



**ANALISIS PERILAKU PENGOTOR SERBUK JERAMI DALAM
MINYAK TRANSFORMATOR SHELL DIALA B PADA MEDAN
LISTRIK HOMOGEN DAN NON HOMOGEN**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



LESTARI AYUNINGSIH

NIM. 135060301111114

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

**LEMBAR PENGESAHAN****ANALISIS PERILAKU PENGOTOR SERBUK JERAMI DALAM MINYAK
TRANSFORMATOR SHELL DIALA B PADA MEDAN LISTRIK HOMOGEN
DAN NON HOMOGEN****SKRIPSI****TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**LESTARI AYUNINGSIH
NIM. 135060301111114**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 09 Juni 2017

Dosen Pembimbing I**Dosen Pembimbing II**

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

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

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

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

**JUDUL SKRIPSI:****ANALISIS PERILAKU PENGOTOR SERBUK JERAMI DALAM MINYAK TRANSFORMATOR SHELL DIALA B PADA MEDAN LISTRIK HOMOGEN DAN NON HOMOGEN****Nama Mahasiswa : LESTARI AYUNINGSIH****NIM : 135060301111114****Program Studi : TEKNIK ELEKTRO****Konsentrasi : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK****Komisi Pembimbing :****Ketua : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.****Anggota : Ir. Hery Purnomo, M.T.****Tim Dosen Penguji :****Dosen Penguji 1 : Ir. Soeprpto, M.T.****Dosen Penguji 2 : Ir. Teguh Utomo, M.T.****Dosen Penguji 3 : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.****Tanggal Ujian : 9 Juni 2017****SK Penguji : 689/UN10.F07/SK/2017**

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 15 Juni 2017

Mahasiswa,

LESTARI AYUNINGSIH

NIM. 135060301111114

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus karena segala penyertaan, kesabaran, dan kemudahan yang diberikanNya sehingga penyelesaian penelitian skripsi ini dapat berlangsung dengan baik. Terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya atas bantuan dan dukungan 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. Bapak Ali Mustofa, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik elektro Universitas Brawijaya.
4. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., ST., Msc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran dan motivasinya.
5. Bapak Moch. Dhofir, Drs., Ir., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
6. Bapak Hery Purnomo, Ir., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan dan motivasinya.
7. Kepala Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan bimbingan, nasehat, saran, masukan, serta motivasi yang diberikan.
8. Keluarga tercinta, kedua orang tua T. Parlindungan dan Suryani Simanjuntak yang selalu memberikan dukungan dan doa tak henti-hentinya serta adik-adik Natalia Deandra dan Daniel Marisi Rizki yang senantiasa menghibur setiap waktu.
9. Rekan-rekan asisten Laboratorium Sistem Daya Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 2012, 2014 dan khususnya 2013 Ayyub, Syamsu, Hesti, Orlando, Bhakti atas segala semangat yang telah diberikan selama penelitian dan penulisan skripsi ini.
10. Para sahabat terdekat selama menunaikan pendidikan di Kota Malang, Melody Indah, Adella Dwi Naura dan Jovi Imanuel.



11. Keluarga besar angkatan 2013 “SPECTRUM” atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.

12. Rekan seperjuangan menyelesaikan penelitian ini Hesti Vini dan Keiko Azizah yang telah membantu proses penelitian serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-satu yang turut membantu secara langsung maupun tidak langsung.

Sekiranya Tuhan Yang Maha Esa 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. Amin.

Malang, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Minyak Isolasi.....	5
2.3 Sifat Listrik Minyak Transformator.....	7
2.4 Minyak Transformator Shell Diala B.....	10
2.5 Mekanisme Kegagalan Zat Cair.....	11
2.5.1 Kegagalan Butiran Padat Pada Zat Cair.....	11
2.5.2 Faktor Efisiensi Medan Listrik.....	14
2.6 Fenomena Jembatan (<i>Bridging</i>) Pada Minyak Transformator.....	14
2.7 Pengukuran Arus Konduksi Tegangan Searah.....	17
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Studi Literatur.....	19
3.2 Objek Uji.....	19
3.3 Persiapan Alat.....	21
3.4 Pengujian Objek Uji.....	22
3.4.1 Persiapan Objek Uji.....	22
3.4.2 Persiapan Gelas Uji.....	23
3.4.3 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi AC.....	24
3.4.4 Pengujian Tegangan Tembus dan Arus Bocor.....	24
3.4.5 Pengujian Resistivitas dan Permittivitas Minyak Transformator.....	27
3.4.6 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Medan Homogen dan Non Homogen pada Minyak Transformator Menggunakan Femm.....	29
3.4.7 Pengamatan Partikel Jerami dalam Minyak Transformator.....	30
3.5 Analisis Data.....	31
3.6 Kesimpulan dan Saran.....	31



BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Tegangan Tembus dan Arus Bocor.....	33
4.1.1 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Tegangan Tembus.....	33
4.1.2 Pengaruh Kontaminan Serbuk Jerami Terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standar.....	34
4.1.3 Pengaruh Filtrasi Minyak Transformator Terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standar.....	36
4.1.4 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Arus Bocor.....	38
4.1.5 Minyak Transformator Terkontaminasi Serbuk Jerami Terhadap Arus Bocor.....	39
4.2 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor Pada Elektroda Cincin Pelindung.....	46
4.3 Analisis Pengamatan Pergerakan Partikel Jerami Dalam Minyak Transformator pada Medan Homogen dan Non Homogen.....	50
4.4 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non Homogen Dalam Pengujian Minyak Transformator.....	53
4.4.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dengan Medan Homogen.....	53
4.4.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dengan Medan Non Homogen.....	54
BAB V PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	58

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

**DAFTAR TABEL**

No.	Judul	Halaman
Tabel 2. 1	Karakteristik Dielektrik Cair Dalam Transformator.....	6
Tabel 2. 2	Tabel Spesifikasi Standar PLN No. 49 Tahun 1982.....	9
Tabel 2. 3	Hubungan Antara Diameter Partikel dengan Kekuatan Tegangan Tembus.....	15
Tabel 3. 1	Takaran Serbuk Jerami dalam Minyak Transformator.....	23
Tabel 4. 1	Perbandingan Data Tegangan Tembus Minyak Transformator Sebelum dan Setelah Pemanasan.....	33
Tabel 4. 2	Data Pengujian Tegangan Tembus dengan Penambahan Kontaminan Serbuk Jerami Pada Elektroda Standar.....	35
Tabel 4. 3	Data Pengujian Tegangan Tembus Setelah Filtrasi Pada Elektroda Standar.....	37
Tabel 4. 4	Data Hasil Pengujian Arus Bocor Minyak Transformator pada Keadaan Murni Menggunakan Tegangan Tinggi AC.....	38
Tabel 4. 5	Data Perbandingan Arus Bocor terhadap Tegangan Menurut Trendline...	39
Tabel 4. 6	Perbandingan Hasil Pengujian Arus Bocor Terkontaminasi Pada Jarak Sela 10mm.....	40
Tabel 4. 7	Perbandingan Data Arus Bocor Terkontaminasi Hasil Pengujian dengan Trendline Pada Jarak 10mm.....	41
Tabel 4. 8	Data Perbandingan Arus Bocor Terkontaminasi Pada Jarak Sela 15mm.....	43
Tabel 4. 9	Perbandingan Analisi Data Hasil Pengujian dengan Data Trendline.....	44
Tabel 4. 10	Data Hasil Pengujian Arus Konduksi Minyak Transformator Murni.....	46
Tabel 4. 11	Data Hasil Analisis Arus Konduksi Menggunakan Trendline.....	48
Tabel 4. 12	Data Hasil Perhitungan Konduktivitas Minyak Transformator Murni.....	49
Tabel 4. 13	Data Hasil Pengujian Arus Bocor Pada Elektroda Cincin Pelindung Dengan Jarak Sela 5mm.....	49

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2. 1	Rangkaian Ekuivalen Dielektrik.....	7
Gambar 2. 2	Komponen Arus Pada Dielektrik.....	7
Gambar 2. 3	Ilustrasi Pengukuran Resistivitas.....	8
Gambar 2. 4	Spesifikasi Minyak Shell Diala B.....	10
Gambar 2. 5	Permitivitas Partikel Padat Dalam Zat Cair.....	12
Gambar 2. 6	Elektroda Setengah Bola Dengan Nilai Tekanan Listrik Tiga Kali dari Rata-rata	13
Gambar 2. 7	Fenomena Bridging pada Minyak Transformator	16
Gambar 2. 8	Pengujian Arus Konduksi pada Susunan Plat Sejajar	17
Gambar 3. 1	Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian.....	19
Gambar 3. 2	Wadah Uji Minyak Transformator	20
Gambar 3. 3	Susunan Elektroda	20
Gambar 3. 4	Wadah Uji dengan Elektroda standar VDE 370.....	21
Gambar 3. 5	Tabung Uji dengan Elektroda Cincin Pengaman	24
Gambar 3. 6	Rangkaian Tegangan Tinggi AC	24
Gambar 3. 7	Diagram Alir pengujian Tegangan Tembus dan Arus Bocor	25
Gambar 3. 8	Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi DC	27
Gambar 3. 9	Diagram Alir Pengujian Permitivitas dan Resistivitas Minyak Transformator	28
Gambar 3. 10	Rangkaian pengamatan pergerakan jerami.....	30
Gambar 3. 11	Diagram alir pengamatan partikel jerami	30
Gambar 4. 1	Fenomena Karbon Setelah Pengujian Tegangan Tembus.....	34
Gambar 4. 2	Grafik Tingkat Tegangan Tembus Setiap Penambahan Kontaminan Serbuk Jerami Pada Elektroda Setengah Bola dengan Jarak Sela 2.5mm.....	35
Gambar 4. 3	Fenomena Jerami dalam Minyak Transformator Sebelum Pengujian Tegangan Tembus.....	36
Gambar 4. 4	Fenomena Jerami dalam Minyak Transformator Sesudah Pegujian Tegangan Tembus.....	36
Gambar 4. 5	Grafik Perbandingan Tegangan Tembus Minyak Transformator Terkontaminasi dengan Tegangan Tembus Setelah Filtrasi.....	37
Gambar 4. 6	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Kenaikan Tegangan AC pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring pada Jarak Sela 10mm dan 15mm	38
Gambar 4. 7	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Kenaikan Tegangan AC Pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring Pada Jarak Sela 10mm	40
Gambar 4. 8	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 10mm	42
Gambar 4. 9	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Jarum-piring Dengan Jarak Sela 10mm	42
Gambar 4. 10	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Kenaikan Tegangan AC Pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring pada Jarak Sela 15mm	43
Gambar 4. 11	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 15mm	45



Gambar 4. 12	Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Jarum-piring Dengan Jarak Sela 15mm	45
Gambar 4. 13	Grafik Hubungan Arus Konduksi Sebagai Fungsi Tegangan Pada Jarak Sela 5mm Pada Tegangan DC 2kV	48
Gambar 4. 14	Pergerakan Jerami Dalam Minyak Transformator Dengan Tegangan Sumber 20kV Pada Elektroda Piring-piring.....	51
Gambar 4. 15	Pergerakan Jerami Dalam Minyak Transformator Dengan Tegangan Sumber 20kV Pada Medan Non Homogen	52
Gambar 4. 16	Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 5mm	53
Gambar 4. 17	Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Elektroda Non Homogen .	55

**DAFTAR LAMPIRAN**

No	Judul	Halaman
Lampiran 1a	Data Tegangan Tembus Minyak Murni.....	62
Lampiran 1b	Data Tegangan Tembus Minyak Shell Diala B dengan Pengotor..... Serbuk Jerami dan dengan Penyaringan	63
Lampiran 2	Data Pengujian Arus Bocor.....	65
Lampiran 3	Foto Pengujian.....	73



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isolasi memiliki peranan penting pada sistem tenaga listrik. Isolasi melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan seperti lompatan listrik atau percikan, dan memisahkan bagian –bagian yang bertegangan dengan yang tidak salah satunya adalah minyak isolasi pada transformator. Fungsi minyak isolasi selain sebagai isolasi juga berfungsi sebagai pendingin bagi peralatan. Bahan - bahan isolasi cair seperti minyak transformator yang akan digunakan harus mempunyai tingkat tegangan tembus yang tinggi yang dapat menunjang ketahanan isolasinya.

Minyak transformator merupakan suatu material isolator cair yang banyak dipakai sebagai isolator pada transformator, sekaligus sebagai pendinginnya. Sebagai isolator cair yang dipakai pada transformator, minyak transformator tentu saja memiliki beberapa sifat untuk memenuhi kriteria sebagai isolator. Beberapa sifat minyak transformator sebagai media isolasi pada trafo adalah mempunyai tegangan tembus yang tinggi ($>10\text{kV/mm}$), berat jenisnya kecil sehingga partikel-partikel yang ada didalam minyak akan mengendap dengan cepat (tidak bercampur), dan tidak gampang menguap sehingga tidak membahayakan. Seiring waktu pemakaian minyak transformator sebagai isolasi, minyak transformator akan mengalami degradasi karena adanya kontaminan yang akan menurunkan kekuatan dielektriknya.

Ketidakmurnian yang menyebabkan menurunnya sifat-sifat dan kekuatan dielektrik minyak transformator setelah digunakan beberapa lama antara lain adalah kandungan air, gas-gas, partikel serat, dan partikel logam seperti Cu, Fe, Al (Lu & Liu, 2015, Jurnal IEEE). Salah satu partikel yang menyebabkan ketidakmurnian pada minyak transformator adalah serat selulosa.

Serat selulosa banyak di temukan akibat dari isolasi kertas yang melindungi belitan pada transformator. Partikel serat selulosa yang ada dalam isolator cair ini akan membuat kekuatan isolasi minyak menurun dan menyebabkan tembus. Studi mengatakan bahwa 30% dari kegagalan transformator disebabkan oleh kegagalan isolasi yang disebabkan oleh kontaminasi sehingga perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui proses dari kegagalan isolasi pada isolasi transformator (Mahmud & Golosnoy, 2012, Jurnal IEEE). Untuk menjaga supaya minyak isolasi tidak cepat rusak, maka perlu dilakukan pembersihan untuk menjaga kekuatan minyak isolasi. Pembersihan minyak transformator dari serat selulosa akan berpengaruh terhadap kekuatan tembus minyak transformator tersebut (J.A. KOK, 1961).

Meskipun diyakini bahwa bercampurnya serat selulosa pada minyak transformator akan menyebabkan turunnya kualitas dan sifat listrik dari bahan isolasi, studi tentang pengaruh serat selulosa terhadap tegangan tembus minyak transformator dan fenomena yang disebabkan serat selulosa masih jarang dilakukan.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang yang telah diuraikan pada sub bab 1.1, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi medan listrik, permitivitas relatif, dan konduktivitas dari minyak Shell Diala B.
2. Bagaimana pengaruh kontaminan serbuk jerami terhadap arus bocor AC pada minyak transformator Shell Diala B dalam medan listrik homogen dan non homogen.
3. Bagaimana pengaruh kontaminan serbuk jerami terhadap tegangan tembus AC pada minyak transformator.
4. Bagaimana fenomena pergerakan minyak partikel jerami dalam minyak transformator Shell Diala B dengan medan listrik homogen dan non homogen.

1.3 Batasan Masalah

Agar proses penyelesaian penelitian ini lebih terarah, maka diberikan beberapa batasan masalah yaitu:

1. Minyak transformator merk Shell Diala B dengan pengotor serat selulosa adalah objek dalam penelitian ini.



2. Pengotor minyak transformator yang digunakan dalam penelitian ini adalah potongan-potongan jerami yang mewakili pengotor serat selulosa.
3. Pengaruh adanya gas terlarut dan partikel yang diabaikan karena minyak yang digunakan merupakan minyak baru.
4. Ukuran kontaminan dan pori-pori kain saring tidak diukur dalam pengujian ini.
5. Transformator yang digunakan untuk pengujian adalah transformator uji dengan tegangan 100kV.
6. Konduktivitas ditentukan melalui pengujian menggunakan tegangan tinggi DC, dan konstanta dielektriknya ditentukan dengan pengujian tegangan AC.
7. Elektroda yang digunakan pada pengujian ini adalah elektroda jarum-piring (medan sangat tidak homogen) dan elektroda piring-piring (medan homogen).
8. Penelitian ini tidak membahas tentang proteksi pada transformator.
9. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mengamati perilaku dinamik kontaminan serbuk jerami di dalam minyak transformator serta pengujian dan analisis untuk menyelidiki tingkat arus bocor, tegangan tembus, dan intensitas medan listrik dalam medan listrik homogen (elektroda piring-piring) dan tidak homogen (elektroda jarum-piring).

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui proses terjadinya tegangan tembus minyak transformator jika di beri kontaminan selulosa.
2. Mengetahui fenomena pergerakan partikel padat pada minyak transformator

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang akan dilaksanakan dalam penelitian ini dapat disusun sebagai berikut:

BABI Berisikan tentang pendahuluan yang menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat serta sistematika penulisan dari skripsi ini

BAB II Berisikan tentang Tinjauan Pustaka yang mengarahkan tentang kegunaan minyak isolasi, sifat-sifat minyak isolasi, mekanisme dan faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan isolasi.

BAB III Berisikan tentang Metode Penelitian yang menjelaskan tentang bahan yang dipakai dalam pengujian, dan metodologi dari pengujian tegangan tembus, arus bocor, arus konduksi, serta pengamatan pergerakan.

BAB IV Berisikan Data dan Analisis dari hasil penelitian serta pembahasan hasil penelitian berdasarkan parameter yang dibahas yaitu jarak sela elektroda, homogenitas medan, serta banyaknya kontaminan pada minyak transformator.

BAB V Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisis dalam skripsi ini.





BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai tinjauan pustaka pada penelitian ini adalah berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Mahmud dan Golosnoy (2012) yang meneliti fenomena yang terjadi pada minyak transformator yang terkontaminasi. Pengotor yang digunakan adalah serat selulosa dengan kesimpulan bahwa partikel serat selulosa berdiam pada titik dimana medan listrik tertinggi terjadi setelah diterapkan tegangan. Dilanjutkan dengan penelitian Mahmud dan Golosnoy (2014) yang menguji minyak transformator yang terkontaminasi pada medan listrik yang tidak seragam dan seragam dengan menggunakan tegangan tinggi AC dan DC. Hasil akhir dari penelitian tersebut adalah pada elektroda jarum-plat medan tertinggi terjadi pada ujung elektroda jarum dan dibagian plat medan listrik yang terjadi sangat kecil. Semakin menjauhi ujung elektroda jarum, medan listrik juga semakin kecil.

Pada jurnal yang ditulis oleh Lu dan Liu (2015) yang membahas efek dari serat selulosa pada fenomena tegangan tembus dalam minyak ester sintetis dan minyak mineral dengan medan listrik homogen dan non homogen menyimpulkan bahwa dengan adanya kontaminan sel selulosa pada minyak ester dan minyak mineral, tegangan tembus yang diuji menggunakan elektroda piring-piring pada kedua jenis minyak tersebut akan menurun. Tegangan tembus akan menurun seiring bertambahnya level kontaminan serat selulosa pada minyak.

2.2 Minyak Isolasi

Pada transformator daya tegangan tinggi, minyak transformator berfungsi sebagai pendingin (penyerap panas) dan juga sebagai material isolasi transformator. Pertimbangan memilih minyak untuk menjadi bahan isolasi pada transformator didasarkan pada tingkat kerapatan yang dimiliki minyak lebih tinggi daripada gas sehingga dengan volume yang sama mempunyai tingkat isolasi yang lebih tinggi, juga kemampuan minyak yang dapat meliputi seluruh bagian obyek yang diisolasi yang mana tidak dimiliki oleh material isolasi padat. Dielektrik cair dan padat biasanya 10000 kali lebih padat dari gas, karenanya dari Hukum Paschen kedua dielektrik tersebut mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (lebih

dari 10^7V/cm). Material minyak mempunyai efisiensi 10 kali lebih baik dari udara atau nitrogen dalam kemampuan transfer panas jika digunakan dalam transformator (Naidu & Kamaraju, 1995). Karakteristik dielektrik cair yang sering digunakan dalam isolasi transformator pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1
Karakteristik Dielektrik Cair Dalam transformator

<i>Property</i>	<i>Transformers Oil</i>
<i>Breakdown strength at 20° on 2.5mm standar sphere gap</i>	15kV/mm
<i>Relative Permittivity (50Hz)</i>	2.2-2.3
<i>Tan δ (50 Hz)</i>	0.001
<i>Resistivity (ohm-cm)</i>	10^{12} - 10^{13}
<i>Specific Gravity at 20°C</i>	0.89
<i>Viscosity at 20°C</i>	30
<i>Acid Value (mg/gm of KOH)</i>	Nil
<i>Refractive Index</i>	1.4820
<i>Saponification (mg of KOH/gm)</i>	0.01
<i>Expansion (20-100°C)</i>	$7 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$
<i>Maximum permissible water content (in ppm)</i>	50

Sumber: Naidu Kamaraju (1995, p.107)

Minyak isolasi adalah material yang hampir tidak berwarna dan campurannya terdiri dari hidrokarbon yang didalamnya terdapat parafin, iso-parafin, naftalin, dan aromatik. Dielektrik cair ini biasanya digunakan sebagai minyak isolasi pada transformator. Petroleum oil (minyak transformers) adalah liquid dielektrik yang paling sering digunakan. Selain itu, *synthetic hydrocarbons* and *halogenated hydrocarbons* juga banyak digunakan pada beberapa aplikasi tertentu. Untuk operasi pada temperatur yang sangat tinggi, biasanya digunakan minyak silikon dan *fluorinated hydrocarbons*. Pada masa sekarang, banyak sekali alternatif minyak seperti beberapa jenis minyak sayur dan minyak ester juga mulai di pakai untuk menjadi minyak isolasi. Di pasaran minyak isolasi beredar dengan berbagai merk dan jenis yang disesuaikan dengan tingkat kemampuan isolasinya, diantaranya beredar merk *Shell Diala-Ax, Shell Diala-B, Shell Diala-Bx, Shell Diala-Dx, Mesran Pertamina, Esso oil.*

2.3 Sifat Listrik Minyak Transformator

Minyak transformator sebagai material isolasi mempunyai beberapa sifat yaitu kimia, fisika dan sifat listrik. Yang dimaksud dengan sifat kimia minyak isolasi adalah angka kenetralan, kestabilan oksidasi minyak dan kandungan air. Sifat fisika minyak isolasi adalah daya hantar panas (konduktivitas thermal), koefisien muai volume, massa jenis, daya melarutkan zat-zat lain, viskositas, daya hantar, dan tegangan permukaan. Sedangkan sifat listrik yang dimiliki oleh bahan isolasi minyak yaitu:

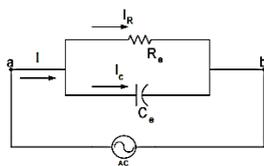
a. Permittivitas

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

$$\epsilon_r = \frac{C.s}{\epsilon_0 A} \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan C adalah kapasitansi dari bahan dielektrik (F), ϵ_r adalah permitivitas bahan dielektrik(F/m), s adalah jarak antar sela ke kapasitor (m), A adalah luas permukaan keping kapasitor (m²) dan ϵ_0 adalah permitivitas vakum atau konstanta listrik (8,85x10⁻¹² F/m).

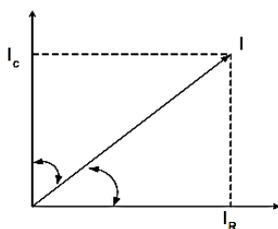
Komponen arus pada dielektrik digambarkan pada Gambar 2.1 (Tobing, 2012, p.50)



Gambar 2. 1 Rangkaian Ekuivalen Dielektrik

Sumber: Tobing L (2012, p.50)

Sehingga arus total yang mengalir (I) digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Komponen Arus Pada Dielektrik

Sumber: Tobing L (2012, p.50)

Gambar 2.2 menunjukkan komponen arus pada dielektrik. Dari gambar tersebut dapat dibuat persamaan yaitu:

$$I = \sqrt{i_R^2 - i_C^2} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$i_C = \sqrt{I^2 - i_R^2} \dots\dots\dots(2-3)$$

Kapasitansi untuk menghitung permitivitas relatif dari dielektrik dapat dihitung dengan persamaan

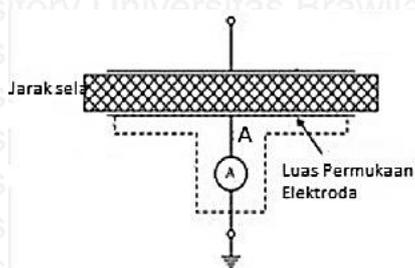
$$\frac{1}{2\pi fC} = \frac{Uac}{i_c} \dots\dots\dots(2-4)$$

Permitivitas dari sebagian besar minyak petroleum bervariasi dari 2.0-2.6. Pada cairan non-polar seperti air, permitivitas berubah sejalan dengan frekuensi. Contohnya, permitivitas dari air adalah 78 pada frekuensi 50Hz dan berkurang menjadi 5.0 pada frekuensi 1MHz.

b. Resistivitas

Bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang mempunyai resistivitas tak terhingga. Tetapi pada kenyataannya sampai sekarang bahan isolasi dengan resistivitas tak terhingga belum bisa diperoleh. Sampai saat ini, isolasi listrik masih mengalirkan arus listrik (walaupun kecil) yang lazim disebut dengan arus bocor.

Besarnya resistivitas bahan isolasi sesuai dengan persamaan 2.5 (Muhaimin, 1999, p.3) :



Gambar 2. 3 Ilustrasi Pengukuran Resistivitas

Sumber: Kind (1993, p.67)

Gambar 2.3 adalah gambar ilustrasi pengukuran resistivitas untuk persamaan (2-5) berikut:

$$\rho = \frac{R.A}{s} \dots\dots\dots(2-5)$$

$$R = \frac{V}{I_k} \dots\dots\dots(2-6)$$

Keterangan:

- ρ : Resistivitas Minyak isolasi (ohm)
 R : Resistansi isolasi (ohm)
 V : tegangan sumber yang diberikan (V)
 A : luas permukaan elektroda (m^2)
 s : jarak sela elektroda (m)
 I_k : arus konduksi (ampere)

Resistivitas dari material isolasi cair untuk aplikasi tegangan tinggi harus lebih dari 10^{16} ohm-m dan sebgain besar dari material isolasi cair murni (tanpa kontaminan) mempunyai sifat ini.

c. Tegangan Tembus

Yang dimaksud dengan tegangan tembus adalah tegangan dimana tembus listrik terjadi diantara dua buah elektroda yang terpisah dengan jarak sebesar 2.5 mm pada laju kenaikan tegangan standar IEC sesuai dengan standar pengujian PLN no. 49 tahun 1982 yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2

Tabel Spesifikasi Standar PLN no. 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			≥ 30	IEC 296
	a. Sebelum diolah	kV/2.5mm			
	b. Sesudah diolah		≥ 50		
9	Faktor kebocoran elektrik	-	≤ 0,05		IEC 250
10	Ketahanan oksidasi			≤ 0,40	IEC 474 & IEC 74
	a. Angka kenetralan	Mg KOH/gr			
	b. Kotoran	%		≤ 0,10	

Sumber: SPLN 49-1 (1982)

2.4 Minyak Transformator Shell Diala B

Minyak transformator Shell Diala B merupakan salah satu minyak yang banyak dipakai pada transformator selain beberapa merk yang sudah dijelaskan pada 2.1. Shell Diala B merupakan minyak yang diproduksi dengan bahan baku *Naphtenic*. Shell Diala B telah memenuhi sertifikasi Litbang PLN dan dapat dicampur dengan minyak transformator jenis lainnya. Beberapa keuntungan menggunakan Shell Diala B antara lain:

- Kemampuan Menyerap Gas baik
- Sudah lulus standar IEC 60296
- Sifat Dielektrik baik dan stabilitas oksidasi yang baik
- Konduktivitas baik
- Suhu rendah yang sangat baik tanpa menggunakan titik depresan
- Tidak mengandung bahan beracun PCB (*Poly Chloronated Byphenils*)

Lebih jelasnya, data spesifikasi dari minyak Shell Diala B dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Technical Data Sheet

Typical Characteristics

Property	Units	Method	IEC 60296 Requirement	Diala B
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment and suspended matters	Complies
Density at 20 °C	kg/m ³	ISO 3675	Max. 895	881
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	ISO 3104	Max. 12	10
Kinematic viscosity at -30 °C	mm ² /s	ISO 3104	Max. 1.800	1.400
Flashpoint P.M.	°C	ISO 2719 / ASTM D93	Min. 135	140
Pourpoint	°C	ISO 3016	Max. -40	-57
Neutralisation value	mg KOH/g	IEC 62021-1	Max. 0,01	< 0,01
Corrosive Sulphur		DIN 51353	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		IEC 62535	-	Not corrosive
Corrosive Sulphur		ASTM D 1275 B	-	Not corrosive
Breakdown voltage	kV	IEC 60156		
Untreated			Min. 30	>30
After treatment			Min. 70	>70
Dielectric Dissipation Factor (DDF) at 90 °C		IEC 60247	Max. 0,005	0,002
Oxidation Stability (164 h / 120 °C)		IEC 61125 C		
Total acidity	mg KOH/g		Max. 1,2	0,9
Sludge	%m		Max. 0,8	0,3
DDF at 90°C		IEC 60247	Max. 0,5	0,1

These characteristics are typical of current production.
Whilst future production will conform to Shell's specification, variations in these characteristics may occur.

Gambar 2. 4 Spesifikasi Minyak Shell Diala B
Sumber: Shell (2016)

2.5 Mekanisme Kegagalan Zat Cair

Kegagalan pada zat cair kebanyakan terjadi karena ketidakmurnian minyak isolasi yang menyebabkan kekuatan menahan tegangan tembus dari minyak isolasi berkurang.

Teori kegagalan dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu sebagai berikut (Arismunandar, 1982, p.70):

- a. Teori kegagalan zat murni atau elektronik, yang merupakan perluasan teori kegagalan dalam gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam zat cair dianggap serupa dengan yang terjadi dalam gas.
- b. Teori kegagalan gelembung udara atau kavitasi dimana tak murnian itu mempunyai tegangan gagal yang lebih rendah dari zat cair.
- c. Teori kegagalan bola cair, dimana tak murnian yang tidak stabil dalam medan listrik dapat merupakan jembatan bertahanan rendah diantara elektroda dan dapat mengakibatkan kegagalan.
- d. Teori kegagalan tak murnian padat, dimana tak murnian (misalnya selulosa) dapat menyebabkan pembesaran medan listrik setempat; bila medan dalam zat cair melebihi nilai kritis tertentu maka di tempat itu zat cair akan gagal dan hal ini dapat mengakibatkan kegagalan total.

2.5.1 Kegagalan Butiran Padat Pada Zat Cair

Kegagalan butiran padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran (partikel) zat di dalam isolasi cair yang akan memulai terjadinya kegagalan. Butiran padat, seperti butiran lainnya biasanya mempunyai permitivitas berlainan dengan permitivitas zat isolasi cair. Jika butiran-butiran itu mempunyai permitivitas ϵ_2 sedangkan permitivitas zat isolasi cair adalah ϵ_1 maka besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan yang tak seragam adalah:

$$F = r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \text{ grad } E \dots\dots\dots (2-7)$$

dimana

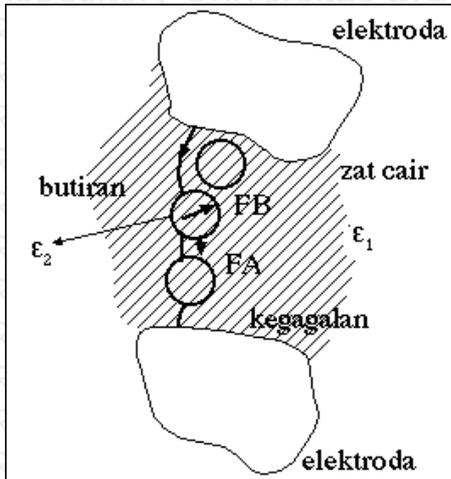
- r : jari-jari butiran
- E : gradien tegangan

Secara khusus, persamaan (2-7) dapat ditulis sebagai:

$$F = \frac{1}{2} r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \text{ grad } E^2 \dots\dots\dots (2-8)$$

Untuk persamaan (2-8), terdapat 2 kemungkinan yang terjadi yaitu:

- Jika $\epsilon_2 > \epsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik (stress) maksimum (F_A), sehingga gaya akan mendorong butiran ke arah bagian yang terkuat dari medan;
- Jika $\epsilon_2 < \epsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B).



Gambar 2. 5 Permittivitas Partikel Padat Dalam Zat Cair

Sumber: Arismunandar (1983, p.81)

Pada Gambar 2.5 mengilustrasikan sepasang elektroda di dalam isolasi cair dan butiran yang ada di dalamnya. Permittivitas butiran dimisalkan sebagai ϵ_2 dan permittivitas zat cair dimisalkan sebagai ϵ_1 . Saat dikenakan tegangan, butiran akan bergerak karena adanya perbedaan permittivitas zat cair dan butiran. Bila ϵ_1 lebih kecil dari ϵ_2 maka yang terjadi adalah gaya F_A yaitu butiran akan terdorong ke arah stress medan maksimum terjadi. Sebaliknya, jika ϵ_2 lebih kecil dari ϵ_1 maka yang terjadi adalah gaya F_B yaitu butiran bergerak menjauhi stress maksimum.

Gaya F makin besar bila ϵ_2 membesar. Untuk butiran penghantar:

$$\epsilon_2 \rightarrow \infty \text{ dan } \epsilon_1 \text{ bernilai } 1$$

Sehingga persamaan (2-8) menjadi

$$F \sim \frac{1}{2} r^3 \text{ grad } E \dots \dots \dots (2-9)$$

Dalam medan yang tidak seagam contohnya jarum-piring, butiran akan tertarik ke ujung jarum dimana tekanan listrik (stress) besar. Akibatnya butiran-butiran akan berjajar di antara kedua elektroda dan seolah-olah membentuk “jembatan” yang akhirnya mengawali terjadinya kegagalan.

Adanya butiran penghantar diantar elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam zat isolasi cair di dekat permukaan butiran. Pembesaran medan ini ditentukan oleh bentuk butiran, yaitu:

- Untuk butiran bulat ($\gamma = 1$) : $E_1 = 3E$
- Untuk butiran sferoida ($\gamma = 2$) : $E_1 = 5.8E$
- Untuk butiran sferoida ($\gamma = 5$) : $E_1 = 18E$

Dimana :

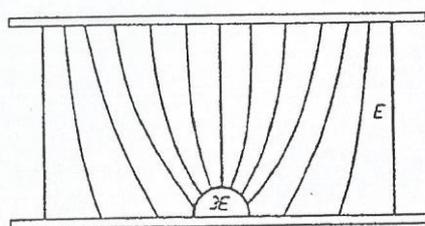
γ : perbandingan jari-jari panjang terhadap jari-jari pendek sferoida

E : medan dalam cairan tanpa butiran

E_1 : medan dalam cairan ujung butiran

Apabila E_1 melebihi tegangan gagal cairan maka akan terjadi kegagalan setempat yang kemudian menimbulkan gelembung yang akhirnya dapat mengakibatkan kegagalan total pada cairan. Gerakan butiran oleh gaya F dihambat oleh kekentalan cairan dan oleh gamburan (*diffusion*) (Arismunandar, 1982, p.88)

Kertas-kertas isolasi disekeliling belitan transformator menjadi sumber penyebab hadirnya partikel padat (serat selulosa) dalam minyak transformator. Selain ini kertas penyaring yang digunakan sebagai penyerap kelembaban atau air dari minyak isolasi seringkali menjadi sumber munculnya serat selulosa yang mempunyai permitivitas yang tinggi. Pembebasan serat selulosa pada minyak transformator dengan filter yang baik dapat menyebabkan kenaikan tegangan tembusnya (J.A.KOK, 1961, p.27). Dalam semua keadaan dalam prakteknya kita menemui dua faktor yang secara bersama-sama menyebabkan terjadinya tembus. Kedua faktor ini adalah faktor pengotor dengan permitivitas tinggi yang sudah dibahas diatas, dan juga ketidakseragaman medan. Puncak suatu gundukan pengotor (dengan permitivitas tinggi) yang bentuknya setengah bola (hemispherical) pada salah satu elektroda mempunyai nilai tekanan listrik tiga kali dari nilai rata-ratanya, sebagai mana dapat di lihat pada Gambar 2.6 (J.A.KOK, 1961, p.39)



Gambar 2. 6 Elektroda Setengah Bola Dengan Nilai Tekanan Listrik Tiga Kali dari Rata-rata

Sumber: J.A.KOK (1961)

2.5.2 Faktor Efisiensi Medan Listrik

Pengujian tegangan tinggi pada berbagai konfigurasi susunan elektroda tertentu dengan bentuk geometris tertentu akan menghasilkan karakteristik tegangan tembus yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan distribusi medan listrik akan berbeda pada setiap susunan elektroda yang berbeda-beda. Misalnya pada susunan elektroda batang-piring. Besar faktor efisiensi medan listrik (η) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan pada persamaan (2.10):

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \dots \dots \dots (2-10)$$

Atau dapat juga ditulis,

$$E_{rata-rata} = \eta \cdot E_{maksimum} \dots \dots \dots (2-11)$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s} \dots \dots \dots (2-12)$$

Dimana:

- η : efisiensi medan listrik pada susunan elektroda
- $E_{rata-rata}$: kuat medan listrik rata-rata (kV/cm)
- $E_{maksimum}$: kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm)
- U_d : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)
- S : jarak sela antar elektroda (cm)

Pada susunan plat elektroda keping sejajar (misalnya: bola-bola) distribusi medannya homogen sehingga besar $E_{maksimum} = E_{rata-rata}$. Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu yang nilainya lebih besar dari pada kuat medan listrik di daerah lainnya. Batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk tertentu syaratnya adalah efisiensi medan listrik kurang dari sama dengan 1 ($\eta \leq 1$)

Pada elektroda dengan distribusi medan listrik homogen, misalnya susunan pelat sejajar, maka faktor efisiensi medan listriknya sama dengan 1 ($\eta=1$) sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan medan listrik non homogen, misalnya jarum-piring, maka nilai efisiensi medan listriknya kurang dari 1 ($\eta < 1$)

2.6 Fenomena Jembatan (*Bridging*) Pada Minyak Transformator

Transformator daya adalah kunci dari semua komponen tegangan tinggi dan sistem distribusi dan operasi tersebut membutuhkan tingkat energi yang tinggi. Namun, semakin lama transformer di gunakan, maka probabilitas kegagalan transformator juga semakin besar. Analisis telah membuktikan bahwa 30% dari total kegagalan transformator

disebabkan oleh kegagalan isolasi atau kontaminasi pada minyak transformator. Maka dari itu, sangat perlu untuk mengerti mekanisme kegagalan atau proses pengamatan yang di butuhkan untuk mencegah kegagalan dan meminimalisir besarnya kerugian karena kerusakan transformator.

Penelitian yang dilakukan oleh Mahmud dan Golosnoy (2012) mengatakan bahwa pada transformator dengan isolasi cair atau minyak transformator, salah satu kerugian dari pemakaian isolasi cair adalah isolasi cair sangat gampang terkontaminasi. Minyak transformator ini juga terkena kontak langsung dari metal, inti besi dan isolasi kertas yang ada dalam transformator dan akan menghasilkan kontaminan berupa serat selulosa atau partikel metal. Kontaminan ini akan bergerak kearah medan tinggi karena gaya dielektroforesis karena medan tidak seragam yang ada pada transformer saat operasi normal. Kontaminan yang memiliki permitivitas berbeda dengan media dielektrik, akan terpolarisasi. Partikel akan diinduksi oleh dipole besarnya sama dengan E. Gaya F pada dipole yang berada dalam medan tidak seragam adalah grad E dan menjadi E^2 pada dipole yang terinduksi. Partikel kontaminan yang bergerak ini dapat membentuk sebuah jembatan (*bridge*) jika dibiarkan pada rentang waktu tertentu, jembatan ini akan menjadi jalur konduktif diantara dua potensial dalam minyak transformer dan akan menyebabkan kegagalan. (J.A.KOK, 1961, p.40). Berdasarkan teori elektrostatis bahwa partikel asing yang mempunyai permitivitas yang tinggi pada sebuah dielektrik yang mempunyai diameter 50\AA hingga 100\AA cenderung bergerak menuju tempat yang mempunyai stress maksimum dari kuat medan listrik. Maka dari itu, semakin besar partikel, maka semakin membuat penurunan tegangan tembus. Tabel 2.3 menunjukkan hubungan diameter dengan kekuatan tegangan tembus dielektrik cair.

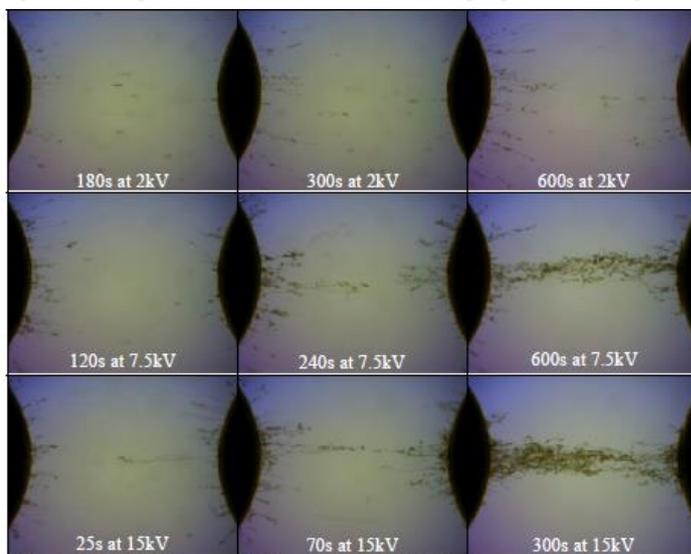
Tabel 2. 3
Hubungan Antara Diameter Partikel dengan Kekuatan Tegangan Tembus

Diameter partikel dalam \AA	Kekuatan Tegangan tembus dalam kV/mm
15	160
25	70
50	25
60	20
75	15
100	9
300	1.9
500	0.9

Sumber: J.A.KOK (1961)

Tegangan tembus bernilai diantara 9kV/mm dan 20kV/mm adalah tegangan tembus rata-rata untuk minyak isolasi yang sudah di filtrasi dari kontaminan pada umumnya.

Pembentukan jembatan partikel padat pada minyak isolasi akan menyebabkan terjadinya tembus pada minyak isolasi transformator. Hal ini diperburuk jika kondisi kontaminan (serat selulosa) bersifat lembab (basah). Partikel selulosa yang basah akan mempunyai permitivitas yang lebih besar daripada partikel selulosa yang kering. Partikel selulosa basah ini sangat berbahaya karena dapat menurunkan tegangan tembus lebih besar daripada partikel selulosa kering. Gambar 2.7 menunjukkan fenomena jembatan (*bridge*) pada minyak transformator.



Gambar 2. 7 Fenomena Bridging pada Minyak Transformator

Sumber: Mahmud dan Golosnoy (2012)

Gambar 2.7 adalah hasil penelitian dari jurnal Mahmud dan Golosnoy (2012). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa partikel selulosa yang berasal dari serat kayu sebesar 150-250 μm mulai bergerak ketika diberikan tegangan DC 2kV namun belum membentuk jembatan yang utuh karena gaya dielektroforesis yang terjadi tidak terlalu besar. Partikel serat tersebut mulai bergerak membentuk jembatan ketika dikenakan tegangan DC 7.5 kV pada waktu 240 detik dan membentuk jembatan saat waktu 600s. Ketika dikenakan tegangan sebesar 15 kV ternyata partikel lebih cepat bergerak pada saat 25s dan membentuk jembatan pada 300s. Pengujian dilakukan dengan menggunakan elektroda bola-bola.

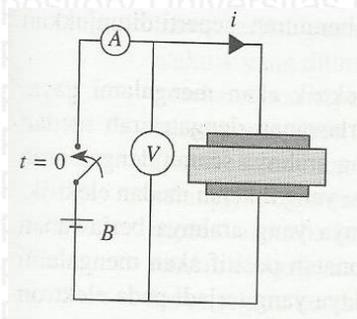
Pada pengujian dipenulisan ini, percobaan akan dilakukan menggunakan elektroda piring-piring dan jarum-piring dengan jarak sela 15mm. Kontaminan yang digunakan adalah serbuk jerami yang berukuran panjang 5mm.



2.7 Pengukuran Arus Konduksi Tegangan Searah

Gambar 2.8 menunjukkan sebuah 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. 8 Pengujian Arus Konduksi pada Susunan Plat Sejajar
 Sumber: Kind (1993, p. 143)

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, p.144)

$$S_1 = q_1 n_1 v_1 \dots\dots\dots (2-13)$$

Keterangan :

- S_1 : kerapatan arus
- n_1 : kerapatan ion
- v_1 : kecepatan ion

Dengan v_i adalah kecepatan, 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, p.145)

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{s}{A} \dots\dots\dots (2-14)$$

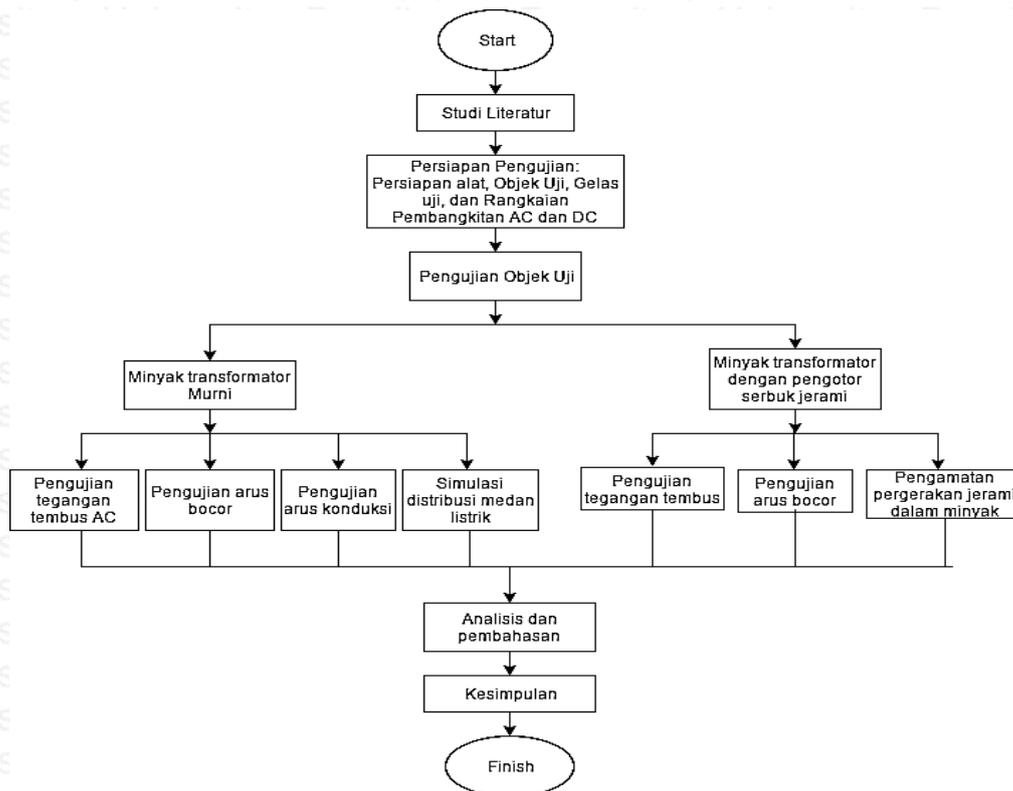
Arus yang terukur umumnya berkisar beberapa pikoampere. Untuk itu bisa digunakan galvanometer kumparan putar ataupun pengukur dengan penguat elektronik yang jauh lebih peka.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Pengujian tegangan tembus minyak transformator Shell Diala B yang telah dikotori oleh serat selulosa bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan tembusnya pada distribusi medan listrik yang homogen dan juga untuk mengetahui karakteristik tegangan tembus minyak transformator Shell Diala B yang murni. Literatur yang dipelajari, diperlukan untuk mendukung penelitian ini untuk mengetahui sifat-sifat dari minyak isolasi, mekanisme dan faktor-faktor yang mempengaruhi terhadapnya kegagalan pada minyak isolasi, pengotor pada isolasi, faktor efisiensi medan listrik serta literatur lainnya. Diagram alir pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

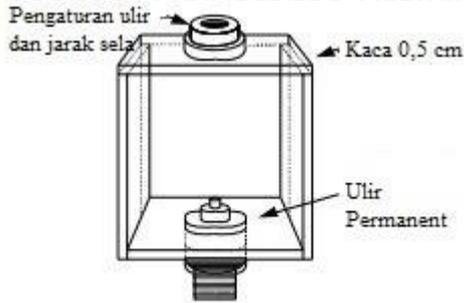


Gambar 3. 1 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

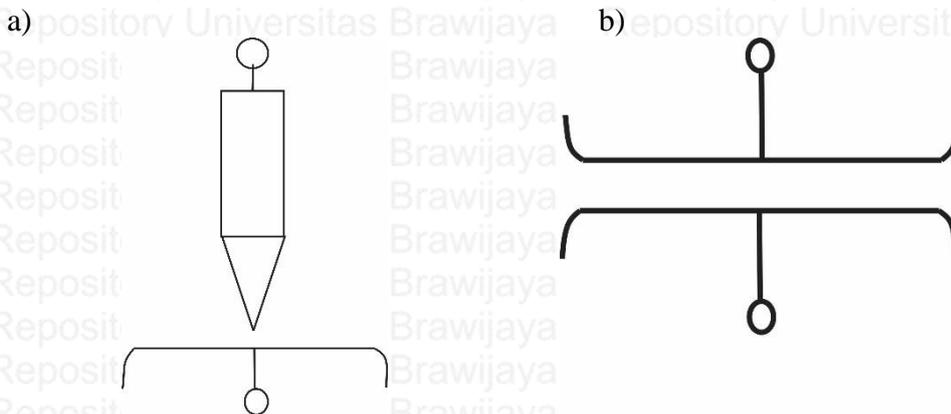
3.2 Objek Uji

Dalam penelitian ini, minyak dengan susunan elektroda adalah objek yang akan diuji. Minyak yang akan dipergunakan dalam penelitian kali ini adalah merk Shell Diala B dengan

nomor seri S2ZU-I yang dijual di pasaran. Minyak Shell Diala B diletakkan dalam tabung yang berfungsi sebagai wadah objek uji. Wadah tersebut terbuat dari mika atau kaca yang akan digunakan dalam percobaan seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Wadah ini akan digunakan dalam pengujian arus bocor dan pergerakan partikel jerami pada minyak transformator.



Gambar 3. 2 Wadah Uji Minyak Transformator



Gambar 3. 3 Susunan Elektroda

- Gambar elektroda jarum piring dengan sudut kelancipan 45°
- Gambar Elektroda Piring-piring dengan diameter 6 cm

Elektroda yang digunakan adalah jarum-piring dengan sudut kelancipan jarum 45° dengan diameter jarum 2 cm dan piring-piring dengan diameter piring 6 cm. Pemilihan sudut kelancipan jarum disesuaikan dengan elektroda jarum yang ada pada laboratorium. Gambar 3.3 (a) memperlihatkan susunan elektroda jarum-piring dan piring-piring yang digunakan.

Dalam pengujian ini juga digunakan wadah uji (chamber) standar dengan elektroda standar sesuai VDE 370 seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Wadah Uji dengan Elektroda standar VDE 370

Chamber dengan elektroda standar akan digunakan untuk mengetahui tegangan tembus dari minyak Shell Diala B dan chamber kaca seperti pada Gambar 3.2 akan digunakan untuk mengetahui berapa besar arus bocor dan pergerakan partikel jerami.

3.3 Persiapan Alat

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

- | | |
|-------------------------------|---|
| a. Minyak Shell Diala B | : Objek Uji |
| b. HV transformer (trafo Uji) | : 220V/100kV, 5kVA, 50Hz untuk membangkitkan tegangan tinggi. |
| c. Serbuk Jerami | : Pengotor yang digunakan sebagai representasi pengotor serat selulosa pada minyak transformator. |
| d. C_M | : Pembagi kapasitif 100pF untuk AC dan 10.000 pF untuk DC |
| e. Chamber | : Kotak/wadah uji |
| f. Chamber standar | : Wadah uji standar dengan elektroda VDE 370 |
| g. R_M | : 280M ohm sebagai pengaman control desk |
| h. JM (jarum-piring) | : Susunan elektroda jarum-piring |
| i. PP (piring-piring) | : Susunan elektroda piring-piring |
| j. DSM | : Alat ukur tegangan tinggi AC |
| k. DGM | : Alat ukur tegangan tinggi DC |
| l. Gelas Ukur | : Untuk mengetahui volume minyak isolasi |
| m. Amperemeter | : Alat ukur arus konduktansi. |
| n. Timbangan | : Alat untuk mengetahui berat serbuk selulosa |

- o. *Heater* : Untuk memanaskan minyak sebelum digunakan
- p. Kain saring : Untuk menyaring serbuk jerami.

3.4 Pengujian Objek Uji

Dalam pengujian yang dilaksanakan di skripsi ini, minyak transformator jenis Shell DIALA B akan diuji menggunakan beberapa susunan elektroda yang akan dimasukkan ke dalam tabung uji (chamber) yang sudah disediakan. Pengujian akan dilaksanakan dalam 3(tiga) kondisi yaitu:

- a. Minyak dalam kondisi murni
- b. Minyak dalam kondisi sudah terkontaminasi jerami
- c. Minyak dalam kondisi sudah disaring.

Minyak akan dituangkan ke dalam chamber dengan sangat perlahan-lahan untuk menghindari adanya gelembung gas yang akan mempengaruhi data keluaran. Pada saat dilakukannya pemurnian, minyak yang sudah terkontaminasi jerami akan disaring menggunakan kain saring dan dilakukan penyaringan sebanyak 3 (tiga) kali untuk mendapatkan keluaran minyak yang bersih. Sebelum dilakukan pengujian, peneliti mempersiapkan persiapan pengujian sebagai berikut:

3.4.1 Persiapan Objek Uji

Berikut adalah objek uji yang akan digunakan dalam penelitian sebagaimana yang sudah di jelaskan pada poin 3.4 yaitu:

a. Minyak transformator Shell DIALA B tanpa pengotor serbuk jerami

Kondisi objek uji pada keadaan minyak transformator masih murni belum dikontaminasi oleh serbuk jerami. Minyak transformator dalam keadaan murni akan diuji tegangan tembus setelah dipanaskan terlebih dahulu dan sebelum pemanasan. Hasil yang lebih baik akan digunakan untuk referensi pengujian selanjutnya.

b. Minyak transformator Shell DIALA B dengan pengotor serbuk jerami

Serbuk jerami digunakan sebagai perwakilan dari pengotor serat selulosa yang ada dalam minyak transformator. Kondisi objek uji pada keadaan ini diberikan pengotor serbuk jerami yang sudah ditumbuk dengan takaran pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1
Takaran Serbuk Jerami dalam Minyak Transformator

No	Volume Minyak (ml)	Kontaminan	
		Persen (%)	(mg)
1	30	3%	9
		5%	15
		7.50%	22.5
2	1000	3%	30
		5%	50
		7.50%	75

Untuk pengujian tegangan tembus dengan chamber standar akan digunakan volume minyak 30ml dengan 3(tiga) level kontaminan. Dan untuk pengujian arus bocor dengan volume minyak 1000ml.

c. Kondisi minyak transformator yang sudah dimurnikan menggunakan kain saring

Pada kondisi ini, minyak transformator akan dimurnikan terlebih dahulu untuk melihat pengaruh pemurnian yang dilakukan terhadap kenaikan tegangan tembus minyak transformator yang sudah terkontaminasi. Pemurnian dilakukan dengan menuangkan minyak kedalam wadah yang sudah ditutup oleh kain saring sehingga serbuk jerami yang terkandung dalam minyak dapat terpisah. Pemurnian menggunakan kain saring akan dilakukan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal dan minyak yang lebih murni.

3.4.2 Persiapan Gelas Uji

Gelas uji yang akan digunakan untuk pengujian tegangan tembus dan arus bocor berbeda. Pada tegangan tembus digunakan gelas uji standar dengan elektroda standar sesuai dengan VDE 370 sedangkan untuk pengujian arus bocor digunakan gelas uji pengujian yang didalamnya berisi elektroda jenis piring-piring dan jarum-piring. Elektroda terbuat dari bahan besi dengan sudut kelancipan elektroda jarum adalah 45° . Pemilihan sudut jarum ini disesuaikan dengan jarum yang sudah ada di laboratorium. Selama pengujian, peneliti akan meratakan permukaan elektroda piring yang tidak rata diakibatkan oleh pengujian sebelumnya menggunakan amplas.

Sedangkan tabung uji untuk pengukuran permitivitas dan resistivitas akan menggunakan tabung uji standar dilengkapi dengan elektroda cincin pengaman berdiameter 2cm didalamnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.

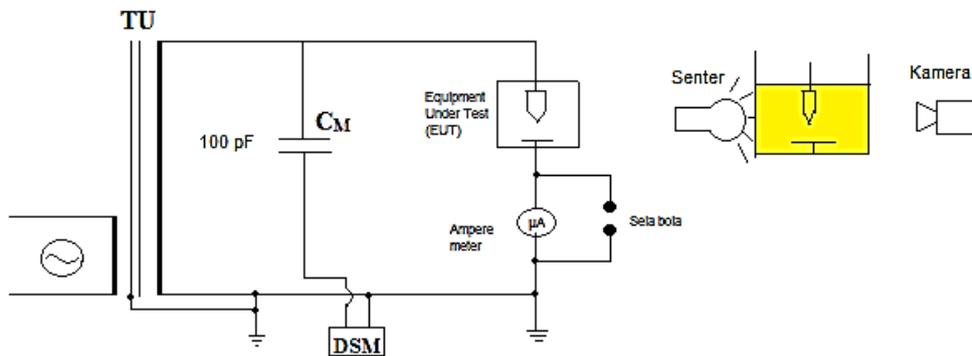


Gambar 3. 5 Tabung Uji dengan Elektroda Cincin Pengaman

Jarak sela yang akan digunakan dalam pengujian resistivitas dan permitivitas adalah 5mm.

3.4.3 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi AC

Rangkaian pengujian tegangan tinggi AC yang digunakan dalam pengujian kali ini adalah seperti pada Gambar 3.6.

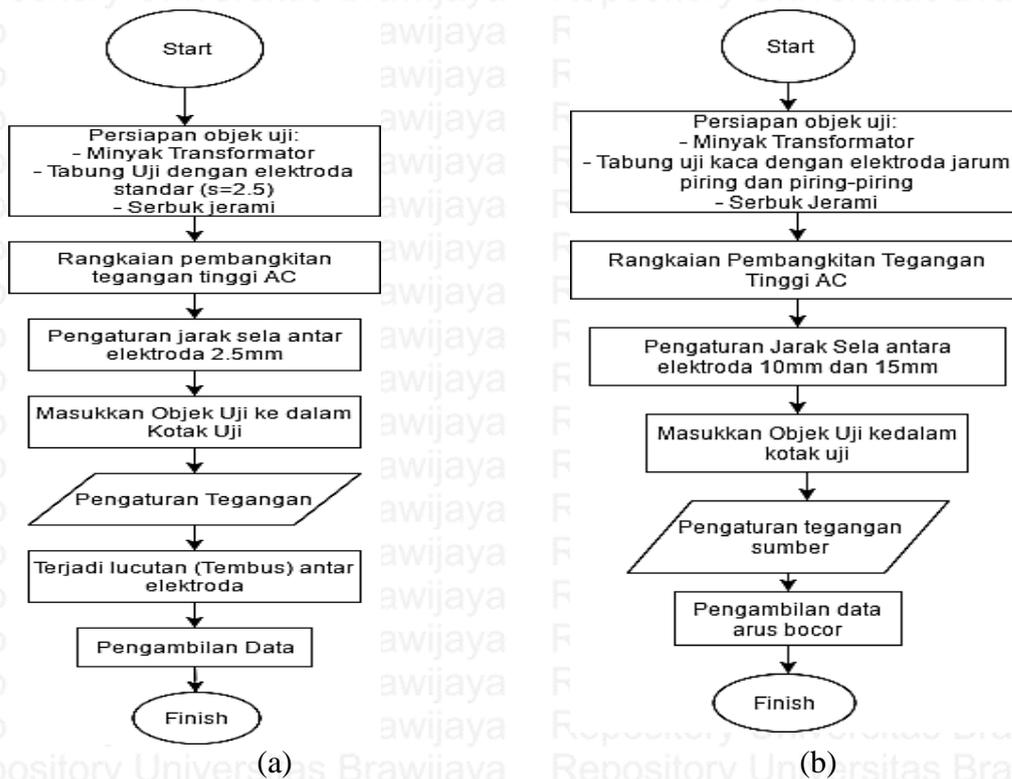


Gambar 3. 6 Rangkaian Tegangan Tinggi AC

Kapasitor yang digunakan adalah 100pF untuk pengujian tegangan tinggi AC. Pada pengujian arus bocor, jarak sela yang akan digunakan adalah 10mm dan 15mm. Setiap pengujian akan diulang sebanyak tiga kali pengujian untuk arus bocor dan empat kali untuk tegangan tembus. Nilai yang digunakan adalah nilai rata-rata dari arus yang didapat. Data arus bocor yang akan diambil adalah data yang didapatkan dari mikro ampermeter.

3.4.4 Pengujian Tegangan Tembus dan Arus Bocor

Pengujian tegangan tembus dan arus bocor dilakukan menggunakan tegangan tinggi AC dengan urutan penelitian yang digambarkan pada diagram alir pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Diagram Alir pengujian Tegangan Tembus dan Arus Bocor

(a) Diagram Alir Pengujian Tegangan Tembus

(b) Diagram Alir pengujian Arus Bocor

Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 maka langkah-langkah pengujian tegangan tembus minyak Shell Diala menggunakan tegangan tinggi AC dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Siapkan wadah uji dengan elektroda standar dengan jarak sela 2.5 mm
- Setelah itu, merangkai rangkaian seperti pada Gambar 3.6
- Pada pengujian ini terdapat tiga kondisi, yaitu minyak murni, terkontaminasi dan yang sudah disaring.
- Pengujian pertama adalah untuk minyak yang masih baru. Pengujian dibagi menjadi 2, yaitu untuk minyak murni yang sudah dipanaskan terlebih dahulu dan minyak murni yang langsung diuji tanpa pemanasan. Pemanasan dilakukan untuk mengurangi kadar air yang ada didalam minyak karena penyimpanan minyak yang sudah lama pada suhu 60° C sebanyak tiga kali.
- Setelah itu tuang minyak kedalam wadah uji dengan perlahan untuk menghindari adanya gelembung gas yang dapat berperan sebagai kontaminan dan minyak didiamkan selama 10menit.

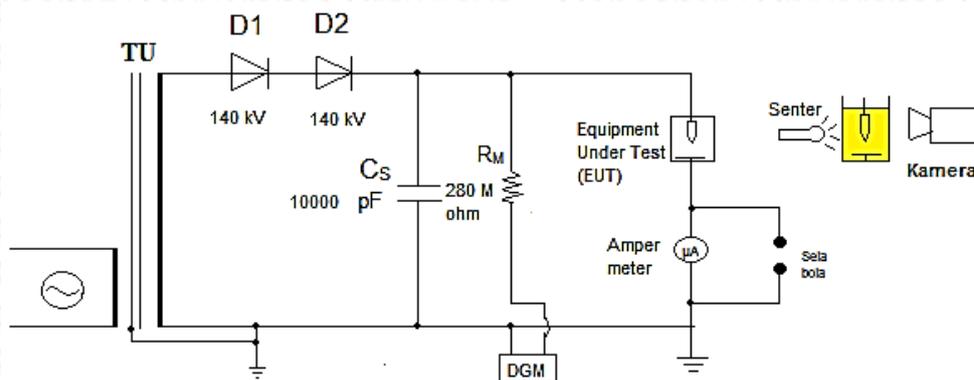
- f. Setelah semua rangkaian selesai, pengujian dimulai dengan menaikkan tegangan perlahan-lahan sampai terjadi tembus. Percobaan diulang sebanyak empat (4) kali dan diambil rata-ratanya dengan.
- g. Setelah data diperoleh, dibandingkan tegangan tembus mana yang lebih baik. Pada pengujian ini digunakan tegangan tembus setelah pemanasan.
- h. Minyak yang sudah terkontaminasi karbon saat tembus tidak digunakan kembali.
- i. Setelah pengujian tegangan tembus minyak murni selesai, dilanjutkan dengan pengujian tegangan tembus minyak yang sudah terkontaminasi dengan langkah yang sama dengan pengujian tegangan tembus minyak transformator murni.
- j. Level kontaminan pertama yaitu 3% dan diuji tegangan tembusnya sebanyak empat kali.
- k. Setelah didapatkan tegangan tembus kontaminannya, minyak disaring menggunakan kain saring. Penyaringan dilakukan sebanyak tiga kali.
- l. Setelah itu dilanjutkan dengan menguji tegangan tembus minyak yang sudah disaring.
- m. Setelah pengujian selesai, dilanjutkan dengan level kontaminan 5% dan 7.5% pada volume minyak 300ml.

Setelah mendapatkan nominal tegangan tembus, dilanjutkan dengan pengujian arus bocor menggunakan tabung uji kaca dengan jarak sela 10mm dan 15mm. Elektroda yang digunakan adalah elektroda piring-piring dan jarum-piring. Langkah-langkah pengujian arus bocor adalah sebagai berikut:

- a. Siapkan wadah uji/chamber kaca yang sudah dibersihkan dan dalam kondisi kering.
- b. Pasang konfigurasi elektroda yang ingin diuji. Untuk pengujian pertama digunakan elektroda piring-piring dengan jarak sela 10mm.
- c. Pada kondisi ini terdapat dua kondisi pengujian, yaitu pada minyak transformator yang murni dan terkontaminasi. Kondisi pertama yang akan diuji terlebih dahulu adalah kondisi murni.
- d. Setelah wadah uji selesai, rangkailah rangkaian percobaan seperti Gambar 3.6 lengkap dengan senter dan video recorder.
- e. Setelah semua rangkaian selesai, pengujian dimulai

- f. Pengaturan tegangan sampai sebelum tegangan tembusnya. Pada pengujian ini, dilakukan pengambilan data untuk beberapa level tegangan yaitu: 5kV, 10kV, 15kV, 20kV dan 25kV.
- g. Pengambilan data arus bocor pada multimeter.
- h. Jika terjadi tembus, pengujian dihentikan dan dilanjutkan dengan pengujian menggunakan elektroda jarum-piring.
- i. Pengujian dilanjutkan dengan elektroda jarum-piring menggunakan langkah-langkah yang sama dan dilanjutkan dengan jarak sela 15mm.
- j. Setelah selesai dengan kondisi pengujian pertama, dilanjutkan dengan kondisi pengujian kedua yaitu minyak terkontaminasi dengan level kontaminan 3%, 5% dan 7.5% dengan langkah yang sama dengan pengujian murni.

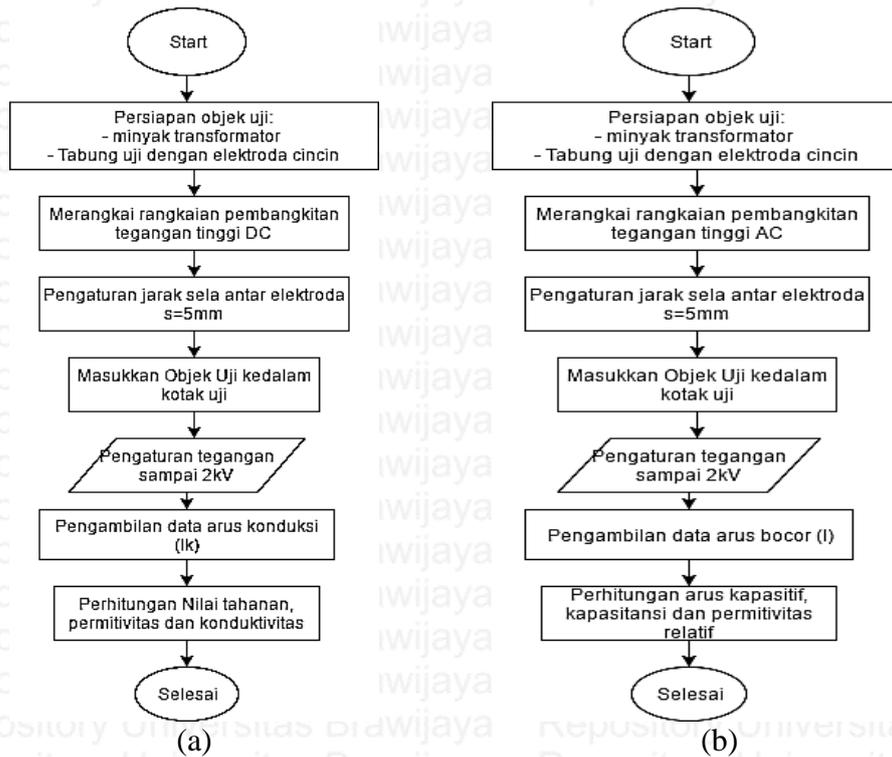
3.4.5 Pengujian Resistivitas dan Permittivitas Minyak Transformator



Gambar 3. 8 Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Gambar 3.8 memperlihatkan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC yang digunakan dalam pengujian arus konduksi untuk memperoleh data resistivitas dan konduktifitas dari minyak Shell Diala B.

Pengujian resistivitas dan permittivitas minyak transformator dilakukan pada minyak transformator murni menggunakan cawan dengan elektroda cincin. Diagram alir pengujian arus konduksi dan arus bocor menggunakan elektroda cincin pelindung ditunjukkan pada Gambar 3.9 (a) dan 3.9 (b).



Gambar 3. 9 Diagram Alir Pengujian Permitivitas dan Resistivitas Minyak Transformator

(a) Diagram alir pengujian arus konduksi dengan elektroda cincin

(b) Diagram alir pengujian arus bocor dengan elektroda cincin

Sebagaimana yang digambarkan pada Gambar 3.9 (a) dan Gambar 3.9 (b) diatas, maka penjelasan langkah-langkah pengujian permitivitas dan resistivitas minyak Shell Diala B adalah sebagai berikut:

- Minyak Shell Diala dituangkan kedalam chamber khusus yang sudah disediakan seperti pada Gambar 3.5.
- Kondisi minyak yang diuji adalah kondisi saat murni.
- Rangkaian pengujian menggunakan rangkaian tegangan tinggi searah (DC) dan rangkaian tegangan tinggi bolak-balik (AC)
- Jarak sela yang digunakan adalah 5mm.
- Untuk mengetahui resistivitas dan konduktivitas dari minyak transformator, dilakukan pengujian DC.
- Cawan dengan elektroda cincin di hubungkan seperti pada rangkaian arus bocor.
- Pegaturan tegangan sebesar 2kV. Arus yang diambil adalah arus yang tertera pada mikro amperemeter DC.
- Setelah data selesai diambil, perhitungan tahanan dengan rumus $R = V/I_k$, setelah itu dapat dihitung resistivitas dan konduktivitasnya.

- i. Menghitung nilai Resisitivitas Shell Diala $\rho = R.A/s$
- j. Untuk mencari permitivitas digunakan rangkaian pengujian tegangan tinggi AC dan didapatkan arus dari mikro amperemeter.
- k. Setelah itu menghitung besar arus $i_c = \sqrt{I^2 - i_R^2}$
- l. Menghitung besar Kapasitansi menggunakan persamaan $\frac{1}{2\pi f C} = \frac{Uac}{ic}$
- m. Menghitung Permitivitas minyak Shell Diala dengan rumus $\epsilon_r = \frac{C.s}{\epsilon_0.A}$

3.4.6 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Medan Homogen dan Non Homogen pada Minyak Transformator Menggunakan Femm

Simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda non-homogen yaitu jarum-piring dan homogen pada piring-piring dapat dilakukan dengan perangkat lunak Femm 4.2. Dengan menggunakan data-data hasil pengujian dan hasil perhitungan maka distribusi medan listrik dari minyak Shell Diala B dapat disimulasikan. Data-data yang dibutuhkan yaitu bentuk geometris susunan elektroda, dimensi elektroda, jarak sela antar elektroda, tegangan tembus dan permitivitas minyak yang diuji.

Hal yang pertama dilakukan adalah menggambar susunan elektroda yang digunakan dalam pengujian. Pada simulasi digunakan jarak sela antar elektroda jarum-piring dan piring-piring yaitu 5mm dan disimulasikan dalam program Femm. Kondisi yang disimulasikan pada perangkat lunak Femm yaitu minyak Shell Diala B saat kondisi murni.

Setelah itu, masukkan data pengujian yaitu tegangan tembus pada elektroda jarum-piring dan piring-piring lalu nilai permitivitas minyak Shell Diala B. Kemudian program dapat disimulasikan untuk mengetahui distribusi medan listriknya.

Nilai yang didapat dari simulasi ini adalah nilai distribusi medan maksimum (E_{max}) yang akan digunakan untuk mencari efisiensi medan. Untuk mencari medan rata-rata ($E_{rata-rata}$) menggunakan persamaan:

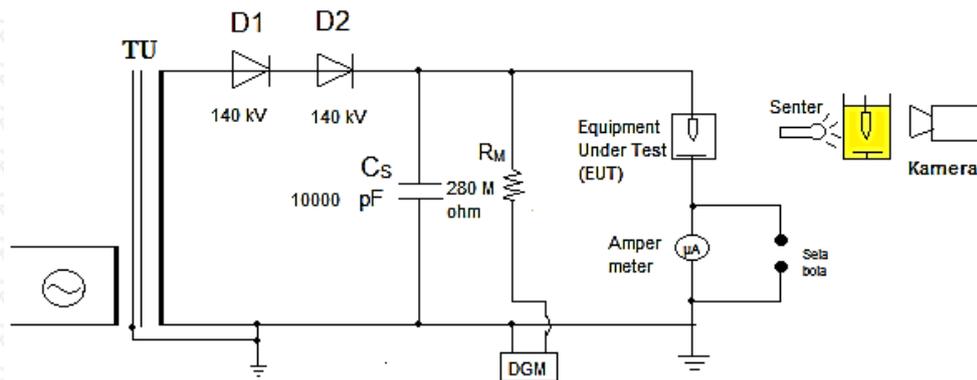
$$E_{rata-rata} = \eta \cdot E_{maksimum} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s} \dots\dots\dots (3-2)$$

Setelah menemukan besar kuat medan rata-rata, maka factor efisiensi medan dapat di tentukan menggunakan persamaan:

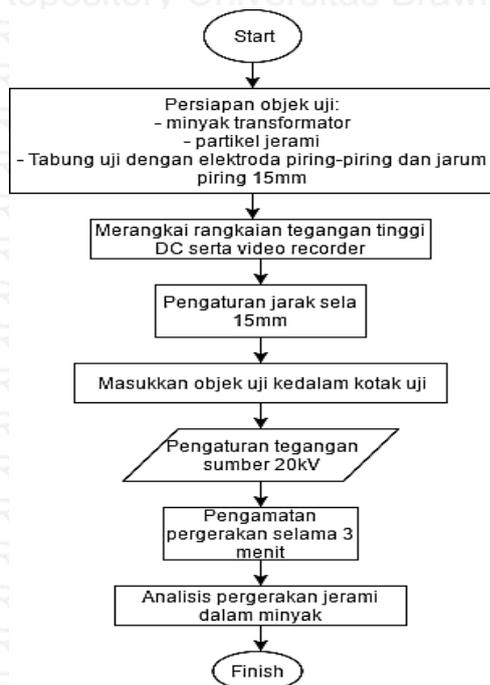
$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \dots\dots\dots (3-3)$$

3.4.7 Pengamatan Partikel Jerami dalam Minyak Transformator



Gambar 3. 10 Rangkaian pengamatan pergerakan jerami

Gambar 3.10 adalah rangkaian yang digunakan untuk pengujian pengamatan pergerakan partikel jerami dalam minyak transformator namun tanpa amperemeter dan sela bola. Untuk melihat pergerakan partikel kontaminan, dalam hal ini adalah jerami pada minyak Shell Diala B, langkah-langkah pengamatan pergerakan partikel jerami dalam minyak digambarkan pada diagram alir dalam Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Diagram alir pengamatan partikel jerami

Sesuai dengan Gambar 3.11, langkah-langkah pengamatan pergerakan partikel jerami dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Siapkan tabung uji, potongan jerami sebanyak 3 buah, minyak transformator dan ponsel untuk merekam percobaan dan senter untuk mengamati pergerakan partikel jerami didalam minyak.

2. Jarak sela diatur sebesar 15mm.
3. Rangkaian pengujian adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah (DC) seperti pada Gambar 3.10 tanpa amperemeter dan sela bola.
4. Tuangkan minyak Shell Diala kedalam tabung uji (chamber) kaca yang sudah disiapkan dengan keadaan kering dan bersih, bebas dari polutan debu.
5. Susunan elektroda pertama yang digunakan adalah elektroda jarum-piring (untuk medan tidak seragam) kemudian elektroda piring-piring (untuk medan yang seragam) dengan tegangan sumber 20kV.
6. Letakkan tiga buah jerami sepanjang 5mm di 3 tempat berbeda. Setelah itu atur tegangan sampai 20kV dan amati pergerakan jerami yang terjadi selama 3 menit.
7. Selama pengamatan, video recorder merekam pergerakan yang terjadi dalam tabung uji yang di sinari senter.
8. Setelah 3 menit pengujian dihentikan. Bila terjadi tembus saat pengujian sebelumnya maka jerami akan dibuang dan diganti dengan jerami yang baru.

3.5 Analisis Data

1. Analisis arus konduksi, permitivitas dan resistivitas pada minyak transformator.
2. Analisis distribusi medan listrik dan efisiensi medan homogen dan non homogen pada minyak transformator.
3. Analisis tegangan tembus minyak transformator saat dalam keadaan murni, terkontaminasi dan setelah dilakukannya filtrasi.
4. Analisis arus bocor minyak transformator saat dalam keadaan murni dan terkontaminasi.
5. Analisis pergerakan serbuk jerami pada minyak transformator

3.6 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 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Tegangan Tembus dan Arus Bocor

4.1.1 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus dilakukan dengan menggunakan tabung uji standar dengan elektroda standar yaitu bola-bola dengan jarak sela 2.5mm. Pada pengujian ini diambil data tegangan tembus sebanyak 4 kali dan diambil rata-ratanya sehingga didapat data keluaran yang lebih akurat dari pengujian tegangan tembus.

Untuk pengujian tegangan tembus minyak transformator murni, dilakukan dua pengujian yaitu pengujian saat minyak dipanaskan terlebih dahulu dan tidak dipanaskan. Pemanasan bertujuan untuk menghilangkan kandungan air yang disebabkan oleh efek penyimpanan dan kontak langsung minyak dengan udara. Pemanasan dilakukan sebanyak tiga kali pada suhu 60°C menggunakan pemanas listrik (*heater*). Data pengujian tegangan tembus dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1
Perbandingan Data Tegangan Tembus Minyak Transformator Sebelum dan Setelah Pemanasan

Kondisi	Tegangan Tembus (kV)	Persentase Kenaikan (%)
Sebelum dipanaskan	17.39	0%
Setelah dipanaskan	23.98	37.9%

Dari Tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa tegangan tembus minyak transformator sebelum pemanasan lebih kecil dibandingkan dengan tegangan tembus minyak transformator setelah dilakukan pemanasan. Tegangan tembus sebelum dipanaskan sebesar 17.39kV dan setelah dipanaskan, tegangan tembus naik hingga 37.9% menjadi 23.98kV. Naiknya tegangan tembus setelah minyak transformator dipanaskan disebabkan oleh

hilangnya kadar air pada minyak akibat proses pemanasan. Pada pengujian tegangan tembus dengan minyak yang dipanaskan, setelah tembus terdapat karbon pada minyak transformator yang berperan sebagai kontaminan. Fenomena karbon pada pengujian tegangan tembus ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Fenomena Karbon Setelah Pengujian Tegangan Tembus

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa fenomena karbon memenuhi minyak transformator yang sudah diuji tegangan tembus. Adanya karbon dikarenakan besarnya tegangan pada saat tembus yang akhirnya merusak struktur minyak transformator. Karbon yang muncul pada minyak ini dapat berperan menurunkan tegangan tembus minyak transformator, sehingga minyak transformator yang sudah berisi karbon tidak bisa digunakan kembali karena akan mempengaruhi kekuatan isolasi minyak transformator itu sendiri.

Bila dilihat dari data pengujian, maka penulis menggunakan minyak transformator yang sudah dipanaskan terlebih dahulu sebagai minyak yang akan digunakan dalam pengujian lainnya agar didapat hasil yang lebih maksimal dengan tegangan tembus yang lebih besar.

4.1.2 Pengaruh Kontaminan Serbuk Jerami Terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standar.

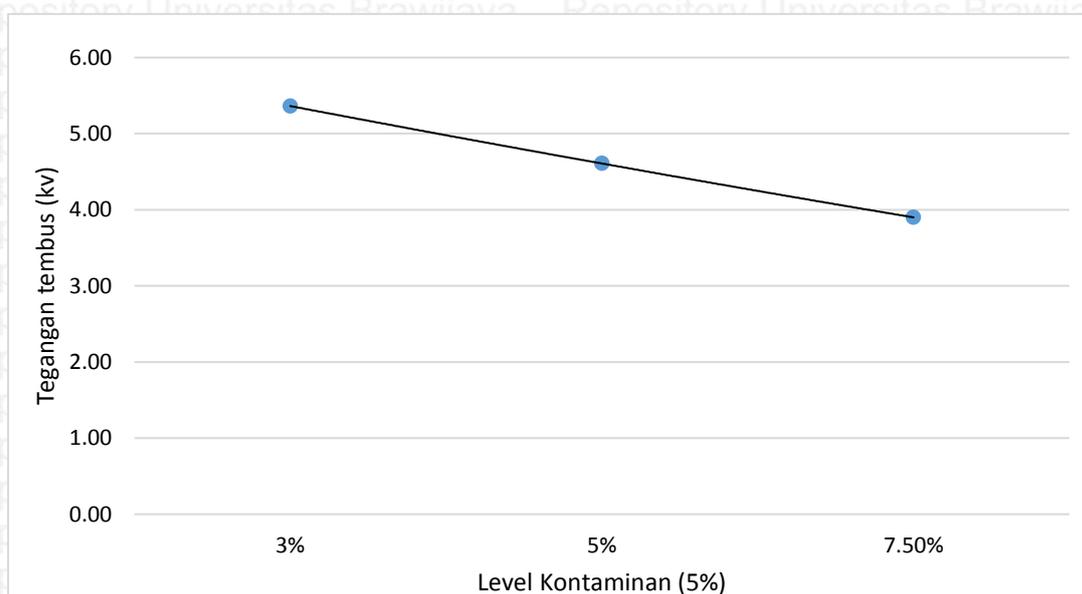
Pada Pengujian ini, minyak transformator murni diberikan kontaminan berupa serbuk jerami dengan beberapa level konsentrasi dan diuji tegangan tembusnya menggunakan cawan dengan elektroda standar pada jarak sela 2.5mm. Pengujian dilakukan sebanyak empat kali dan diambil rata-rata tegangannya untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat. Data hasil pengujian tegangan tembus dengan kontaminan serbuk jerami dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2

Pengaruh Tingkat Kontaminan Terhadap Tegangan Tembus Menggunakan Elektroda Standar

Jenis elektroda	% Kontaminan	Kontaminan (mg)	Tegangan Tembus (kV)
Standar	3%	9	5.36
	5%	15	4.61
	7.50%	22.5	3.90

Dari data pada Tabel 4.2 dapat dibuat grafik hubungan antara tingkat kontaminan terhadap tegangan tembus yang ditunjukkan pada Gambar 4.2..



Gambar 4. 2 Grafik Tingkat Tegangan Tembus untuk Setiap Penambahan Kontaminan Serbuk Jerami Pada Elektroda Setengah Bola dengan Jarak Sela 2.5mm

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat, bahwa pada elektroda standar berjarak sela 2.5mm bila diberikan kontaminan berupa serbuk jerami sebanyak 3% dari volume minyak tegangan tembus mengalami penurunan dari tegangan tembus murni sebesar 23.98 kV menjadi 5.36kV . Sedangkan pada saat diberikan kontaminan serbuk jerami sebesar 5%, penurunan tegangan tembus minyak transformator sebesar 4.61 kV. Begitu pula saat diberikan kontaminan 7.5%, penurunan tegangan tembus menjadi 3.90 kV. Maka, adanya kontaminan serat selulosa berupa serbuk jerami pada minyak transformator sangat berpengaruh menurunkan kekuatan isolasi dari minyak transformator.

Fenomena yang muncul dalam pengujian penambahan kontaminan serbuk jerami menggunakan elektroda standar dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4. 3 Fenomena Jerami dalam Minyak Transformator Sebelum Pengujian Tegangan Tembus



Gambar 4. 4 Fenomena Jerami dalam Minyak Transformator Sesudah Pengujian Tegangan Tembus

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa sebelum pengujian, serbuk jerami tersebar merata didalam minyak transformator. Ketika sudah diberikan tegangan, perlahan-lahan jerami akan bergerak menuju sela antar elektroda seperti pada Gambar 4.4. Serbuk jerami membentuk sebuah jalur yang menyerupai jembatan diantara kedua buah elektroda. Serbuk jerami yang membentuk suatu jembatan diantara elektroda ini merupakan media tembus pada minyak transformator. Jadi, semakin banyak kontaminan yang terkandung dalam minyak transformator, akan mempercepat terbentuknya jembatan yang menghubungkan kedua elektroda dan akan mempercepat proses terjadinya tembus.

4.1.3 Pengaruh Filtrasi Minyak Transformator Terhadap Tegangan Tembus pada Susunan Elektroda Standar

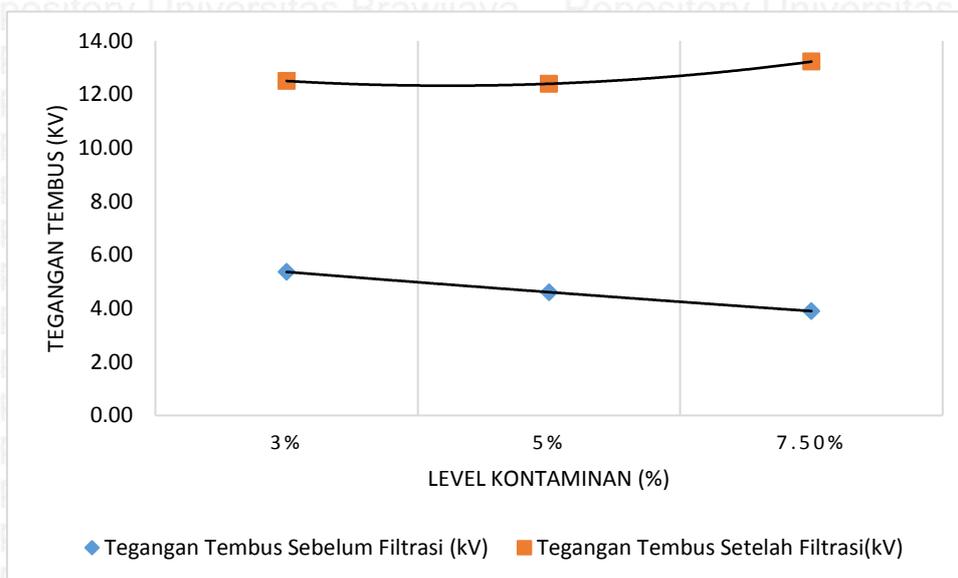
Setelah didapatkan tegangan tembus minyak transformator yang sudah terkontaminasi oleh serbuk jerami, maka minyak yang terkontaminasi tersebut difilter menggunakan kain saring untuk membersihkan kontaminan serbuk jerami dari dalam minyak. Penyaringan dilakukan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan minyak yang bersih.

Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3
Pengaruh Tingkat Kontaminan Terhadap Tegangan Tembus Sebelum dan Sesudah Dilakukan Penyaringan

Kontaminan (%)	Tegangan Tembus Sebelum Filtrasi (kV)	Tegangan Tembus Setelah Filtrasi(kV)	Persentase kenaikan (%)
3%	5.36	12.50	133.10%
5%	4.61	12.40	169.02%
7.50%	3.90	13.22	239.04%

Dari data pada Tabel 4.3 dapat dibuat grafik hubungan antara tingkat kontaminan terhadap tegangan tembus sebelum dan sesudah dilakukan penyaringan seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Tegangan Tembus Minyak Transformator Terkontaminasi dengan Tegangan Tembus Setelah Filtrasi

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa, kenaikan tegangan tembus setelah dilakukan penyaringan terhadap serbuk jerami dari minyak transformator meningkat. Pada tegangan tembus minyak transformator yang dikotori oleh kontaminan 3%, setelah di filter didapatkan kenaikan tegangan tembus dari 5.36 kV menjadi 12.50 kV dengan kenaikan sebesar 133.10%. Pada konsentrasi kontaminan 5%, kenaikan tegangan tembus setelah penyaringan dari tegangan dengan kontaminan 4.61 kV menjadi 12.50 kV dengan kenaikan sebesar 169.02%. Dan pada konsentrasi kontaminan 7.5% tegangan tembus meningkat dari 3.90 kV menjadi 13.22 kV dengan kenaikan sebesar 239.04%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pembersihan kontaminan serbuk jerami dari minyak transformator dapat menaikkan tegangan tembus minyak transformator.

4.1.4 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Arus Bocor

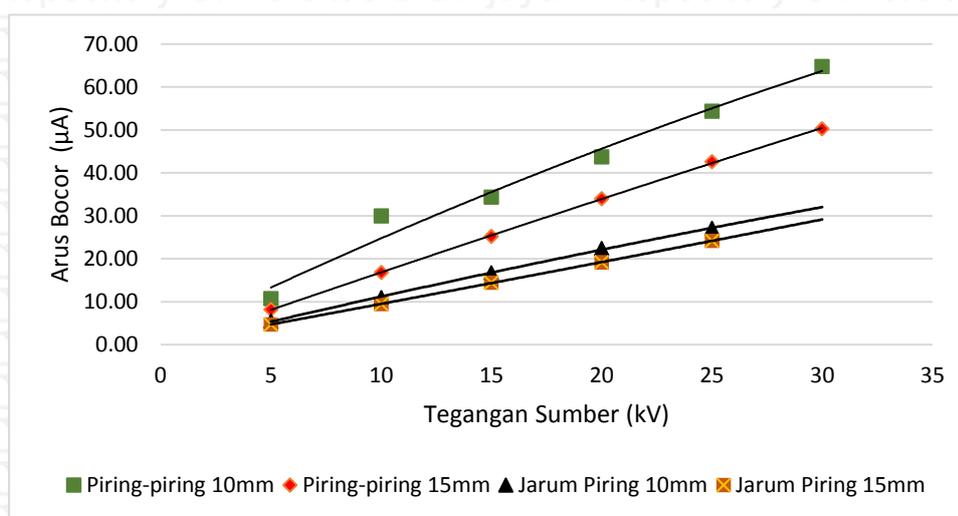
Pada pembahasan ini, arus bocor pada minyak transformator diuji menggunakan tabung uji yang terbuat dari kaca dengan elektroda piring-piring dan jarum piring pada jarak sela 10mm dan 15mm. Volume minyak yang digunakan adalah 1000ml. Data pengujian arus bocor pada minyak transformator murni ditunjukkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4

Data Hasil Pengujian Arus Bocor Minyak Transformator pada Keadaan Murni Menggunakan Tegangan Tinggi AC

Jenis Elektroda	Tegangan Sumber		Arus Bocor (μA)	
	Jarak Sela 10mm	Jarak Sela 15mm	Jarak sela 10mm	Jarak sela 15mm
Piring-piring	5.00	5.00	10.70	8.17
	10.00	10.00	29.97	16.83
	14.98	15.08	34.44	25.33
	20.01	20.00	43.77	33.97
	25.00	25.03	54.40	42.63
Jarum-piring	30.08	30.05	65.00	50.39
	5.09	5.01	5.57	4.73
	9.99	10.04	10.97	9.47
	15.08	15.06	16.83	14.47
	20.01	20.01	22.37	19.20
	25.02	25.07	27.10	24.17

Berdasarkan Tabel 4.4 maka dapat dilihat karakteristik dalam grafik hubungan antara tegangan sumber dengan arus bocor pada susunan elektroda piring-piring dan jarum-piring dengan jarak sela 10mm dan 15mm pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Grafik Tingkat Arus Bocor Murni Untuk Setiap Kenaikan Tegangan AC pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring pada Jarak Sela 10mm dan 15mm

Pada Gambar 4.6 adalah grafik karakteristik arus bocor terhadap tegangan pada susunan elektroda piring-piring dan jarum-piring dengan jarak sela 10mm dan 15mm. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar tegangan, arus bocor pada elektroda piring-piring dan jarum piring juga bertambah besar. Homogenitas mempengaruhi besarnya arus bocor pada pengujian ini. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.6 yaitu arus bocor pada elektroda piring-piring berjarak sela 10mm lebih besar daripada arus bocor pada jarum piring pada jarak sela dan tegangan sumber yang sama.

Jika di analisis menurut *trendline* sesuai dengan persamaan yang terdapat dalam Grafik 4.6 maka perbandingan data *trendline* dengan data hasil percobaan digambarkan dengan Tabel 4.5.

Tabel 4. 5

Data Perbandingan Arus Bocor terhadap Tegangan Menurut *Trendline*

Jenis Elektroda	Tegangan Sumber (kV)		Arus Bocor (μA)		Arus Bocor <i>Trendline</i> (μA)		Δ Arus Bocor (μA)		Rata-rata penyimpangan	
	Jarak Sela 10mm	Jarak Sela 15mm	Jarak sela 10mm	Jarak sela 15mm	Jarak sela 10mm	Jarak Sela 15mm	Jarak sela 10mm	Jarak Sela 15mm	Jarak sela 10mm	Jarak sela 15mm
Piring-piring	5.00	5.00	10.70	8.17	13.29	8.10	2.59	0.07	0.02	0.01
	10.00	10.00	29.97	16.83	24.76	16.84	5.21	0.01		
	14.98	15.08	34.33	25.33	35.49	25.58	1.16	0.25		
	20.01	20.00	43.77	33.97	45.64	33.91	1.87	0.06		
	25.00	25.03	54.40	42.63	55.02	42.30	0.62	0.33		
	30.08	30.05	65.00	50.39	63.86	50.55	1.14	0.16		
Jarum-piring	5.09	5.01	5.57	4.73	5.47	4.72	0.10	0.01	0.01	0.01
	9.99	10.04	10.97	9.47	11.18	9.53	0.21	0.06		
	15.08	15.06	16.83	14.47	16.87	14.39	0.04	0.08		
	20.01	20.01	22.37	19.20	22.13	19.22	0.24	0.02		
	25.02	25.07	27.10	24.23	27.24	24.22	0.14	0.01		

Dari Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa penyimpangan rata-rata pada arus bocor piring-piring dan jarum-piring berjarak sela 10 dan 15mm hamper mendekati 0. Sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat kesesuaian data antara data hasil pengujian dengan data hasil *trendline* karena penyimpangan rata-rata mendekati 0 dan masih dalam batas toleransi kesalahan.

4.1.5 Minyak Transformator Terkontaminasi Serbuk Jerami Terhadap Arus Bocor

Pengujian arus bocor terkontaminasi dilakukan dengan menggunakan tegangan tinggi AC. Minyak transformator yang murni ditambahkan serbuk jerami dengan konsentrasi 3%, 5% dan 7.5% dengan volume minyak 1000ml. Berikut adalah data hasil percobaan pada

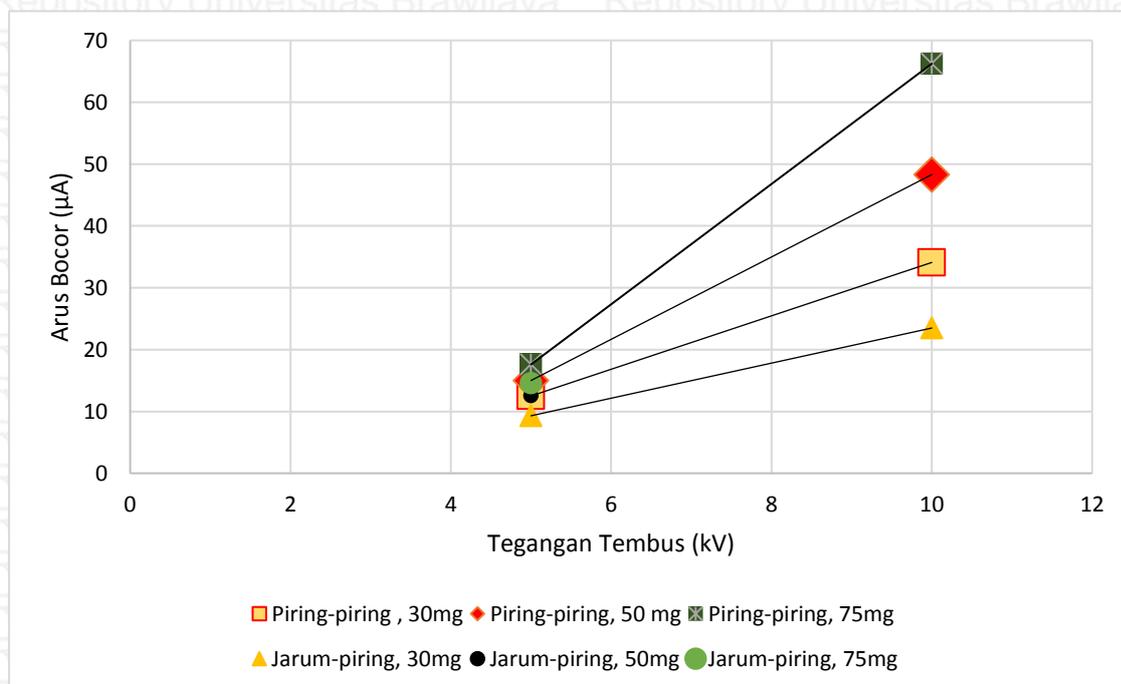
pengujian arus bocor dengan minyak transformator yang terkontaminasi serbuk jerami pada elektroda piring-piring dan jarum piring pada jarak sela 10mm pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6

Perbandingan Hasil Pengujian Arus Bocor Terkontaminasi Pada Jarak Sela 10mm

Jenis Elektroda	Serbuk Jerami (mg)	Tegangan Sumber (kV)	Arus Bocor (μA)
Piring-piring	30	4.99	12.5
		10.03	34.1
	50	-	-
		5	15
		10.01	48.3
		5.01	17.6
75	10.04	66.23	
	5.00	9.30	
Jarum-piring	30.00	10.01	23.49
		-	-
	50.00	5.02	12.57
	75.00	5.03	14.57

Berdasarkan Tabel 4.6 maka perbandingan arus bocor terkontaminasi pada elektroda jarum-piring dan piring-piring pada jarak sela 10mm dalam bentuk grafik digambarkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Grafik Tingkat Arus Bocor Terkontaminasi Untuk Setiap Kenaikan Tegangan AC Pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring Pada Jarak Sela 10mm

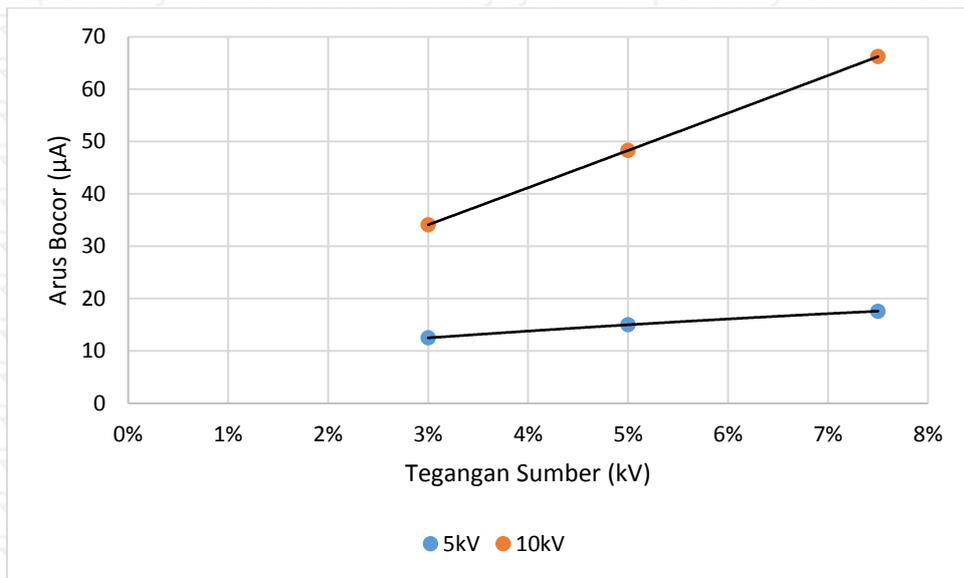
Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa, arus bocor minyak yang terkontaminasi pada elektroda piring-piring dan jarum-piring berbeda. Arus bocor minyak terkontaminasi pada elektroda piring-piring lebih besar daripada arus bocor minyak terkontaminasi pada elektroda jarum-piring. Pada Gambar 4.7 semakin banyak kontaminan yang diberikan pada minyak transformator maka arus bocor semakin besar. Pengambilan data hasil pengujian pada elektroda jarum-piring dengan kontaminan serbuk jerami 50mg dan 75mg hanya sampai pada tegangan sumber 5kV karena pada saat tegangan dinaikkan, terjadi tembus. Hal ini disebabkan karena partikel jerami pada elektroda jarum-piring cepat tertarik ke ujung jarum karena adanya medan tinggi pada ujung jarum. Perbandingan data hasil pengujian dengan data hasil *trendline* Gambar 4.7 dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7
Perbandingan Data Arus Bocor Terkontaminasi Hasil Pengujian dengan *Trendline* Pada Jarak 10mm

Jenis Elektroda	Serbuk Jerami (mg)	Tegangan Sumber (kV)	Arus Bocor (μ A)	Arus Bocor <i>trendline</i> (μ A)	Δ Arus Bocor	Rata-rata Penyimpangan
Piring-piring	30	4.99	12.5	12.46	0.04	0.09
		10.03	34.1	34.23	0.13	
	50	-	-	-	-	
		5	15	15.00	0.00	
	75	10.01	48.3	48.37	0.07	
		5.01	17.6	17.70	0.10	
Jarum-piring	30	10.04	66.23	66.62	0.39	
		5.00	9.30	9.30	0.00	
	50	10.01	23.49	23.52	0.03	
		-	-	-	-	
	75	5.02	12.57	-	-	
		5.03	14.57	-	-	

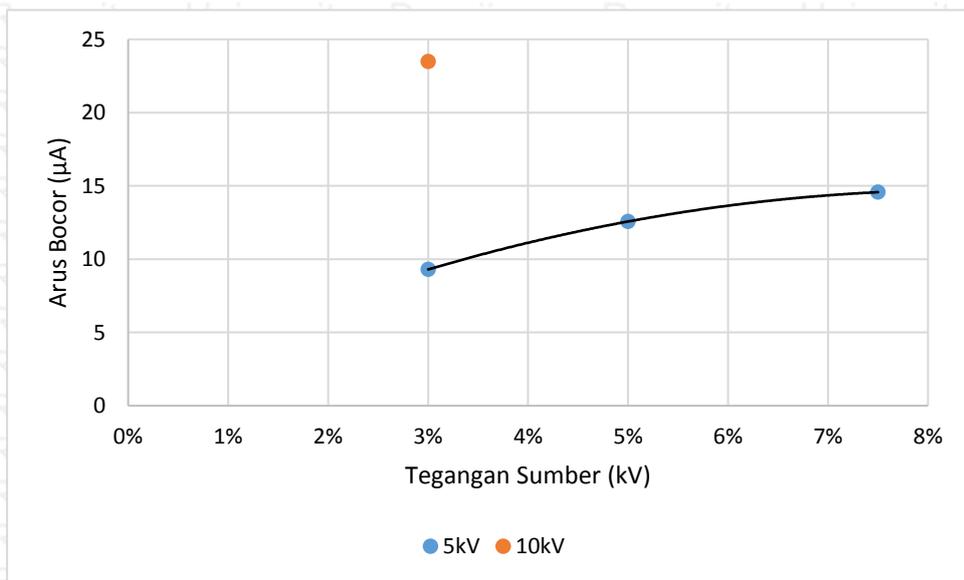
Pada Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa rata-rata penyimpangan data arus bocor terkontaminasi pada jarak sela 10mm mendekati 0. Angka ini menunjukkan bahwa data masih dalam batas toleransi kesalahan yang diijinkan dan Gambar 4.7 dapat mewakili karakteristik perubahan arus bocor terhadap tegangan dan banyaknya kontaminan serta perbedaan elektroda pada jarak 10mm.

Grafik karakteristik penambahan kontaminan terhadap arus bocor pada elektroda piring-piring dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 10mm

Gambar 4.8 menunjukkan grafik karakteristik arus bocor setiap penambahan kontaminan pada susunan elektroda piring-piring dengan jarak sela 10mm. Dapat dilihat dari Gambar 4.8 bahwa pada tegangan yang sama, dengan penambahan kontaminan membuat arus bocor pada elektroda piring-piring pada jarak sela 10mm semakin besar. Sedangkan untuk grafik karakteristik arus bocor dengan penambahan kontaminan pada elektroda jarum-piring dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Jarum-piring Dengan Jarak Sela 10mm

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pada elektroda jarum-piring, pada tegangan sumber yang sama dengan penambahan kontaminan, arus bocornya akan bertambah besar.

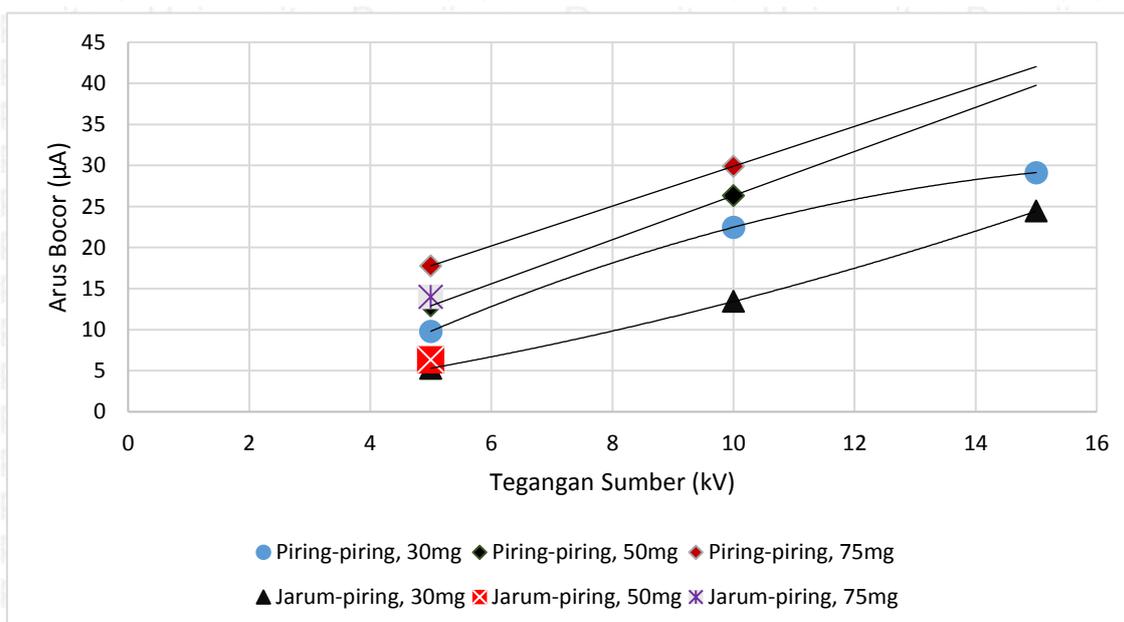
Sedangkan untuk data hasil pengujian arus bocor terkontaminasi pada jarak sela 15mm mempunyai perbandingan seperti pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8

Data Perbandingan Arus Bocor Terkontaminasi Pada Jarak Sela 15mm

Jenis Elektroda	Serbuk Jerami (mg)	Tegangan Sumber (kV)	Arus Bocor (μ A)
Piring-piring	30	5	9.8
		10.03	22.47
		15.04	29.13
	50	4.99	12.9
		10.05	26.33
		75	5.05
Jarum-piring	30.00	10.05	29.9
		5.01	5.30
		10.01	13.43
	50.00	15.03	24.43
		5.04	6.33
		75.00	5.05

Berdasarkan Tabel 4.8 dapat dibuat grafik hubungan antara penambahan tegangan terhadap arus bocor elektroda piring-piring dan jarum-piring pada jarak sela 15mm dengan penambahan serbuk jerami seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Kenaikan Tegangan AC Pada Susunan Elektroda Piring-piring dan Jarum-piring pada Jarak Sela 15mm

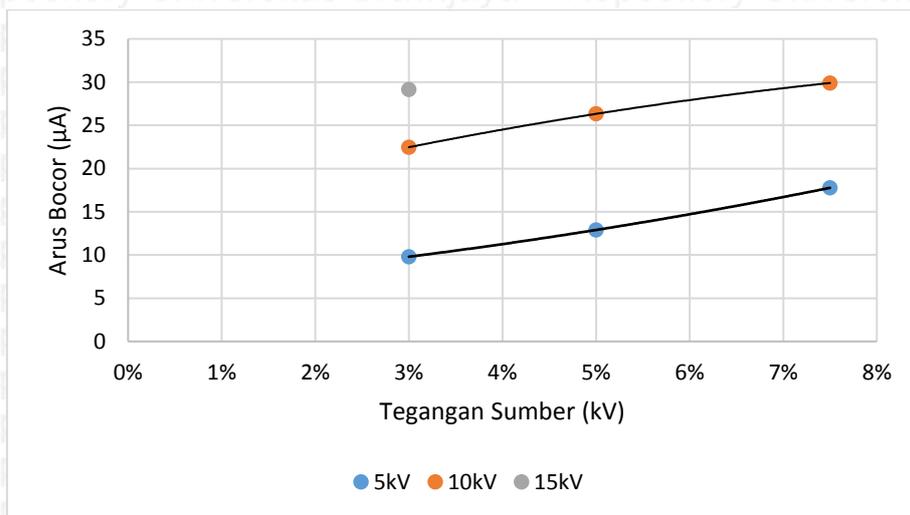
Pada Gambar 4.10 adalah grafik karakteristik arus bocor kontaminan pada elektroda berjarak sela 15mm. Terlihat bahwa, bentuk elektroda mempengaruhi besarnya arus bocor pada minyak transformator terkontaminasi. Arus bocor elektroda piring-piring lebih besar daripada arus bocor elektroda jarum-piring. Dan semakin besarnya tegangan sumber yang diterapkan, maka arus bocor pada kedua elektroda pada jarak sela yang sama juga semakin besar. Analisis arus bocor terkontaminan pada jarak sela 15mm juga dilakukan pada *trendline* menggunakan persamaan yang tersedia pada di Gambar 4.10. Tabel perbandingan data hasil pengujian dengan data hasil analisis *trendline* dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9
Perbandingan Analisi Data Hasil Pengujian dengan Data Trendline

Jenis Elektroda	Serbuk Jerami (mg)	Tegangan Sumber (kV)	Arus Bocor (μA)	Arus Bocor <i>Trendline</i> (μA)	Δ Arus Bocor	Rata-rata Penyimpangan	
Piring-piring	30	5	9.8	9.80	0.00	0.06	
		10.03	22.47	22.53	0.06		
		15.04	29.13	29.16	0.03		
	50	4.99	12.9	12.87	0.03		
		10.05	26.33	26.46	0.13		
		75	5.05	17.77	17.89		0.12
Jarum-piring	30	5.01	5.30	5.31	0.01	0.02	
		10.01	13.43	13.45	0.02		
		15.03	24.43	24.50	0.07		
	50	5.04	6.33	-	-		
		75	5.05	14.00	-		-
		-	-	-	-		-

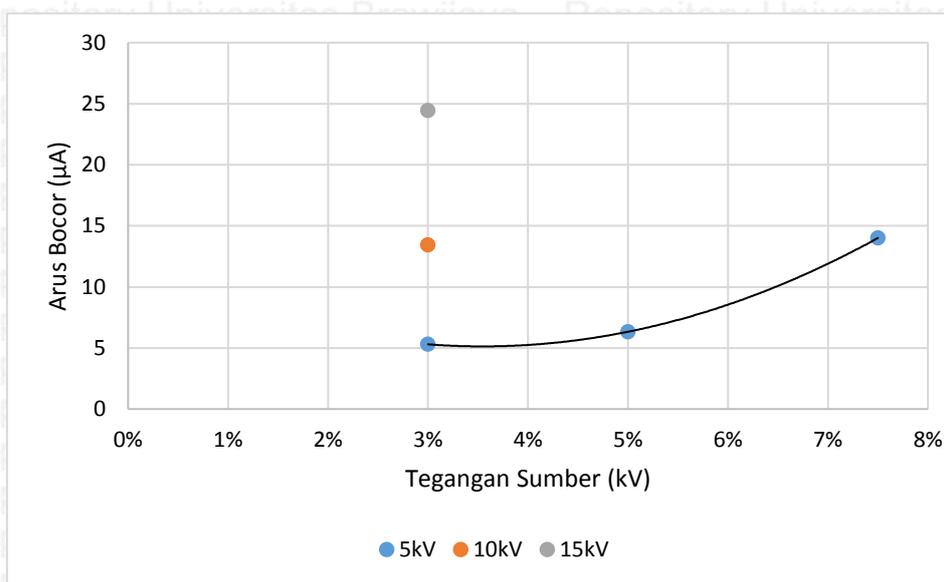
Pada Tabel 4.9, rata-rata penyimpangan pada perbandingan arus bocor data hasil pengujian dengan data hasil analisis *trendline* adalah sebesar 0.06 dan 0.02 dimana hasil ini mendekati 0 dan masih dalam batas toleransi kesalahan yang diijinkan.

Karakteristik arus bocor dengan penambahan kontaminan pada elektroda piring-piring dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 15mm

Gambar 4.11 adalah grafik tingkat arus bocor untuk setiap penambahan kontaminan pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 15mm. Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa, dengan bertambahnya kontaminan dalam minyak transformator maka arus bocornya akan bertambah besar pada tegangan yang sama. Grafik karakteristik arus bocor terhadap penambahan kontaminan pada elektroda jarum-piring dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik Tingkat Arus Bocor Untuk Setiap Penambahan Kontaminan Pada Susunan Elektroda Jarum-piring Dengan Jarak Sela 15mm

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada tegangan yang sama, dengan penambahan kontaminan serbuk jerami maka arus bocor pada elektroda jarum-piring dengan jarak sela 15mm akan bertambah besar.

Dari pengujian arus bocor yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin besar tegangan sumber yang diterapkan, maka arus bocor pada minyak transformator murni dan terkontaminasi akan semakin besar juga. Kontaminasi serbuk jerami sangat berpengaruh memperbesar arus bocor pada minyak transformator karena semakin banyak kontaminan serbuk jerami yang ada pada minyak transformator maka arus bocornya akan semakin besar juga. Begitupula bentuk elektroda juga berpengaruh dalam pengujian arus bocor. Pada elektroda piring-piring yang mempunyai luas penampang yang lebih besar daripada jarum-piring arus bocornya akan semakin besar. Semakin besar penampang suatu elektroda maka arus bocor yang melewati elektroda tersebut akan semakin besar. Sedangkan pada elektroda jarum-piring dengan luas permukaan jarum yang lebih kecil, arus yang melalui elektroda jarum juga akan kecil. Kemudian pada tegangan sumber yang sama, arus bocor pada jarak sela 10mm lebih besar daripada arus bocor pada elektroda berjarak sela 15mm. Hal ini dikarenakan semakin besar jarak sela pada elektroda maka resistansinya akan semakin besar dan arus bocor pada elektroda akan semakin kecil.

4.2 Pengaruh Minyak Transformator Murni Terhadap Arus Konduksi dan Arus Bocor Pada Elektroda Cincin Pelindung

Pada pembahasan ini, arus konduksi minyak diuji menggunakan elektroda cincin pelindung pada jarak sela 5mm dengan tegangan tinggi searah (DC) dan arus bocor murni minyak transformator dengan jarak sela 5mm dengan tegangan tinggi bolak-balik (AC). Data hasil pengujian arus konduksi ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10

Data Hasil Pengujian Arus Konduksi DC Minyak Transformator Murni

Volume minyak (ml)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Konduksi (μ A)	Rata-rata (μ A)	Resistivitas Minyak Transformator Murni $M\Omega$ m	Rata-rata ($M\Omega$ m)
500	2.09	2.07	0.201	0.20	653.00	650.99
	2.07		0.2		649.98	
	2.04		0.2		649.98	

Tabel 4.10 menunjukkan data hasil pengujian arus konduksi minyak transformator pada tegangan 2kV. Dapat dilihat dari tabel bahwa, arus konduksi pada tegangan 2kV cenderung konstan. Perhitungan resistivitas minyak transformator murni menggunakan persamaan (2-5) dan (2-6) pada tegangan 2.09 kV sebagai berikut.

Arus konduksi yang didapat menggunakan tegangan tinggi searah (DC) adalah arus resisitif (i_R). Sehingga, dari pengujian arus konduksi dapat dihitung resistivitas minyak transformator seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.10 dengan perhitungan sebagai berikut:

Pertama-tama, setelah data arus konduksi didapatkan maka tahanan minyak transformator pada jarak sela 5mm dan tegangan 2.09 kV bisa dicari menggunakan persamaan.

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

$$R = \frac{2.09 \text{ kV}}{0.201 \mu\text{A}} = 10.40 \Omega$$

Setelah itu mencari luas permukaan elektroda cincin pelindung dengan diameter 2cm dan jari-jari 1cm. Sehingga didapatkan luas elektroda cincin pelindung sebagai berikut.

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

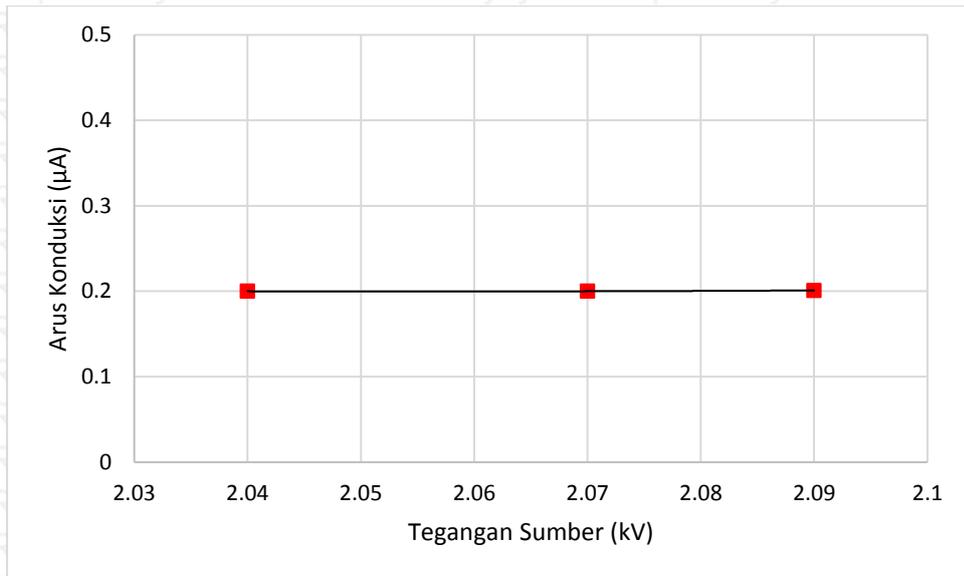
$$A = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga resistivitas minyak transformator sesuai dengan persamaan (2-5) menggunakan data dari Tabel 4.10 adalah sebagai berikut.

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

$$\rho = \frac{10,40 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 653.00 \text{ M}\Omega\text{m}$$

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat lebih lanjut pada Tabel 4.10. Dari data hasil pengujian arus konduksi yang didapatkan, kemudian dibuat grafik karakteristik arus konduksi terhadap tegangan sumber pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Arus Konduksi Sebagai Fungsi Tegangan Pada Jarak Sela 5mm Pada Tegangan DC 2kV

Pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada tegangan 2kV arus konduksi berbentuk linear atau hampir tidak ada perubahan kenaikan atau penurunan.

Setelah mendapatkan persamaan pada Gambar 4.13, data hasil pengujian arus konduksi kemudian dianalisis menggunakan *trendline* dan didapatkan hasil pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11
Data Hasil Analisis Arus Konduksi Menggunakan Trendline

Volume minyak (ml)	Tegangan Sumber (kV)	Arus konduksi i (µA)	Resistivitas Minyak Transformator Murni MΩm	Analisis Arus Konduksi dengan Trendline	ΔArus Konduksi	Rata-rata Penyimpangan
500	2.09	0.201	653.00	0.201	0	0
	2.07	0.2	649.98	0.2	0	
	2.04	0.2	649.98	0.2	0	

Pada Tabel 4.11 dapat dilihat bahwa analisis menggunakan *trendline* menghasilkan hasil yang sama dengan data hasil pengujian arus konduksi. Sehingga, rata-rata penyimpangan bernilai 0.

Setelah didapatkan resistivitas dari minyak transformator, maka konduktivitas (σ) dari minyak transformator dapat dicari menggunakan persamaan (2-14). Berikut adalah perhitungan konduktivitas minyak transformator pada tegangan sumber 2.09 kV.

$$\sigma = \frac{I.S}{V.A} = \frac{1}{\rho}$$

$$\sigma = \frac{1}{653,00M\Omega m} = 1,5314 \times 10^{-9} S m^{-1}$$

Untuk hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12

Data Hasil Perhitungan Konduktivitas Minyak Transformator Murni

Volume minyak (ml)	Tegangan Sumber (kV)	Arus konduksi (μA)	Resisitivitas Minyak Transformator Murni $M\Omega m$	Konduktivitas Minyak Transformator (nS/m)
500	2.09	0.201	653.00	1.5314
	2.07	0.2	649.98	1.5385
	2.04	0.2	649.98	1.5385

Dari Tabel 4.12 dapat disimpulkan bahwa konduktivitas pada minyak transformator murni sangat kecil. Sehingga, minyak transformator Shell Diala B dapat digunakan untuk mengisolasi transformator dengan baik.

Setelah pengujian arus konduksi selesai, dilanjutkan dengan pengambilan data arus bocor menggunakan tegangan tinggi AC dengan elektroda cincin pelindung untuk mengetahui permitivitas minyak transformator Shell Diala B. Data hasil pengujian arus bocor dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13

Data Hasil Pengujian Arus Bocor AC Pada Elektroda Cincin Pelindung Dengan Jarak Sela 5mm

Volume minyak (ml)	Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus bocor (μA)	Rata-rata (μA)
500	2.07	2.08	0.9	0.87
	2.09		0.8	
	2.09		0.9	

Pada pengujian arus bocor menggunakan tegangan tinggi AC, I yang didapat adalah penjumlahan dari arus kapasitif (i_C) dan arus resistif (i_R). Sehingga dari pengujian arus bocor menggunakan tegangan tinggi AC dapat dihitung kapasitansi dan permitivitas minyak transformator Shell Diala B dengan perhitungan sebagai berikut:

Tegangan sumber AC rata-rata = 2.08 kV

Arus bocor rata-rata = 0.87 μA .

Arus konduksi rata-rata = 0,2 μA .

Menggunakan persamaan $i_C = \sqrt{I^2 - i_R^2}$ didapatkan hasil sebagai berikut.

$$i_C = \sqrt{0,87^2 - 0,2^2}$$

$$i_C = 0.84669 \mu A$$

Setelah mendapatkan arus kapasitifnya, maka kapasitansi dari minyak transformator Shell Diala B dapat dihitung sebagai berikut.

$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{U_{AC}}{i_C}$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot C} = \frac{2.08 \text{ kV}}{0.84669 \mu A}$$

$$C = 1.296 \times 10^{-12} F$$

Jadi, kapasitansi dari minyak transformator Shell Diala B adalah 1.296 pF. Setelah mendapatkan nilai kapasitansi dari minyak transformator Shell Diala B, maka nilai permitivitas dari minyak transformator dapat dihitung menggunakan persamaan (2-1) dengan perhitungan sebagai berikut:

Diketahui luas penampang elektroda cincin pelindung adalah $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ pada jarak sela $s = 5 \text{ mm}$, maka perhitungan permitivitas minyak transformator adalah

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot s}{\epsilon_0 \cdot A} = 1,296 \times 10^{-12} \cdot \frac{5 \times 10^{-3}}{8,85 \times 10^{-12} \cdot 3,14 \times 10^{-4}}$$

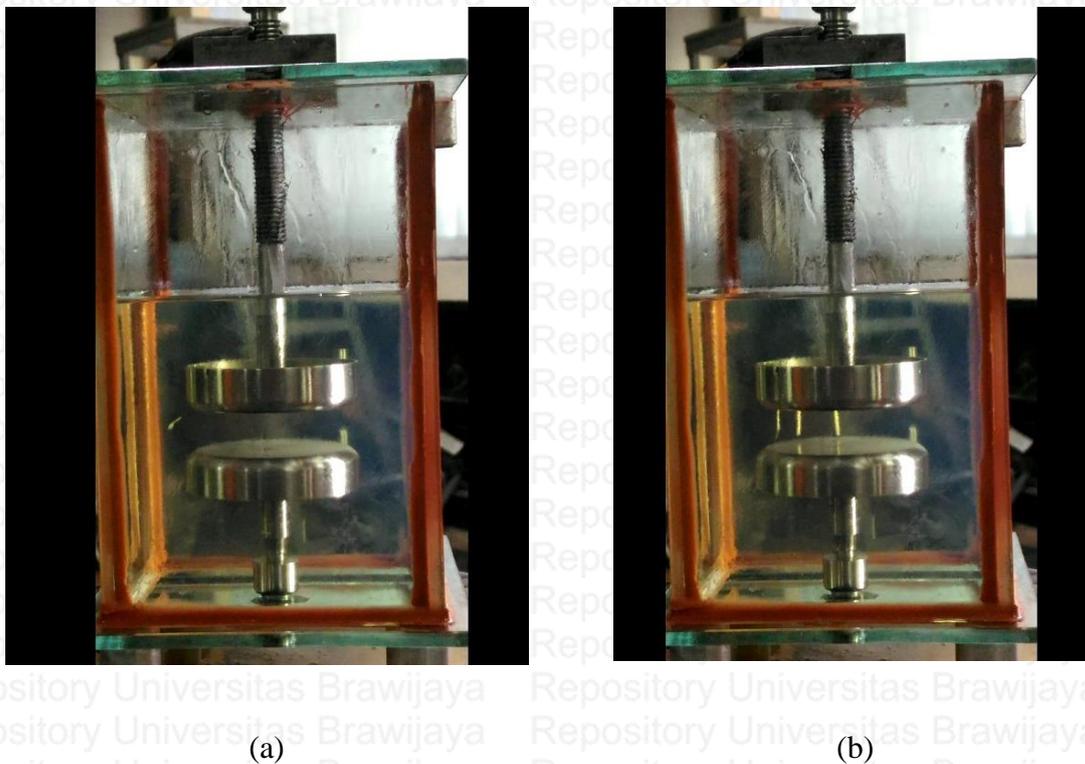
$$\epsilon_r = 2,3318$$

Dari hasil perhitungan didapatkan permitivitas minyak transformator pada jarak sela 5mm adalah 2.3318.

4.3 Analisis Pengamatan Pergerakan Partikel Jerami Dalam Minyak Transformator pada Medan Homogen dan Non Homogen

Pengujian untuk mengamati pergerakan partikel serbuk jerami dalam minyak transformator dilakukan menggunakan menggunakan dua jenis elektroda, yaitu piring-piring untuk medan homogen dan jarum-piring untuk medan non homogen. Data hasil pengujian pengamatan diambil menggunakan video recorder dalam format video. Video ini akan *discreen capture* menjadi beberapa foto untuk menggambarkan proses pergerakan partikel jerami dalam medan homogen dan non homogen.

Pengujian pertama pada elektroda piring-piring menggunakan tegangan sumber sebesar 20kV untuk melihat pergerakan jerami dalam minyak transformator. Gambar pengamatan untuk pergerakan jerami dengan tegangan sumber 20kV dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Pergerakan Jerami Dalam Minyak Transformator Dengan Tegangan Sumber 20kV Pada Elektroda Piring-piring

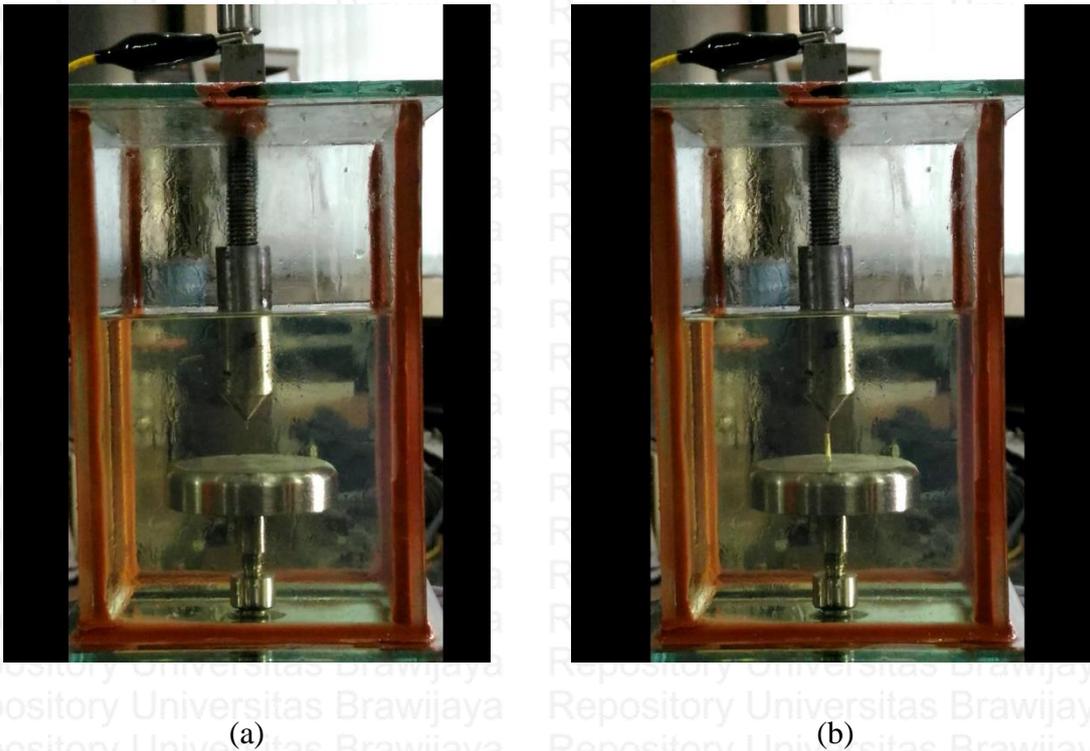
- (a) Sebelum tegangan dinaikkan
- (b) Setelah tegangan mencapai 20kV

Pada Gambar 4.14 adalah gambar pergerakan jerami dalam minyak transformator pada tegangan sumber 20kV. Pada level tegangan 20kV, ketiga jerami bergerak menuju elektroda piring-piring dengan sangat cepat. Hal ini dikarenakan, semakin besarnya tegangan yang diberikan gaya F yang muncul juga semakin besar yang menyebabkan jerami pada permukaan juga ikut tertarik ke tengah elektroda piring-piring. Pada Gambar 4.14 (a) ditunjukkan bahwa sebelum tegangan sumber dinaikkan, jerami masih dalam keadaan diam (keadaan awal). Setelah tegangan dinaikkan dan mencapai 20kV maka jerami akan bergerak menuju permukaan elektroda piring. Jerami bergerak disebabkan karena adanya gaya F . Saat tegangan sumber dinaikkan, maka jerami akan terpolarisasi oleh medan listrik yang berada disekitar elektroda. Ketika adanya perbedaan permitivitas dari jerami dan minyak, maka jerami akan bergerak. Saat permitivitas jerami lebih besar dibandingkan dengan permitivitas

minyak, maka pergerakan jerami akan menuju tempat dimana medan listrik terbesar berasal.

Pada elektroda piring-piring, jerami bergerak ke permukaan piring secara merata yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 (b). Semakin besar permitivitas jerami, maka gaya F ini akan semakin besar.

Untuk perbandingan maka dilakukan pengujian pergerakan listrik pada medan non homogen menggunakan elektroda jarum-piring dengan jarak sela 15mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Pergerakan Jerami Dalam Minyak Transformator Dengan Tegangan Sumber 20kV Pada Medan Non Homogen

- (a) Sebelum Tegangan dinaikkan
- (b) Setelah Tegangan dinaikkan sebesar 20kV

Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa saat minyak transformator diberikan tegangan 20kV, jerami yang semula diam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 (a) akan bergerak mendekati elektroda ujung elektroda jarum. Ketika tegangan sumber 20kV, posisi jerami berada pada ujung elektroda jarum seperti yang digambarkan pada Gambar 4.15 (b).

Pada pengujian pergerakan jerami di elektroda jarum-piring dengan medan non homogen, saat tegangan sumber dinaikkan jerami akan terpolarisasi oleh medan listrik yang berada pada sekitar elektroda. Bergeraknya jerami ke arah ujung jarum dikarenakan perbedaan permitivitas antara jerami dan minyak. Jika permitivitas jerami lebih besar

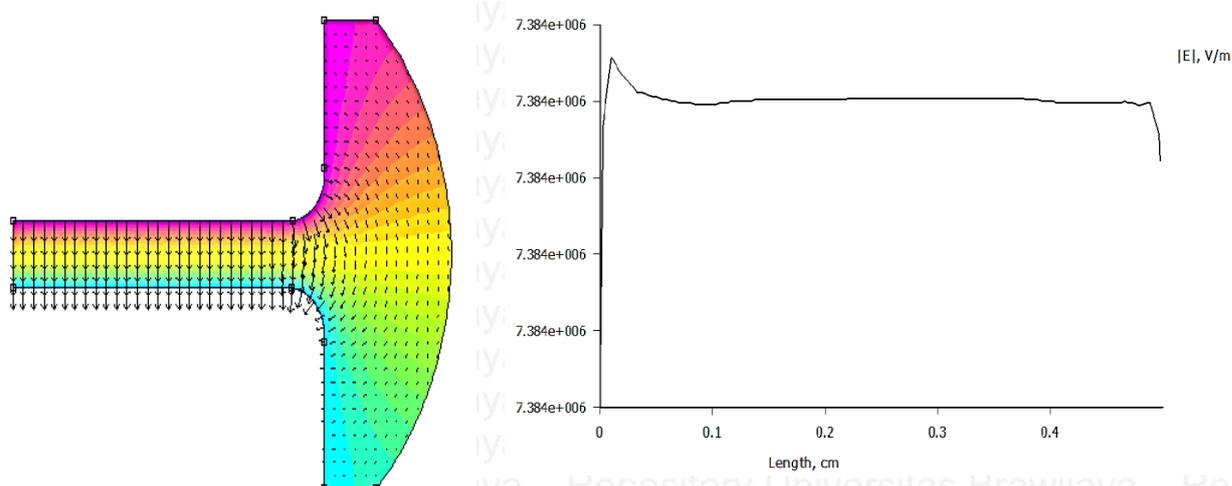
dibandingkan dengan permitivitas minyak, jerami akan bergerak ke arah medan listrik tertinggi dihasilkan yaitu pada ujung elektroda jarum. Semakin jauh dari ujung elektroda jarum, maka medan listrik akan semakin kecil. Hal ini membuat jerami yang bergerak pada pengamatan dengan elektroda jarum-piring hanya satu buah karena posisi jerami lain jauh dari ujung jarum.

4.4 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Homogen dan Non Homogen Dalam Pengujian Minyak Transformator

Setelah didapat data permitivitas minyak transformator sebesar 2.3318 maka dapat dilakukan simulasi distribusi medan listrik untuk mengetahui penyebaran medan listrik pada elektroda homogen dan non homogen. Simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dan piring-piring dilakukan menggunakan Femm 4.2. Dari hasil simulasi dapat diketahui kuat medan maksimum dari elektroda yang diuji.

4.4.1 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dengan Medan Homogen

Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda homogen pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 5mm dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Piring-piring Dengan Jarak Sela 5mm

- (a) Simulasi Distribusi Medan Listrik
- (b) Grafik Kuat Medan Listrik

Gambar 4.16 (a) adalah hasil simulasi distribusi medan listrik pada elektroda piring-piring. Pada gambar ini dapat dilihat bahwa penyebaran medan listrik yang terjadi pada

elektroda piring-piring adalah merata. Sehingga, pada elektroda piring-piring mempunyai medan listrik yang homogen atau seragam. Gambar 4.16 (b) adalah grafik kuat medan listrik pada elektroda piring-piring. Pada gambar ini dapat dilihat grafik cenderung konstan pada sepanjang permukaan piring. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada elektroda piring-piring adalah seragam atau homogen.

Dari Gambar 4.16 (b) dapat dilihat bahwa kuat medan tertinggi pada elektroda piring-piring bernilai 7.384×10^6 V/m atau 73.84 kV/cm. Setelah mendapatkan kuat medan listrik local tertinggi maka kuat medan rata-rata dapat dihitung menggunakan persamaan (2-12) dengan U_d sebesar 36.92 kV maka didapatkan besarnya kuat medan listrik rata-rata sebagai berikut.

$$E_{rata-rata} = \frac{36.92 \text{ kV}}{0.5 \text{ cm}}$$

$$E_{rata-rata} = 73.84 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

Dengan kuat medan listrik tertinggi adalah sebesar 73.84 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata sebesar 73.84 kV/cm maka sesuai dengan persamaan (2-10) faktor efisiensi medan listrik pada elektroda piring-piring adalah sebesar

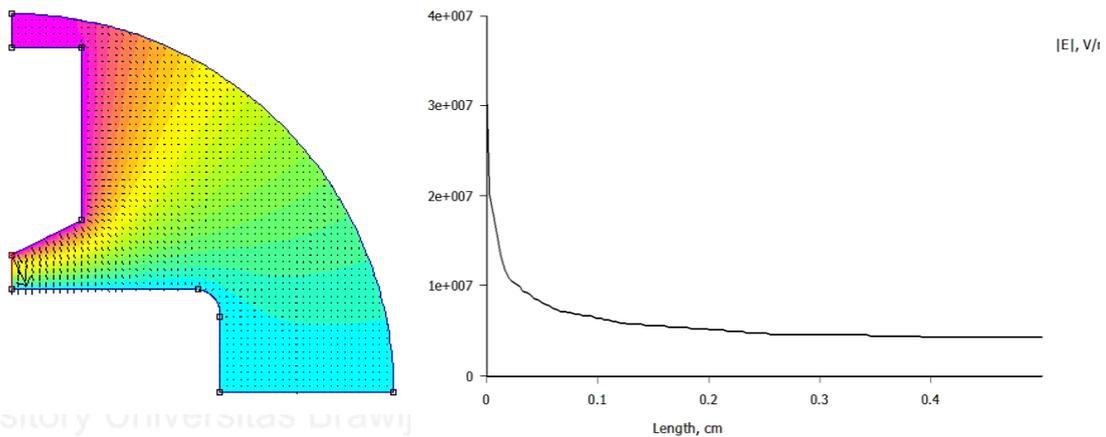
$$\eta = \frac{73.84 \text{ kV/cm}}{73.84 \text{ kV/cm}}$$

$$\eta = 1$$

Jadi, faktor efisiensi medan listrik pada elektroda pada jarak sela 5mm adalah 1 atau 100%. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 5mm adalah homogen sesuai dengan dasar teori pada sub-bab 2.4.2 dengan syarat faktor efisiensi pada medan homogen adalah $\eta=1$.

4.4.2 Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Susunan Elektroda Dengan Medan Non Homogen

Hasil simulasi medan listrik non homogen pada elektroda jarum-piring menggunakan Femm 4.2 dengan jarak sela 5mm dalam minyak transformator ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4. 17 Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Elektroda Non Homogen

(a) Hasil Simulasi Distribusi Medan Listrik

(b) Grafik Kuat Medan Listrik

Pada Gambar 4.17 adalah hasil simulasi distribusi medan listrik pada elektroda jarum-piring dengan jarak sela 5mm. Dari Gambar 4.17 (a) dapat dilihat bahwa distribusi medan pada ujung elektroda jarum tidak seragam. Gambar 4.17 (b) adalah grafik kuat medan listrik pada medan non homogen. Dari grafik dapat dilihat bahwa kuat medan listrik maksimum terjadi pada ujung jarum sedangkan saat menjauhi ujung jarum medan listrik cenderung menurun. Hal ini menunjukkan bahwa penyebaran medan pada elektroda non homogen tidak merata. Makin dekat dengan ujung elektroda jarum maka kuat medan listriknya akan semakin besar.

Dari Gambar 4.17 (b) dapat dilihat bahwa besar kuat medan listrik maksimum adalah 3.20×10^7 V/m atau 320 kV/cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik maksimum pada elektroda jarum-piring, maka besar kuat medan listrik rata-rata pada jarak sela 5mm dapat dihitung menggunakan persamaan (2-12) pada U_d sebesar 28.58 kV adalah

$$E_{rata-rata} = \frac{28.58 \text{ kV}}{0.5 \text{ cm}}$$

$$E_{rata-rata} = 57.16 \text{ kV/cm}$$

Dengan kuat medan listrik rata-rata sebesar 57.16 kV/cm dan kuat medan maksimum sebesar 125.18 kV/cm maka menggunakan persamaan (2-10) faktor efisiensi medan pada elektroda non homogen adalah

$$\eta = \frac{57.16 \text{ kV/cm}}{320 \text{ kV/cm}}$$

$$\eta = 0.178$$

Jadi, faktor efisiensi medan listrik pada elektroda jarum-piring adalah sebesar 0.178 atau bila dijadikan dalam persen yaitu 17.8%. Besarnya faktor efisiensi pada elektroda jarum-piring tersebut menunjukkan bahwa penyebaran distribusi medan listrik pada jarum piring adalah non homogen sesuai dengan dasar teori pada sub-bab 2.5.2. Faktor efisiensi medan non homogen adalah $\eta < 1$.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari data hasil penelitian studi analisis pergerakan jerami pada minyak transformator Shell Diala B dalam medan homogen dan non homogen didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter ketahanan dari isolasi minyak Shell Diala B ini didapatkan nilai permitivitas relative sebesar 2.3318 dan nilai resistivitasnya sebesar $650.99\text{M}\Omega\text{m}$ serta konduktivitasnya sebesar $1.5314 \times 10^{-9} \text{ Sm}^{-1}$. Nilai permitivitas relatif tersebut digunakan untuk simulasi medan listrik dengan hasil simulasi pada elektroda piring-piring dengan medan listrik merata (homogen) ditunjukkan dengan faktor efisiensi medan listrik sebesar 1 dan pada elektroda jarum-piring dengan medan listrik tidak merata (non homogen) ditunjukkan dengan faktor efisiensi medan listrik sebesar 0.178.
2. a. Hubungan arus bocor pada setiap tingkat kontaminan dengan kontaminan tertinggi sebesar 7.5% adalah naik secara linier dengan kenaikan tegangan AC. Pada tingkat kontaminan tertinggi (7.5%) pada elektroda piring-piring dan jarum-piring memberikan arus bocor berturut-turut sebesar $17.6\mu\text{A}$ dan $14.57\mu\text{A}$ pada tegangan AC 5kV dan meningkat pada elektroda piring-piring menjadi $66.23\mu\text{A}$ pada tegangan AC 10kV.
b. Hubungan arus bocor pada setiap tingkat tegangan dengan kenaikan tingkat kontaminan adalah naik secara kuadratik. Pada tingkat tegangan tertinggi 10kV memberikan arus bocor sebesar $29.9\mu\text{A}$ dengan kontaminan 7.5% untuk elektroda piring-piring dan sebesar $14\mu\text{A}$ pada tegangan 10kV dengan kontaminan 7.5% untuk elektroda jarum-piring.
3. Konsentrasi serbuk jerami dalam minyak Shell Diala B menurunkan tegangan tembus secara signifikan. Dari minyak murni setelah pemanasan dengan tegangan tembus 23.98kV dan menurun secara drastic pada tingkat tegangan tembus 3.90kV dengan konsentrasi kontaminan 7.5%. Dengan kata lain,

kenaikan konsentrasi serbuk jerami 7.5% menurunkan tegangan tembus sebesar 83.73%.

4. Homogenitas medan berpengaruh terhadap pergerakan jerami dalam minyak transformator. Pada susunan elektroda piring-piring (homogen) jarum akan bergerak ke arah permukaan elektroda piring secara merata. Namun pada elektroda jarum piring (non homogen) jarum akan tertarik ke arah stress medan maksimum yaitu pada ujung jarum. Saat tegangan dinaikkan, jerami akan terpolarisasi oleh medan listrik disekitar elektroda. Pergerakan disebabkan oleh adanya gaya F yang timbul karena perbedaan permitivitas jerami dan minyak. Jika permitivitas jerami lebih besar dibanding permitivitas minyak maka jerami akan bergerak ke arah medan dan listrik tertinggi. Semakin besar permitivitas jerami maka gaya yang ditimbulkan akan semakin besar.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk menyempurnakan penelitian ini adalah:

1. Perlunya pengujian lebih lanjut dengan mempertimbangkan dimensi pengotor serbuk jerami serta ukuran pori-pori kain yang digunakan dalam penyaringan.
2. Perlunya pengujian lebih lanjut mengenai tegangan tembus dan arus bocor pada minyak transformator dengan rentang level kontaminan 0% - 1%.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar.1983. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta Timur : Penerbit Ghalia Indonesia
- J.A.KOK. 1961. *Electrical Breakdown Of Insulating Liquids*. London: Philips Technical Library.
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung: Penerbit ITB.
- Lu,W. Q, Liu. 2015. *Effect Of Cellulose Particle on Streamer Initiation and Propagation in Dielectric Liquids*. Jurnal IEEE.
- Muhaimin. 1999. *Bahan – Bahan Listrik untuk Politeknik*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita.
- Mahmud,Shekar. Golosnoy, Igor. 2012. *Bridging Phenomenon in Contaminated Transformer Oil*. Jurnal IEEE.
- Mahmud,Shekar. Golosnoy, Igor. 2014. *Effect of Different Shape of Electrodes on Bridging in Contaminated Transformator Oil*. Jurnal IEEE
- Naidu, M.S dan V. Kamaraju. 1995. *High Voltage Engineering Second Edition*. New Delhi: McGraw Hill.
- Shell. Web. 10 November 2016. *Shell Diala Transformers Oil*.
<http://www.shell.com/business-customers/lubricants-for-business/shell-diala-electrical-oils.html>
- SPLN 49-1.1982. *Pedoman Penerapan Spesifikasi dan Pemeliharaan Minyak Isolasi*. Jakarta :LMK.
- Tobing L, Bonggas. 2012. *Dasar- Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta : Penerbit Erlangga

Lampiran 1a. Data Tegangan Tembus Minyak Murni

Tabel L. 1 Data Tegangan Tembus Minyak Murni Tanpa Pemanasan Pada Elektroda Standar Jarak sela 2.5mm

Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
16.89	19.4625
17.87	
17.4	
25.69	

Tabel L. 1 Data Tegangan Tembus Minyak Murni dengan Pemanasan Pada Elektroda Standar Jarak Sela 2.5mm

Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
19.51	22.37
30.92	
21.52	
17.52	

Tabel L. 2 Data Tegangan Tembus Minyak Murni Pada Elektroda Piring-piring dengan Jarak Sela 5mm

Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
35.5	36.925
37.2	
36.9	
38.1	

Tabel L. 3 Data Tegangan Tembus Minyak Murni Pada Elektroda Jarum-piring dengan Jarak Sela 5mm

Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
26.71	28.58
27.56	
28.9	
31.15	

Lampiran 1b. Data Tengan Tembus Minyak Shell Diala B dengan Pengotor Serbuk Jerami dan dengan Penyaringan

Tabel L. 4 Tegangan tembus dengan pengotor 3% dalam volume minyak 300ml pada elektroda standar

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	6.1	5.3625
2	5.32	
3	4.73	
4	5.3	

Tabel L.5 Tegangan tembus setelah penyaringan pada pengotor 3% pada elektroda standar

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	12	12.65
2	12.6	
3	12.8	
4	13.2	

Tabel L.6 Tegangan tembus dengan pengotor 5% dalam volume minyak 300ml pada elektroda standar.

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	5.05	4.6075
2	4.65	
3	4.83	
4	3.9	

Tabel L.7 Tegangan tembus setelah penyaringan pada pengotor 5% pada elektroda standar

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	11.59	12.395
2	12.3	
3	12.69	
4	13	

Tabel L.8 Tegangan tembus dengan pengotor 7.5% dalam volume minyak 300ml pada elektroda standar.

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	4.2	3.8
2	3.9	
3	3.8	
4	3.3	

Tabel L.9 Tegangan tembus setelah penyaringan pada kontaminan 7.5% pada elektroda standar

No.	Tegangan Tembus (kV)	Rata-rata (kV)
1	11.9	13.2225
2	10.59	
3	15.9	
4	14.5	

Lampiran 2. Data Pengujian Arus Bocor

Tabel L.10 Data hasil pengujian arus bocor pada minyak Shell Diala B Murni pada jarak sela 10mm dengan elektroda piring-piring

No	Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
1	4.90	5.00	10.40	10.70
2	5.10		10.90	
3	5.00		10.80	
1	9.99	10.00	29.90	29.97
2	9.99		30.00	
3	10.01		30.01	
1	14.90	14.98	34.30	34.33
2	15.01		34.30	
3	15.03		34.40	
1	20.01	20.01	43.80	43.77
2	20.02		43.80	
3	19.99		43.70	
1	24.99	25.00	54.10	54.40
2	25.01		54.60	
3	25.01		54.50	
1	30.09	30.08	65.10	65.00
2	30.09		65.10	
3	30.07		64.80	

Tabel L.11 Data hasil pengujian arus bocor pada minyak murni pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 15mm

No	Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
1	4.99	5.00	8.10	8.17
2	4.99		8.10	
3	5.02		8.30	
1	9.99	10.00	16.80	16.83
2	9.99		16.80	
3	10.02		16.90	
1	15.09	15.08	25.40	25.33
2	15.09		25.50	
3	15.07		25.10	
1	19.99	20.00	33.90	33.97
2	20.00		34.00	
3	20.01		34.00	
1	25.10	25.03	42.90	42.63
2	24.99		42.40	
3	25.00		42.60	
1	30.05	30.05	50.09	50.39
2	30.02		50.08	
3	30.08		51.00	

Tabel L.12 Data hasil pengujian arus bocor pada elektroda jarum-piring dengan jarak sela 10mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Arus Bocor rata-rata (μA)
5.09	5.09	5.60	5.57
5.08		5.50	
5.09		5.60	
9.99	9.99	11.00	10.97
9.99		10.90	
10.00		11.00	
15.07	15.08	16.80	16.83
15.09		16.90	
15.08		16.80	
19.99	20.01	22.30	22.37
20.01		22.40	
20.02		22.40	
25.09	25.02	27.80	27.10
24.99		26.80	
24.99		26.70	

Tabel L.13 Data hasil pengujian arus bocor pada elektroda jarum-piring dengan jarak sela 15mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
4.99	5.01	4.60	4.73
5.02		4.80	
5.01		4.80	
9.99	10.04	9.40	9.47
10.08		9.50	
10.05		9.50	
15.08	15.06	14.50	14.47
15.07		14.50	
15.02		14.40	
19.99	20.01	19.20	19.20
20.01		19.20	
20.02		19.20	
25.05	25.07	24.20	24.23
25.09		24.30	
25.06		24.20	

Tabel L.14 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 3% pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 10mm

No	Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
1	4.99	4.99	12.50	12.50
2	4.99		12.40	
3	5.00		12.60	
1	9.99	10.03	33.40	34.10
2	10.09		35.20	
3	10.02		33.70	
1	14.30			Tembus
2				
3				

Tabel L.15 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 3% pada elektroda piring-piring dengan jarak sela 15mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
4.99	5.00	9.50	9.80
4.99		9.90	
5.01		10.00	
9.99	10.03	22.30	22.47
10.08		22.60	
10.03		22.50	
14.99	15.04	28.90	29.13
15.09		29.50	
15.05		29.00	

Tabel L.16 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 3% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 10mm

No	Tegangan (kV)	Tegangan Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Arus Bocor rata-rata (μA)
1	4.99	5.00	9.10	9.30
2	4.99		9.30	
3	5.01		9.50	
1	9.99	10.01	23.50	23.49
2	10.01		23.16	
3	10.04		23.80	
1	14.19			Tembus

Tabel L.17 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 3% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 15mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
4.99	5.01	5.10	5.30
5.01		5.30	
5.03		5.50	
9.99	10.01	11.10	13.43
10.01		14.40	
10.03		14.80	
15.00	15.03	22.20	24.43
15.09		27.30	
15.01		23.80	

Tabel L.18 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 5% pada elektroda piring-piring pada jarak sela 10mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-rata (μ A)
4.99	5.00	15.00	15.00
4.99		14.90	
5.02		15.10	
10.01	10.01	48.30	48.30
9.99		48.00	
10.03		48.60	
13.00			Tembus

Tabel L.19 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 5% pada elektroda piring-piring pada jarak sela 15mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μ A)	Rata-rata (μ A)
4.99	4.99	12.80	12.90
4.99		12.90	
5.00		13.00	
9.99	10.05	25.60	26.33
10.09		26.90	
10.08		26.50	
15.05			Tembus

Tabel L.20 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 5% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 10mm

Tegangan (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
4.99	5.02	12.20	12.57
5.04		12.60	
5.04		12.90	
10.00			Tembus

Tabel L.21 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 5% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 15mm

Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
5.01	5.04	6.00	6.33
5.03		6.30	
5.09		6.70	
9.99			Tembus

Tabel L.22 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 7.5% pada elektroda piring-piring pada jarak sela 10mm

Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
5.00	5.01	17.70	17.60
5.03		17.50	
4.99		17.60	
9.99	10.04	60.30	66.23
10.09		72.80	
10.03		65.60	
12.65			Tembus

Tabel L.23 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 7.5% pada elektroda piring-piring pada jarak sela 15mm

Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
5.06	5.05	17.80	17.77
5.09		18.00	
4.99		17.50	
9.99	10.05	27.80	29.90
10.09		31.00	
10.08		30.90	
15.00			Tembus

Tabel L.24 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 7.5% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 10mm

Tegangan Sumber(kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
5.02	5.03	14.80	14.57
4.99		13.90	
5.09		15.01	
9.98			Tembus

Tabel L.25 Data pengujian arus bocor dengan pengotor 7.5% pada elektroda jarum-piring pada jarak sela 15mm

Tegangan Sumber (kV)	Rata-rata (kV)	Arus Bocor (μA)	Rata-rata (μA)
5.06	5.05	14.10	14.00
5.09		14.30	
5.01		13.60	
10.00			Tembus

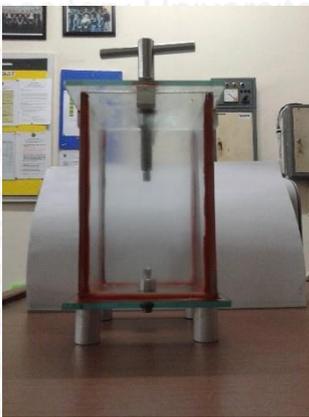
Lampiran 3. Foto Pengujian



Gambar L.1 Tabung Uji dengan Elektroda Standar 2.5mm



Gambar L.2 Tabung Uji dengan Elektroda Cincin



Gambar L.3 Tabung Uji untuk Pengujian Arus Bocor



Gambar L.4 Control Desk untuk Pengujian Tegangan Tinggi AC dan DC



Gambar L.5 Multimeter pada Pengujian Arus Bocor



Gambar L.6 Elektroda Jarum dan Piring yang Digunakan Dalam Pengujian



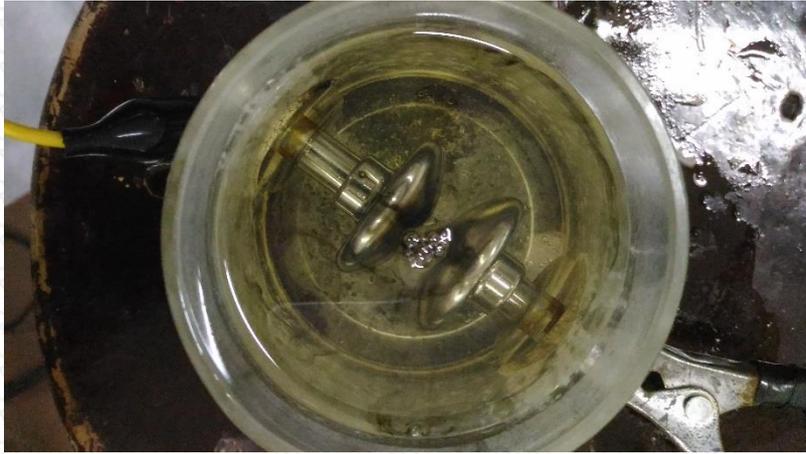
Gambar L.7 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi AC



Gambar L.8 Rangkaian Pengujian Tegangan Tinggi DC



Gambar L.9 Jerami yang Digunakan Dalam Pengujian



Gambar L.10 Pengujian Tegangan Tembus Minyak Shell Diala B Murni



Gambar L.11 Pengujian Arus Bocor Minyak Shell Diala B Murni Pada Elektroda Jarum Piring



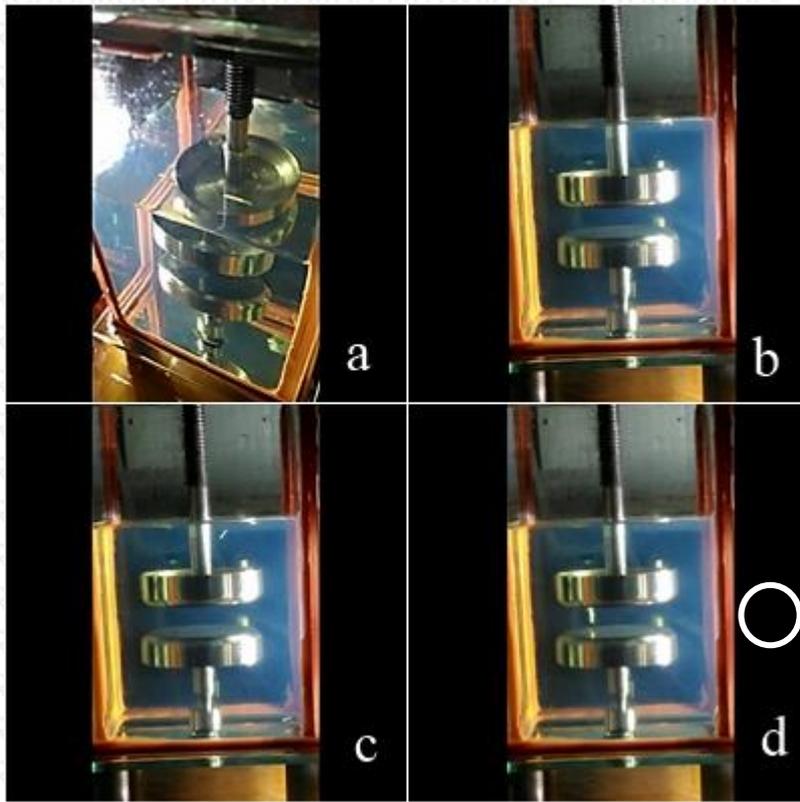
Gambar L.12 Pengujian Arus Bocor Dalam Minyak Murni Pada Elektroda Piring-piring



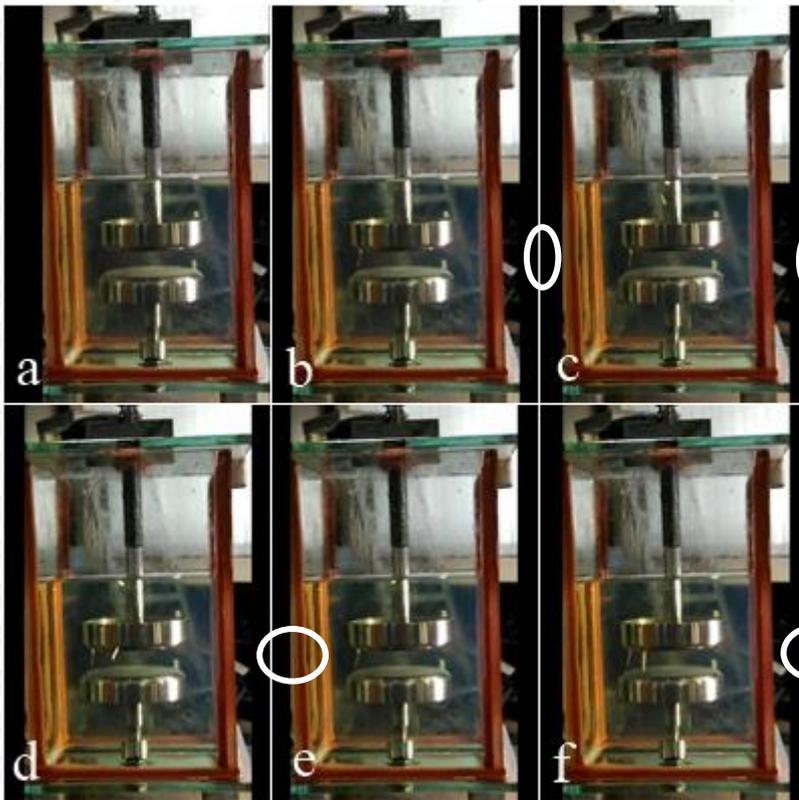
Gambar L.13 Jembatan Serbuk Jerami Saat Pengujian Arus Bocor



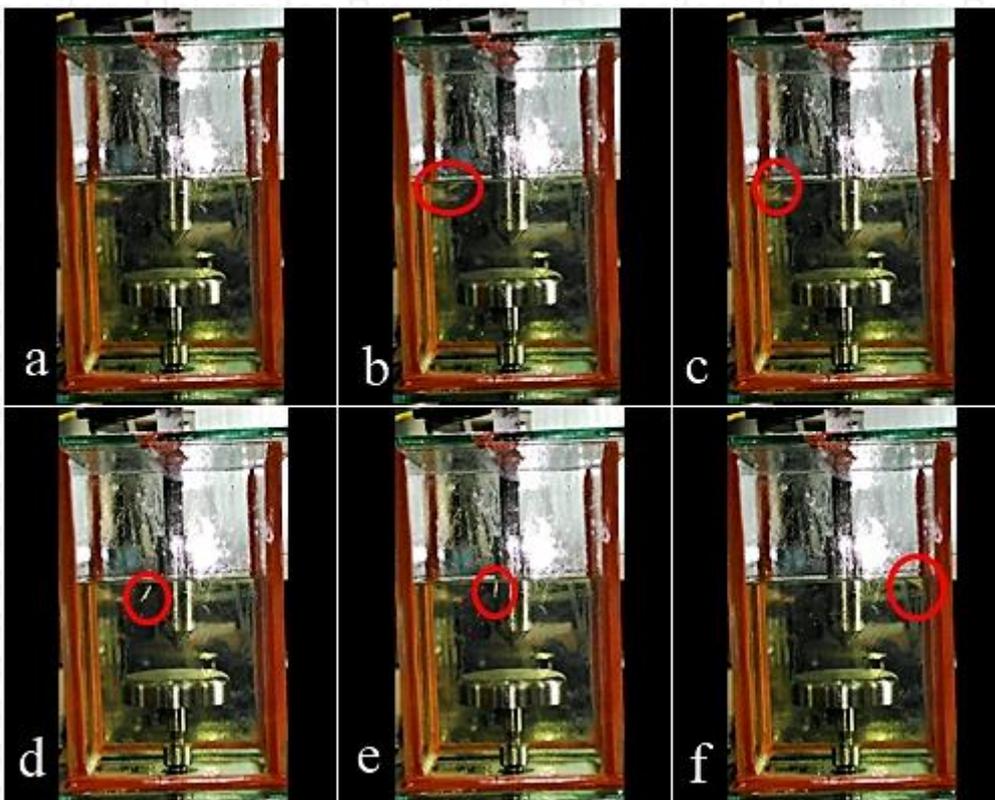
Gambar L.14 Jembatan Jerami Saat Pengujian Arus Bocor Pada Elektroda Jarum Piring



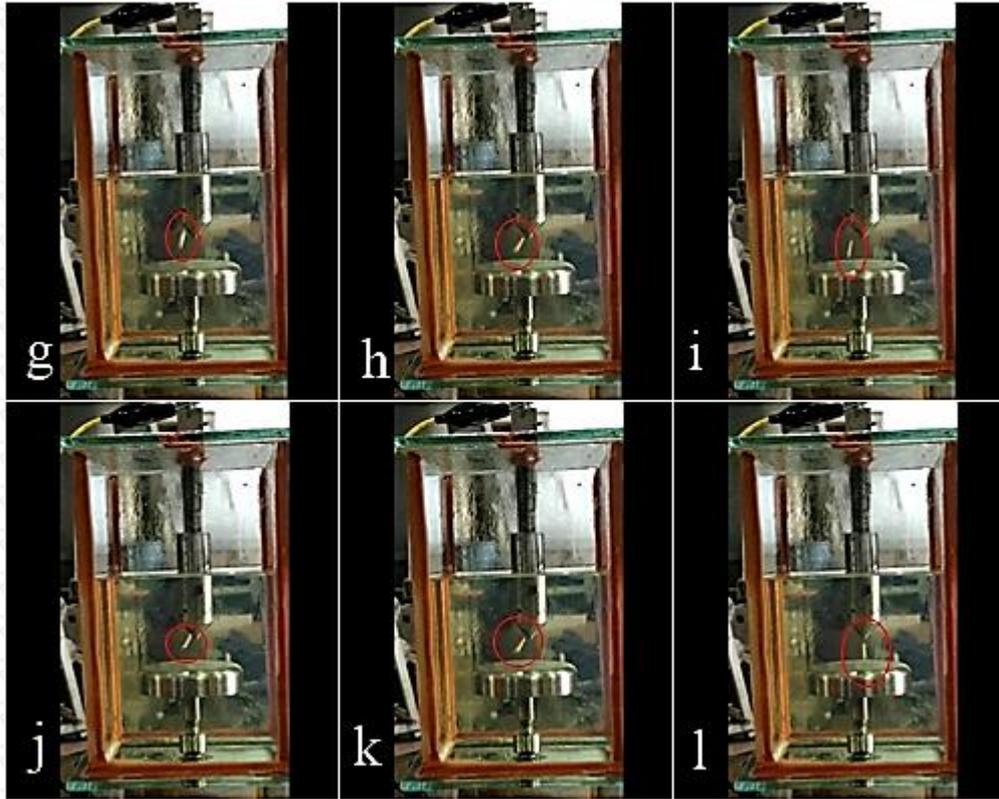
Gambar L.15 Pergerakan Partikel Jerami dengan Tegangan Sumber 5kV



Gambar L.16 Pergerakan Jerami Pada Tegangan Sumber 15kV Pada Elektroda Piring-piring



Gambar L.17 Pergerakan Jerami Pada Tegangan Sumber 5kV pada Elektroda Jarum-Piring



Gambar L.18 Pergerakan Jerami Pada Tegangan Sumber 15kV Pada Elektroda Jarum-Piring



PT PLN (Persero) P3B

 PANDUAN PEMELIHARAAN TRAFU TENAGA No. Dokumen : P3B/O&M Trafo/001.01
 Berlaku Efektif : 13 Juni 2003

Tabel Dielectric Strength dari Minyak untuk Tegangan Operasi.

Tegangan tembus minyak transformator		
Tegangan operasi (kV)	Untuk minyak baru	Untuk minyak sudah dipakai
	IEC 156 KV/2,5 mm	IEC 156 KV/2,5 mm
> 170	≥ 50	≥ 50
70 - 170	≥ 50	≥ 40
< 70	≥ 50	≥ 30

Batasan Pengusahaan Minyak Transformator Sesuai Metoda ASTM

Jenis test	ASTM no:	Batasan Tegangan		
		≤ 69 kV	> 69 < 288 kV	≥ 345 kV
Dielectric Str	D 877	26	26	26
Asam (mg. KOH/g)	D 974	0,05 – 0,2	0,05 – 0,2	0,05 – 0,2
IFT (dynes/cm)	D 971	30	30	35
Kandungan air (ppm)	D 1533	35	20	15
Kandungan gas (%)	D 2945	2	2	2
Warna	D 1500	1,5	1,5	1,5
Kejernihan	D 1524	Jernih	Jernih	Jernih
Flash point 0C	D 92	140	140	140
Pour point	D 97	- 40	- 40	- 40
Power factor	D 1533	< 30	30 – 34,9	≥ 35
Berat jenis	D 1298	0,91	0,91	0,91
Viscositas	D 445	12	12	12

Bilamana batasan tersebut dilampaui agar difilter ulang, bilamana *Breakdown Voltage* sudah tidak bisa dinaikkan lagi (endapan < dari 0,5 ppm, moisture < 120 ppm, dielectric strength < 30 kV) sebaiknya minyak dibuang.

Gambar L.19 Batasan Pengusahaan Minyak Transformator



PT PLN (Persero) P3B

 PANDUAN PEMELIHARAAN TRAFU TENAGA No. Dokumen : P3B/O&M Trafo/001.01
 Berlaku Efektif : 13 Juni 2003

Tabel Beberapa Klasifikasi Hasil Test Minyak Trafo

Jenis Test	Standar ASTM no:	Dapat dipakai	Diragukan	Tidak boleh dipakai
Asam	D 974	≤ 0,5	0,60 – 0,10	> 0,10
IFT	D 971	≥ 32,0	28,0 – 31,9	< 27,90
Dielektrik Str.	D 877	≥ 30,0	25 – 29	< 25
Warna	D 1524	≤ 3,50	< 0,84	> 3,50
Berat Jenis	D 1298	0,84 – 0,91		> 0,91
Visual	D 1524	Terang	0,19 – 0,11	
DBPC	D 2668	≥ 20,0	0,1 – 0,3	≤ 0,10
Power Factor	D 924	25 °C < 0,1	3,0 – 3,99	> 0,30
		100 °C < 299	30 – 34,9	> 4,00
Karl Fisher	D 1533	< 30	Tergantung pada data	≥ 35
Kand. Gas		Tergantung pada data	101 - 249	Tergantung pada data
ICP				
Kand. Logam		< 100		101 - 249
Angka Furam	D 5837	Optimal		
PCB	D 4059	≥ 140 °C		
Flash Point	D 72	≤ -40 °C		
Pour Point	D 97	12,00		
Viscosity, Cst	D 88	0,30		
Inhibitor (%)	D 2668	35		
Air (ppm)	D 1533			

Gambar L.20 Klasifikasi Hasil Test Minyak Transformator

