidak rataan permukaan

Persamaan 2.15 menunjukkan bahwa arus bergantung pada suhu, tetapi pada kegagalan zat cair ini suhu hanya sedikit mempengaruhi. Ini menunjukkan bahwa katodanya adalah proses emisi medan dan bukan proses emisi termionik.

Untuk terjadinya kondisi banjir elektron diperoleh dengan menyamakan perolehan energi oleh elektron yang menempuh lintasan bebas rata-rata : (Arismunandar, 1983 :74)

$$U_1 = F \cdot \lambda \quad (2-17)$$

$$U_1 = e \cdot E \cdot \lambda \quad (2-18)$$

Energi yang diutuhkan untuk mengionisasikan molekul

$$U_2 = c \cdot h \cdot \nu \quad (2-19)$$

Keterangan :

E : Medan yang diterapkan

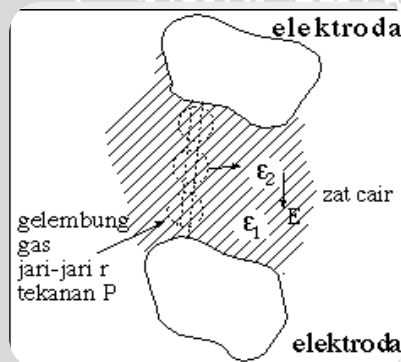
ν : Lintasan bebas rata-rata

$h\nu$: Catu energi yang diperlukan untuk mengionisasikan molekul

c : Konstanta

2.7.2 Kegagalan gelembung atau kavitasi zat cair

Kegagalan gelembung atau kavitasi atau gas merupakan bentuk kegagalan zat cair yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas didalamnya. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Teori kegagalan gelembung pada zat cair

Sumber : Arismunandar,1983:75

Menurut Kao dan Krasucki, sebab-sebab timbulnya gelembung gas sebagai berikut : (Arismunandar,1983:74)

1. Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terdapat kantong-kantong udara dipermukannya
2. Tabrakan elektron, terjadinya produk-produk baru berupa gas
3. Pengupan cairan karena adanya lucutan pada bagian-bagian elektroda yang tajam dan teratur
4. Zat cair dikenai perubahan suhu dan tekanan

Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam isolasi cair dinyatakan: (Arismunandar, 1983 :74)

$$E_b = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \quad (2-20)$$

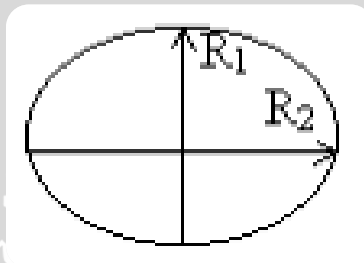
Dengan :

ε_1 : Permittivitas zat cair

E_0 : Medan listrik dalam zat cair tanpa gelembung

2.7.3 Kegagalan bola cair dalam zat cair

Kegagalan bola cair disebabkan oleh suatu media isolasi yang mengandung sebuah bola cair atau cairan lain. Adanya bola cair tersebut menyebabkan ketidakstabilan pada media isolasi tersebut. Jika bola cair diberikan medan E, maka bola cair tersebut akan berubah menjadi sferoida (lihat Gambar 2.7) dan terdapat suatu medan sebesar E_2 . Maka hubungan antara kedua medan dinyatakan oleh : (Arismunandar, 1983 :77)



Gambar 2.7 Teori kegagalan bola cair dalam zat cair

Sumber : Arismunandar,1983:77

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)G} \quad (2-21)$$

Dimana :

$$G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cos^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right\} \quad (2-22)$$

$$\gamma = R_2/R_1 \quad (2-23)$$

Keterangan :

R_2 : Jari-jari panjang sferoida

R_1 : Jari-jari pendek sferoida

ε_1 : Permittivitas zat isolasi cair

ε_2 : Permittivitas bola cair

2.7.3 Kegagalan Butiran Padat dalam Zat isolasi Cair

Kegagalan butiran padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran (*particle*) zat padat di dalam isolasi cair yang akan memulai terjadinya kegagalan. Butiran padat memiliki permittivitas yang berbeda dengan permittivitas zat isolasi cair. Butiran padat memiliki permittivitas ε_2 dan permittivitas zat isolasi cair yaitu ε_1 (dilihat pada Gambar 4.8).

Menurut kok besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan tak seragam adalah :
(Arismunandar, 1983 :80)

$$F = r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} U \text{ grad } U \quad (2-24)$$

$$\text{Secara khusus dapat dituliskan : } F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \text{ grad } U^2 \quad (2-25)$$

Keterangan :

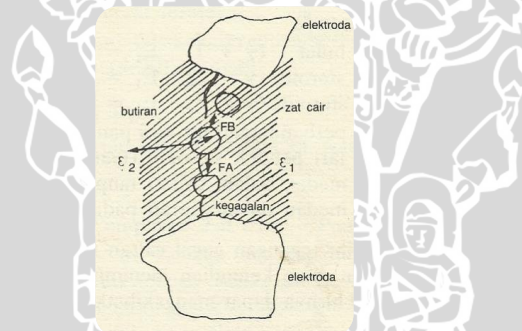
r : Jari-jari butiran

U : Gradien tegangan

$\epsilon_{1,2}$: Permittivitas butiran padat, zat isolasi cair

Untuk persamaan diatas terdapat dua kemungkinan yaitu :
(Arismunandar, 1983:81)

1. Jika $\epsilon_1 > \epsilon_2$ maka arah gaya yang bekerja pada butiran padat isolasi cair akan searah dengan tekanan listrik maksimum (F_A) gaya akan mendorong butiran ke arah bagian yang terkuat dari medan
2. Jika $\epsilon_1 < \epsilon_2$ seperti dalam gelembung gas maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B)



Gambar 2.8 Kegagalan Butiran Padat dalam Zat isolasi Cair

Sumber : Arismunandar, 1983 :81

Butiran penghantar diantara elektroda mengakibatkan perbesaran medan dalam zat isolasi cair di dekat permukaan butiran. Pembesaran medan ditentukan dalam bentuk butiran yaitu : (Arismunandar, 1983 :82)

- a. Untuk butiran bulat ($\gamma = 1$) : $E_1 = 3E$
- b. Untuk butiran sferoida ($\gamma = 2$) : $E_1 = 5,8 E$
- c. Untuk butiran sferoida ($\gamma = 5$) : $E_1 = 18 E$

Keterangan :

γ : Perbandingan jari-jari panjang terhadap jari-jari pendek sferoida

E : Medan dalam cairan tanpa butiran

E_1 : Medan dalam cairan pada ujung butiran

2.8 Minyak Randu

Kapuk randu atau kapuk (*Ceiba pentandra*) adalah pohon tropis yang tergolong ordo Malvales dan famili Malvaceae (sebelumnya dikelompokkan ke dalam famili terpisah Bombacaceae), berasal dari bagian utara dari Amerika Selatan, Amerika Tengah dan Karibia, dan (untuk varitas *C. pentandravar. guineensis*) berasal dari sebelah barat Afrika. Kata "kapuk" atau "kapok" juga digunakan untuk menyebut serat yang dihasilkan dari bijinya (Wikipedia,2009). Pohon ini juga dikenal sebagai kapas Jawa atau kapok Jawa, atau pohon kapas-sutra. Dan disebut sebagai *Ceiba*, nama genusnya, yang merupakan simbol suci dalam mitologi bangsa Maya. Pohon biji Randu dapat dilihat seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pohon randu penghasil biji randu

Sumber : kristantobudiprabowo.blogspot.com

Pohon ini tumbuh hingga setinggi 60-70 m dan dapat memiliki batang pohon yang cukup besar hingga mencapai 3 m.

Biji dari pohon randu ini bisa digunakan sebagai minyak. Biji tersebut diperoleh dari proses pengekstraksian biji kapuk pohon randu. Biji kapuk memiliki kandungan minyak sebesar 16,14% dengan kelembaman kurang dari 10 %. Kadungan asam yang terbesar di dalam minyak randu yaitu asam linoleat (asam lemak yang tak jenuh) yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.(Kemala,2006)

Tabel 2.2 Memaparkan komposisi Asam Lemak di dalam Biji pohon Randu dan persentasenya

No	Asam Lemak	Persentase berat (%)
1	Asam mirsitat	1,4
2	Asam palmitat	23,4
3	Asam stearate	1,1
4	Asam arachidat	1,3
5	Asam miriatoleat	0,1
6	Asam palmitoleat	2,0
7	Asam Oleat	22,9
8	Asam linoleat	47,8

Sumber : Krischenbauer,1960

Tabel 2.3 Memaparkan sifat kimia dari komposisi keseluruhan minyak biji randu

No	Komposisi	Biji (%)	Kernel (%)	Kulit (%)	Daging (%)
1	Kadar air	9,9	6,9	9,3	7,8
2	Minyak	19,5	29,6	0,9	7,4
3	Protein	19,4	30,3	3,8	44,8
4	Serat Kasar	22,6	4,8	46,1	9,9
5	Abu	4,7	6,9	2,6	5,6

Sumber : Krischenbauer,1960

Dari Tabel 2.3 dapat dijelaskan bahwa kadungan minyak randu di dalam minyak randu terbesar terletak pada serat kasar dan biji. Sedangkan abu di dalam minyak randu sangat rendah. Di dalam minyak biji randu mengandung hidrokarbon seperti squalene. Minyak tersebut mengandung 0,004 – 0,12% squalene dengan biji Randu yang masih murni. Sedangkan menurut Kufmann jumlah total hidrokarbon sebesar 0.25 %. Pada suhu kamar minyak biji Randu dapat larut dalam pelarut pada berbagai zat, tetapi tidak larut di dalam furfural dan pelarut polar seperti aseton metil asetas. Pembakaran 1 gram minyak biji Randu menghasilkan 9.500 kalori dengan indeks refraksinya pada suhu 20⁰C sebesar 1,4724.

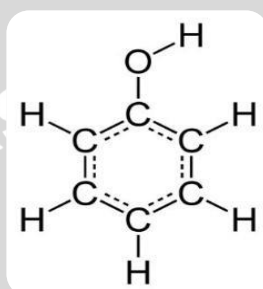
Nilai titik asap, titik api dan titik nyala pada minyak biji Randu, dengan biji randu yang murni dan mengandung asam lemak bebas sebesar 0,01-0,03% dan mempunyai titik asap 221,1-232,2 °C, titiknyala 323,8-329.4 °C dan titik api 357,2-362,7 °C. Dan pada minyak kasar mengandung asam lemak bebas sebesar 1,8% yang mempunyai nilai titik asap, titik nyala dan titik api sebagai berikut : 145°C, 293,3 °C, dan 356,1°C

Minyak pohon randu ini biasanya digunakan sebagai alat penerangan, minyak pelumas, campuran lemak babi, minyak salad, bahan untuk membuat sabun dan margarine serta mertega putih. Dan pada pembahasan ini, minyak randu akan digunakan sebagai isolasi dari peralatan tegangan tinggi, struktur minyak pohon randu yang akan diamati adalah kekuatan dielektrik, arus konduktansi, dan sifat dasar minyak pohon randu.

Dalam pengelolaan minyak pohon randu ini dilakukan pemurnian agar menghilangkan rasa, bau dan warna yang kurang menarik (kecoklatan) dan dapat memperpanjang masa simpan minyak, dikarenakan minyak randu mengandung kotoran yang larut dan tidak larut dalam minyak randu. Kotoran yang larut dalam minyak randu yaitu asam lemak bebas, aldehida, keton, zat warna serta tokoferol. Sedangkan yang tidak larut di dalam minyak randu yaitu getah, lendir, protein, fosfatida yang berasal dari sumber minyak. (Sardjono,1983)

2.9 Fenol

Fenol atau asam karbolat atau benzenol merupakan senyawa aromatik, turunan benzene dengan gugus hidroksil (-OH) yang terikat dengan cincin benzene dan mudah larut dalam air. Fenol merupakan jenis asam yang lebih kuat dari alkohol sehingga memiliki bau yang sangat menyegat atau khas, fenol sulit di degradasi oleh organisme pengurai sehingga dapat masuk dengan mudah ketubuh manusia melalui pencernaan dan pernafasan (Ulya,2012). Rumus kimianya yaitu C_6H_5OH dan memiliki struktur gugus hidroksil (-OH) yang berikatan dengan cincin fenil seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Struktur dari fenol (C_6H_5OH)

Sumber : www.encyclopedia.com

Fenol bersifat racun dan korosif terhadap kulit (menimbulkan iritasi). Fenol memiliki titik leleh $41^{\circ}C$, titik didih $181,7^{\circ}C$ larut dalam pelarut organik dan larut didalam air dengan kelarutan terbatas yaitu 8,3 gram/100ml (Hamamah F dan Trihadiningrum Y,2008). Sifat fenol cenderung asam artinya fenol dapat melepaskan ion H^+ dari gugus hidroksilnya tetapi fenol juga dapat berikatan dengan basa seperti pada fenolat, sifat asam yang dimiliki pada fenol dapat diuraikan dengan asam karbonat serta fenol mudah dioksidasi oleh udara dan memberikan zat-zat warna. Pengeluaran ion tersebut menjadikan anion fenoloksida $C_6H_5O^-$ yang dapat dilarutkan didalam air.

Fenol didapat melalui oksidasi sebagian pada benzene atau asam benzoat dengan proses *Rasching*, fenol dapat diperoleh juga dari hasil oksidasi batu bara (Kaniawati,2011). Sebagian besar fenol bersifat asam lemah dari pada asam karbonsilat, Jika fenol bereaksi dengan basa, fenol akan diubah mejadi anion fenoksida dan fenol terlarut didalam larutan basa (sebagai garam fenoksida). Larutan natrium hidroksida dan natrium karbonat merupakan basa yang cukup kuat untuk melarutkan fenol yang tak larut didalam air, tetapi larutan natrium bikarbonat tidak dapat merubah menjadi basa dikarenakan larutan tersebut mengandung basa yang lemah sehingga larutan tersebut tidak dapat berubahnya menjadi basa.

Fenol digunakan di dalam limbah industri di Indonesia. Dan industri yang menghasilkan fenol yaitu industri migas, perekat, kayu lapis, farmasi, cat, tekstil, keramik, plastik, limbah cair Rumah Sakit. Selain itu, fenol juga terdapat pada limbah kosmetik yang salah satunya berasal dari sisa pembersih lantai. Fenol bisa digunakan untuk desinfektan dan antiseptik untuk sterilisasi peralatan terutama dari laboratorium Mikrobiologi dan ruang operasi. Fenol merupakan komponen utama pada antiseptik dagang, triklorofenol atau TCP (*trichlorophenol*) dan fenol berfungsi untuk pembuatan obat-obatan bagian produksi aspirin, pembasmi rumput liar, dll.

Fenol dapat mengalami degradasi atau penurunan dikarenakan cahaya matahari (fotodegradasi), namun laju pergerakan fenol jauh lebih tinggi dari laju degradasinya. Sehingga konsentrasi fenol akan meingkat sampai akhirnya melewati batas yang diijinkan. Proses fotodegradasi fenol pada dasarnya dapat dipercepat dengan fotokatalis seperti TiO_2 , CuO , ZnO , CdO dan Fe_2O_3 yang masing-masing bertindak sebagai sentizer. Reaksi fotokatalis sangat efektif untuk menguraikan fenol secara sempurna menjadi CO_2 dan H_2O yang aman bagi lingkungan.

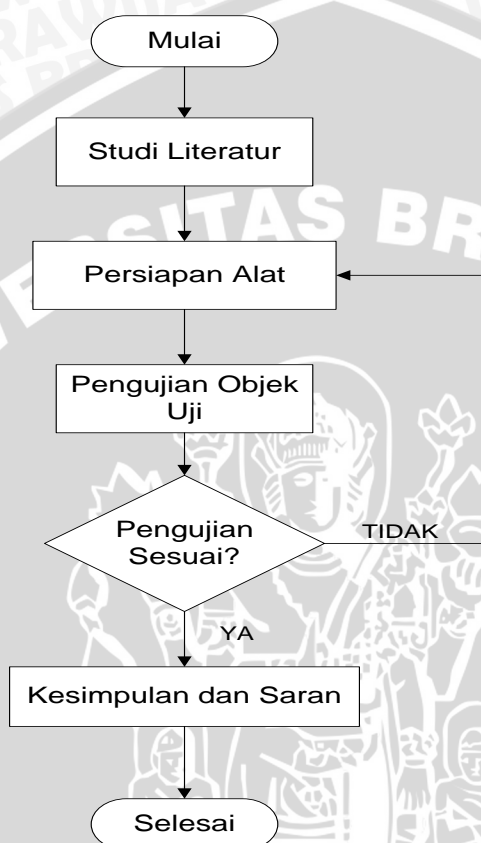
(Wahyuni, dkk. 2004)



BAB III

METODE PENELITIAN

Untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian maka unjuk kerja prosedural dan langkah-langkah percobaan penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis Penelitian

Dari Gambar 3.1 dapat diamati bahwa unjuk kerja di dalam penelitian ini diawali dengan tahap studi literatur yang dilakukan dengan membaca buku pustaka yang berkaitan dengan pengujian isolasi minyak. Di dalam melakukan persiapan alat perlu untuk dipersiapkan alat-alat dan bahan yang akan digunakan di dalam pengujian dan di dalam pengujian dapat diperoleh data sesuai dengan standart SPLN 49 tahun 1982 bahwa tegangan tembus pada minyak isolasi baru yaitu 30 kV/2,5 mm. Sehingga di dapat kesimpulan dan saran sesuai dengan kaidah isolasi minyak baru.

3.1 Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur yang ada kaitannya dengan uji kekuatan isolasi dan ketahanan dari minyak isolasi pada peralatan tinggi yang menggunakan minyak randu yang berasal dari biji kapuk.

Studi literatur ini meliputi jurnal, buku-buku dan sumber lain yang menunjang yang berasal dari internet. Studi literatur ini dimaksudkan untuk landasan teori didalam mengerjakan penelitian tentang uji ketahan isolasi pada peralatan tegangan tinggi menggunakan minyak nabati atau minyak alternatif dari minyak Randu.

3.2 Persiapan Alat

Adapun bahan dan peralatan yang digunakan didalam penelitian ini agar mendapatkan arus konduksi, arus bocor dan tegangan tembus pada susunan elektroda homogen dan non homogen antara lain :

- a. Minyak Randu : Objek uji
- b. *HV Transformer* (Trafo uji) : 220 V/ 100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- c. C_M : Pembagi Kapasitif 100 pF
- d. Chamber : Kotak Uji
- e. SB (Sela Bola) : Susunan elektroda bola-bola
- f. JP (Jarum-piring) : Susunan elektroda jarum-piring
- g. BB (Bola-Bola) : Susunan elektroda bola-bola
- h. *DSM* : Alat ukur tegangan tinggi AC
- i. Amperemeter : Alat ukur arus listrik
- j. Gelas Ukur : Mengetahui volume minyak randu
- k. Timbangan : Mengetahui berat Fenol
- l. Heater : Memanaskan objek uji

3.2.1 Fungsi Peralatan

Berikut masing-masing fungsi peralatan yang digunakan di dalam pengujian.

- a. Minyak Randu, sebagai objek uji yang akan diteliti.
- b. *HV Transformer* (Trafo Uji), transformator ini dapat menaikkan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sebesar 5 kVA, dan frekuensi yang digunakan sesuai standar PLN, yaitu 50 Hz.

- c. C_M merupakan kapasitor pengukuran yang berfungsi sebagai perata tegangan dan pelindung meja kontrol (*control desk*).
- d. *Chamber*, ruang uji digunakan sebagai wadah tempat pengujian minyak isolasi
- e. SB, Sela Bola digunakan sebagai indikator atau petunjuk bahwa distribusi tegangan pada minyak isolasi sudah terjadi. Sedangkan fungsi sela bola pada pengujian arus konduktansi digunakan sebagai pelindung atau proteksi peralatan khususnya pada ampermeter.
- f. JP, Jarum-piring digunakan sebagai elektroda pengujian dan pembanding hasil pengujian bola-bola
- g. BB, Bola-Bola digunakan sebagai indikator tembus pada minyak isolasi dan mengetahui arus konduktansi
- h. DSM merupakan alat ukur yang berada di meja control (*control desk*), dan fungsi dari DSM adalah sebagai pengukur tegangan tinggi AC.
- i. Amperemeter, digunakan sebagai pengukur arus konduktansi yang terjadi.
- j. Gelas ukur, digunakan sebagai wadah untuk mengetahui volume minyak randu yang di dalam penelitian.
- k. Timbangan, digunakan untuk mengetahui berat dari Kristal fenol sebagai bahan campuran dari minyak randu.
- l. Heater, digunakan untuk memanaskan minyak randu dan fenol pada suhu 20-30°C

3.3 Pengujian Objek Uji

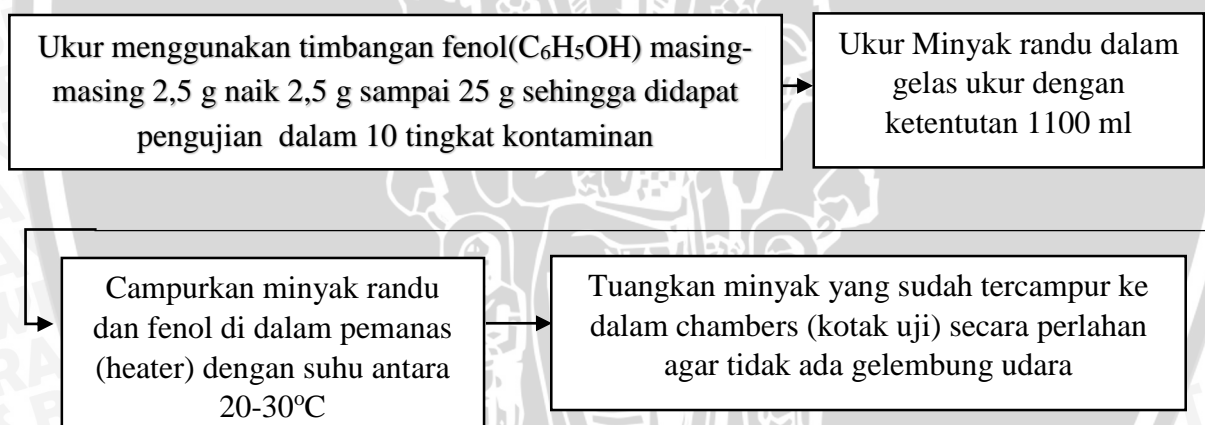
Minyak isolasi yang dipakai dalam pengujian ini adalah Minyak alternatif yang masih belum pernah dipakai (baru) yaitu minyak biji kapuk atau dikenal dengan minyak randu dengan penambahan zat adiftif fenol dengan rumus kimia C_6H_5OH untuk berbagai elektroda jarum-piring dan bola-bola. Perlu diketahui bahwa dalam penuangan minyak isolasi dilakukan dengan penuangan minyak isolasi yang telah di tera menggunakan gelas ukur dan sudah tercampur fenol yang terukur, pencampuran dilakukan didalam heater atau pemanas pada suhu 20-30°C untuk memperoleh campuran fenol dan minyak randu secara homogen atau menyatu secara keseluruhan. Dan pada saat pengambilan dilakukan pada wadah yang bersih dan terpisah serta berlahan-lahan agar minyak isolasi tidak terkontaminan dan tidak ada gelembung udara.

3.3.1 Persiapan Kontaminan

Kontaminan yang dipakai dalam pengujian ini adalah fenol atau asam karbolat (C_6H_5OH) yang memiliki sifat asam artinya fenol dapat melepaskan ion H^+ dari gugus hidroksilnya. Proses produksi fenol dilakukan melalui oksidasi sebagian pada benzena atau asam benzoat.

Tujuan dari penggunaan fenol (C_6H_5OH) ini adalah untuk mengurangi kandungan asam di dalam minyak randu sehingga dapat menaikkan tegangan dari minyak isolasi yang dapat memicu ketahanan isolasi dari minyak isolasi. Sebelum fenol dilarutkan ukur fenol dengan timbangan sebanyak 2,5 g naik 2,5 g sampai 25 g, sehingga didapatkan 10 tingkat kontaminan yang menggunakan fenol kemudian fenol dicampurkan di dalam heater atau pemanas dengan minyak isolasi alternatif "Minyak Randu" sampai fenol dan minyak isolasi tercampur dengan rata.

Secara lebih sederhana proses penyiapan kontaminan dapat dilihat pada Gambar 3.2.



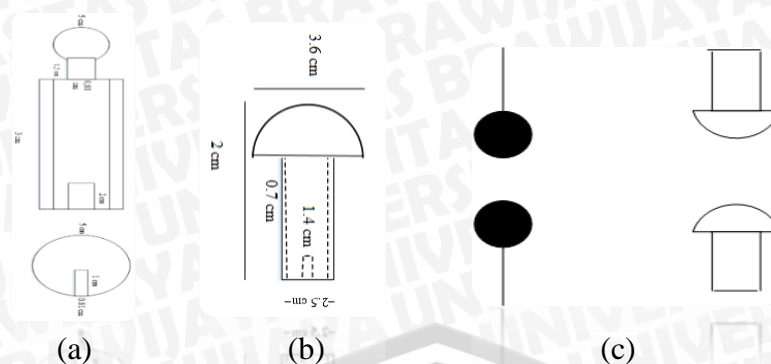
Gambar 3.2 Bagan Persiapan Kontaminan

3.2.1 Persiapan elektroda uji

Elektroda yang digunakan didalam penelitian ini terbuat dari bahan alumunium yang berupa elektroda bola-bola dan jarum piring

a. Elektroda bola- bola

Elektroda ini mempunyai diameter 50 mm yang disesuaikan dengan standarisasi IEC 156 dan sebagai pembanding digunakan elektroda setengah bola sesuai standart VDE 0370 yang di dalam IEC 156 diatur spesifikasi tegangan tembus 30kV/cm dengan jarak sela 2,5 mm dan digunakan untuk mengetahui distribusi medan homogen ditunjukkan pada Gambar 2.3.

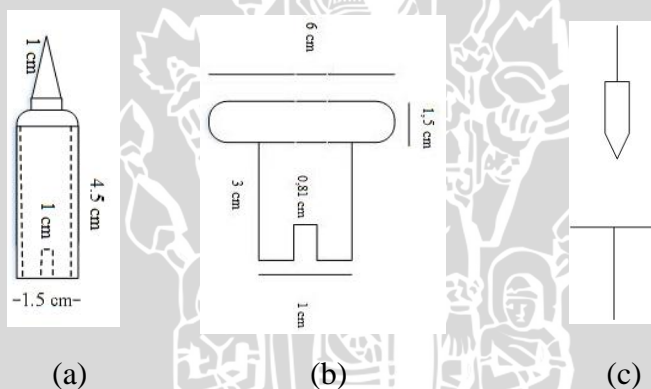


Gambar 3.3 Elektroda bola-bola

- (a) Elektroda bola
- (b) Elektroda setengah bola
- (c) Elektroda bola-bola dan setengah bola

b. Elektroda Jarum piring

Dipakai elektroda jarum piring dengan diameter elektroda piring 60 mm dan secara khusus dipasangkan dengan elektroda jarum dengan diameter 1,5 mm untuk dilakukan penelitian tentang pengaruh medan yang non-homogen ditunjukkan pada Gambar 3.4.

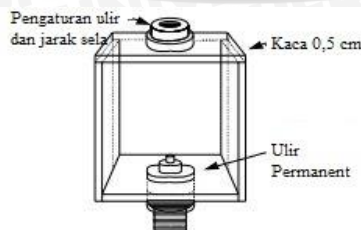


Gambar 3.4 Elektroda Jarum-piring

- (a) Elektroda jarum
- (b) Elektroda piring
- (c) Elektroda jarum-piring

3.3.3 Persiapan Kotak Uji

Kotak uji yang digunakan yaitu terbuat dari bahan kaca Tempered dengan ketebalan 0,5 cm. Kaca memiliki temperature kerja sampai 700°C sehingga isolasi kaca sangat cocok digunakan didalam penelitian iniyang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



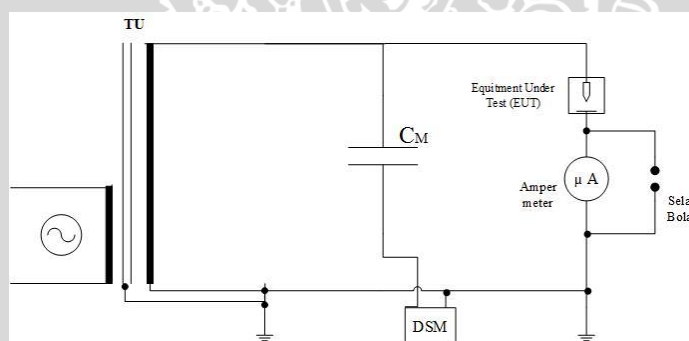
Gambar 3.5 Kotak uji

3.4 Rangkaian Pengujian

3.4.1 Rangkaian Pengujian Arus Bocor Dan Tegangan Tembus Pada Pengujian Tegangan Tinggi Bolak-Balik (AC)

Dalam pengujian arus bocor dan tegangan tembus dari minyak randu digunakan tegangan bolak-balik (AC). Hal ini menunjukkan bahwa arus bocor didalam minyak randu digunakan untuk mengetahui ketahanan isolasi minyak randu sedangkan tegangan tembus digunakan untuk mengetahui tingkat kekuatan minyak di dalam menahan tegangan yang besar. Pada pengujian ini digunakan elektroda bola-bola sebagai parameter uji distribusi medan yang homogen. Dan faktor efisiensi pada susunan elektroda yaitu $\eta = 1$. Sedangkan pada elektroda jarum piring digunakan untuk mengetahui distribusi medan yang non homogen yaitu $\eta \leq 1$.

Untuk mengetahui arus bocor menggunakan pengujian tegangan bolak-balik(AC). Dimana di dalam chambers (kotak uji) salah satu elektroda dihubungkan dengan terminal tegangan tinggi sedangkan elektroda yang lainnya dihubungkan dengan ampermeter yang dipararel dengan sela bola sebagai pengaman. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.

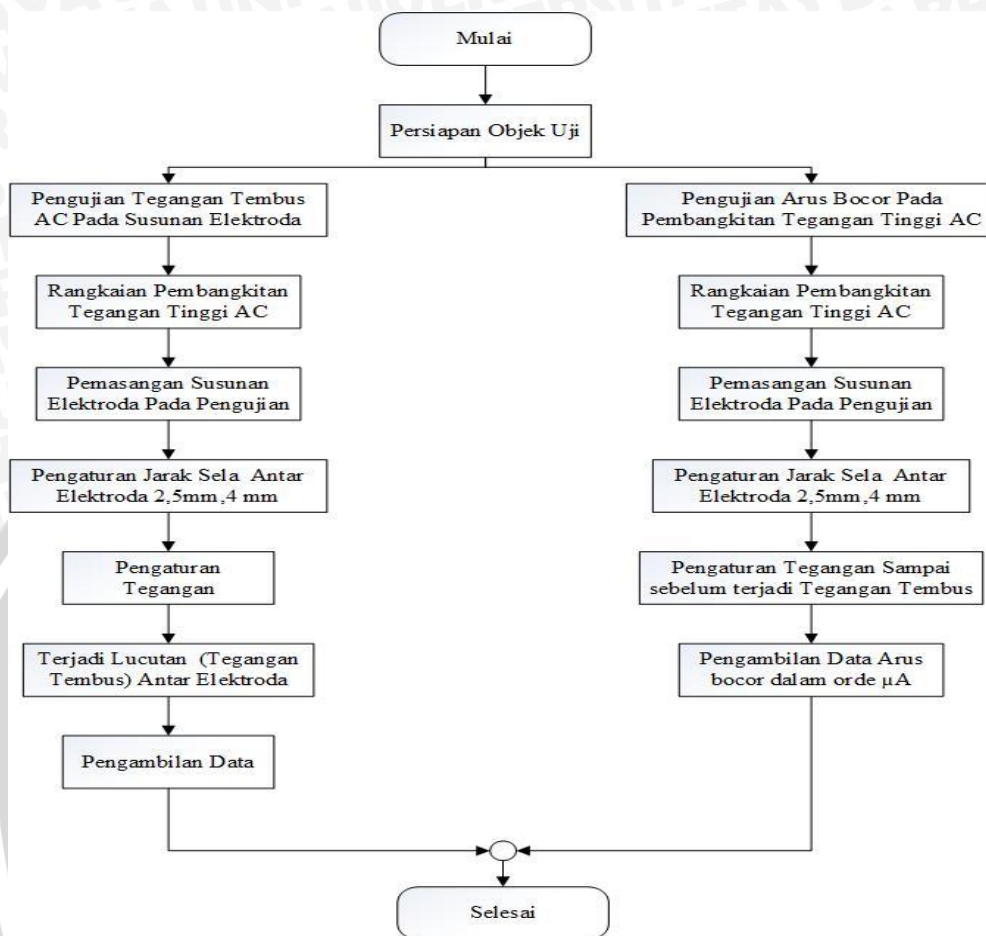


Gambar 3.6 Rangkaian Pengujian Arus Bocor dan Tegangan Tembus Pada Pengujian AC

Pada Gambar 3.6 dapat diamati bahwa untuk mengetahui arus bocor dan tegangan tembus menggunakan rangkaian pengujian yang sama, tetapi untuk pengujian tegangan tembus tidak digunakan ampermeter dan sela bola. Dimana di dalam pengujian tegangan tembus tersebut, terminal tegangan tinggi dihubungkan ke salah satu elektroda jarum dan elektroda piring yang lain di groundkan.:

Pada Gambar 3.6 dapat dianalisis trafo uji dihubungkan pararel dengan C_M (pembagi kapasitif) untuk dapat diukur tegangannya. Tegangan ukurnya diukur menggunakan *Control desk* yang digunakan kabel penghubung DSM pada *control desk*, kotak uji atau chambers dihubungkan pararel dengan trafo uji dan C_M serta elektroda bola atau jarum di dalam chambers bagian atas dihubungkan dengan tegangan tinggi sedangkan elektroda bola atau piring yang bawah dihubungkan dengan ground.

Diagram alir untuk pengujian karakteristik arus bocor dan tegangan tembus minyak randu pada kondisi minyak randu murni dan penambahan fenol dapat ditunjukkan pada Gambar 3.7.



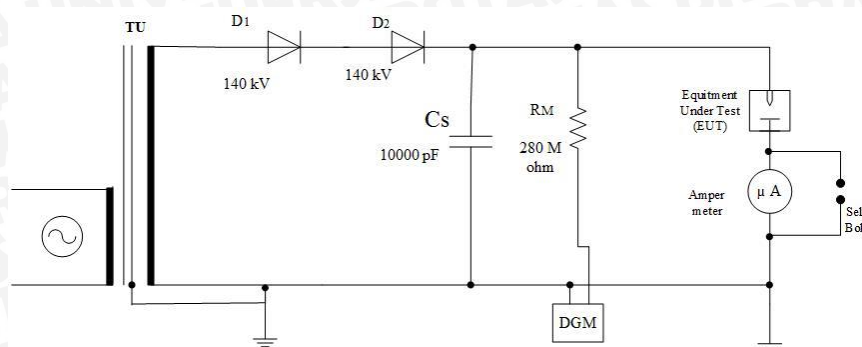
Gambar 3.7 Diagram alir pengujian arus bocor dan tegangan tembus pada pengujian Tegangan Tinggi Bolak-Balik (AC)

3.4.2 Rangkaian Pengujian Arus Konduksi, Resistivitas Dan Permittivitas Minyak Randu

Pengukuran Arus konduksi merupakan metode yang tidak merusak dikarenakan yang diukur adalah tingkat kebocoran dari minyak isolasi tersebut. Dengan mengetahui kebocoran arus maka kita dapat mengetahui resistivitas dari minyak randu tersebut sehingga dapat diketahui kelayakan minyak randu untuk digunakan didalam isolasi peralatan tegangan tinggi.

Pengukuran arus konduksi menggunakan tegangan tinggi DC yang tidak menggunakan tegangan yang terlalu tinggi yaitu sebesar 2 kV. Didalam pengukuran arus konduksi harus dipertimbangkan peralatan yang tersedia di laboratorium. Dan untuk jarak sela elektroda yang diukur yaitu 2,5 mm dan 4 mm.

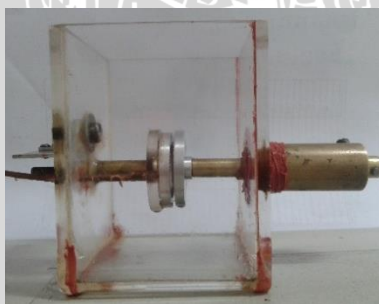
Rangkaian pengujian arus konduksi pada minyak Randu murni dan penambahn fenol dapat ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Rangkaian pengukuran arus konduksi pada minyak randu murni dan penambahan fenol

Pada Gambar 3.8 dapat diamati bahwa trafo uji dihubungkan seri dengan dioda, disini digunakan dua dioda agar tidak ada arus balik yang besarnya dua kali tegangan maksimum dari sumber ac. Dan pada rangkaian dihubungkan paralel dengan Cs (pembagi tegangan) dan R_M (pengaman *control desk*). *Chambers* (kotak uji) juga dihubungkan paralel dengan trafo uji, sedangkan di dalam pengukuran ampermeter di paralel dengan sela bola sebagai pengaman dari ampermeter daan dihubungkan seri dengan *chambers* (kotak uji).

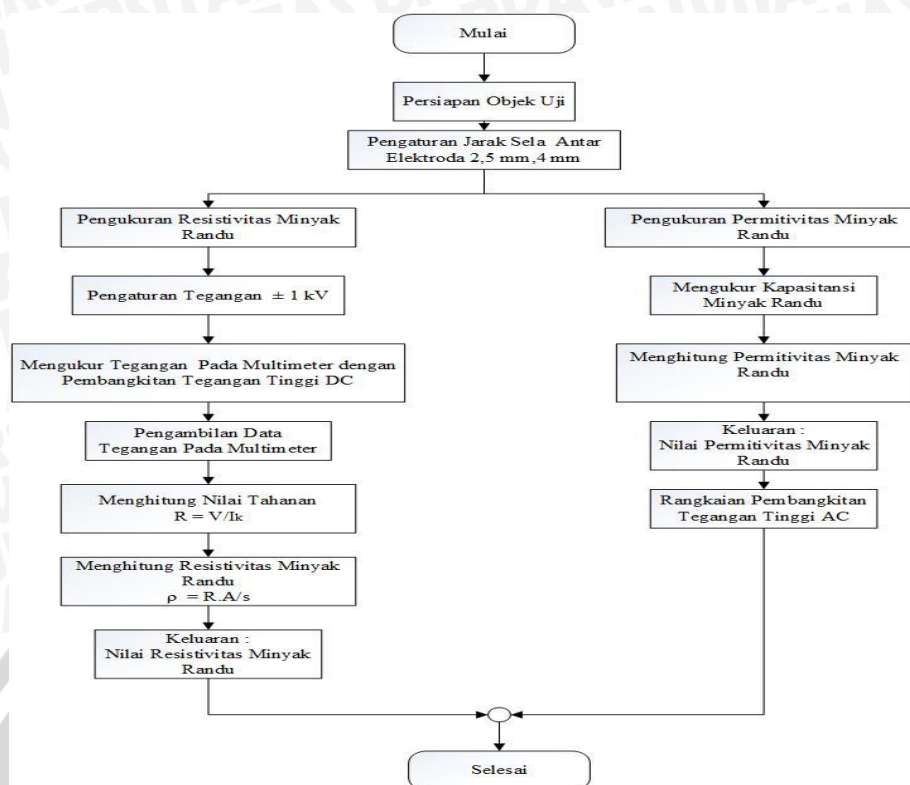
Wadah yang digunakan didalam pengujian arus konduksi, resistivitas, dan permitivitas mempunyai kotak uji yang khusus yang terdiri dari elektroda tegangan tinggi, elektroda cincin pengaman dan elektroda ukur dengan diameter 2 cm, dengan jarak sela antar elektroda (s) yaitu 2,5 mm dan 4 mm. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 *Chambers* (kotak uji) di dalam pengujian arus konduksi, resistivitas dan permitivitas dengan menggunakan pengukuran Tegangan Tinggi Searh (DC)

Untuk pengujian permitivitas, terlebih dahulu dicari nilai kapasitansi minyak randu dengan menggunakan multimeter yang dihubungkan langsung dengan *chambers* (kotak uji) untuk diketahui nilai kapasitansi di dalam minyak randu.

Diagram alir untuk mengetahui arus konduksi, resistivitas dan permitivitas dapat ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Diagram alir untuk pengujian arus konduksi, resistivitas dan permitivitas pada Minyak Randu

3.5 Pengukuran Dengan Model Penambahan fenol (C_6H_5OH)

Penggunaan fenol digunakan untuk mengurangi kadungan asam didalam minyak randu sehingga dapat menaikkan tegangan tembus dan memperkecil nilai arus konduksi pada minyak Randu. Penggunaan fenol ini, sebagai penetralisis dari zat asam yang dimiliki oleh Minyak Randu supaya layak digunakan di dalam isolasi peralatan tegangan tinggi. Dengan menggunakan gelas ukur yang digunakan untuk mengukur volume dari minyak Randu dan fenol yang diukur menggunakan timbangan maka akan didapatkan campuran minyak randu dan fenol secara homogen pada suhu $20-30^{\circ}C$ untuk digunakan sebagai objek uji. Seperti pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Komposisi penambahan fenol pada susunan elektroda standart

No	Minyak Randu (ml)	Fenol C ₆ H ₅ OH (g)
1	250	2,5
2	250	5
3	250	7,5
4	250	10
5	250	12,5
6	250	15
7	250	17,5
8	250	20
9	250	22,5
10	250	25

Tabel 3.2 Komposisi Penambahan Fenol pada Susunan Elektroda Bola- Bola dan Jarum-Piring

No	Minyak Randu (ml)	Fenol C ₆ H ₅ OH (g)
1	1100	2,5
2	1100	5
3	1100	7,5
4	1100	10
5	1100	12,5
6	1100	15
7	1100	17,5
8	1100	20
9	1100	22,5
10	1100	25

Volume yang tertampung didalam *chambers* (kotak uji) tersebut sudah mewakili sampel dari minyak Randu yang akan diuji. Dalam pengujian ini pengukuran dilakukan dalam waktu selang 1 menit dan diambil 3 data untuk mewakili pengujian yang telah dilakukan dan digunakan jarak sela 2,5 dan 4 mm. Tetapi didalam pengujian arus bocor pada pembangkitan tegangan tinggi AC hanya dilakukan pada penambahan fenol pada 7,5 gram, 15 gram dan 25 gram sebagai objek uji di dalam pengujian arus bocor pada pembangkitan tegangan tinggi AC.

3.6 Kondisi Pengujian

3.6.1 Kondisi Pengujian Minyak Randu Murni

Kondisi ini pengujian dilakukan tanpa campuran zat aditif yaitu fenol. Pada objek uji digunakan minyak randu murni dengan elektroda uji bola-bola dan jarum piring serta sebagai pembanding digunakan elektroda standart. Elektroda bola-bola, jarum piring, setengah bola dimasukkan didalam *chambers* kemudian dituangkan minyak Randu didalam

chambers. Pada *chambers* titik tegangan tinggi diletakkan pada satu ulir yang terdiri dari elektroda bola, jarum atau elektroda standart dan ulir yang lain yaitu untuk elektroda bola, piring dan elektroda standart dihubungkan ke titik terendah atau ground. Hal ini agar pengujian sesuai dengan standart dari pengujian minyak isolasi.

Tetapi pada pengujian arus konduksi minyak randu murni dilakukan dengan menambahkan minyak randu dari 500 ml naik 25 ml sampai 725 ml sehingga didapatkan 10 data di dalam pengujian arus konduksi.

3.6.2 Kondisi Pengujian dengan Fenol

Pengujian dengan fenol atau penambahan kontaminan zat aditif dilakukan dengan mengukur minyak randu dan fenol sesuai dengan Tabel 3.1 dan Tabel 3.2. Pada kali ini *chambers* akan menggunakan elektroda bola-bola, jarum-piring dan elektroda standart untuk mengetahui medan homogen dan non-homogen. Penuangan minyak Randu terlebih dahulu dilakukan di gelas ukur dan fenol di ukur pada timbangan. Setelah itu, minyak randu dan fenol yang sudah terukur dimasukkan didalam pemanas atau heater untuk dilakukan pencampuran dan suhu pemanasan pada heater antara 20-30°C, suhu ini dipilih dikarenakan pencampuran fenol dan minyak randu agar tercampur secara merata (homogen). Pada penuangan ke *chambers* (kotak uji) campuran minyak randu dan fenol dilakukan secara perlahan agar tidak ada gelembung udara di dalam *chambers* sehingga dalam proses pengujian bisa maksimal. Serta pada *chambers* titik tegangan tinggi diletakkan pada satu ulir dan ulir yang lain dihubungkan ke titik terendah atau ground. Hal ini agar pengujian sesuai dengan standart dari pengujian minyak isolasi.

3.7 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non-Homogen Pada Pengujian Minyak randu

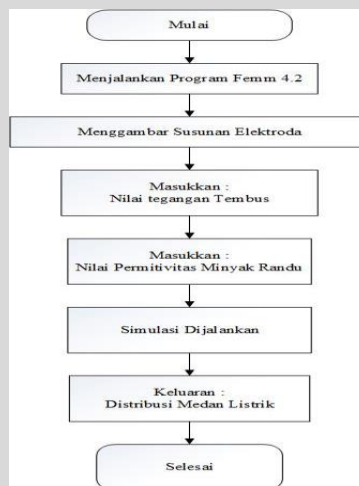
Distribusi medan listrik dari susunan elektroda homogen (bola-bola) dan non-homogen (jarum piring) pada pengujian tegangan tembus minyak randu dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Femm 4.2. Dengan menggunakan data-data dari hasil pengujian dan hasil perhitungan maka distribusi medan listrik dari minyak randu dapat disimulasikan. Data-data yang diperlukan untuk simulasi adalah bentuk geometris dari susunan elektroda, dimensi elektroda, jarak sela antar elektroda, tegangan tembus, dan permitivitas minyak randu yang diuji.

Pada program Femm 4.2, hal pertama yang dilakukan adalah menggambar susunan elektroda yang digunakan dalam pengujian. Pada simulasi digunakan jarak sela antar elektroda bola-bola dan jarum piring yaitu 2,5 mm dan 4 mm. Dan yang disimulasikan di

dalam program femm 4.2 adalah bola-bola dan jarum piring pada minyak randu murni pada jarak sela 2,5 mm dan 4 mm. Dan bola bola dan jarum piring dengan penambahan fenol 25 gram pada jarak sela 2,5 mm dan 4 mm. Pada elektroda bola dan jarum simulasi dilakukan dengan menggunakan sistem *axisymmetric* yaitu dengan cara membuat irisan simetrinya dengan pusat elektroda sebagai porosnya.

Setelah menggambar susunan elektroda, kemudian masukkan data pengujian yaitu tegangan tembus minyak randu pada susunan elektroda yang akan disimulasikan. Setelah itu, masukkan nilai permitivitas minyak randu yang akan diuji. Kemudian program dapat disimulasikan untuk mengetahui distribusi medan listrik.

Diagram alir untuk simulasi distribusi medan listrik minyak randu yang diuji dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.11

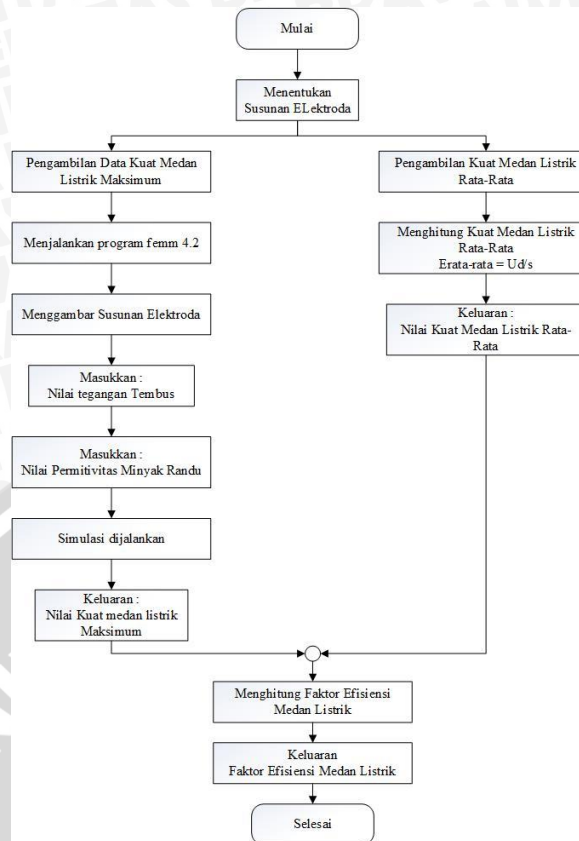


Gambar 3.11 Diagram Alir simulasi distribusi medan listrik pada pengujian minyak randu menggunakan program Femm 4.2

3.7.1 Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non-Homogen dalam Pengujian Minyak Randu

Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm) E_m dapat diketahui dari grafik dan tabel hasil simulasi menggunakan perangkat lunak femm 4.2. Sedangkan kuat medan listrik rata-rata (kV/cm) E_r dapat dihitung dengan persamaan (2-12).

Pada simulasi, jarak sela yang diterapkan yaitu 2,5 mm dan 4 mm serta tegangan tembus yang dipakai adalah tegangan tembus pada susunan elektroda bola-bola dan jarum piring minyak randu murni dan dengan fenol 25 gram. Diagram alir untuk mencari atau mendapatkan faktor efisiensi medan listrik pada medan homogen dan non-homogen pada minyak randu ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Diagram alir perhitungan dan simulasi faktor efisiensi medan listrik pada pengujian medan homogen dan non-homogen pada minyak randu

3.8 Analisis Data

1. Analisis karakteristik arus bocor dan tegangan tembus pada minyak randu dengan kontaminan maupun tanpa kontaminan pada pengujian tegangan tinggi AC
2. Analisis karakteristik arus konduksi, resistivitas dan permitivitas pada minyak randu.
3. Analisi distribusi medan listrik dan efisiensi medan listrik homogen dan non-homogen pada minyak randu.

3.9 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis. Selain kesimpulan, akan dicantumkan saran-saran kepada perusahaan dan pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan skripsi ini. Meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian ataupun hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Dalam bab ini, akan dianalisis pengaruh dari parameter yang mempengaruhi isolasi di dalam minyak randu. Parameter parameter yang akan dianalisis yaitu pengaruh arus konduksi, resistivitas, tegangan tembus terhadap jarak sela elektroda dengan dan tanpa campuran fenol, permitivitas minyak isolasi, faktor efisiensi dari bentuk geometris susunan elektroda homogen (bola-bola) dan non-homogen (elektroda jarum-piring). Susunan elektroda yang digunakan didalam pengujian ini yaitu susunan elektroda setengah bola dengan jarak sela 2,5 mm, bola-bola dan jarum-piring dengan jarak sela 2,5 mm dan 4 mm. Elektroda bola-bola dengan diameter 5 cm dan elektroda setengah bola dengan diameter 3,6 cm dan elektroda piring dengan diameter 6 cm dengan ketebalan 1,0 mm.

Dalam menganalisis data yang diperoleh dari hasil pengujian, maka data tersebut akan dibahas dan disajikan secara pengelompokan sesuai dengan parameter yang dibahas. Pengelompokan akan dibahas dalam bentuk subbab-subbab yang akan menjelaskan bagaimana pengaruh dari parameter-parameter yang akan dianalisis terhadap kualitas isolasi dari minyak randu.

Distribusi medan listrik dari pengujian tegangan tembus medan homogen dan non-homogen pada minyak randu akan disimulasikan dengan perangkat lunak femm 4.2. Dengan menggunakan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dan perhitungan, maka distribusi medan listrik dari minyak randu dalam penelitian ini akan disimulasikan pada susunan elektroda homogen dan non-homogen.

4.2 Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor

4.2.1 Pengaruh Minyak Randu Murni Terhadap Arus Konduksi

Pada Pembahasan ini, arus konduksi minyak randu murni di uji dengan menggunakan elektroda piring-piring sebagai elektroda uji yang dilengkapi dengan elektroda cincin atau yang disebut sebagai elektroda pelindung. Pada pengujian arus konduksi digunakan pengukuran tegangan tinggi DC. Data pada pengujian arus konduksi paa minyak randu murni dapat dilihat di Tabel 4.1. Nilai yang tercantum pada Tabel 4.1 merupakan nilai rata-rata dari tiga kali pengambilan data.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Arus Konduksi Minyak Randu Murni pada tegangan tinggi DC

Minyak Randu (mL)	Tegangan Sumber (kV)		Arus Konduksi (μA)		Resistivitas Minyak Randu Murni ($\text{M}\Omega\text{m}$)	
	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak Sela 4 mm
500	2,03	2,03	1,43	0,80	178,30	199,19
525	2,03	2,04	1,43	0,80	178,30	199,35
550	2,02	2,04	1,42	0,80	178,25	199,03
575	2,01	2,03	1,42	0,80	177,08	199,19
600	2,03	2,04	1,43	0,80	178,72	199,35
625	2,03	2,04	1,43	0,80	178,30	199,35
650	2,03	2,03	1,43	0,80	178,30	199,21
675	2,04	2,04	1,44	0,81	178,35	198,53
700	2,03	2,04	1,43	0,80	178,59	199,85
725	2,04	2,04	1,43	0,80	179,60	199,35

Pada Tabel 4.1 dijelaskan bahwa arus konduksi pada minyak randu murni dengan tegangan yang sama memiliki arus konduksi yang sama atau hampir sama. Dengan kenaikan jarak sela pada susunan elektroda maka arus konduksi akan lebih kecil. Sehingga resistivitas minyak randu murni akan semakin besar tetapi resistivitas minyak randu dengan penambahan volume ini, umumnya tidak ada perubahan secara khusus sehingga dengan penambahan volume minyak randu menghasilkan resistivitas yang sama atau hampir sama. Resistivitas minyak randu murni tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan (2-5). Perhitungan resistivitas minyak randu murni dapat dijabarkan sebagai berikut.

Sesuai pada Tabel 4.1 dari hasil pengujian arus konduksi pada minyak randu murni dengan pengujian tegangan tinggi DC, diperoleh data sebagai berikut.

Pada minyak randu dengan volume 500 ml dengan pengujian tegangan tinggi DC diperoleh data,

Dengan jarak sela antar elektroda 2,5 mm

- Tegangan Sumber (U_d) = 2,03 kV
- Arus Konduksi (I_k) = 1,43 μA

Dengan jarak sela antar elektroda 4 mm

- Tegangan Sumber (U_d) = 2,03 kV
- Arus Konduksi (I_k) = 0,8 μA

Dari data yang diperoleh, nilai tahanan minyak randu murni dapat dihitung dengan persamaan (2-8) yaitu :

$$R = \frac{V}{I_k}$$

Pada Jarak Sela 2,5 mm dan 4 mm, tahanan minyak randu murni yaitu

- Jarak Sela 2,5 mm
 - $R = \frac{2,03}{1,43} = 1,42 \text{ kv}/\mu\text{A}$
- Jarak Sela 4 mm
 - $R = \frac{2,03}{0,8} = 2,54 \text{ kv}/\mu\text{A}$

Luas permukaan elektroda pada kotak uji (*chambers*) yaitu dengan diameter elektroda ukur adalah 20 mm, maka jari-jari elektroda ukur yaitu 10 mm. Sehingga luas permukaan elektroda ukur adalah

$$A = \pi \cdot r^2$$

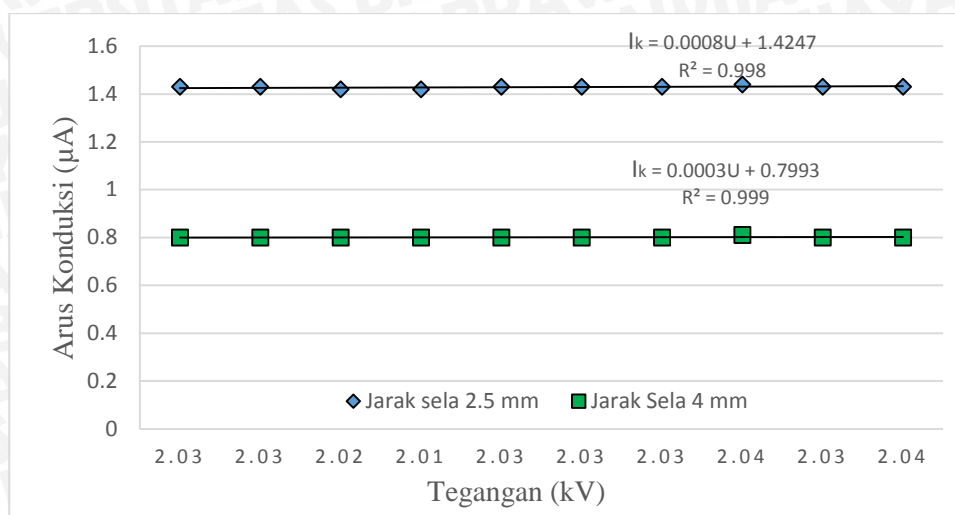
$$A = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga nilai resistivitas minyak randu murni sesuai persamaan (2-9) dari data yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 dapat yaitu

$$\rho = \frac{R \cdot A}{s}$$

- Jarak Sela 2,5 mm
 - $\rho = \frac{1,42 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 178,30 \text{ M}\Omega\text{m}$
- Jarak Sela 4 mm
 - $\rho = \frac{2,54 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} = 199,19 \text{ M}\Omega\text{m}$

Untuk perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dan dari Tabel 4.1 yang telah dijelaskan dapat dibuat grafik hubungan arus konduksi dan resistivitas minyak randu murni terhadap pertambahan volume minyak randu murni. Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4.1 Grafik Hubungan arus konduksi sebagai fungsi tegangan dengan jarak sela berbeda pada pengujian tegangan tinggi DC

Berdasarkan Gambar 4.1 dapat diuraikan bahwa arus konduksi pada minyak randu murni linear. Hal ini, dikarenakan penambahan volume minyak randu yang semakin besar pada tegangan sumber yang sama dihasilkan arus konduksi yang sama hal ini, dapat disimpulkan dengan penambahan volume tidak berubah arus konduksi pada minyak randu murni, sedangkan besarnya jarak sela semakin membuat arus konduksi semakin kecil.

Jika di analisis menurut *trendline* pada grafik dengan persamaan yang didapat yaitu pada jarak sela 2,5 mm $I_k = 0,0008U + 1,4247$ dan pada jarak sela 4 mm $I_k = 0,0003U + 0,7993$, dengan I_k merupakan fungsi arus konduksi pada minyak randu murni, dan dengan mengambil contoh tegangan sumber pada volume minyak randu 500 ml dengan jarak sela 2,5 mm maka perhitungan sebagai berikut,

$$I_k = f(U)$$

$$I_k = 0,0008U + 1.4247$$

$$I_k = 0.0008(2,03) + 1.4247$$

$$I_k = 1,43 \mu A$$

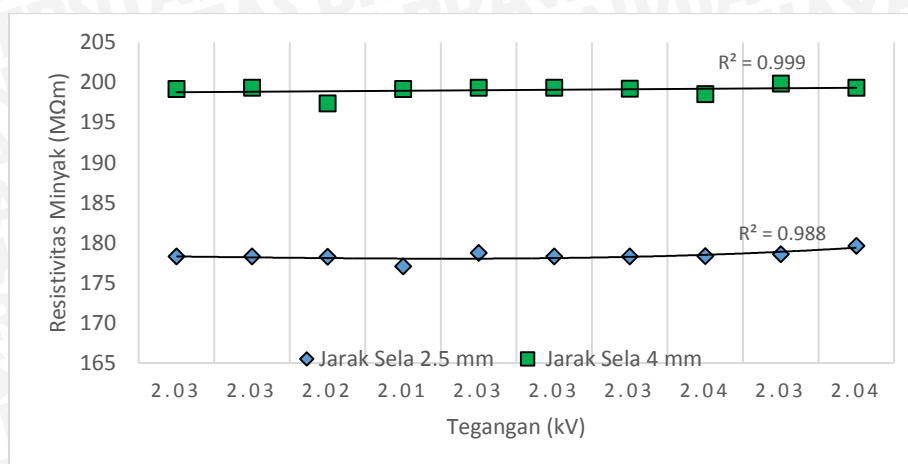
Untuk perhitungan selanjutnya pada arus konduksi minyak randu murni dapat dilihat pada Tabel 4.2. Tabel 4.2 merupakan tabel perbandingan data menurut *trendline* dengan data hasil pengujian.

Tabel 4.2 Data perbandingan Arus konduksi terhadap tegangan menurut *trendline*

No.	Minyak Randu (mL)	I_k (μA)		I_k (μA) <i>Trendline</i>		ΔI_k (μA)		Rata-Rata Penyimpangan (μA)	
		Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm
1.	500	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0	0	0
2.	525	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		
3.	550	1,42	0,80	1,43	0,80	0,01	0		
4.	575	1,42	0,80	1,43	0,80	0	0		
5.	600	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		
6.	625	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		
7.	650	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		
8.	675	1,44	0,81	1,43	0,80	0,01	0,01		
9.	700	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		
10.	725	1,43	0,80	1,43	0,80	0	0		

Dari hasil yang telah dipaparkan pada Tabel 4.2, dapat di simpulkan bahwa nilai penyimpangan data *trendline* dengan data pengujian kecil, jika di rata-rata nilai penyimpangan tersebut bernilai 0 untuk jarak sela 2,5 mm dan jarak sela 4 mm.

Sedangkan untuk resistivitas minyak randu murni ditunjukkan pada Gambar 4.2. Resistivitas minyak randu murni dengan tegangan yang konstan, memiliki nilai resistivitas minyak randu yang sama atau hampir sama. Hal ini dikarenakan minyak randu murni dengan penambahan volume minyak randu tidak berubah nilai arus konduksi pada minyak randu murni sehingga resistivitas minyak randu murni sama pada jarak sela yang sama. Sehingga dalam hal ini, untuk meningkatkan sistem kerja isolasi dari minyak randu diperlukan penambahan zat aditif agar minyak randu dapat difungsikan sebagai isolasi cair pada peralatan tegangan tinggi.



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Resistivitas minyak randu murni sebagai fungsi tegangan dengan jarak sela berbeda pada pengujian tegangan tinggi DC

Pada saat pengujian tidak ada fenomena yang muncul didalam pengujian minyak randu murni terhadap arus konduksi dengan penambahan volume pada minyak randu murni, hal ini dimungkinkan dikarenakan tidak adanya internal gangguan seperti gelembung udara atau jembatan konduksi yang dapat meningkatkan nilai arus konduksi sehingga di dapatkan arus konduksi yang sama pada jarak sela yang sama dikarenakan susunan elektroda uji yang digunakan telah tercelupkan minyak randu murni secara keseluruhan., seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pengujian Minyak Randu Murni terhadap arus konduksi dengan penambahan volume pada tegangan tinggi DC

Sumber : Hasil Pengukuran

4.2.2 Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Arus Bocor

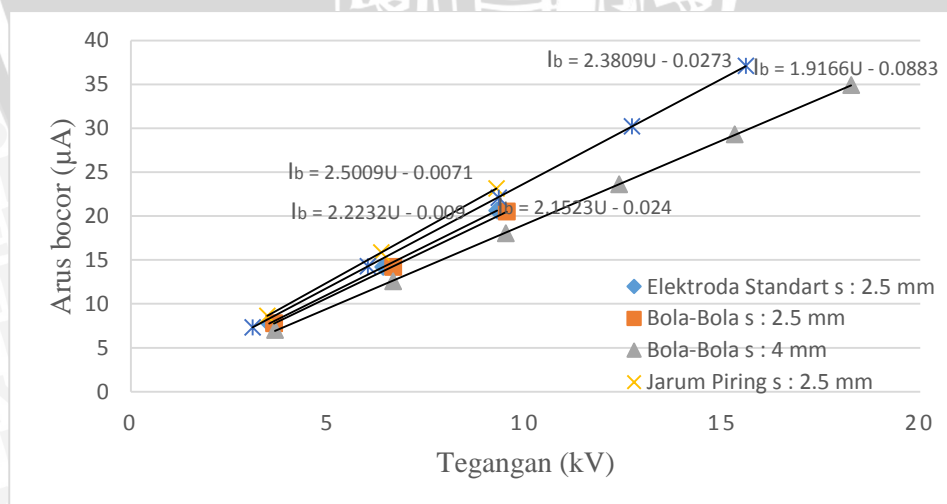
Pada pengujian arus bocor pada minyak randu murni dengan penambahan volume minyak randu digunakan pengukuran tegangan tinggi AC untuk mengetahui nilai impedansi pada minyak randu murni pada elektroda standart, bola-bola dan jarum-piring. Hasil pengujian arus bocor terhadap fungsi dari tegangan pada pengukuran tegangan tinggi AC menggunakan pengukuran tegangan tinggi AC, ditunjukkan pada Tabel 4.3. Nilai ini adalah

nilai rata-rata dari pengujian arus bocor yang untuk data yang lainnya dapat dilihat di lampiran.

Tabel 4.3 Data Hasil pengujian Arus Bocor Pada Minyak randu Murni dengan menggunakan pengukuran tegangan tinggi AC

Jenis Elektroda	Tegangan (kV)		Arus Bocor (μA)	
	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Elektroda Standart	3,5	-	7,77	-
	6,39	-	14,2	-
	9,28	-	20,62	-
Bola-Bola	3,62	3,65	7,8	7,01
	6,64	6,64	14,2	12,57
	9,52	9,5	20,5	18,03
	-	12,37	-	23,6
	-	15,3	-	29,3
Jarum-Piring	-	18,25	-	34,9
	3,45	3,08	8,62	7,33
	6,34	6	15,85	14,28
	9,26	9,32	23,15	22,07
	-	12,69	-	30,21
	-	15,58	-	37,09

Berdasarkan Tabel 4.3, maka dapat dibuat grafik hubungan antara arus bocor terhadap tegangan pada minyak randu murni pada susunan elektroda uji yaitu elektroda standart, bola-bola dan jarum-piring yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Arus Bocor terhadap tegangan pada susunan elektroda standart, bola-bola, dan jarum-piring

Pada Gambar 4.4 yang ditunjukkan bahwa pada elektroda standart, bola-bola dan jarum piring dengan fungsi arus bocor terhadap tegangan menyatakan semakin besar tegangan yang diberikan maka arus bocor pada elektroda standart, bola-bola dan jarum piring akan semakin besar meningkat secara signifikan. Serta semakin besar jarak sela pada susunan elektroda maka arus bocor pada susunan elektroda tersebut akan semakin kecil. Tetapi pada susunan elektroda jarum piring arus bocor dengan jarak sela 2,5 mm dan 4 mm memiliki arus bocor yang berdekatan atau hampir sama.

Jika di analisis menurut *trendline* pada grafik sesuai Gambar 4.4 dengan persamaan yang tercantum di dalam grafik. Maka perbandingan data *trendline* dengan data hasil pengujian pada arus bocor minyak randu murni sesuai Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data perbandingan Arus bocor terhadap tegangan menurut *trendline*

Jenis Elektroda	U_d (kV)		I_b (μ A)		I_b (μ A) <i>Trendline</i>		ΔI_b (μ A)		Rata-Rata Penyimpangan (μ A)	
	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Elektroda Standart	3,5	-	7,77	-	7,77	-	0	-	0	-
	6,39	-	14,2	-	14,20	-	0	-		
	9,28	-	20,62	-	20,62	-	0	-		
Bola-Bola	3,62	3,65	7,8	7,01	7,77	6,91	0,03	0,10	0,05	0,06
	6,64	6,64	14,2	12,57	14,27	12,64	0,07	0,07		
	9,52	9,5	20,5	18,03	20,47	18,12	0,03	0,09		
	-	12,37	-	23,6	-	23,62	-	0,02		
	-	15,3	-	29,3	-	29,24	-	0,06		
Jarum-Piring	-	18,25	-	34,9	-	34,89	-	0,01	0	0,04
	3,45	3,08	8,62	7,33	8,62	7,31	0	0,02		
	6,34	6	15,85	14,28	15,85	14,26	0	0,02		
	9,26	9,32	23,15	22,07	23,15	22,16	0	0,09		
	-	12,69	-	30,21	-	30,19	-	0,02		
-	15,58	-	37,09	-	37,07	-	0,02			

Dari hasil tabel 4.4 yang telah di dapatkan, dapat disimpulkan bahwa nilai penyimpangan data *trendline* dengan data pengujian hampir mendekati 0, jika di rata-rata nilai penyimpangan tersebut bernilai 0 pada susunan elektroda standart, jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm sedangkan pada susunan elektroda lainnya mendekati nilai 0. Sehingga dari data pengujian dengan data analisis menurut *trendline* ada kesesuaian data sehingga data pengujian masih dalam batas toleransi kesalahan.

4.3 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor Pada Minyak Randu

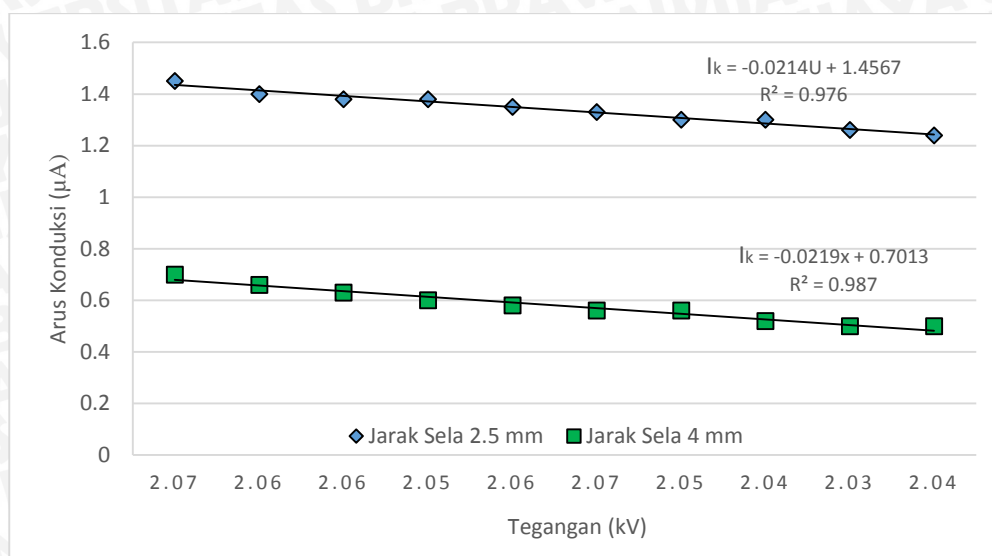
4.3.1 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Konduksi Pada Minyak Randu

Dengan penambahan fenol pada minyak randu, arus konduksi akan mengalami penurunan dibandingkan dengan minyak randu murni. Hal ini merupakan pengaruh fenol terhadap minyak randu yang dapat menurunkan arus konduksi dari minyak randu murni. Data hasil pengujian dengan penambahan fenol terhadap arus konduksi pada minyak randu dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian dengan penambahan fenol terhadap arus konduksi pada Minyak Randu dengan pengujian tegangan tinggi DC

No.	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)		Arus Konduksi (μ A)		Resistivitas Minyak (MQm)	
		Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak Sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
1.	2,5	2,07	2,06	1,45	0,7	179,30	231,76
2.	5	2,06	2,07	1,40	0,66	184,37	247,47
3.	7,5	2,06	2,06	1,38	0,63	187,49	257,10
4.	10	2,05	2,07	1,38	0,60	187,03	269,78
5.	12,5	2,06	2,08	1,35	0,58	191,66	283,16
6.	15	2,07	2,07	1,33	0,56	196,29	290,17
7.	17,5	2,05	2,06	1,30	0,56	198,06	290,99
8.	20	2,04	2,06	1,30	0,52	196,61	310,98
9.	22,5	2,03	2,03	1,26	0,5	202,69	319,23
10.	25	2,04	2,04	1,24	0,5	206,08	318,19

Dari Tabel 4.5 dapat dianalisis bahwa minyak randu dengan penambahan fenol, maka arus konduksi pada susunan elektroda akan mengalami penurunan. Hal ini disebabkan kandungan asam di dalam minyak randu mengalami penurunan setelah ditambahkan fenol. Serta dengan kenaikan jarak sela pada penambahn fenol maka arus konduksi akan mengalami penurunan. Seperti pada Gambar 4.5 tentang grafik fungsi arus konduksi terhadap tegangan.



Gambar 4.5 Grafik fungsi arus konduksi terhadap tegangan dengan penambahan fenol

Dari Gambar 4.5 dapat disimpulkan bahwa penambahan fenol pada minyak randu dapat menurunkan arus konduksi di dalam minyak randu. Dengan tegangan yang tetap maka arus konduksi di dalam minyak randu akan mengalami penurunan. Tetapi dengan semakin besarnya jarak sela pada susunan elektroda maka menyebabkan arus konduksi lebih rendah. Dan untuk mengetahui perbandingan arus konduksi di dalam pengujian tegangan tinggi DC dan menurut data *trendline*, dapat dilihat pada Tabel 4.6.

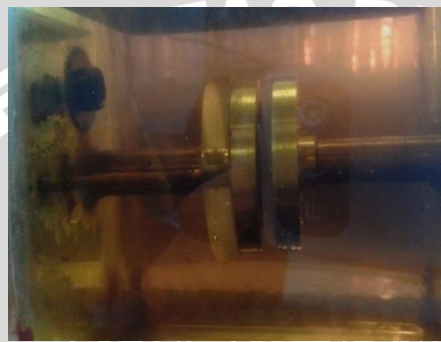
Tabel 4.6 Data Perbandingan Penambahan Fenol Minyak Randu pada Arus Konduksi dalam pengujian tegangan tinggi DC

No.	Fenol (gram)	I_k (μA)		I_k (μA) <i>Trendline</i>		ΔI_k (μA)		Rata-Rata Penyimpangan (μA)	
		Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm	Jarak Sela 2.5 mm	Jarak sela 4 mm
1.	2,5	1,45	0,7	1,41	0,66	0,04	0,04	0,08	0,09
2.	5	1,40	0,66	1,41	0,66	0,01	0		
3.	7,5	1,38	0,63	1,41	0,66	0,03	0,03		
4.	10	1,38	0,60	1,41	0,66	0,03	0,06		
5.	12,5	1,35	0,58	1,41	0,66	0,06	0,08		
6.	15	1,33	0,56	1,41	0,66	0,08	0,10		
7.	17,5	1,30	0,56	1,41	0,66	0,11	0,10		
8.	20	1,30	0,52	1,41	0,66	0,11	0,14		
9.	22,5	1,26	0,5	1,41	0,66	0,15	0,16		
10.	25	1,24	0,5	1,41	0,66	0,17	0,16		

Dari Tabel 4.6 memperlihatkan bahwa di dalam analisis menurut *trendline* nilai rata-rata penyimpangan hampir mendekati nilai pengujian. Walaupun nilai penyimpangan ini

mendekati nilai 0 tetapi nilai tersebut telah menggambarkan bahwa data pengujian masih dalam batas toleransi kesalahan untuk data pengujian. Dari Tabel 4.6 terlihat bahwa pada fenol 5 gram perbandingan arus konduksi adalah 0, hal ini menunjukkan bahwa data pengujian dengan data *trendline* menghasilkan nilai yang dikehendaki di dalam menganalisa data tersebut. Sehingga perbedaan data pengujian dengan *trendline* di masing-masing data mendekati toleransi yang masih dalam tahap kewajaran.

Fenomena di dalam pengujian penambahan fenol dapat dilihat pada Gambar 4.6 bahwa ada gelembung udara didalam elektroda piring-piring atau plat sejajar. Hal ini yang menyebabkan arus konduksi di dalam minyak randu lebih kecil dari pada minyak murni.

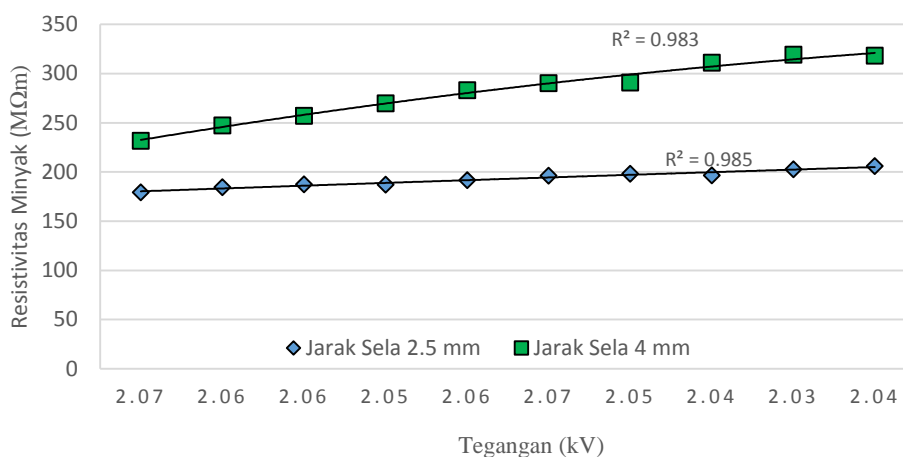


Gambar 4.6 Kondisi pengujian minyak randu dengan penambahan fenol

Sumber : Hasil Pengukuran

Gelembung-gelembung udara di dalam kotak uji (*chambers*) seperti Gambar 4.6, disebabkan tegangan yang telah diberikan untuk pengujian arus konduksi telah membuat kondisi yang tidak seperti pengujian minyak randu murni yaitu ketika pengujian dilakukan pada minyak randu murni dan diberikan tegangan maka tidak ada gelembung udara sedangkan pada pengujian dengan penambahan fenol terjadi gelembung udara.

Dengan penambahn fenol nilai resistivitas pada minyak randu akan mengalami kenaikan. Sesuai dengan Tabel 4.5 dapat dianalisis bahwa nilai resistivitas minyak randu dengan penambahan fenol akan lebih besar dibandingkan dengan minyak randu murni. Untuk lebih jelas dapat di lihat pada Gambar 4.7 tentang grafik hubungan fungsi resistivitas terhadap tegangan konstan yang dipengaruhi oleh penambahan fenol.



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Fungsi Resistivitas terhadap tegangan konstan pada penambahan fenol

Dari Gambar 4.7 dapat dianalisis bahwa nilai resistivitas minyak dengan jarak sela 2,5 mm memiliki nilai resistivitas yang lebih rendah dari pada nilai resistivitas dengan jarak sela 4 mm. Hal ini membuktikan bahwa arus konduksi yang rendah maka nilai resistivitas minyak akan lebih besar dan membuat isolasi pada minyak randu menjadi layak untuk digunakan sebagai pengganti isolasi pada peralatan tegangan tinggi. Tetapi hal ini perlu juga dilihat nilai dari tegangan tembus dari minyak randu dan arus bocor nya.

4.3.3 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Arus Bocor Pada Minyak Randu

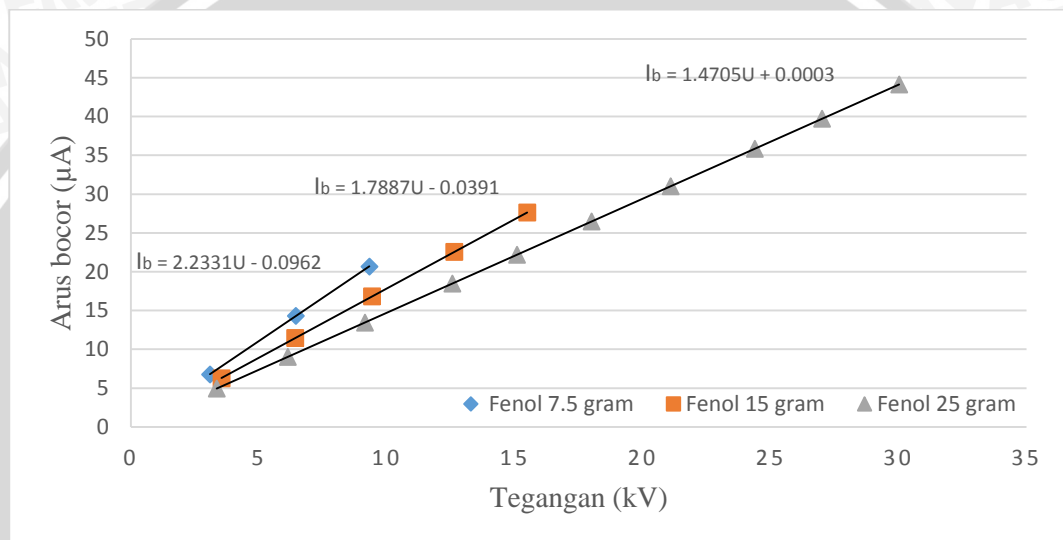
Pengujian arus bocor dilakukan dengan pengujian tegangan tinggi AC sehingga didapatkan arus bocor di masing-masing elektroda yaitu elektroda standart, bola-bola, dan jarum-piring. Sehingga dalam menganalisis tingkat isolasi dengan penambahan fenol dapat lebih akurat. Tabel 4.7 adalah tabel arus bocor pada elektroda standart dengan penambahan fenol.

Tabel 4.7 Data pengujian Arus Bocor pada elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm pada penambahan fenol

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)
Elektroda Standart	7.5	3,08	6,77
		6,44	14,31
		9,31	20,68
	15	3,54	6,27
		6,41	11,45
		9,42	16,82
		12,63	22,55
	25	15,48	27,64
		3,35	4,93
		6,13	9,01
		9,14	13,44
		12,56	18,47
		15,08	22,18
		18	26,47
		21,09	31,01
24,38	35,85		
27	39,7		
30,02	44,15		

Dari Tabel 4.7 diketahui bahwa pada elektroda standart, arus bocor setiap penambahan fenol yang dilakukan maka arus bocor akan mengalami penurunan pada tegangan yang sama. Dan pada fenol yang sama, dengan tegangan yang besar maka arus bocor akan naik. Didalam menentukan arus bocor ada batasan tertentu yaitu dalam pengambilan data perlu untuk mengetahui nilai tegangan tembus sehingga pengujian tidak sampai merusak alat yang digunakan.

Untuk Karakteristik elektroda standart hubungan fungsi arus bocor terhadap tegangan dengan penambahan fenol dapat diamati di dalam Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Karakteristik arus bocor terhadap tegangan pada elektroda standart

Dari Gambar 4.8 dapat diamati bahwa pada elektroda standart dengan penambahan fenol 7,5 gram, 15 gram, dan 25 gram memiliki arus bocor yang lebih rendah dari arus bocor minyak randu murni. Sehingga dari Gambar 4.8 dapat disimpulkan bahwa arus bocor didalam elektroda standart ketika tegangan dinaikkan, maka arus bocor dengan penambahan fenol akan mengalami penurunan.

Tabel 4.8 Data *trendline* pengujian Arus Bocor pada elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm pada penambahan fenol

Jenis Elektroda	Fenol (g)	U_d (kV)	I_b (μ A)	I_b (μ A) <i>Trendline</i>	ΔI_b (μ A)	Rata-Rata Penyimpangan (μ A)
Elektroda Standart	7,5	3,08	6,77	6,78	0,01	0,01
		6,44	14,31	14,28	0,03	
		9,31	20,68	20,69	0,01	
	15	3,54	6,27	6,29	0,02	
		6,41	11,45	11,43	0,02	
		9,42	16,82	16,81	0,01	
		12,63	22,55	22,55	0	
	25	15,48	27,64	27,65	0,01	
		3,35	4,93	4,93	0	
		6,13	9,01	9,01	0	
		9,14	13,44	13,44	0	
		12,56	18,47	18,47	0	
		15,08	22,18	22,18	0	
		18	26,47	26,47	0	
		21,09	31,01	31,01	0	
24,38	35,85	35,85	0			
27	39,70	39,70	0,01			
30,02	44,15	44,14	0			

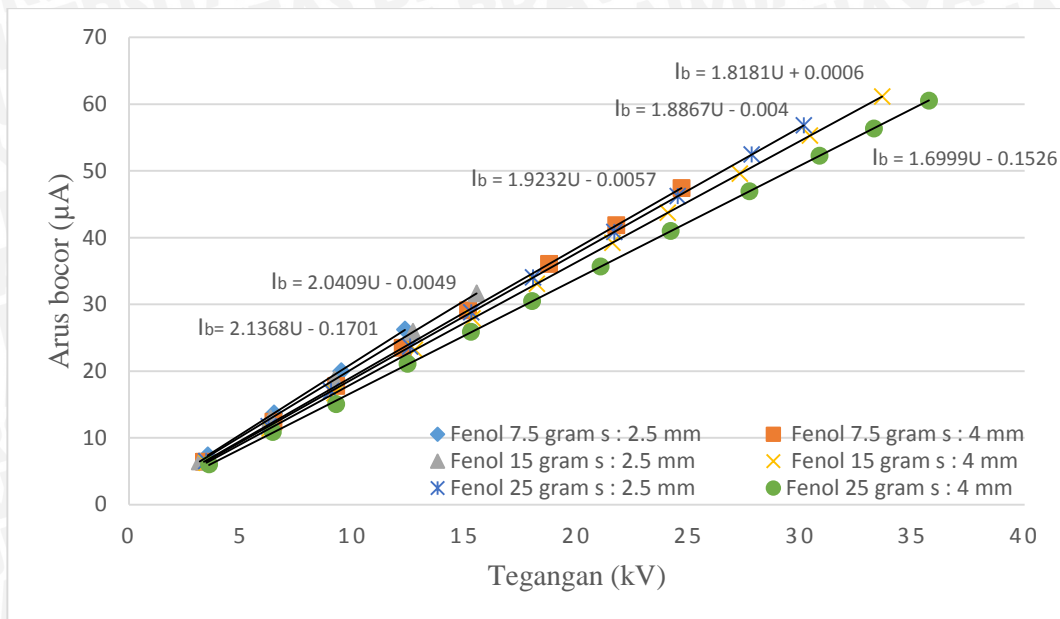
Tabel 4.8 memperlihatkan bahwa arus bocor dengan analisis *trendline* memiliki perbedaan yang tidak begitu jauh dengan pengujian yang dilakukan dengan tegangan tinggi AC. Dari Tabel 4.8 dapat diamati bahwa nilai rata-rata penyimpangan arus bocor menurut analisis *trendline* adalah 0,01, sehingga dapat disimpulkan bahwa data pengujian arus bocor pada elektroda standart memiliki batas toleransi kesalahan yang masih diijinkan.

Pada elektroda bola-bola dengan penambahan fenol, arus bocor dapat ditunjukkan pada Tabel 4.9. Data berikut merupakan data rata-rata yang dilakukan di dalam pengujian, data lainnya bisa dilihat dilampiran.

Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian Penambahn Fenol terhadap Arus Bocor pada elektroda bola-bola

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan (kV)		Arus Bocor (μ A)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Bola-Bola	7,5	3,52	3,34	7,37	6,42
		6,47	6,45	13,67	12,40
		9,48	9,25	20	17,78
		12,32	12,22	26,21	23,5
		-	15,13	-	29,09
		-	18,75	-	36,05
		-	21,76	-	41,85
		-	24,67	-	47,44
	15	3,16	3,46	6,44	6,29
		6,32	6,27	12,90	11,4
		9,18	9,18	18,73	16,69
		12,68	12,77	25,87	23,22
		15,52	15,34	31,67	27,89
		-	18,21	-	33,11
		-	21,58	-	39,23
		-	24,06	-	43,74
		-	27,27	-	49,58
		-	30,41	-	55,29
		-	33,64	-	61,16
		25	3,44	3,57	6,49
	6,23		6,42	11,75	10,88
	9,02		9,25	17,01	15,07
	12,55		12,44	23,67	21,08
	15,28		15,27	28,83	25,88
	18,04		18	34,03	30,50
	21,67		21,06	40,88	35,69
	24,5		24,18	46,22	40,98
	27,8		27,7	52,45	46,94
	30,13		30,84	56,84	52,27
	-		33,26	-	56,37
	-		35,72	-	60,54

Data hasil pengujian penambahn fenol terhadap arus bocor dapat dianalisis bahwa semakin besar tegangan yang diberikan maka arus bocor akan semakin kecil. Pada Tabel 4.9 agar lebih mudah melihat perbedaan penambahan fenol terhadap arus bocor dapat dilihat seperti Gambar 4.10.



Gambar 4.9 Grafik penambahan fenol fungsi arus bocor terhadap tegangan pada elektroda bola-bola

Pada Gambar 4.9, dapat dilihat dengan jelas perbedaan penambahan fenol terhadap arus bocor pada minyak randu. Perbedaan arus bocor tersebut, dipengaruhi oleh jarak sela pada elektroda. Semakin kecil arus bocor maka jarak sela elektroda akan semakin besar. Hal ini disebabkan semakin besar jarak sela, maka arus bocor yang melalui minyak randu memiliki kerapatan jarak yang besar sehingga arus menjadi kecil.

Hasil perbedaan analisis pengujian penambahan fenol terhadap arus bocor menurut analisis *trendline* dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Data Analisis *Trendline* pada Susunan Elektroda bol-bola

Jenis Elektroda	Fenol (g)	U_d (kV)		I_b (μ A)		I_b (μ A) <i>Trendline</i>		ΔI_b (μ A)		Rata-rata penyimpangan (μ A)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Bola-Bola	7,5	3,52	3,34	7,37	6,42	7,35	6,42	0,02	0	0,04	0
		6,47	6,45	13,67	12,40	13,65	12,40	0,02	0		
		9,48	9,25	20	17,78	20,09	17,78	0,09	0		
		12,32	12,22	26,21	23,5	26,16	23,5	0,05	0		
		-	15,13	-	29,09	-	29,09	-	0		
		-	18,75	-	36,05	-	36,05	-	0		
		-	21,76	-	41,85	-	41,84	-	0,01		
	-	24,67	-	47,44	-	47,44	-	0			
	15	3,16	3,46	6,44	6,29	6,44	6,29	0	0	0	0
		6,32	6,27	12,90	11,4	12,89	11,40	0,01	0		
		9,18	9,18	18,73	16,69	18,73	16,69	0	0		
		12,68	12,77	25,87	23,22	25,87	23,22	0	0		
		15,52	15,34	31,67	27,89	31,67	27,89	0	0		
		-	18,21	-	33,11	-	33,11	-	0		
		-	21,58	-	39,23	-	39,24	-	0,01		
		-	24,06	-	43,74	-	43,74	-	0		
		-	27,27	-	49,58	-	49,58	-	0		
		-	30,41	-	55,29	-	55,29	-	0		
	-	33,64	-	61,16	-	61,16	-	0			
	25	3,44	3,57	6,49	6,05	6,49	5,92	0	0,13	0	0,09
		6,23	6,42	11,75	10,88	11,75	10,76	0	0,12		
		9,02	9,25	17,01	15,07	17,01	15,57	0	0,50		
		12,55	12,44	23,67	21,08	23,67	20,99	0	0,09		
		15,28	15,27	28,83	25,88	28,82	25,80	0	0,08		
		18,04	18	34,03	30,50	34,03	30,45	0	0,05		
		21,67	21,06	40,88	35,69	40,88	35,65	0	0,04		
		24,5	24,18	46,22	40,98	46,22	40,95	0	0,03		
		27,8	27,7	52,45	46,94	52,45	46,93	0	0,01		
		30,13	30,84	56,84	52,27	56,84	52,27	0	0		
		-	33,26	-	56,37	-	56,39	-	0,02		
		-	35,72	-	60,54	-	60,57	-	0,03		

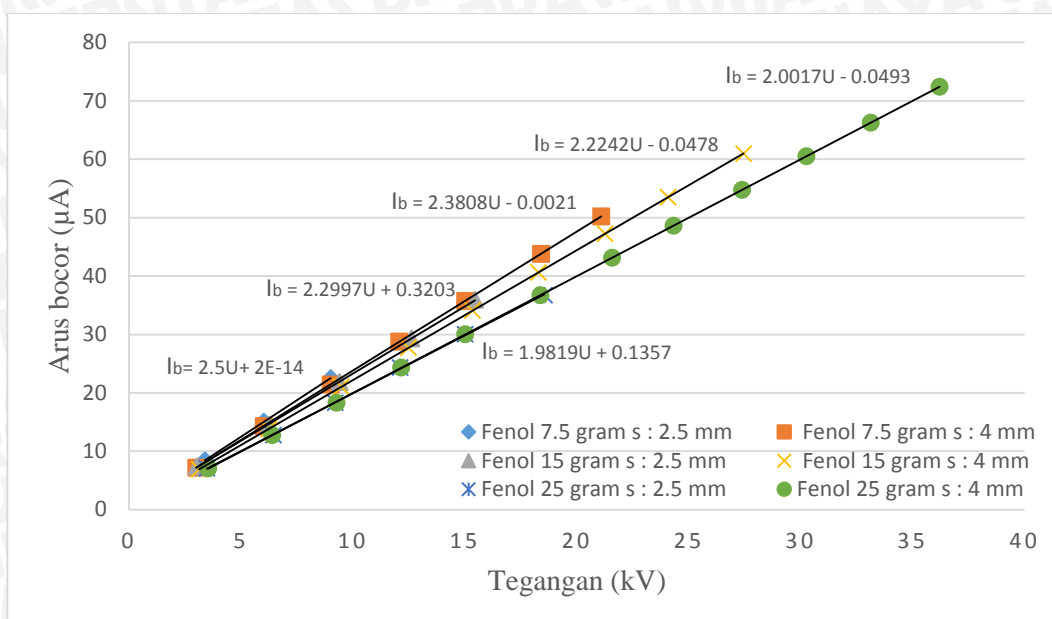
Menurut analisis *trendline* dinyatakan bahwa di dalam Tabel 4.10 rata-rata penyimpangan pada penambahan fenol dengan fungsi arus bocor terhadap tegangan memiliki nilai keakuratan yang mendekati 0. Yang mana dari Tabel 4.10 diketahui bahwa perbedaan analisis *trendline* dengan pengujian yang dilakukan pada tegangan tinggi AC masih mendekati toleransi kesalahan yang di ijinan.

Hasil pengujian pada elektroda jarum-piring sama seperti pengujian yang telah dilakukan yaitu pada elektroda standart dan bola-bola. Data Hasil pengujian arus bocor elektroda jarum piring dapat dilihat pada Tabel 4.11. Untuk data ini, merupakan data rata-rata di dalam pengujian, untuk data lainnya ditunjukkan pada lampiran.

Tabel 4.11 Data Hasil pengujian Penambahan fenol Fungsi Arus Bocor terhadap tegangan pada Elektroda Jarum-Piring

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan (kV)		Arus Bocor (μ A)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Jarum-Piring	7,5	3,38	3	8,45	7,14
		6,02	6,01	15,05	14,31
		9	9	22,50	21,42
		-	12,07	-	28,74
		-	15,01	-	35,73
		-	18,4	-	43,8
		-	21,08	-	50,19
	15	3,01	3,12	7,4	6,90
		6,25	6,25	14,53	13,8
		9,4	9,48	21,86	21,06
		12,6	12,48	29,3	27,73
		15,45	15,33	35,93	34,06
		-	18,28	-	40,62
		-	21,26	-	47,24
		-	24,07	-	53,48
		-	27,44	-	60,97
		25	3,47	3,53	7,38
	6,45		6,38	13,72	12,76
	9,2		9,26	19,72	18,32
	12,1		12,15	25,70	24,3
	15,01		15,01	31,93	30,02
	18,55		18,37	39,46	36,74
	-		21,57	-	43,14
	-		24,32	-	48,64
	-		27,38	-	54,76
	-		30,25	-	60,50
	-	33,13	-	66,26	
-	36,2	-	72,4		

Berdasarkan data Tabel 4.11, maka dapat dibuat grafik penambahan fenol pada minyak randu fungsi arus bocor terhadap tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Penambahan Fenol pada Fungsi Arus Bocor terhadap tegangan pada Elektroda Jarum-Piring

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa perubahan tegangan mempengaruhi nilai arus bocornya. Pada pengujian yang telah dilakukan ada perbedaan arus bocor ketika tegangan dinaikkan. Sehingga semakin besar tegangannya, maka arus bocor semakin besar. Tetapi dengan semakin besarnya jarak sela, membuat arus bocor menjadi lebih kecil dikarenakan penambahan fenol yang membuat arus bocor melalui minyak randu lebih rendah.

Sama halnya dengan Gambar 4.8, Gambar 4.9 jika dianalisis menurut *trendline* yang persamaannya sudah diketahui pada grafik dapat diketahui penyimpangan nilai arus bocor menurut *trendline* dengan nilai arus bocor menurut data. Tabel 4.12 merupakan tabel perbandingan nilai arus bocor menurut data dengan *trendline* pada elektroda jarum-piring.

Tabel 4.12 Perbandingan nilai Arus Bocor menurut data dengan *trendline* pada Elektroda Jarum-Piring

Jenis Elektroda	Fenol (g)	U _d (kV)		I _b (μA)		I _b (μA) <i>Trendline</i>		Δ I _b (μA)		Rata-rata penyimpangan (μA)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm	Jarak sela 2,5 mm	Jarak Sela 4 mm
Jarum-Piring	7.5	3,38	3	8,45	7,14	8,45	7,14	0	0	0	0
		6,02	6,01	15,05	14,31	15,05	14,31	0	0		
		9	9	22,50	21,42	22,50	21,43	0	0,01		
		-	12,07	-	28,74	-	28,73	-	0		
		-	15,01	-	35,73	-	35,73	-	0		
		-	18,4	-	43,8	-	43,80	-	0		
		-	21,08	-	50,19	-	50,19	-	0		
	15	3,01	3,12	7,4	6,90	7,24	6,89	0,16	0,01	0,1	0,02
		6,25	6,25	14,53	13,8	14,69	13,85	0,16	0,05		
		9,4	9,48	21,86	21,06	21,94	21,04	0,08	0,02		
		12,6	12,48	29,3	27,73	29,30	27,71	0	0,02		
		15,45	15,33	35,93	34,06	35,85	34,05	0,08	0,01		
		-	18,28	-	40,62	-	40,61	-	0,01		
		-	21,26	-	47,24	-	47,24	-	0		
		-	24,07	-	53,48	-	53,49	-	0,01		
	25	3,47	3,53	7,38	7,06	7,01	7,02	0,37	0,04	1,45	0,03
		6,45	6,38	13,72	12,76	12,72	12,72	0,80	0,04		
		9,2	9,26	19,72	18,32	18,37	18,49	1,35	0,17		
		12,1	12,15	25,70	24,3	24,12	24,27	1,58	0,03		
		15,01	15,01	31,93	30,02	29,88	30,00	2,05	0,02		
		18,55	18,37	39,46	36,74	36,90	36,72	2,56	0,02		
		-	21,57	-	43,14	-	43,13	-	0,01		
		-	24,32	-	48,64	-	48,63	-	0,01		
		-	27,38	-	54,76	-	54,76	-	0		
		-	30,25	-	60,50	-	60,50	-	0		
		-	33,13	-	66,26	-	66,27	-	0,01		
		-	36,2	-	72,4	-	72,41	-	0,01		

Data di atas atau data *trendline* jika dibandingkan dengan dengan data hasil pengujian arus bocor terjadi penyimpangan sebesar 1,45 pada elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm sedangkan untuk arus bocor lainnya masih dalam keakuratan. Hal ini masih dapat ditoleransi, sehingga grafik tersebut sudah cukup mewakili perubahan arus bocor terhadap tegangan kerja yang diterapkan.

4.4 Pengaruh Minyak Randu Terhadap Tegangan Tembus

4.4.1 Pengaruh Minyak Randu Murni terhadap Tegangan Tembus

Pada pembahasan ini, pengujian tegangan tembus dilakukan dengan menggunakan tegangan tinggi AC. Dalam pengujian yang dilakukan dengan menggunakan elektroda standart dan bola-bola sebagai pengujian medan homogen sedangkan medan non homogen digunakan elektroda jarum-piring. Diameter elektroda standart dan bola-bola berturut turut yaitu 3,6 cm dan 5 cm, serta untuk jarum piring diameter 6 cm. Data pengujian tegangan tembus minyak randu murni ini dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4.13 Data Pengujian tegangan tembus minyak randu murni

Jenis Elektroda	Volume Minyak Randu (mL)	Tegangan Tembus (kV)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak sela 4 mm
Elektroda Standart	250	12,84	-
Bola-Bola	1100	13,23	27,79
Jarum-Piring	1100	12,32	25,54

Pada Tabel 4.13 dapat dianalisis bahwa minyak randu murni memiliki tegangan tembus yang masih dibawah standart pengujian tegangan tembus minyak yaitu 30 kV/mm. Pengujian ini, dilakukan pada jarak sela 2,5 mm. Dari Tabel 4.13 dapat disimpulkan bahwa pada elektroda standart dan bola-bola pada jarak 2,5 mm, tegangan tembus berturut-turut pada minyak randu murni yaitu 12,84 kV dan 13,23 kV. Susunan elektroda tersebut sebagai perwakilan pengujian medan homogen, sehigga minyak randu murni belum layak digunakan untuk pengganti isolasi minyak pada peralatan tegnagan tinggi. Pada pengujian dengan jarak sela yang dinaikkan yaitu pada 4 mm, dapat dianalisis pada Tabel 4.13 bahwa elektroda standart dan bola-bola mengalami kenaikan tegangan tembus.

Susunan elektroda jarum-piring sebagai perwakilan pengujian dari susunan elektroda non homogen. Dapat diamati bahwa karakteristik tegangan tembus jarum piring lebih rendah dari pada pengujian elektroda standart dan bola-bola pada pengujian dengan jarak sela 2,5 dan 4 mm. Sehingga minyak randu murni masih belum layak digunakan sebagai pengganti isolasi pada peralatan tegnagan tinggi, perlu adanya zat kimia yang dapat menaikkan nilai tegangan tembus agar minyak randu layak untuk digunakan di dalam pengujian tegangan tembus yaitu dengan menggunakan campuran fenol, yang akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

4.4.2 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standart, Bola-bola dan Jarum Piring

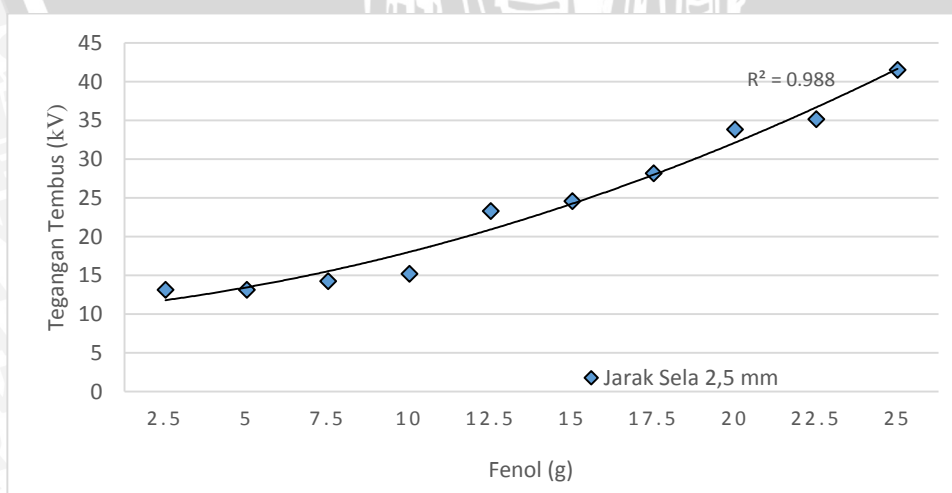
4.4.2.1 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standart

Pengujian tegangan tembus medan homogen menggunakan elektroda standart. Pada Pengujian tersebut dilakukan sebanyak 5 kali dan diambil rata-rata tegangan tembusnya sehingga didapatkan nilai keakuratan dari pengujian menggunakan elektroda setengah bola. Pengujian pada elektroda standart, dilakukan untuk membandingkan pengujian ini dengan elektroda bola-bola sehingga didapatkan data keakuratan di dalam pengujian tegangan tembus menggunakan medan homogen. Untuk data pengujian tegangan tembus elektroda standart dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Data Pengujian Penambahan Fenol pada Tegangan Tembus Elektroda Standart dengan jarak 2.5 mm dengan fenol

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)
Elektroda Standart	2.5	13.13
	5	13.15
	7.5	14.27
	10	15.2
	12.5	23.32
	15	24.6
	17.5	28.18
	20	33.84
	22.5	35.15
	25	41.54

Untuk melihat karakteristik dari Tabel 4.14, dilihat pada tampilan grafik pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Penambahan Fenol Pada Fungsi tegangan tembus terhadap fenol dengan menggunakan elektroda standart

Dari Gambar 4.11 dapat disimpulkan bahwa pada elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm, dengan penambahan fenol mengakibatkan tegangan tembus mengalami kenaikan. Pada Gambar 4.11 menyatakan bahwa ketika dilakukan penambahn fenol dengan 2,5 g tegangan tembus pada elektroda standart yaitu 13,13 kV, sehingga terjadi perubahan dengan adanya penambahan fenol. Pada sebelum dilakukan pencampuran fenol tegangan tembus nya 12,84 kV (Tabel 4.13) sehingga terjadi kenaikan ketika dilakukan penambahan fenol. Ketika dilakukan pencampuran fenol 20 g, maka tegangan tembus dari elektroda standart menjadi 33,84 kV dengan volume minyak randu sebesar 250 ml. Maka dengan pencampuran sebesar 20 gram fenol sudah didapatkan kelayakan isolasi penggunaan minyak randu pada peralatan tegangan tinggi.

Fenomena yang muncul di dalam pengujian elektroda standart dapat diamati dalam Gambar 4.13, dijelaskan bahwa sebelum pengujian minyak randu didalam elektroda standart tampak bersih dan belum terjadi kontaminan yang merusak pada minyak randu. Sehingga minyak randu dapat digunakan di dalam pengujian (seperti pada Gambar 4.13a). Setelah dilakukan pengujian tegangan tembus maka didalam minyak randu akan tampak hitam dikarenakan tegangan yang telah diberikan telah merusak struktur didalam minyak randu sehingga minyak randu yang telah digunakan untuk pengujian tegangan tembus tidak bisa digunakan lagi untuk pengujian.



Gambar 4.12 pengujian pada elektroda standart

Sumber : hasil pengukuran

4.4.2.2 Pengaruh Penambahn Fenol terhadap Tegangan Tembus di dalam Minyak Randu pada Susunan Elektroda Bola- Bola

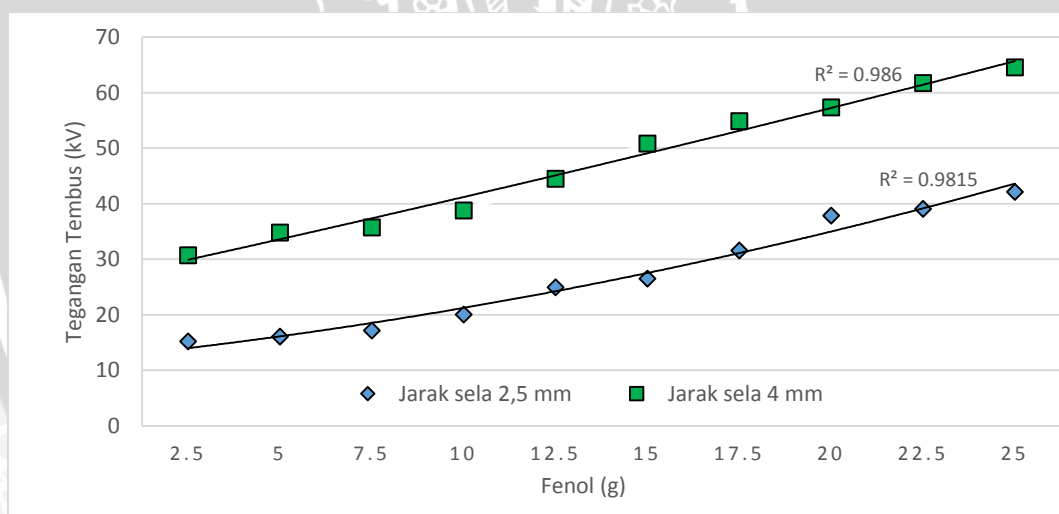
Pada pengujian elektroda bola bola, seperti yang kita ketahui di sub bab sebelumnya bahwa pada elektroda standart dengan penambahan fenol akan mengalami kenaikan tegangan tembus. Jadi pada elektroda bola bola ini, karakteristik tegangan tembus sama

seperti elektroda standart karena keduanya merupakan medan homogen. Untuk data pengujian pada elektroda bola-bola dapat diamati pada Tabel 4.15 berikut.

Tabel 4.15 Data pengujian penambahan fenol terhadap tegangan tembus pada elektroda bola-bola

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak sela 4 mm
Bola-bola	2,5	15,19	30,68
	5	16,06	34,8
	7,5	17,16	35,71
	10	20,05	38,79
	12,5	24,94	44,47
	15	26,48	50,82
	17,5	31,56	54,88
	20	37,87	57,31
	22,5	39,08	61,72
	25	42,12	64,54

Untuk karakteristik data pengujian penambahan fenol terhadap tegangan tembus pada elektroda bola-bola dapat diamati pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik penambahan fenol fungsi tegangan tembus terhadap fenol pada elektroda bola-bola

Dari grafik dapat dianalisis bahwa penambahan fenol dapat menaikkan tegangan tembus minyak randu pada susunan elektroda bola bola. Pada jarak sela 2,5 mm dengan pencampuran fenol 2,5 mm tegangan tembus 15,19 kV sedangkan pada jarak sela 4 mm tegangan tembus 30,68 kV. Sehingga dengan naiknya jarak sela pada penambahan fenol yang sama besarnya tegangan tembus pada elektroda bola-bola akan semakin besar ketika jarak sela dinaikkan. Begitu pula ketika penambahan fenol dilakukan maka tegangan tembus dari elektroda bola-bola juga mengalami kenaikan seperti pada Gambar 4.13 sehingga dapat

disimpulkan bahwa dengan jarak sela dan penambahan fenol yang semakin besar maka tegangan tembus dari elektroda bola-bola akan semakin besar.

Fenomena yang muncul dalam pengujian tegangan tembus pada susunan elektroda bola-bola tampak seperti pada Gambar 4.13. Dari fenomena tersebut, tampak terlihat bahwa setelah dilakukan pengujian di dalam susunan elektroda bola-bola terdapat pengotor internal yang mengumpul pada ujung elektroda sehingga pengotor internal ini akan menghambat elektron-elektron pada ujung elektroda sehingga dapat meningkatkan tegangan tembus dan merusak struktur kadungan di dalam minyak randu.



Gambar 4.14 Pengujian tegangan tembus pada susunan elektroda bola-bola

- (a) sesudah pengujian di dalam minyak randu
- (b) sesudah pengujian di ruang terbuka

Sumber : hasil pengukuran

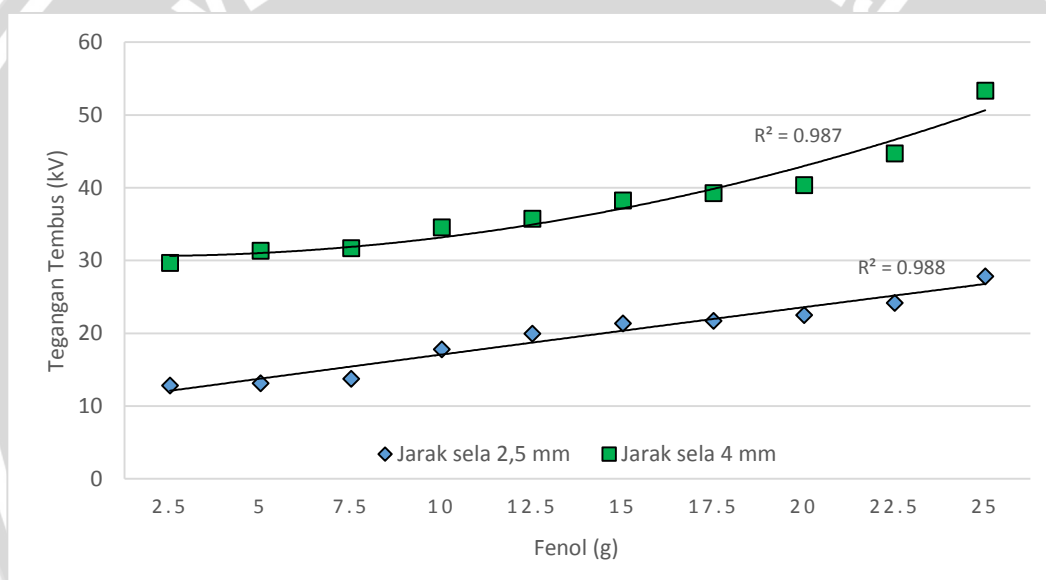
4.4.2.3 Pengaruh Penambahan Fenol terhadap tegangan tembus minyak randu pada Susunan Elektroda Jarum-Piring

Didalam medan non homogen, tegangan tembus elektroda homogen seperti bola-bola memiliki nilai tegangan tembus yang lebih besar dari pada medan non homogen seperti jarum-piring. Pengujian tegangan tembus pada elektroda non homogen dilakukan dengan menggunakan elektroda jarum-piring dengan diameter elektroda jarum 1,5 cm dan elektroda piring 6 cm. Data pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda jarum-piring dapat diamati pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Data Penambahan Fenol terhadap Tegangan Tembus pada Elektroda Jarum Piring

Jenis Elektroda	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	
		Jarak sela 2,5 mm	Jarak sela 4 mm
Jarum-piring	2,5	12,84	29,65
	5	13,13	31,35
	7,5	13,76	31,7
	10	17,79	34,55
	12,5	19,95	35,75
	15	21,36	38,25
	17,5	21,71	39,27
	20	22,48	40,35
	22,5	24,17	44,71
	25	27,84	53,35

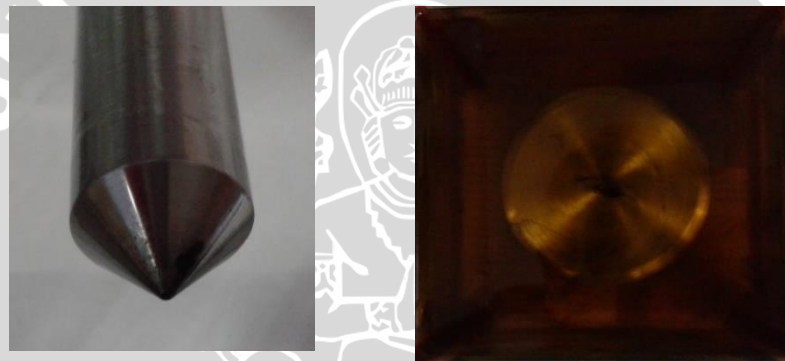
Untuk karakteristik Tabel 4.15 dapat diamati pada grafik di Gambar 4.16.



Gambar 4.15 Grafik penambahan fenol fungsi tegangan tembus pada elektroda jarum-piring

Pada medan non homogen yaitu susunan elektroda jarum piring seperti pada Gambar 4.15 dapat diamati bahwa elektroda jarum-piring dengan jarak sela 2,5 mm memiliki tegangan yang lebih rendah dari elektroda bola-bola dimana pada elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm dengan penambahan fenol 2,5 gram memiliki tegangan tembus 12,84 kV sedangkan pada bola-bola tegangan tembus 15,19 kV. Terjadi perbedaan yang signifikan diantara kedua pengujian tegangan tembus tersebut. Hal ini, disebabkan oleh distribusi medan listrik di dalam medan homogeny yang lebih merata dari pada medan non homogen. Dan dapat disimpulkan bahwa dengan kenaikan penambahan fenol dari elektroda jarum piring maka tegangan tembus semakin besar.

Pada pengujian tegangan tembus elektroda jarum piring, terdapat internal pengotor pada ujung jarum dan piring seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15. Fenomena di dalam elektroda jarum piring tampak ada pengotor internal di ujung elektroda. Pengotor internal tersebut mempengaruhi keadaan tegangan tembus di dalam minyak randu. Semakin besar pengotor internal yang di ujung jarum akan membuat warna kehitaman di dalam minyak randu yang membuat struktur kadungan di dalam minyak randu menjadi rusak. Dan perlu untuk dibersihkan agar pengotor internal tidak merusak pengujian tegangan tembus di dalam elektroda jarum piring. Sehingga di dalam pengujian susunan elektroda jarum piring dapat memperoleh data yang akurat, perlu diketahui bahwa pengotor internal tersebut terjadi setelah diberikan tegangan tertentu sampai batas tertentu hingga terjadi percikan di dalam minyak randu dan terjadi tegangan tembus. Yang memunculkan fenomena pengotor internal pada ujung-ujung elektroda jarum piring.



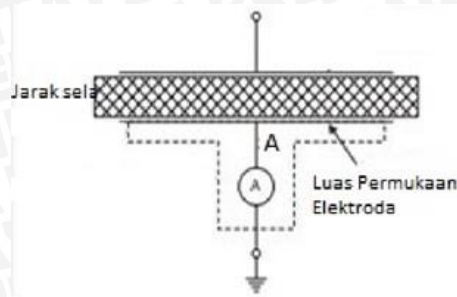
Gambar 4.16 Tampak elektroda jarum piring setelah pengujian tegangan tembus

- (a) elektroda jarum setelah pengujian
- (b) elektroda piring setelah pengujian

Sumber : Hasil Pengukuran

4.5 Permittivitas Minyak Randu

Bahan isolasi cair mempunyai nilai permitivitas. Nilai permitivitas dapat dicari dengan menggunakan nilai kapasitansi dari minyak randu, sehingga nilai permitivitas dari minyak randu dapat dihitung dengan persamaan 2-5 . Nilai permitivitas pada minyak randu dengan jarak sela 2,5 mm dan 4 mm berturut-turut yaitu $1,52 \times 10^{-12}$ F dan $1,32 \times 10^{-12}$ F dengan luas permukaan elektroda seperti Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Jarak sela dan luas elektroda pada pengujian arus konduksi minyak Randu
 Dari pengujian arus konduksi yang telah dilakukan dengan jari jari 10 mm, didapatkan luas permukaan elektroda yaitu $A = 3,14 \cdot 0,01^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Sehingga nilai permitivitas dari minyak randu yaitu dapat dihitung dengan persamaan 2-5 yaitu :

Dengan Jarak sela 2,5 mm atau $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot s}{\epsilon_0 \cdot A} = \frac{1,52 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}$$

$$\epsilon_r = 1,37 \text{ F/m}$$

Dengan Jarak sela 4 mm atau $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot s}{\epsilon_0 \cdot A} = \frac{1,32 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}$$

$$\epsilon_r = 1,9 \text{ F/m}$$

Jadi dari hasil perhitungan nilai permitivitas dari minyak randu dengan jarak sela 2,5 mm dan 4 mm berturut-turut yaitu 1,37 F/m dan 1,9 F/m

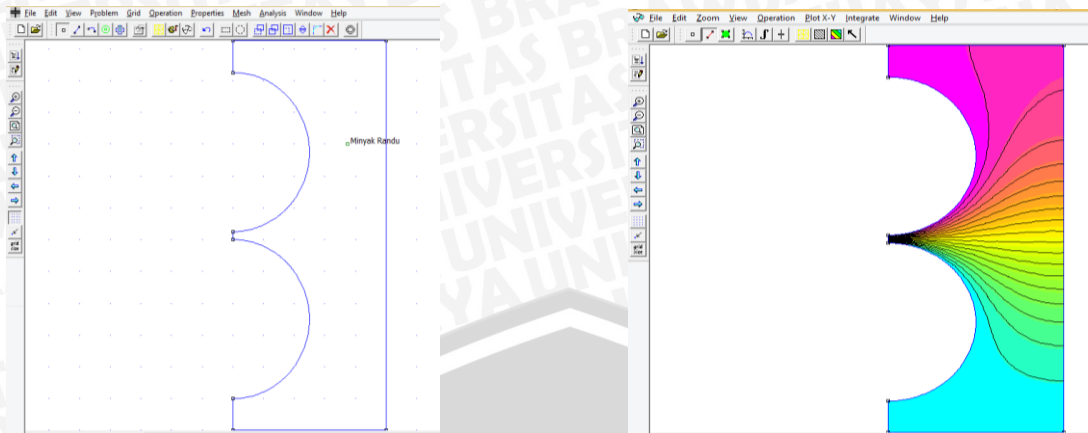
4.6 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dalam Pengujian Minyak Randu

Disitribusi medan listrik pada susunan elektroda dengan bentuk geometris disimulaikan dengan menggunakan program femm 4.2. Dari hasil simulasi dapat diketahui susunan elektroda homogen dan non-homogen pada elektroda yang telah diuji.

4.6.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-bola Pada Minyak randu Murni dan Penambahan Fenol

4.6.1.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-Bola Pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 2,5 mm

Dibawah ini adalah gambar simulasi pada program Femm 4.2 dengan objek uji elektroda bola-bola pada jarak sela 2,5 mm minyak randu murni dapat dilihat pada Gambar 4.18.

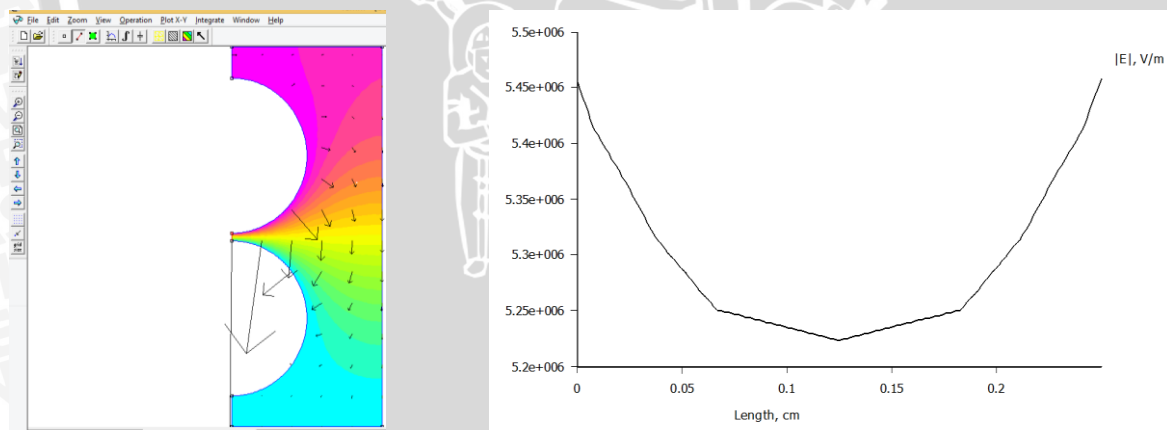


Gambar 4.18 Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak murni

Sumber : Hasil Simulasi

Perencanaan simulasi yang telah digambarkan pada Gambar 4.18 merupakan perencanaan simulasi pada pengujian minyak randu murni dengan menggunakan susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm dengan beda potensial yaitu 13,23 kV.

Berdasarkan nilai kapasitansi yang telah dihitung, maka nilai permitivitas minyak randu pada jarak sela 2,5 mm adalah 1,37 F/m. Sehingga di dalam perencanaan femm yang telah dibuat pada Gambar 4.18. Maka hasil simulasi distribusi medan listrik dari perencanaan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak randu murni dapat diamati pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm

(a) Simulasi Distribusi Medan Listrik (b) grafik Kuat Medan Listrik

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.19a merupakan hasil simulasi untuk distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm. Pada Gambar 4.20 dapat diamati bahwa distribusi medan pada susunan elektroda bola merata atau seragam. Sehingga pada elektroda bola-bola memiliki medan listrik yang homogen atau seragam.



Gambar 4.19b adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm.. Dari Gambar 4.19 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah melengkung seperti cengkungan. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm adalah homogen atau seragam.

Dari Gambar 4.20b dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $5,44764633 \cdot 10^6$ V/m atau 54,4764633 kV/cm dengan jarak $1,67785235 \cdot 10^{-3}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12 . Dengan U_d 13,23 kV dan jarak sela sebesar 2,5 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{13,23}{0,25}$$

$$E_{rata-rata} = 52,92 \text{ kV/cm}$$

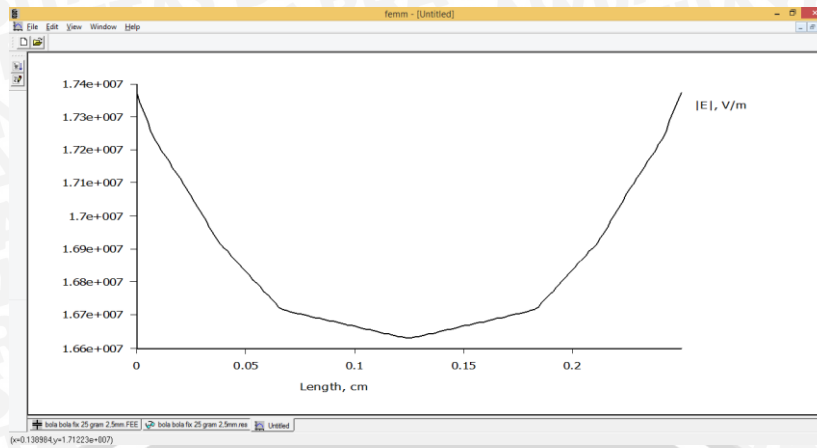
Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 54,4764633 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 52,92 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm adalah :

$$\eta = \frac{52,92}{54,4764633}$$

$$\eta = 0,971$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak randu murni adalah 0,971. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm pada pengujian dengan minyak randu adalah medan homogen.

Perencanaan simulasi distribusi medan listrik pada elektroda bola bola dengan penambahan fenol sama seperti pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19(a), sedangkan untuk hasil kuat medan listrik mutlaknya dapat diamati pada Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity, |E|*) dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola pada jarak sela 2,5 mm
 Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.20 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm. Beda potensial antara elektroda bola dengan bola yang lainnya pada diameter bola 5 cm adalah 42,12 kV. Dari Gambar 4.20 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah melengkung seperti cengkungan. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm adalah homogen atau seragam.

Dari Gambar 4.20 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $1,73721407 \cdot 10^7$ V/m atau 173,721407 kV/cm dengan jarak 0 cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12. Dengan U_d 42,12 kV dan jarak sela sebesar 2,5 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{42,12}{0,25}$$

$$E_{rata-rata} = 168,48 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 173,721407 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 168,48 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm adalah :

$$\eta = \frac{168,48}{173,721407}$$

$$\eta = 0,969$$

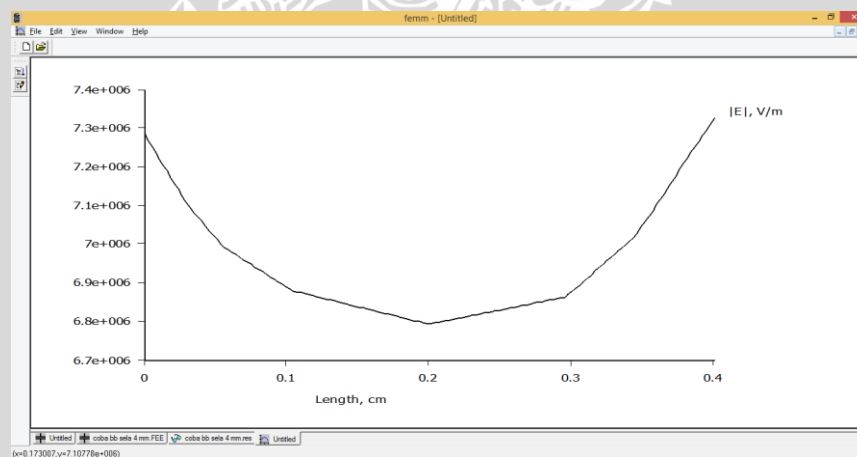


Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan penambahan fenol pada jarak sela 2,5 mm adalah 0,969. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm dengan penambahan fenol pada pengujian dengan minyak randu adalah medan homogen.

4.6.1.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Susunan Elektroda Bola-Bola Pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 4 mm

Simulasi distribusi medan listrik pada elektroda bola-bola dengan jarak sela 4 mm, langkah perencanaan simulasi seperti pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20(a), tetapi yang membedakan hanyalah untuk jarak selanya diubah menjadi 4 mm atau diperlebar lagi. Dan beda potensial antara elektroda bola dengan elektroda bola yang lain yaitu sebesar 27,79 kV. Serta berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dari hasil pengujian kapasitansi yang telah dilakukan. Maka nilai permitivitas minyak randu pada jarak sela 4 mm adalah 1,9 F/m.

Sehingga grafik simulasi kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity*, $|E|$) pada pengujian minyak randu murni pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm dapat diamati pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity*), $|E|$ pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.21 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm. Dari Gambar 4.22 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah melengkung seperti cengkungan. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm adalah homogen atau seragam.

Dari Gambar 4.21 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $7,28643027 \cdot 10^6$ V/m atau yaitu 72,8643027 kV/cm dengan jarak 0 cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12. Dengan U_d 27,79 kV dan jarak sela sebesar 4 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{27,79}{0,4}$$

$$E_{rata-rata} = 69,475 \text{ kV/cm}$$

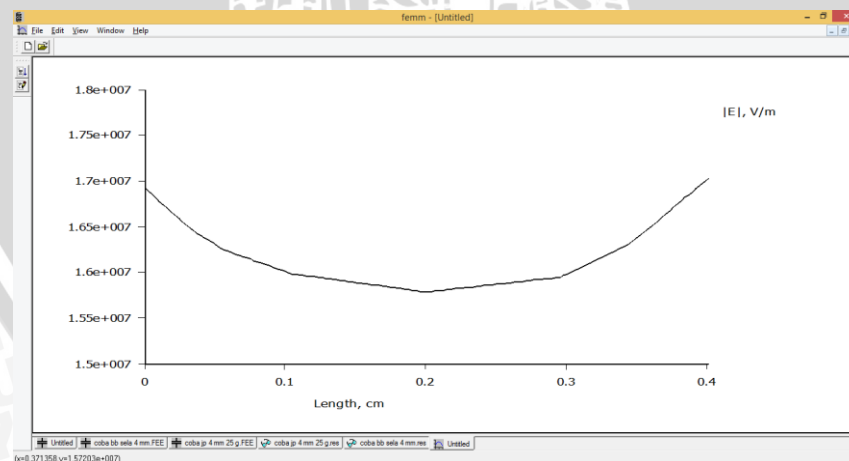
Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 72,8643027 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 69,475 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 2,5 mm adalah :

$$\eta = \frac{69,475}{72,8643027}$$

$$\eta = 0,953$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm adalah 0,953. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm pada pengujian minyak randu murni adalah medan homogen.

Sedangkan untuk minyak randu dengan penambahan fenol, simulasi distribusi medan listrik sama seperti pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 (b) dan grafik simulasi kuat medan listrik mutlak nya (*magnitude of field intensity*, |E|) pada pengujian minyak randu dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm dapat diamati pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 simulasi grafik kuat medan listrik mutlak nya pada minyak randu dengan penambahan fenol pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.22 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlak nya pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm. Beda potensial antara elektroda bola dengan

bola yang lainnya pada diameter bola 5 cm adalah 64,57 kV. Dari Gambar 4.22 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah melengkung seperti cengkungan. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm adalah homogen atau seragam.

Dari Gambar 4.22 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $1,69300360 \cdot 10^7$ V/m atau 169,300360 kV/cm dengan jarak 0 cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12. Dengan U_d 64,57 kV dan jarak sela sebesar 4 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{64,57}{0,4}$$

$$E_{rata-rata} = 161,425 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 169,300360 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 161,425 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm adalah :

$$\eta = \frac{161,425}{169,300360}$$

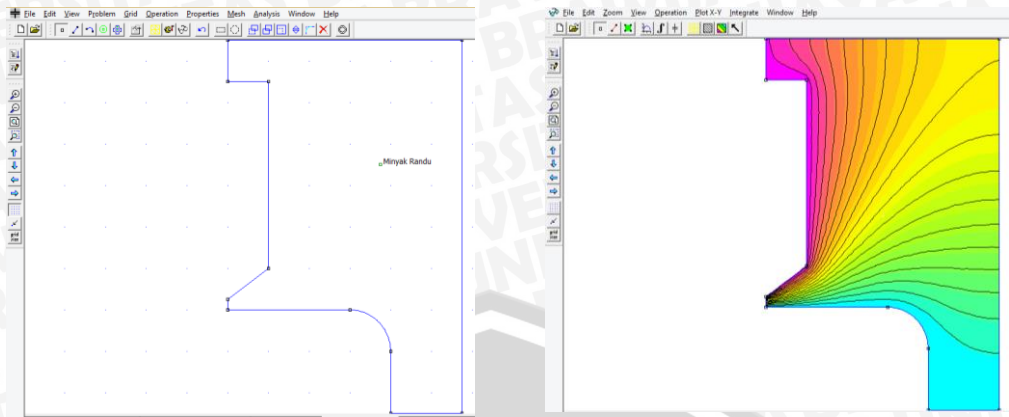
$$\eta = 0,953$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm adalah 0,953. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda bola bola dengan jarak sela 4 mm dengan pengujian penambahn fenol minyak randu adalah medan homogen.

4.6.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol

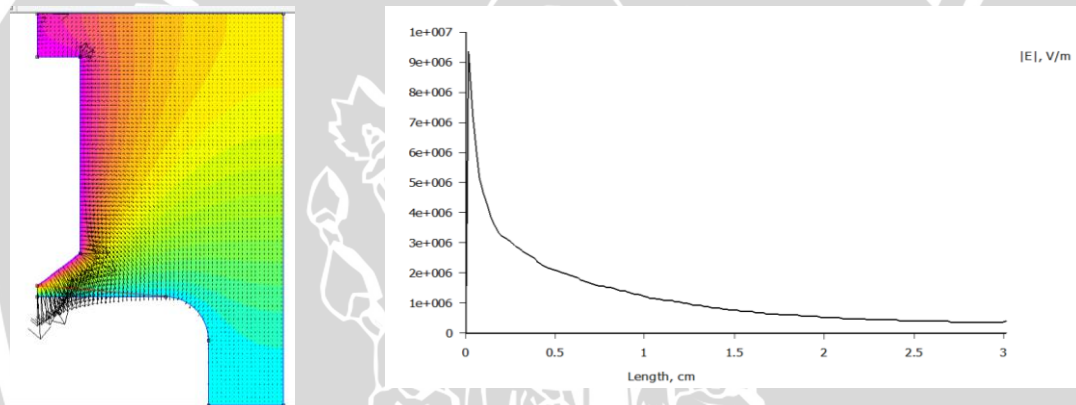
4.6.2.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 2,5 mm

Pada perencanaan simulasi menggunakan Femm 4.2 untuk pengujian elektroda jarum-piring dengan jarak sela 2,5 mm dapat diamati seperti pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Perencanaan simulasi pada susunan elektroda jarum-piring pada jarak sela 2,5 mm pada Minyak Randu Murni
 Sumber : Hasil Simulasi

Pada perencanaan simulasi pada Gambar 4.23 adalah simulasi pada pengujian elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak randu murni. Beda potensial antara elektroda jarum dengan elektroda piring adalah sebesar 12,32 kV.



Gambar 4.24 Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm pada Minyak Randu Murni
 (a) Simulasi Distribusi Medan Listrik (b) Grafik Kuat Medan Listrik
 Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.24 adalah hasil simulasi untuk distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan jarak sela 2,5 mm.. Dari Gambar 4.24a dapat diamati bahwa distribusi medan listrik di daerah ujung jarumnya menyebar atau tidak seragam. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada pengujian jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak randu murni adalah medan non homogen atau tidak seragam.

Gambar 4.24b adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlak pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm pada minyak randu murni. Dari Gambar 4.24b dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah tidak linier dan cenderung turun curam, dimana kuat medan listrik yang terbesar terletak pada jarak yang kurang dari 0,1 cm atau pada ujung elektroda jarumnya. Sedangkan pada jarak 2 sampai 3

cm kuat medan listriknya kecil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm adalah non-homogen atau tidak seragam.

Dari Gambar 4.24b dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $9,34936739 \cdot 10^6$ V/m atau 93,4936739 kV/cm dengan jarak $2,02040177 \cdot 10^{-2}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12. Dengan U_d 12,32 kV dan jarak sela sebesar 2,5 mm, sehingga kuat medan listrik rata-rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{12,32}{0,25}$$

$$E_{rata-rata} = 49,28 \text{ kV/cm}$$

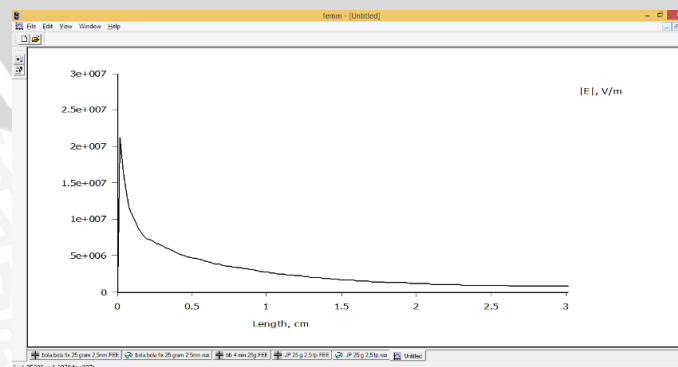
Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 93,4936739 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 49,28 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm adalah :

$$\eta = \frac{49,28}{93,4936739}$$

$$\eta = 0,527$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring pada minyak randu murni dengan jarak sela 2,5 mm adalah 0,527. Hal ini dapat disimpulkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum piring pada minyak randu murni pada jarak sela 2,5 mm adalah medan non-homogen.

Sedangkan untuk elektroda jarum-piring dengan penambahan fenol simulasi distribusi medan listrik sama seperti pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25a hanya aja yang membedakan adalah beda potensial ketika dilakukan penambahan fenol sebesar 27,84 kV sehingga menghasilkan kuat medan listrik seperti pada Gambar 2.25.



Gambar 4.25 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity*, $|E|$) elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.25 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan jarak sela 2,5 mm. Dari Gambar 4.25 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah tidak linier dan cenderung turun curam, dimana kuat medan listrik yang terbesar terletak pada jarak yang kuran kecil dari 0,1 cm atau pada ujung elektroda jarumnya. Sedangkan pada jarak 2 sampai 3 cm kuat medan listriknya kecil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring pada penambahan fenol minyak randu dengan jarak sela 2,5 mm adalah non-homogen atau tidak seragam.

Dari Gambar 4.25 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $2,11271419 \cdot 10^7$ V/m atau 211,271419 kV/cm dengan jarak $2,02040177 \cdot 10^{-2}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik local tertinggi, maka kuat medan listrik rata rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12 . Dengan Ud 27,84 kV dan jarak sela sebesar 2,5 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{27,84}{0,25}$$

$$E_{rata-rata} = 111,36 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 211,271419 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 111,36 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm adalah :

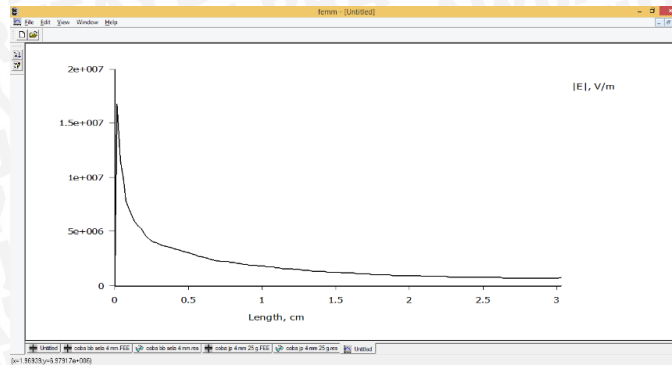
$$\eta = \frac{111,36}{211,271419}$$

$$\eta = 0,527$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 2,5 mm adalah 0,527. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum piring pada pengujian penambahan fenol pada minyak randu dengan jarak sela 2,5 mm adalah medan non-homogen

4.6.2.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Elektroda Jarum-Piring pada Minyak Randu Murni dan Penambahan Fenol dengan jarak sela 4 mm

Simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan jarak sela 4 mm sama seperti pada Gambar 24 dan Gambar 25(a) tetapi yang membedakan adalah pengaturan jarak sela pada perencanaan simulasi yang dinaikkan atau diperlebar menjadi 4 mm. Sehingga menghasilkan kuat medan listrik mutlaknya seperti pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (*magnitude of field intensity*, $|E|$) pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.26 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada minyak randu murni susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm. Beda potensial antara elektroda jarum dengan piring adalah 25,54 kV. Dari Gambar 4.27 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik adalah tidak linier dan cenderung turun curam, dimana kuat medan listrik yang terbesar terletak pada jarak yang kuran kecil dari 0,1 cm atau pada ujung elektroda jarumnya. Sedangkan pada jarak 2 sampai 3 cm kuat medan listriknya kecil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring minyak randu murni dengan jarak sela 4 mm adalah non-homogen atau tidak seragam.

Dari Gambar 4.26 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $1,67971348 \cdot 10^7$ V/m atau 167,971348 kV/cm dengan jarak $2,03124107 \cdot 10^{-2}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik local tertinggi, maka kuat medan listrik rata-rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12. Dengan U_d 25,54 kV dan jarak sela sebesar 4 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{25,54}{0,4}$$

$$E_{rata-rata} = 63,85 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 167,971348 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 63,85 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 5 mm adalah :

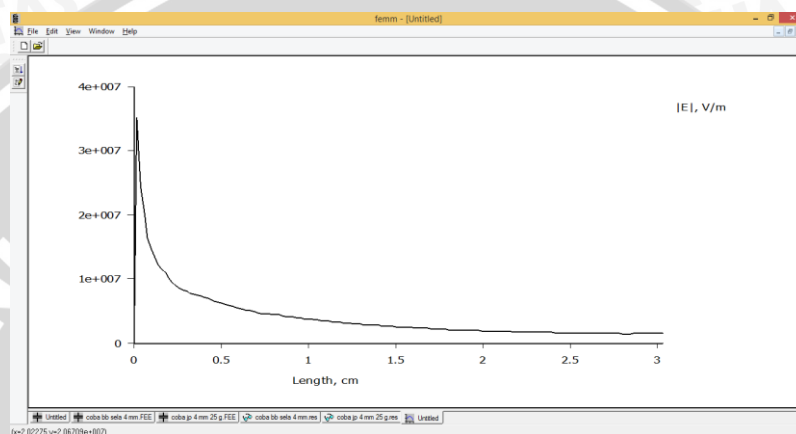
$$\eta = \frac{63,85}{167,971348}$$

$$\eta = 0,380$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm adalah 0,380. Hal ini dapat disimpulkan bahwa distribusi medan listrik untuk

susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm pada pengujian minyak randu murni adalah medan non-homogen.

Pada susunan elektroda jarum-piring dengan penambahan fenol, simulasi distribusi medan listrik sama seperti pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24(a), dimana grafik simulasi kuat medan listrik mutlak nya (*magnitude of field intensity*, $|E|$) pada pengujian penambahan fenol minyak randu dengan penggunaan susunan elektroda jarum dengan jarak sela 4 mm dapat diamati pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlak nya (*magnitude of field intensity*, $|E|$) pada penambahan fenol minyak randu susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm

Sumber : Hasil Simulasi

Gambar 4.27 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlak nya pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 4 mm. Beda potensial antara elektroda jarum dengan piring dengan penambahan fenol adalah 53,35 kV. Dari Gambar 4.27 dapat Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring pada penambahan fenol minyak randu dengan jarak sela 4 mm adalah non-homogen atau tidak seragam.

Dari Gambar 4.28 dapat diamati bahwa nilai kuat medan listrik tertinggi yaitu $3,50872022 \cdot 10^7$ V/m atau 350,872022 kV/cm dengan jarak $2,03124107 \cdot 10^{-2}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-rata dapat dihitung dengan persamaan 2-12 . Dengan U_d 53,35 kV dan jarak sela sebesar 4 mm, sehingga kuat medan listrik rata rata adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{53,35}{0,4}$$

$$E_{rata-rata} = 133.375 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yaitu 350,872022 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 133,375 kV/cm, maka sesuai persamaan 2-9. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan jarak sela 5 mm adalah :

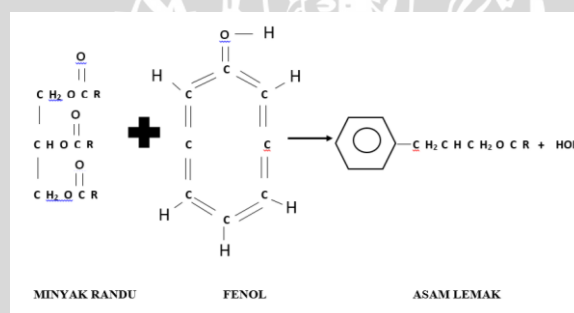
$$\eta = \frac{133,375}{350,872022}$$

$$\eta = 0,380$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum piring dengan penambahan fenol pada jarak sela 4 mm adalah 0,380. Hal ini dapat disimpulkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum piring dengan penambahan fenol minyak randu pada jarak sela 4 mm adalah medan non-homogen.

4.7 Pengaruh Fenol terhadap Minyak Randu Menurut Analisis Secara Ilmiah

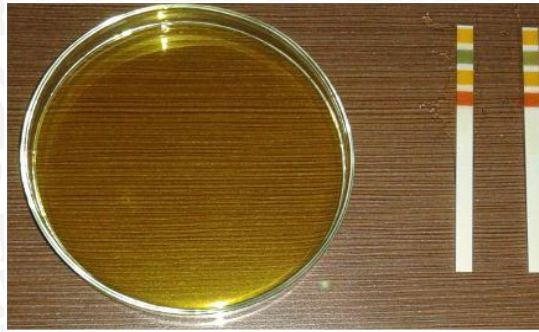
Secara analisis ilmiah, pengaruh fenol terhadap minyak randu dapat dianalisis dari struktur kimia dan kondisi saat minyak randu di uji di dalam pengujian yang telah dilakukan. Dari struktur kimia dapat dilihat pada Gambar 4.28 berikut.



Gambar 4.28 Reaksi kimia minyak randu dengan fenol

Bahwa dari Gambar 4.29 dapat dijelaskan struktur ikatan karbon dengan penambahan fenol pada minyak randu akan meningkatkan nilai titik nyala dari minyak randu tersebut. Hal ini, dapat dibuktikan dengan kondisi dimana minyak randu murni memiliki titik nyala 323,8°C-329,4°C dan Fenol 181,7°C, sehingga dari ikatan kimia yang dilakukan akan menstabilkan nilai titik nyala di dalam pencampuran minyak randu ini. Dan pencampuran minyak randu dengan fenol akan menghasilkan asam lemak tak jenuh (kadungan asam terbesar minyak randu asam linoleat) sehingga asam lemak tak jenuh ini, akan dapat mengurangi kandungan endapan dan asam di dalam minyak randu.

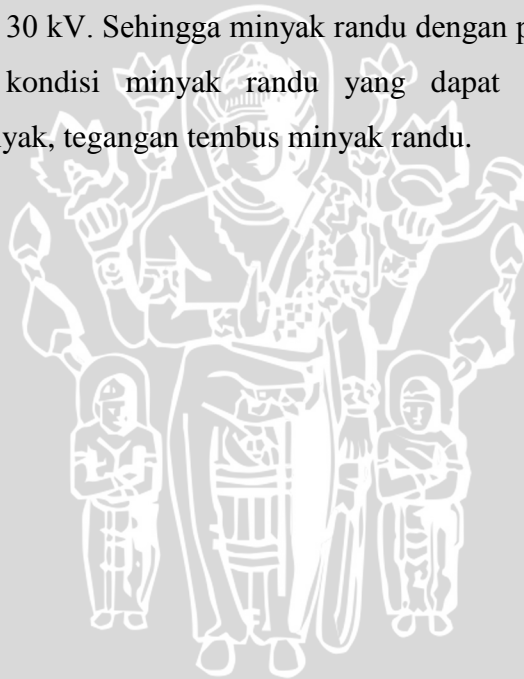
Secara fisis bahwa dengan kurangnya kandungan asam di dalam minyak randu, maka tampak di dalam minyak randu akan lebih jernih, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.29 berikut.



Gambar 4.29 Kondisi Pencampuran fenol dengan minyak randu yang tampak lebih jernih

Dari kondisi tersebut tampak bahwa dengan pencampuran fenol maka minyak randu akan lebih jernih sehingga di dalam viskositas minyak randu akan lebih kecil maka sirkulasi di dalam transformator akan jauh lebih optimal.

Secara tegangan tembus dengan persentase penambahan fenol $\geq 8,2\%$ maka akan di dapatkan tegangan tembus ≥ 30 kV. Sehingga minyak randu dengan penambahan fenol ini, mempengaruhi perubahan kondisi minyak randu yang dapat dari struktur ikatan kimia, tingkat kejernihan minyak, tegangan tembus minyak randu.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari data hasil penelitian dan analisis karakteristik isolasi minyak randu, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada medan homogenitas mempengaruhi nilai arus bocor pada minyak randu, Pada susunan elektroda yang homogen nilai arus bocor lebih kecil dari susunan elektroda non homogen. Pada tegangan yang sama 9 kV dengan jarak sela 2,5 mm arus bocor pada susunan elektroda homogen (elektroda standart dan bola-bola) berturut-turut yaitu 20,62 μA dan 20,5 μA . Sedangkan pada susunan elektroda non-homogen (jarum-piring) yaitu 23,15 μA . Sehingga semakin besar arus bocor maka isolasi pada minyak randu murni semakin buruk.
2. Pada medan homogenitas dengan penambahan fenol mempengaruhi nilai arus bocor pada minyak randu. Penambahan fenol Pada susunan elektroda yang homogen (elektroda standart dan bola-bola) mempunyai nilai arus bocor lebih kecil dari minyak randu murni yaitu dengan penambahan fenol 25 gram pada tegangan 9 kV dengan jarak sela 2,5 mm nilai arus bocor berturut-turut yaitu 13,44 μA dan 17,01 μA . sedangkan pada susunan elektroda non-homogen (jarum-piring) yaitu 19,72 μA . Jadi semakin besar penambahan fenol maka arus bocor pada minyak randu akan semakin kecil sehingga isolasi pada minyak randu semakin baik.
3. Bahwa penambahan fenol mempengaruhi tingkat tegangan tembus, pada persentase fenol dengan 25 gram pada jarak sela 2,5 mm dapat menaikkan tegangan tembus pada susunan elektroda homogen (elektroda standart dan bola-bola) yaitu 41,54 kV dan 42,12 kV dari sebelumnya dengan minyak randu murni 12,84 kV dan 13,23 kV. Sedangkan pada susunan elektroda non-homogen (jarum-piring) yaitu 27,84 kV dari yang sebelumnya pada minyak randu murni 12,32 kV. Sehingga pada susunan elektroda homogen tegangan tembus lebih besar dari susunan elektroda non-homogen. Dan efisiensi medan listrik pada susunan elektroda bola-bola akan semakin besar yaitu ≤ 1 karena medan homogen, sedangkan pada jarum piring

efisiensi medan listrik akan semakin kecil yaitu < 1 karena medan non-homogen. Dan semakin besar jarak sela menyebabkan efisiensi dari susunan elektroda akan semakin kecil yaitu < 1 .

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penyempurnaan penelitian ini adalah

1. Perlunya pengujian lebih lanjut untuk dianalisis secara kimia atau menggunakan *gas chromatograph* sehingga unsur kadungan kimia di dalam minyak randu murni dan penambahan fenol dapat diketahui.
2. Perlunya pengujian lebih lanjut mengenai pengaruh suhu dan waktu terhadap arus konduksi, arus bocor dan tegangan tembus
3. Perlunya pengujian lebih lanjut mengenai perbandingan minyak randu dengan minyak *Sheel Diala B* untuk diterapkan pengukuran tegangan tinggi bolak-balik (AC), searah (DC) dan impuls.
4. Perlunya pengujian lebih lanjut, untuk dilakukan pada minyak nabati lainnya dengan mempertimbangkan viskositas, rugi-rugi dielektrik, konduktivitas, dan efisiensi penggunaan minyak nabati di dalam isolasi cair.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Kuffel. 1990. *High Voltage Engineering*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New York
- Arismunandar. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta Timur : Penerbit Ghalia Indonesia
- Bailey's, Alton E. 1951. *Industrial Oil and Fat Product*. Interscience Publisher. New York
- Dhofir, Moch,dkk. 2000. *Gejala Medan Tinggi*. Malang : Penerbit Teknik Elektro UB
- Hauschild,dkk.1992. *Statistical Techniques for High-Voltage Engineering*. Published by Peter Peregrinus LTd, London, United Kingdom
- Ketaren.1986. *Minyak dan Lemak Pangan*.Jakarta: Penerbit UI-Press
- Kaniawati.2011. *Asam Pikrat*. Malang: Universitas Malang
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung : Penerbit ITB.
- Naidu,MS, Kamajuru, V.1995. *High Voltage Engineering- second edition*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Dehli.
- Muhaimin. 1999. *Bahan – Bahan Listrik untuk Politeknik*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita.
- SPLN 49-1.1982. *Pedoman Penerapan Spesifikasi dan Pemeliharaan Minyak Isolasi*. Jakarta :LMK.
- Setiabudy, Rudy. 2007. *Material Teknik Listrik*. Jakarta : Penerbit Universitas Indonesia
- Tobing L, Bonggas. 2012. *Dasar- Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta : Penerbit Erlangga
- Wadhwa,C.L. 2007. *High Voltage Engineering*. New Delhi: Penerbit New Age International
- Wahyuningrum,D. 2014. *Penuntun Praktikum Kimia Organik*. Bandung
- Arif Benito,N.2014. *Pengaruh Persentase Fenol Terhadap Kekuatan Dielektrik Minyak Jagung*. Skripsi tidak dipublikasikan. Medan: Universitas Sumatera Utara.

LAMPIRAN



LAMPIRAN 1

Data Arus Konduksi Minyak Randu Murni dengan jarak sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (mL)	Tegangan Sumber(kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μA)	Rata-Rata Arus Konduksi (μA)	Resistansi Isolasi (kV/ μA)	Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)	Rata-Rata Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)
1	500	2,03	2,03	1,43	1,43	1,42	178,30	178,30
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,03		1,43		1,42	178,30	
2	525	2,03	2,03	1,43	1,43	1,42	178,30	178,30
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,03		1,43		1,42	178,30	
3	550	2,02	2,02	1,42	1,42	1,42	178,67	178,25
		2,02		1,42		1,42	178,67	
		2,02		1,43		1,41	178,42	
4	575	2	2,01	1,42	1,42	1,41	176,90	177,08
		2,01		1,42		1,42	177,79	
		2,01		1,43		1,41	176,54	
5	600	2,03	2,03	1,42	1,43	1,43	179,55	178,72
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,03		1,43		1,42	178,30	
6	625	2,03	2,03	1,43	1,43	1,42	178,30	178,30
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,03		1,43		1,42	178,30	

No	Minyak Randu (mL)	Tegangan Sumber(kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μ A)	Rata-Rata Arus Konduksi (μ A)	Resistansi Isolasi (kV/ μ A)	Resistivitas Minyak ($M\Omega$ m)	Rata-Rata Resistivitas Minyak ($M\Omega$ m)
7	650	2,03	2,03	1,43	1,43	1,42	178,30	178,30
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,03		1,43		1,42	178,30	
8	675	2,04	2,04	1,44	1,44	1,42	177,93	178,35
		2,04		1,44		1,42	177,93	
		2,04		1,43		1,43	179,18	
9	700	2,03	2,03	1,43	1,43	1,42	178,30	178,59
		2,03		1,43		1,42	178,30	
		2,04		1,43		1,43	179,18	
10	725	2,04	2,04	1,43	1,43	1,43	179,18	179,60
		2,04		1,42		1,44	180,44	
		2,04		1,43		1,42	179,18	

Data Arus Konduksi Minyak Randu Murni dengan Jarak Sela 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μA)	Rata-Rata Arus Konduksi (μA)	Resistansi Isolasi (kV/ μA)	Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)	Rata-Rata Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)
1	500	2,03	2,03	0,80	0,80	2,54	199,19	199,19
		2,03		0,80		2,54	199,19	
		2,03		0,80		2,54	199,19	
2	525	2,04	2,04	0,81	0,80	2,52	197,70	199,35
		2,04		0,80		2,55	200,18	
		2,04		0,80		2,55	200,18	
3	550	2,04	2,04	0,80	0,80	2,55	200,18	199,03
		2,04		0,80		2,55	200,18	
		2,03		0,81		2,51	196,73	
4	575	2,03	2,03	0,80	0,80	2,54	199,19	199,19
		2,03		0,80		2,54	199,19	
		2,03		0,80		2,54	199,19	
5	600	2,04	2,04	0,80	0,80	2,55	200,18	199,35
		2,04		0,81		2,52	197,70	
		2,04		0,80		2,55	200,18	

No	Minyak Randu (mL)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μA)	Rata-Rata Arus Konduksi (μA)	Resistansi Isolasi ($\text{kV}/\mu\text{A}$)	Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)	Rata-Rata Resistivitas Minyak ($\text{M}\Omega\text{m}$)
6	625	2,04	2,04	0,80	0,80	2,55	200,18	199,35
		2,04		0,80		2,55	200,18	
		2,04		0,81		2,52	197,70	
7	650	2,03	2,03	0,81	0,80	2,51	196,73	199,21
		2,03		0,80		2,54	199,19	
		2,03		0,79		2,57	201,72	
8	675	2,04	2,04	0,81	0,81	2,52	197,70	198,53
		2,04		0,81		2,52	197,70	
		2,04		0,80		2,55	200,18	
9	700	2,04	2,04	0,80	0,80	2,55	200,18	199,85
		2,04		0,80		2,55	200,18	
		2,03		0,80		2,54	199,19	
10	725	2,04	2,04	0,80	0,80	2,55	200,18	199,35
		2,04		0,80		2,55	200,18	
		2,04		0,81		2,52	197,70	

LAMPIRAN 2

Data Arus konduksi dengan Penambahan Fenol dengan Jarak Sela 2,5 dan 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μA)	Rata-Rata Arus Konduksi (μA)	Resistansi Isolasi (kV/μA)	Resistivitas Minyak (MΩm)	Rata-Rata Resistivitas Minyak (MΩm)
1	500	2,5	2,07	2,07	1,45	1,45	1,43	179,30	179,30
			2,07		1,45		1,43	179,30	
			2,07		1,45		1,43	179,30	
2	500	5	2,06	2,06	1,40	1,40	1,47	184,81	184,37
			2,06		1,40		1,47	184,81	
			2,06		1,41		1,46	183,50	
3	500	7,5	2,06	2,06	1,38	1,38	1,49	187,49	187,49
			2,06		1,38		1,49	187,49	
			2,06		1,38		1,49	187,49	
4	500	10	2,05	2,05	1,38	1,38	1,49	186,58	187,03
			2,05		1,37		1,50	187,94	
			2,05		1,38		1,49	186,58	
5	500	12,5	2,06	2,06	1,35	1,35	1,53	191,66	191,66
			2,06		1,35		1,53	191,66	
			2,06		1,35		1,53	191,66	
6	500	15	2,07	2,07	1,33	1,33	1,56	195,48	196,29
			2,08		1,33		1,56	196,43	
			2,07		1,32		1,57	196,96	

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μ A)	Rata-Rata Arus Konduksi (μ A)	Resistansi Isolasi (kV/ μ A)	Resistivitas Minyak (M Ω m)	Rata-Rata Resistivitas Minyak (M Ω m)
7	500	17,5	2,05	2,05	1,30	1,30	1,58	198,06	198,06
			2,05		1,30		1,58	198,06	
			2,05		1,30		1,58	198,06	
8	500	20	2,04	2,04	1,32	1,30	1,55	194,11	196,61
			2,04		1,29		1,58	198,62	
			2,04		1,30		1,57	197,10	
9	500	22,5	2,04	2,03	1,26	1,26	1,62	203,35	202,69
			2,03		1,26		1,61	202,36	
			2,03		1,26		1,61	202,36	
10	500	25	2,04	2,04	1,24	1,24	1,65	206,63	206,08
			2,04		1,25		1,63	204,98	
			2,04		1,24		1,65	206,63	

Data Arus konduksi dengan Penambahan Fenol dengan Jarak Sela 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μ A)	Rata-Rata Arus Konduksi (μ A)	Resistansi Isolasi (kV/ μ A)	Resistivitas Minyak (M Ω m)	Rata-Rata Resistivitas Minyak (M Ω m)
1	500	2,5	2,07	2,07	0,70	0,70	2,96	232,14	231,76
			2,06		0,70		2,94	231,01	
			2,07		0,70		2,96	232,14	
2		5	2,07	2,07	0,66	0,66	3,14	246,20	247,47
			2,07		0,66		3,14	246,20	
			2,07		0,65		3,18	249,99	
3		7,5	2,07	2,06	0,63	0,63	3,29	257,93	257,10
			2,06		0,63		3,27	256,68	
			2,06		0,63		3,27	256,68	
4	10	2,07	2,07	0,60	0,60	3,45	270,83	269,78	
		2,07		0,61		3,39	266,39		
		2,08		0,60		3,47	272,13		
5	12,5	2,08	2,08	0,57	0,58	3,65	286,46	283,16	
		2,08		0,58		3,59	281,52		
		2,08		0,58		3,59	281,52		
6	15	2,07	2,07	0,56	0,56	3,70	290,17	290,17	
		2,07		0,56		3,70	290,17		
		2,07		0,56		3,70	290,17		

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan Sumber (kV)	Arus Konduksi (μ A)	Rata-Rata Arus Konduksi (μ A)	Resistansi Isolasi (kV/ μ A)	Resistivitas Minyak (M Ω m)	Rata-Rata Resistivitas Minyak (M Ω m)
7	500	17,5	2,06	2,06	0,55	0,56	3,75	294,02	290,99
			2,06		0,56		3,68	288,77	
			2,07		0,56		3,70	290,17	
8		20	2,06	2,06	0,52	0,52	3,96	310,98	310,98
			2,06		0,52		3,96	310,98	
			2,06		0,52		3,96	310,98	
9		22,5	2,04	2,03	0,50	0,50	4,08	320,28	319,23
			2,03		0,50		4,06	318,71	
			2,03		0,50		4,06	318,71	
10	25	2,04	2,04	0,50	0,50	4,08	320,28	318,19	
		2,04		0,50		4,08	320,28		
		2,04		0,51		4,00	314,00		

LAMPIRAN 3 Data Arus Bocor Susunan Elektroda Standart, Bola-Bola dan Jarum-Piring

Data Arus bocor Susunan elektroda Standart Jarak Sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kv)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)				
1		0	3,5	3,50	7,77	7,77				
			3,5		7,77					
			3,5		7,77					
			6,41	6,39	14,21		14,20			
			6,34		14,20					
			6,42		14,20					
			9,29	9,28	20,64			20,62		
			9,26		20,61					
			9,28		20,61					
2	1100	7,5	3,09	3,08	6,78	6,77				
			3,08		6,77					
			3,08		6,77					
			6,42	6,44	14,31		14,31			
			6,45		14,31					
			6,44		14,31					
			9,31	9,31	20,68			20,68		
			9,3		20,67					
			9,32		20,68					
3		15	3,54	3,54	6,27	6,27				
			3,53		6,27					
			3,54		6,28					
			6,4	6,41	11,45		11,45			
			6,41		11,44					
			6,41		11,45					
			9,41	9,42	16,83			16,82		
			9,43		16,83					
			9,43		16,80					
			12,64	12,63	22,57				22,55	
			12,62		22,57					
			12,62		22,52					
			15,46	15,48	27,64					27,64
			15,48		27,64					
			15,51		27,64					

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kv)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
4	1100	25	3,35	3,35	4,93	4,93
			3,35		4,93	
			3,35		4,93	
			6,12	6,13	9,01	9,01
			6,12		9,01	
			6,15		9,01	
			9,12	9,14	13,46	13,44
			9,15		13,43	
			9,15		13,43	
			12,61	12,56	18,47	16,47
			12,55		18,48	
			12,51		12,47	
			15,04	15,08	22,18	22,18
			15,08		22,18	
			15,11		22,18	
			18,00	18,00	26,47	26,47
			18,01		26,47	
			18,00		26,47	
			21,06	21,09	31,04	31,01
			21,11		31,00	
			21,11		31,00	
			24,40	24,38	35,86	35,85
			24,37		35,86	
			24,36		35,83	
			27,00	27,00	39,70	39,70
			27,00		39,70	
			27,00		39,70	
30,02	30,02	44,20	44,15			
30,01		44,12				
30,02		44,12				

Data Arus bocor Susunan elektroda Bola-bola Jarak Sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kv)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)			
1		0	3,61	3,62	7,81	7,80			
			3,62		7,81				
			3,64		7,78				
						6,63	6,64	14,21	14,20
				6,64	14,20				
				6,64	14,20				
						9,52	9,51	20,50	20,50
				9,5	20,50				
				9,5	20,50				
2	1100	7,5	3,5	3,52	7,37	7,37			
			3,52		7,37				
			3,54		7,36				
						6,47	6,47	13,70	13,67
				6,47	13,66				
				6,48	13,66				
						9,5	9,48	20,00	20,00
				9,47	20,00				
				9,47	20,00				
						12,31	12,32	26,21	26,21
				12,32	26,21				
				12,32	26,21				
			3		15	3,15	3,16	6,45	6,44
3,18	6,44								
3,15	6,44								
						6,32	6,32	12,90	12,90
	6,32	12,90							
	6,33	12,90							
						9,18	9,18	18,73	18,73
	9,18	18,73							
	9,18	18,73							
						12,69	12,68	25,88	25,87
	12,66	25,87							
	12,69	25,87							
						15,52	15,52	31,68	31,67
	15,52	31,68							
	15,53	31,66							

Data Arus bocor Susunan elektroda Bola-bola Jarak Sela 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-Rata Arus Bocor (μA)
1	1100	0	3,65	3,65	7,01	7,01
			3,65		7,01	
			3,66		7,01	
			6,66	6,64	12,60	12,57
			6,67		12,55	
			6,59		12,55	
			9,51	9,50	18,03	18,03
			9,51		18,03	
			9,49		18,04	
			12,35	12,37	23,60	23,60
			12,39		23,60	
			12,38		23,60	
			15,29	15,30	29,30	29,30
			15,31		29,30	
			15,31		29,30	
			18,29	18,25	34,90	34,90
			18,22		34,90	
			18,23		34,90	
2	1100	7,5	3,33	3,34	6,42	6,42
			3,34		6,42	
			3,34		6,42	
			6,44	6,45	12,40	12,40
			6,44		12,40	
			6,47		12,41	
			9,24	9,25	17,78	17,78
			9,27		17,78	
			9,25		17,78	
			12,18	12,22	23,50	23,50
			12,23		23,50	
			12,25		23,50	
			15,13	15,13	29,09	29,09
			15,14		29,09	
			15,11		29,09	
18,79	18,75	36,05	36,05			
18,77		36,05				
18,7		36,05				

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
2		7,5	21,81	21,76	41,85	41,85
			21,72		41,85	
			21,74		41,84	
			24,66	24,67	47,44	47,44
			24,67		47,44	
			24,69		47,44	
3	1100	15	3,44	3,46	6,29	6,29
			3,47		6,29	
			3,46		6,29	
			6,27	6,27	11,40	11,40
			6,28		11,40	
			6,26		11,40	
			9,16	9,18	16,70	16,69
			9,18		16,69	
			9,21		16,69	
			12,80	12,77	23,24	23,22
			12,74		23,21	
			12,77		23,21	
			15,50	15,34	27,89	27,89
			15,52		27,89	
			15,00		27,89	
			18,24	18,21	33,11	33,11
			18,18		33,11	
			18,22		33,10	
			21,44	21,58	39,23	39,23
			21,66		39,23	
			21,64		39,22	
			24,06	24,06	43,74	43,74
			24,07		43,74	
			24,06		43,73	
			27,24	27,27	49,58	49,58
			27,26		49,58	
			27,31		49,58	
			30,32	30,41	55,29	55,29
			30,43		55,30	
			30,47		55,29	
33,79	33,64	61,16	61,16			
33,40		61,16				
33,74		61,17				

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
4		25	3,57	3,57	6,05	6,05
			3,56		6,05	
			3,58		6,05	
			6,41	6,42	10,88	10,88
			6,42		10,88	
			6,43		10,88	
			9,23	9,25	15,10	15,07
			9,25		15,06	
			9,27		15,06	
			12,39	12,44	21,09	21,08
			12,46		21,08	
			12,47		21,08	
			15,23	15,27	25,88	25,88
			15,3		25,88	
			15,29		25,88	
			18,00	18,00	30,50	30,50
			18,00		30,50	
			18,01		30,50	
			21,05	21,06	35,72	35,69
			21,05		35,68	
			21,08		35,68	
			24,19	24,18	40,99	40,98
			24,22		40,99	
			24,13		40,96	
			27,70	27,70	46,94	46,94
			27,71		46,94	
			27,70		46,94	
			30,76	30,84	52,27	52,27
			30,90		52,27	
			30,86		52,27	
33,27	33,26	56,39	56,37			
33,24		56,36				
33,27		56,36				
35,70	35,72	60,54	60,54			
35,71		60,54				
35,74		60,55				

Data Arus bocor Susunan elektroda Jarum-Piring Jarak Sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
1		0	3,45	3,45	8,62	8,62
			3,45		8,62	
			3,46		8,62	
			6,34	6,34	15,85	15,85
			6,33		15,85	
			6,34		15,85	
			9,24	9,26	23,15	23,15
			9,26		23,15	
9,28	23,16					
2	1100	7,5	3,38	3,38	8,45	8,45
			3,38		8,45	
			3,37		8,45	
			6,02	6,02	15,05	15,05
			6,03		15,05	
			6,02		15,05	
			9	9,00	22,50	22,50
			9,01		22,50	
9	22,50					
3		15	3,01	3,01	7,40	7,40
			3		7,42	
			3,01		7,39	
			6,26	6,25	14,53	14,53
			6,24		14,53	
			6,24		14,53	
			9,39	9,40	21,88	21,86
			9,42		21,85	
			9,4		21,85	
			12,55	12,60	29,30	29,30
			12,64		29,30	
			12,61		29,30	
15,44	15,45	35,93	35,93			
15,46		35,93				
15,45		35,93				
4		25	3,47	3,47	7,38	7,38
			3,48		7,38	
			3,47		7,38	

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
4	1100	25	6,44	6,45	13,72	13,72
			6,45		13,72	
			6,45		13,72	
			9,18	9,20	19,72	19,72
			9,22		19,71	
			9,20		19,72	
			12,11	12,10	25,70	25,70
			12,10		25,70	
			12,10		25,70	
			15,01	15,01	31,93	31,93
			15,00		31,93	
			15,01		31,93	
			18,52	18,55	39,46	39,46
			18,50		39,46	
18,62	39,46					



Data Arus bocor Susunan elektroda Jarum-Piring Jarak Sela 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-Rata Arus Bocor (μA)
1		0	3,09	3,08	7,33	7,33
			3,08		7,33	
			3,08		7,33	
			6	6,00	14,28	14,28
			6		14,28	
			6		14,28	
			9,31	9,32	22,07	22,07
			9,32		22,07	
			9,32		22,07	
			12,68	12,69	30,18	30,21
			12,69		30,25	
			12,71		30,21	
			15,57	15,58	37,08	37,09
			15,58		37,10	
			15,58		37,08	
2	1100	7,5	3	3,00	7,13	7,14
			3		7,15	
			3,01		7,15	
			6	6,01	14,31	14,31
			6		14,33	
			6,02		14,30	
			9	9,00	21,42	28,09
			9		21,42	
			9		41,42	
			12,05	12,07	28,75	28,74
			12,1		28,73	
			12,05		28,73	
			15,01	15,01	35,73	35,73
			15,01		35,73	
			15		35,73	
18,45	18,40	43,81	43,80			
18,37		43,79				
18,39		43,80				
21,11	21,08	50,19	50,19			
21,06		50,20				
21,07		50,18				

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
3	1100	15	3,12	3,12	6,90	6,90
			3,13		6,90	
			3,12		6,90	
			6,25	6,25	13,80	13,80
			6,25		13,81	
			6,26		13,80	
			9,47	9,48	21,07	21,06
			9,50		21,06	
			9,48		21,06	
			12,46	12,48	27,73	27,73
			12,48		27,73	
			12,50		27,74	
			15,34	15,33	34,05	34,06
			15,32		34,07	
			15,33		34,07	
			18,27	18,28	40,63	40,62
			18,26		40,62	
			18,30		40,62	
			21,25	21,26	47,24	47,24
			21,30		47,24	
			21,22		47,24	
			24,62	24,68	53,48	53,48
			24,69		53,49	
			24,74		53,48	
27,45	27,44	60,97	60,97			
27,41		60,98				
27,46		60,96				
4		25	3,53	3,53	7,06	7,06
			3,53		7,07	
			3,54		7,05	
			6,37	6,38	12,76	12,76
			6,38		12,76	
			6,39		12,76	
			9,26	9,26	18,33	18,32
			9,25		18,32	
			9,26		18,32	
			12,12	12,15	24,30	24,30
			12,18		24,30	
			12,14		24,31	

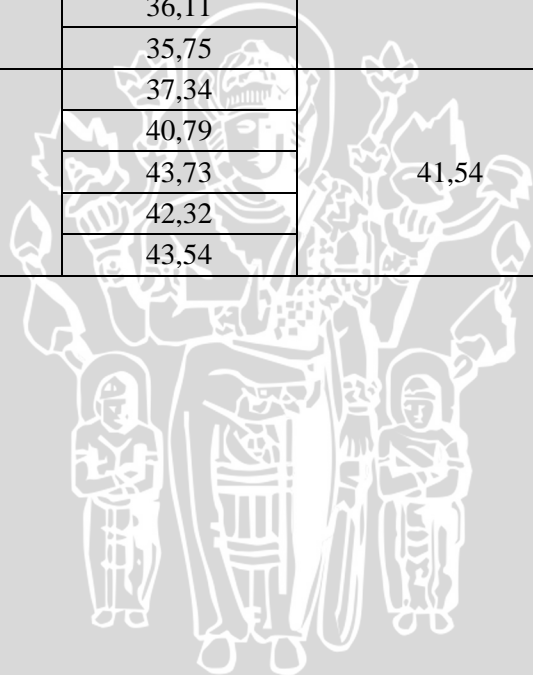
No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-Rata Tegangan (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-Rata Arus Bocor (μ A)
4	1100	25	15,01	15,01	30,02	30,02
			15,00		30,01	
			15,03		30,02	
			18,37	18,37	36,74	36,74
			18,38		36,73	
			18,37		36,74	
			21,57	21,57	43,14	43,14
			21,58		43,15	
			21,56		43,14	
			24,32	24,32	48,64	48,64
			24,33		48,64	
			24,31		48,64	
			27,37	27,38	54,76	54,76
			27,39		54,75	
			27,39		54,76	
			30,26	30,25	60,50	60,50
			30,23		60,50	
			30,25		60,51	
			33,09	33,13	66,26	66,26
			33,18		66,26	
33,13	66,25					
36,18	36,20	72,38	72,40			
36,24		72,40				
36,18		72,42				

LAMPIRAN 4 Data Pengujian Tegangan Tembus Pada Susunan Eletroda Standart, Bola-bola dan Jarum-Piring

Data Pengujian tegangan tembus Susunan elektroda standart dengan jarak sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (ml)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
1	250	0	12,26	12,84
			13,36	
			12,4	
			14,13	
			12,07	
2	250	2,5	10,98	13,13
			12,08	
			13,12	
			14,99	
			14,49	
3	250	5	10,96	13,15
			12,26	
			14,47	
			14,05	
			14,03	
4	250	7,5	12,26	14,27
			13,38	
			15,19	
			15,24	
			15,28	
5	250	10	13,36	15,20
			15,28	
			14,27	
			15,04	
			18,05	
6	250	12,5	23,71	23,32
			24,11	
			22,26	
			23,29	
			23,24	
7	250	15	22,73	24,60
			23,16	
			27,03	
			24,03	
			26,06	

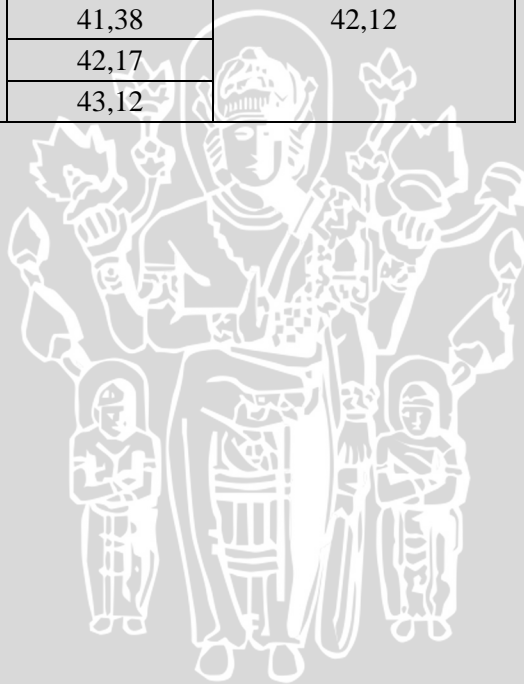
No	Minyak Randu (ml)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
8	250	17,5	27,23	28,18
			28,13	
			27,81	
			29,15	
			28,6	
9	250	20	30,37	33,84
			32,25	
			34,25	
			37,25	
			35,08	
10	250	22,5	34,11	35,15
			35,33	
			34,46	
			36,11	
			35,75	
11	250	25	37,34	41,54
			40,79	
			43,73	
			42,32	
			43,54	



Data Pengujian Tegangan Tembus Susunan elektroda Bola-bola jarak sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
1	1100	0	12,67	13,23
			12,85	
			14,47	
			15,57	
			10,57	
2	1100	2,5	14,12	15,19
			14,54	
			15,57	
			16,67	
			15,07	
3	1100	5	16,26	16,06
			14,45	
			18,17	
			15,36	
			16,04	
4	1100	7,5	16,11	17,16
			16,73	
			17,01	
			18,99	
			16,95	
5	1100	10	19,28	20,05
			21,52	
			21,67	
			15,57	
			22,2	
6	1100	12,5	22,22	24,94
			25,07	
			27,27	
			27,32	
			22,81	
7	1100	15	25,24	26,48
			26,28	
			27,11	
			26,66	
			27,13	
8	1100	17,5	34,23	31,56
			34,18	
			34,22	
			33,11	
			22,05	

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
9	1100	20	37,67	37,87
			37,44	
			39,34	
			38,77	
			36,11	
10	1100	22,5	39,18	39,08
			38,48	
			38,08	
			39,77	
			39,87	
11	1100	25	41,59	42,12
			42,36	
			41,38	
			42,17	
			43,12	



Data Pengujian Teganga Tembus Susunan Elektroda Bola-bola dengan jarak sela 4 mm

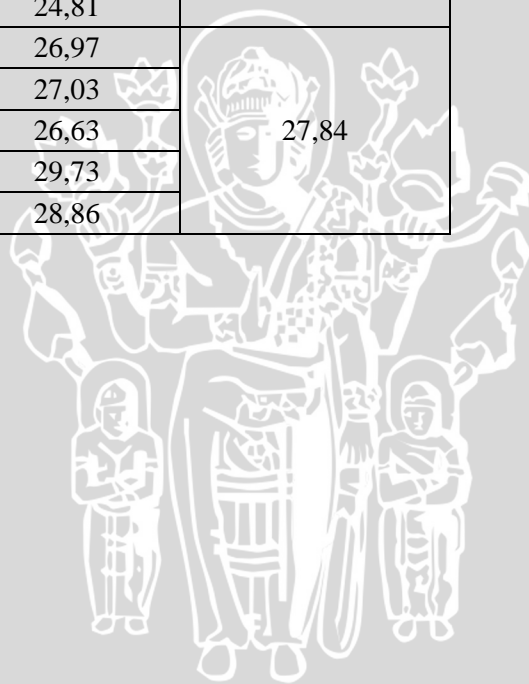
No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
1	1100	0	30,31	27,79
			31,8	
			25,18	
			26,31	
			25,33	
2	1100	2,5	26,95	30,68
			30,87	
			32,18	
			31,21	
			32,18	
3	1100	5	33,86	34,80
			33,76	
			33,01	
			36,69	
			36,7	
4	1100	7,5	34,17	35,71
			34,89	
			35,71	
			36,81	
			36,96	
5	1100	10	38,65	38,79
			39,76	
			39,65	
			38,71	
			37,18	
6	1100	12,5	43,15	44,47
			44,21	
			45,19	
			44,13	
			45,66	
7	1100	15	51,5	50,82
			51,73	
			51,98	
			50,75	
			48,13	

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
8	1100	17,5	53,15	54,88
			53,71	
			56,81	
			55,42	
			55,32	
9	1100	20	55,97	57,31
			57,19	
			57,24	
			58,72	
			57,41	
10	1100	22,5	60,18	61,72
			61,28	
			60,39	
			62,84	
			63,93	
11	1100	25	64,12	64,57
			63,21	
			65,05	
			64,53	
			65,96	

Data Pengujian Tegangan Tembus Susunan Elektroda Jarum Piring jarak Sela 2,5 mm

No	Minyak Randu (ml)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
1	1100	0	12,94	12,32
			12,12	
			12,14	
			13,14	
			11,24	
2	1100	2,5	14,24	12,84
			12,76	
			13,28	
			12,11	
			11,79	
3	1100	5	14,28	13,13
			12,2	
			11,54	
			13,6	
			14,03	
4	1100	7,5	13,86	13,76
			13,8	
			14,73	
			14,14	
			12,26	
5	1100	10	15,52	17,79
			18,75	
			17,78	
			19,87	
			17,02	
6	1100	12,5	17,96	19,95
			20,8	
			20,43	
			20,31	
			20,27	
7	1100	15	19,43	21,36
			20,54	
			21,85	
			22,43	
			22,57	

No	Minyak Randu (ml)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
8	1100	17,5	20,02	21,71
			21,02	
			21,86	
			22,05	
			23,58	
9	1100	20	22,78	22,48
			21,42	
			22,09	
			23,08	
			23,02	
10	1100	22,5	22,48	24,17
			24,1	
			25,64	
			23,81	
			24,81	
11	1100	25	26,97	27,84
			27,03	
			26,63	
			29,73	
			28,86	



Data Pengujian Tegangan Tembus Susunan Elektroda Jarum Piring jarak Sela 4 mm

No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
1	1100	0	25,43	25,54
			25,26	
			25,82	
			24,83	
			26,36	
2	1100	2,5	28,87	29,65
			30,48	
			30,72	
			29,82	
			28,38	
3	1100	5	26,26	31,35
			32,72	
			34,11	
			34,94	
			28,74	
4	1100	7,5	30,17	31,70
			31,79	
			32,14	
			32,15	
			32,27	
5	1100	10	33,76	34,55
			35,76	
			33,31	
			33,86	
			36,07	
6	1100	12,5	36,01	35,75
			35,11	
			34,76	
			35,97	
			36,89	
7	1100	15	37,46	38,25
			39,11	
			38,76	
			36,66	
			39,26	

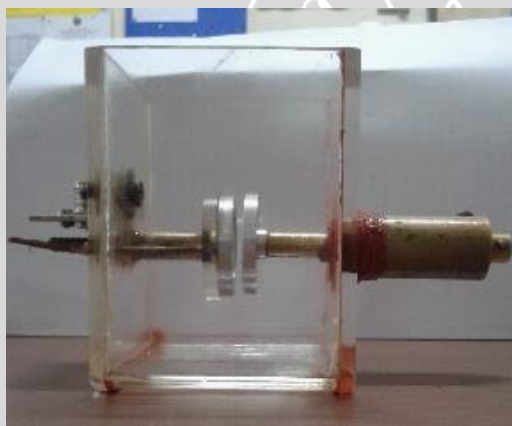
No	Minyak Randu (mL)	Fenol (g)	Tegangan Tembus (kV)	Rata-Rata Tegangan Tembus (kV)
8	1100	17,5	38,15	39,27
			39,21	
			40,51	
			40,02	
			38,45	
9	1100	20	38,01	40,35
			41,56	
			41,24	
			43,77	
			37,18	
10	1100	22,5	44,57	44,71
			43,12	
			46,18	
			44,21	
			45,45	
11	1100	25	52,74	53,35
			53,16	
			49,18	
			56,16	
			55,49	



LAMPIRAN 5. Foto Pengujian



Gambar 1. Minyak randu Pada kondisi murni



Gambar 2. Kotak Uji yang digunakan untuk menguji Arus konduksi tampak depan



Gambar 3. Kotak Uji yang digunakan untuk menguji Arus konduksi tampak atas



Gambar 4. Kotak uji untuk pengujian Arus bocor dan tegangan tembus tampak depan



Gambar 5. Kotak uji untuk pengujian Arus bocor dan tegangan tembus tampak atas



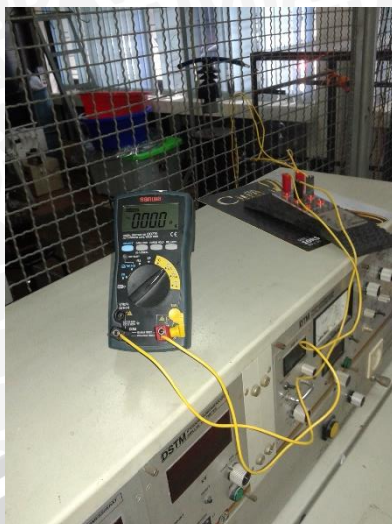
Gambar 6. Kotak uji untuk pengujian Arus bocor dan tegangan tembus tampak depan pada elektroda standart



Gambar 7. Kotak uji untuk pengujian Arus bocor dan tegangan tembus tampak atas pada elektroda standart



Gambar 8. Alat ukur tegangan tinggi AC dan DC pada *control desk*



Gambar 9. Multimeter yang digunakan untuk mengukur Arus Bocor dan Arus Konduksi



Gambar 10. Rangkaian pengujian Arus Konduksi pada pengukuran tegangan tinggi DC



Gambar 11. Rangkaian pengujian Arus Bocor dan Tegangan Tembus pada pengukuran tegangan tinggi DC



Gambar 12. Kondisi kotak uji ketika di masukkan minyak randu pada susunan elektroda Jarum-Piring



Gambar 13. Susunan elektroda jarum, piring, bola yang digunakan di dalam pengujian isolasi minyak randu