

SKRIPSI

**PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN MEDAN
LISTRIK PADA RESISTIVITAS MINYAK TRANSFORMATOR**

Disusun dan diajukan oleh:

TASYA WULAN RAMADHANI RAMLY

D041 19 1064



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN MEDAN LISTRIK PADA RESISTIVITAS MINYAK TRANSFORMATOR

Disusun dan diajukan oleh

Tasya Wulan Ramadhani Ramly

D041191064

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 6 Maret 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP 197609142008011006

Ir. Gassing, M.T.
NIP 196007201987021001

Ketua Program Studi,

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Tasya Wulan Ramadhani Ramly
NIM : D041191064
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN MEDAN LISTRIK PADA RESISTIVITAS MINYAK TRANSFORMATOR

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 6 Maret 2024

Yang Menyatakan



Tasya Wulan Ramadhani Ramly



KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan atas kehadiran ALLAH SWT yang telah memberikan Rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “Pengaruh Temperatur dan Tekanan Medan Listrik Pada Resistivitas Minyak Transformator”

Penyusunan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk kelulusan pada program sarjana Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini mendapati berbagai kesulitan dan rintangan, namun berkat usaha yang disertai doa akhirnya penyusunan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, hal tersebut tentu tidak lepas dari bantuan, motivasi, bimbingan serta saran-saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua Tercinta Ibu Heriyanti Surya dan Bapak Ramli Jaya yang telah memberikan kepercayaan untuk melanjutkan pendidikan kuliah, serta menjadi penyemangat penulis sebagai sandaran terkuat dari kerasnya dunia, yang tiada hentinya selalu memberikan cinta, doa, dan nasihat yang diberikan kepada penulis.
2. Saudara Penulis Tersayang Kakak Arya Irsyad Ramly dan Adik Zahra Reski Amelia Ramly yang selalu memberikan dukungan, doa, cinta dan sudah menjadi *mood boster* penulis.
3. Bapak Dr. Ikhlas Kitta, ST., MT. sebagai dosen pembimbing I dan Bapak Ir. Gassing, MT. selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan tenaganya dalam memberikan bimbingan serta saran dan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT., IPM. sebagai dosen penguji I dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, ST., MT. selaku dosen penguji II yang telah menyempatkan waktu dan tenaganya untuk hadir selama seminar penelitian, serta ide, saran dan masukannya dalam penyusunan tugas akhir ini.



5. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh dosen dan pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas ilmu dan pengalaman dalam kelancaran perkuliahan serta penyusunan tugas akhir ini.
7. Nabila, Rara, Ira, Ummu dan Ainun yang setia menemani kegundahan maupun keceriaan hari-hari penulis.
8. Ainun, Ima, Dwi dan Raste yang telah mendorong, memotivasi, memberi semangat dan menjadi tempat penulis berkeluh kesah selama masa studi.
9. Kakak Adit yang selalu meluangkan waktunya, menghibur dalam kesedihan, menjadi tempat berkeluh kesah dan memberikan semangat serta dukungan selama proses penelitian dan juga penyusunan tugas akhir ini.
10. Teman-teman seperjuangan di Lab riset Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Sinta, Zilpa, Sahid, Nur Fadil, Dennis, Jendri, Edo, Richard, Riskal dan Imam yang telah mendukung, memberikan masukan dan membantu penulis dalam melaksanakan penelitian tugas akhir.
11. Kakak Arham, Kakak Rein dan Rahmi yang telah mendukung, mendorong dan membantu penulis dalam melaksanakan penelitian tugas akhir.
12. Teman-teman TR19GER yang berperan banyak memberikan pengalaman, dukungan, dan cerita selama masa studi penulis, karena kita kuat bersama.
13. Teman-teman KKN 108 Universitas Hasanuddin terkhususnya Perhutanan Sosial Pare-Sidrap Kec. Compong, Mallo, Fikar, Zubair, Yusril, Ike, Tuti, Indah dan Umni atas pengalaman yang luar biasa selama melakukan pegabdian pada Masyarakat.
14. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang sudah mau membantu penulis selama proses penulisan tugas akhir hingga selesai.



Semoga Allah SWT, Melimpahkan Karunia-Nya serta membalas kebaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan yang belum sampai pada titik kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran penulis harapkan, mudah-mudahan ini bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Gowa, 13 Februari 2024

Penulis



ABSTRAK

TASYA WULAN RAMADHANI RAMLY. *PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN MEDAN LISTRIK PADA RESISTIVITAS MINYAK TRANSFORMATOR* (dibimbing oleh Ikhlas Kitta dan Gassing)

Dalam sistem tenaga listrik terdapat salah satu peralatan yang sangat penting yaitu transformator. Umumnya, transformator beroperasi dalam jangka waktu yang lama secara terus-menerus selama sistem tenaga listrik masih aktif. Hal ini dapat menyebabkan transformator mengalami gangguan berupa panas atau kegagalan isolasi. solusi untuk mencegah agar tidak terjadi kerusakan pada transformator dapat dilakukan pemeliharaan, salah satunya pengujian tegangan tembus minyak transformator. Menurut standart SPLN-49-1 dengan metode uji IEC 60296:2012, tegangan tembus dapat dikatakan baik jika tegangan tembus minyak transformator > 30 kV. Pada pengujian yang dilakukan, akan diamati karakteristik tegangan tembus dan tekanan medan listrik yang muncul pada minyak transformator jenis Nynas Nitro Libra terhadap pengaruh suhu antara 30°C sampai 70°C dengan 4 pengujian jarak sela yaitu 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm dan 10 mm. Metode pengujian menggunakan elektroda jenis setengah bola yang diuji berupa tegangan bolak balik AC dengan frekuensi 50 Hz. Pada pengujian ini didapatkan tegangan tembus pada suhu 30°C dengan jarak sela 2,5 mm yaitu 26,31 kV yang belum memenuhi standar IEC 60296, namun saat dilakukan pengujian dengan suhu 70°C dengan jarak sela 2,5 mm didapatkan tegangan tembus yang meningkat hingga 64,47 kV. Semakin jauh jarak sela yang digunakan maka semakin besar pula tegangan tembus yang dihasilkan. Kemudian untuk tekanan medan listrik pada suhu 30°C dengan jarak sela 2,5 mm didapatkan sebesar 10,524 kV/mm dan pada suhu 70°C dengan jarak sela 2,5 mm sebesar 25,956 kV/mm. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan medan juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu saat pengujian.

Kata kunci: Tegangan Tembus, Minyak Transformator. Tekanan medan Listrik



ABSTRACT

TASYA WULAN RAMADHANI RAMLY. *THE EFFECT OF TEMPERATURE AND ELECTRIC FIELD PRESSURE ON THE RESISTIVITY OF TRANSFORMER OIL* (Supervised by Ikhlas Kitta dan Gassing)

In the electric power system there is one very important equipment, that is transformer. Usually, transformers operate for a long period of time continuously as long as the power system is still active. This can cause the transformer to be disturbed in the form of heat or insulation failure. solutions to prevent damage to the transformer can be carried out maintenance, one of which is testing the breakdown voltage of the transformer oil. According to the SPLN-49-1 standard with the IEC 60296:2012 test method, the breakdown voltage can be said to be good if the breakdown voltage of the transformer oil is > 30 kV. In the tests carried out, the characteristics of the breakdown voltage and electric field pressure that appear in the Nynas Nitro Libra type transformer oil will be observed against the influence of temperatures between $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ with 4 testing intervals of 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm and 10 mm. The test method uses a half-ball type electrode that is tested in the form of AC alternating voltage with a frequency of 50 Hz. In this test, the breakdown voltage at $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a spacing of 2.5 mm is 26.31 kV which does not meet the IEC 60296 standard, but when testing with a temperature of $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a spacing of 2.5 mm, the breakdown voltage increases to 64.47 kV. The greater the spacing used, the greater the breakdown voltage produced. Then for the electric field pressure at a temperature of $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a gap distance of 2.5 mm, it is found to be 10.524 kV/mm, and at a temperature of $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a gap distance of 2.5 mm, it is 25.956 kV/mm. This indicates that the electric field pressure also increases with the temperature rise during testing.

Keywords: Transformer oil, breakdown voltage, electric field pressure



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Dielektrik Cair.....	6
2.2 Transformator.....	7
2.3 Prinsip Kerja Transformator.....	9
2.4 Bagian-bagian Transformator dan Fungsinya.....	10
2.5 Bahan Isolasi.....	12
2.6 Bahan Isolasi Cair.....	13
2.7 Teori Kegagalan Isolasi Cair.....	16
2.8 Minyak Transformator.....	19
2.9 Bahan Dasar Pembuatan Minyak Transformator.....	20
2.10 Persyaratan Minyak Sebagai Isolasi.....	22
2.11 Permunian dan Perawatan Pada Minyak Transformator.....	24
2.12 Hubungan Antara Suhu dan Resistivitas.....	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Metode Penelitian.....	28
3.2 Waktu Penelitian dan Lokasi Penelitian.....	28
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	33
3.5 Rangkaian Pengujian.....	33
3.5 Prosedur Pengujian.....	33
3.6 Diagram Alur Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Data Hasil Pengujian.....	37
4.2 Analisis Hasil Pengujian Minyak Transformator (Nynas Nitro Libra) dalam kondisi baru dengan jarak sela 2,5 mm.....	37
4.2.1 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tegangan Tembus Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 2,5 mm	37



4.2.2 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tekanan Medan Listrik Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 2,5mm.....	40
4.3 Analisis Hasil Pengujian Minyak Transformator (Nynas Nitro Libra) dalam kondisi baru dengan jarak sela 5mm	43
4.3.1 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tegangan Tembus Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 5mm	43
4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tekanan Medan Listrik Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 5mm.....	46
4.4 Analisis Hasil Pengujian Minyak Transformator (Nynas Nitro Libra) dalam kondisi baru dengan jarak sela 7,5mm.....	48
4.4.1 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tegangan Tembus Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 7,5mm	48
4.4.2 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tekanan Medan Listrik Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 7,5 mm.....	52
4.5 Analisis Hasil Pengujian Minyak Transformator (Nynas Nitro Libra) dalam kondisi baru dengan jarak sela 10mm	55
4.5.1 Analisis Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tegangan Tembus Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 10 mm	55
4.5.2 Hasil Pengujian Terhadap Temperatur Dengan Tekanan Medan Listrik Pada Resistivitas Minyak Transformator Jarak Sela 10 mm ..	58
4.6 Analisis Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Terhadap Suhu Minyak Transformator (Nynas Nitro Libra)	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Transformator Daya.....	7
Gambar 2 Transformator Distribusi	8
Gambar 3 Transformator Distribusi Transformator Terpasang di Tiang Fase Tunggal.....	8
Gambar 4 Transformator Pengukuran.....	9
Gambar 5 Elektromagnetik Pada Transformator.....	10
Gambar 6 Minyak Transformator.....	19
Gambar 7 Struktur Kimia Senyawa Parafin Hidrokarbon	21
Gambar 8 Struktur Kimia Senyawa Napthena	21
Gambar 9 Struktur Kimia Senyawa Aromatik Hidrokarbon.....	22
Gambar 10 Minyak Transformator.....	28
Gambar 11 Meja Kontrol	29
Gambar 12 Transformator Uji.....	29
Gambar 13 Connecting Cup.....	30
Gambar 14 Floor Pedestal.....	30
Gambar 15 Kabel Penghubung	30
Gambar 16 Resistor 10M Ω	31
Gambar 17 Measuring Capacitor 100pF	31
Gambar 18 Chamber Minyak.....	31
Gambar 19 Elektroda Setengah Bola	32
Gambar 20 Oven	32
Gambar 21 Thermometer	32
Gambar 22 Rangkaian Ekuivalen Uji Minyak Transformator	33
Gambar 23 Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 24 Tegangan Tembus Jarak Sela 2,5 mm	40
Gambar 25 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 2,5mm	42
Gambar 26 Tegangan Tembus Jarak Sela 5mm	45
Gambar 27 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 5mm	48
Gambar 28 Minyak Transformator Dengan Jarak Sela 7,5mm.....	52
Gambar 29 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 7,5mm	54
Gambar 30 Minyak Transformator Dengan Jarak Sela 10mm.....	58
Gambar 31 Nilai Tekanan Medan Listrik Dengan Jarak Sela 10mm.....	60
Gambar 32 Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Minyak Transformator	62
Gambar 33 Nilai Tekanan Medan Listrik Minyak Transformator	63



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Tipe Pendingin Transformator.....	11
Tabel 2 Pengujian Temperatur Terhadap Tegangan Tembus Jarak Sela 2,5 mm ..	37
Tabel 3 Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Jarak Sela 2,5 mm.....	39
Tabel 4 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 2,5mm	42
Tabel 5 Pengujian Temperatur Terhadap Tegangan Tembus jarak Sela 5 mm.....	43
Tabel 6 Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Jarak Sela 5mm.....	45
Tabel 7 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 5mm	47
Tabel 8 Pengujian Temperatur Terhadap Tegangan Tembus Jarak Sela 7,5 mm ..	49
Tabel 9 Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Jarak 7,5 mm.....	51
Tabel 10 Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 7,5mm	53
Tabel 11 Pengujian Temperatur Terhadap Tegangan Tembus Jarak 10mm	55
Tabel 12 Nilai Rata-rata Tegangan Tembus Jarak Sela 10mm.....	57
Tabel 13 Nilai Tekanan Medan Listrik Jarak Sela 10mm	60
Tabel 14 Nilai Rata-rata tegangan Tembus dan Tekanan Medan Listrik Minyak Transformator.....	61



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Energi listrik berperan sangat penting dalam kehidupan sehari-hari manusia, penggunaan energi listrik digunakan mulai dari energi listrik yang berkapasitas tinggi sampai dengan berkapasitas rendah terutama pada alat-alat elektronik. Kekurangan energi listrik dapat mengganggu aktivitas manusia karena hampir seluruh manusia tidak dapat melakukan pekerjaannya, agar energi listrik tetap stabil maka perlu memerlukan pemeliharaan pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan sebuah sistem yang meliputi beberapa bagian yang saling terhubung dan saling bekerja sama untuk memenuhi kebutuhan energi listrik.

Didalam sistem tenaga listrik terdapat salah satu alat yang sangat vital yaitu transformator. Transformator adalah suatu alat listrik statis yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet tanpa mengubah frekuensinya (Siburian, 2019). Salah satu masalah yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah transformator, hal ini disebabkan oleh transformator yang selalu beroperasi terus menerus dalam kondisi apapun yang dapat menyebabkan transformator mengalami gangguan, gangguan yang sering terjadi pada transformator yaitu panas yang diakibatkan oleh naik turunnya beban pada transformator tersebut. Karena harganya yang relatif mahal maka perlu mencegah agar tidak terjadi kerusakan pada transformator maka harus dilakukan pemeliharaan transformator dengan sebaik mungkin dengan cara pemilihan sistem isolasi yang baik dan tepat pada transformator. Sistem isolasi merupakan gabungan dari beberapa bahan isolasi yang digunakan pada suatu peralatan listrik. Bahan Isolasi adalah sifat bahan yang dipakai untuk menjalankan tugasnya mengisolasi didalam rangkaian listrik. Bahan ini merupakan sifat atau bahan yang dimana dapat memisahkan secara elektris dua buah penghantar yang berdekatan sehingga tidak terdapat kebocoran arus atau tidak terjadi



loncatan api (*flashover*). Ada tiga bentuk bahan isolasi yaitu pada, cair dan gas (Kamilatin, 2021).

Pada transformator salah satu bahan isolasi yang sering di pakai adalah bahan dengan isolasi cair yaitu minyak transformator yang di mana salah satu fungsinya yaitu sebagai pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi terbagi atas dua jenis yaitu minyak mineral dan minyak organik, sampai pada saat ini minyak isolasi jenis mineral yang sering digunakan pada transformator karena harganya yang relatif murah dan juga memiliki sifat dielektrik dan pendingin yang sangat baik. Salah satu parameter untuk mengetahui karakteristik minyak transformator tersebut dalam kondisi baik atau buruknya adalah nilai tegangan tembusnya.

Tegangan yang terjadi pada elektroda yang dapat menyebabkan bahan isolasi tembus listrik yang dimana nilai tegangan yang menimbulkan kuat medan listrik lebih besar daripada kekuatan dielektrik bahan isolasi tersebut. Tegangan tembus adalah ketika isolator sudah tidak sanggup menghadapi tekanan berupa medan listrik diantara elektroda yang mempunyai beda potensial sehingga isolator berubah menjadi konduktor. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi proses tembus listrik pada minyak transformator. Salah satunya dapat diakibatkan oleh kontaminan yang bergerak ke daerah yang bertekanan listrik diantara kedua elektroda. Tegangan tembus pada isolator cair juga dapat dipengaruhi oleh sifat alami tegangan, sistem tegangan, serta durasi waktu tegangan diterapkan. Selain itu besar tegangan tembus bergantung pada kuat dielektrik masing-masing bahan dan kehadiran unsur lain (Winanta, 2019).

Menurut SPLN 49-1 (1982), menjelaskan bahwa besar nilai tegangan tembus minyak isolator adalah sebesar 30 kV dengan jarak 2,5mm yang di mana setelah pengujian tegangan tembus nilai tegangan tembusnya dibawah 30 kV maka minyak isolasi tersebut mengalami pemburukan hal yang bisa mempengaruhi nilai tegangan tembus minyak isolasi transformator adalah adanya kontaminasi air, kotoran dan konduktif dalam minyak transformator serta perubahan suhu yang terjadi pada transformator suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan terpengaruh oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada transformator itu



sendiri dan suhu lingkungannya. Suhu yang tinggi dalam minyak transformator dapat menyebabkan pembentukan endapan dan asam hal ini dapat mengurangi kualitas minyak dan mempercepat kerusakan isolasi serta resistivitas minyak transformator yang dimana ukuran kemampuan minyak dalam menghambat aliran arus listrik sangat dipengaruhi oleh suhu. Semakin tinggi resistivitas minyak semakin baik kemampuannya dalam mengisolasi dan mencegah arus bocor. Resistivitas minyak transformator yang rendah pada suhu tinggi dapat menyebabkan kualitas isolasi yang buruk dan dimana pengaruh tekanan medan listrik juga dapat mempengaruhi resistivitas minyak transformator. Pada kondisi tertentu, medan listrik yang tinggi dapat menyebabkan penghancuran isolasi di dalam minyak yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan transformator.

Oleh karena itu, pemantauan suhu dan tekanan medan listrik pada transformator sangat penting untuk menjaga kinerja yang optimal dan mencegah kerusakan untuk memastikan kondisi operasional yang aman dan efisien. Dari latar belakang diatas yang telah dipaparkan, penulis ingin mengajukan penelitian yang berjudul “PENGARUH TEMPERATUR DAN TEKANAN MEDAN LISTRIK PADA RESISTIVITAS MINYAK TRANSFORMATOR”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh temperatur dan tekanan medan listrik pada resistivitas minyak transformator?
2. Bagaimana interaksi antara temperatur dan tekanan medan listrik dalam mempengaruhi resistivitas minyak transformator?
3. Bagaimana perubahan temperatur dan tekanan medan listrik dalam mempengaruhi resistivitas minyak transformator?

1.3 Tujuan Penelitian



Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:
 Mengetahui pengaruh temperatur dengan tegangan tembus listrik pada resistivitas minyak transformator

2. Mengetahui interaksi antara temperatur dengan tekanan medan listrik dalam mempengaruhi resistivitas minyak transformator.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memberikan wawasan tentang pengaruh temperatur dan tekanan medan listrik pada resistivitas minyak transformator.
2. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan.

1.5 Ruang Lingkup

Pada penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Minyak transformator yang di pakai menjadi sampel penelitian ini adalah minyak transformator dalam keadaan baru.
2. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan tekanan medan listrik pada resistivitas minyak transformator.
3. Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari hasil percobaan yang dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pada penulisan ini dapat di uraikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini membahas teori-teori yang relevan yang mendukung penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi diagram alur penelitian, metode penelitian, waktu dan lokasi, alat dan bahan yang digunakan, serta teknik pengumpulan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Pada bab ini berisi tentang hasil penelitian yang di peroleh serta pembahasan terkait dengan penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari penelitian dan saran yang ditunjukkan untuk pembaca maupun penelitian ini dan saran yang ditujukan untuk membaca maupun penelitian selanjutnya yang berkaitan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dielektrik Cair

Kekuatan dielektrik cair merupakan ukuran kemampuan dari suatu material untuk bisa menahan tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kegagalan dielektrik tersebut. Kekuatan dielektrik cair tergantung pada sifat atom dan molekul cairan itu sendiri, material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, gas yang terdapat dalam cairan, dan sebagainya yang dapat merubah sifat molekul cairan. Dalam isolasi cair kekuatan dielektrik setara dengan tegangan yang terjadi. Hukum Paschen's menyatakan bahwa kekuatan dielektrik cair berkisar antara 107 V/cm. Dielektrik cair akan mengisi volume ruang yang harus diisolasi dan secara simultan akan mendisipasikan panas yang timbul secara konveksi. Kelebihan lain dari dielektrik cair murni yaitu mempunyai kemampuan untuk memperbaiki diri sendiri jika terjadi suatu pelepasan muatan (*discharge*). Salah satu kekurangan yang ada pada dielektrik cair yaitu mudah terkontaminasi (Wibowo, 2011).

Dalam penerapan tegangan kekuatan dielektrik dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang menyebabkan kerusakan atau tembus listrik (V) dengan tebal isolasi (d) yang memisahkan antara elektroda. Hal ini dapat dilihat pada persamaan berikut (Wonda, 2018):

$$E = \frac{V}{d} \quad (1)$$

Dimana,

E = kuat medan Listrik (kV/cm)

V = tegangan maksimum (kV)

d = tebal isolasi/jarak (cm)

Pada dasarnya dielektrik cair harus memiliki sifat dielektrik yang baik, yaitu karakteristik perpindahan panas yang bagus dan memiliki struktur yang stabil saat pengoperasian (Wijaya, 2009).

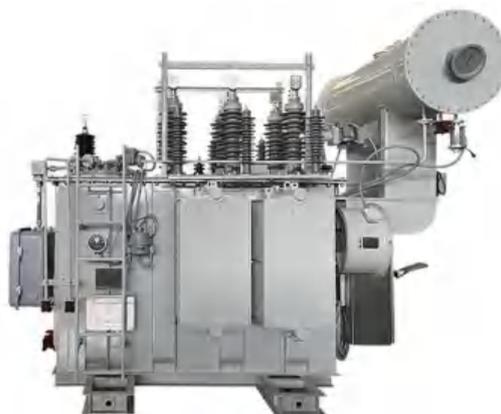


2.2 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik statis yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet tanpa mengubah frekuensinya. Pada umumnya transformator terdiri dari sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan skunder. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar “kaki” inti transformator. Secara umum dapat dibedakan dua jenis transformator menurut konstruksinya, yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Pada tipe inti terdapat dua kaki dan masing-masing kaki dibelit oleh satu kumparan. Sedangkan tipe cangkang mempunyai tiga buah kaki dan hanya kaki yang tengah-tengah dibelit oleh kedua kumparan (Siburian, 2019). Dalam teknik tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi 3, yaitu:

1. Transformator Daya

Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi, ukuran bobotnya (Tondok, 2019).



Gambar 1 Transformator Daya (Sumber : *Scotech*, 2022)



sformator Distribusi

Transformator distribusi digunakan untuk mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan komponen-komponen lain dari rangkaian distribusi, rugi-rugi energi dan turun tegangan yang disebabkan arus Listrik mengalir menuju beban merupakan penentuan untuk pemilihan dan lokasi transformator (Tondok, 2019).



Gambar 2 Transformator Distribusi (Sumber : *Scotech*, 2022)



Gambar 3 Transformator Distribusi Transformator Terpasang di Tiang Fase Tunggal (Sumber : *Scotech* , 2022)

3. Transformator Pengukuran

Transformator pengukuran dalam praktiknya tidaklah aman dalam menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator Instrumen umumnya digunakan

↳ mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat nakan untuk kerja peralatan demikian (Tondok, 2019).



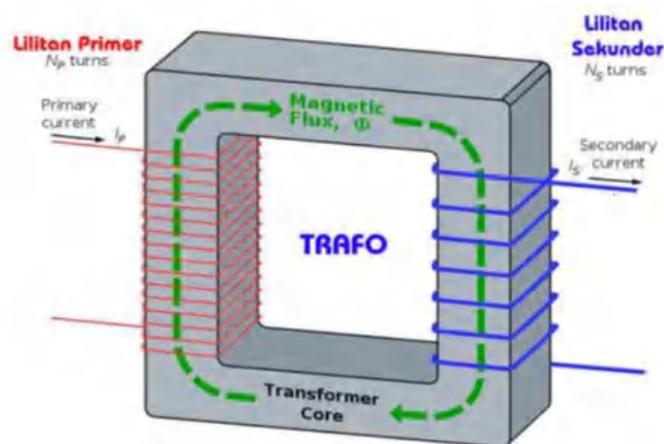


Gambar 4 Transformator Pengukuran (Sumber : *Scotech*, 2022)

2.3 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan induksi elektromagnetik. Saat lilitan primer terhubung dengan arus AC biasanya akan menghasilkan perubahan arus listrik. Perubahan arus listrik yang terjadi akan berpengaruh pada medan magnet yang ada dan membuat inti besi semakin kuat. Nantinya inti besi ini akan menghantarkan perubahan pada lilitan sekunder. Proses ini seringkali disebut juga sebagai induksi bolak-balik dan cara kerjanya sama dengan induksi elektromagnetik. Dimana keduanya baik induksi bolak-balik atau induksi magnetik juga memiliki penghubung magnetik antara lilitan primer dan sekunder. Dalam hukum faraday dijelaskan jika gaya listrik yang lewat garis lengkung tertutup akan berbanding lurus dengan perubahan satuan waktu saat arus induksi dilingkari lengkungan tertutup tersebut. Sementara hukum Lorenz menyebutkan jika arus AC yang terdapat dalam sekeliling inti besi akan mengubah inti besi menjadi magnet. Jika magnet dipenuhi lilitan, tentunya lilitan akan memiliki perbedaan tegangan pada kedua ujungnya (Djufri, 2021).





Gambar 5 Elektromagnetik Pada Transformator (Sumber : Putri, 2018)

2.4 Bagian-bagian Transformator dan Fungsinya

Adapun bagian-bagian transformator dan fungsinya:

1. *Electromagnetic Circuit* (Inti besi)

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi eddy current yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi-rugi (losses) (PLN, 2014).

2. *Current Carrying Circuit* (Winding)

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan *flux magnetic* (PLN, 2014).

3. Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank trafo (PLN, 2014).

konduktor



Suatu material yang mudah menghantarkan arus listrik. Sifat hantarannya adalah memindahkan elektron-elektron dari satu titik kelistrikan ke titik kelistrikan lainnya secara mudah. Kegunaan utama dari penghantar listrik adalah mengalirkan arus listrik. Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu *hollow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penegang di tengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan *flexible lead* (PLN, 2014).

5. Sistem Pendingin

Transformator dilengkapi dengan sistem pendingin yang bertujuan untuk membantu pendinginan pada saat kondisi transformator terjadi peningkatan suhu. Sistem pendinginan ini juga membantu minyak isolasi transformator yang selain sebagai penyekat juga sebagai media pendingin apabila tidak mampu menjalankan fungsinya sebagai pendingin. Tipe pendinginan transformator ada dua yaitu secara alami dan paksa dengan sirip-sirip transformator (riben), radiator dan bantuan motor penggerak untuk menghembuskan udara (Puteri, 2018).

Tabel 1 Tipe Pendingin Transformator

No	Macam Sistem Pendinginan	Media			
		Di dalam Transformator		Di luar Transformator	
		Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
	OFWF	-	Minyak	-	Air
	ONAN/ONAF		Kombinasi 3 dan 4		



9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7

Sumber: IEC tahun 1976

Keterangan:

A = Air (udara)

O = Oil (minyak)

N = Natural (alamiah)

F = *Forced* (paksaan/tekanan)

2.5 Bahan Isolasi

Bahan isolasi adalah sifat bahan yang berfungsi dapat memisahkan secara elektrik dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Isolasi mempunyai pengertian memisahkan daerah yang bertegangan dengan daerah yang tidak bertegangan. Kemampuan bahan isolasi untuk menahan tegangan disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari bahan isolasi sangat penting dalam hal menentukan kualitas isolator yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi semakin baik kualitasnya. Bahan isolasi yang digunakan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa golongan yaitu: padat, cair, dan hampa. Suatu bahan isolasi yang baik harus mempunyai resistansi isolasi tinggi, dan kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat diminimalkan. Oleh sebab itu, pemakaian isolasi harus memperhatikan faktor ekonomis tanpa mengesampingkan faktor teknisnya. Artinya pemakaian isolasi harus ekonomis namun tidak mengurangi kemampuannya sebagai isolator. Maka dengan mempertimbangkan semua faktor yang ada diharapkan tercapai suatu jaringan tenaga listrik yang baik dan aman bagi teknisi maupun masyarakat serta efisien (Heri, 2010). Sehingga untuk bahan penyekat ini perlu diperhatikan mengenai sifat-sifat berikut:



a. Sifat Listrik

Yaitu suatu bahan yang mempunyai tahanan jenis listrik yang besar agar dapat mencegah terjadinya rambatan atau kebocoran arus listrik antara hantaran yang berbeda tegangan atau dengan tanah. Karena pada kenyataannya sering terjadi kebocoran, maka harus dibatasi sampai sekecil-kecilnya agar tidak melebihi batas yang ditentukan oleh peraturan yang berlaku pada (PUIL: peraturan umum instalasi listrik) (Puteri, 2018).

b. Sifat Mekanis

Mengingat sangat luasnya pemakaian bahan penyekat, maka perlu dipertimbangkan kekuatannya supaya dapat dibatasi hal-hal penyebab kerusakan karena akibat salah pemakaian. Misal memerlukan bahan yang tahan terhadap tarikan, maka dipilih bahan dari kain bukan dari kertas karena kain lebih kuat daripada kertas (Puteri, 2018).

c. Sifat Termis

Panas yang timbul pada bahan akibat arus listrik atau arus gaya magnet berpengaruh kepada penyekat termasuk pengaruh panas dari luar sekitarnya. Apabila panas yang terjadi cukup tinggi, maka diperlukan pemakaian penyekat yang tepat agar panas tersebut tidak merusak penyekatnya (Puteri, 2018).

d. Sifat Kimia

Akibat panas yang cukup tinggi dapat mengubah susunan kimianya, begitu pula kelembaban udara atau basah disekitarnya. Apabila kelembaban dan keadaan basah tidak dapat dihindari, maka harus memilih bahan penyekat yang tahan air, termasuk juga kemungkinan adanya pengaruh zat-zat yang merusak seperti: gas, asam, garam, alkali, dan sebagainya (Puteri, 2018).

2.6 Bahan Isolasi Cair

Isolasi cair memiliki dua fungsi yaitu sebagai pemisah antara yang bertegangan dan juga sebagai pendingin sehingga banyak n pada peralatan seperti transformator, pemutus tenaga, *switch gear*



(Junaidi, 2008). Beberapa alasan digunakannya bahan isolasi cair adalah sebagai berikut:

- Isolasi memiliki kerapatan 100 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum Paschen.
- Isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi.
- Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Namun kekurangan utama isolasi cair adalah mudah terkontaminasi.

Ada berbagai jenis isolasi cair diantaranya:

a. Minyak Organik

Kelompok minyak organik meliputi minyak sayur, minyak damar, dan ester. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, terlebih dengan semakin menipisnya cadangan mineral tak terbaharukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintetik membuat minyak organik mendapatkan perhatian lebih (Kamilatin, 2021).

b. Minyak Mineral

Bahan dasar dari minyak isolasi mineral adalah minyak bumi kemudian diproses dengan cara destilasi. Karakteristik dari minyak jenis ini memiliki tahanan isolasi yang sangat tinggi dan stabilitas panas yang baik. Minyak isolasi mineral umumnya banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi misalnya circuit breaker, transformator daya, kapasitor daya dan kabel daya. Minyak isolasi juga berfungsi sebagai bahan dielektrik, bahan pendingin dan pemadam busur api (Kamilatin, 2021).

c. Minyak Sintetis

Minyak isolasi sintesis ini dapat diolah dengan proses kimia agar endapatkan karakteristik yang baik. Kelebihan utamanya dari minyak olasi ini yaitu bersifat tidak mudah terbakar. Tetapi minyak isolasi jenis ini emiliki kekurangannya adalah mudah terkontaminasi dengan udara.



Contoh dari minyak isolasi sintetis yaitu ester sintetis, askarel, fluorinasi cair, dan silicon cair (Kamilatin, 2021).

Sifat-sifat listrik yang menentukan unjuk kerja cairan sebagai isolasi adalah:

- a. Tembusan Listrik (*Withstand Breakdown*)
Kemampuan untuk tidak mengalami ketembusan dalam kondisi tekanan listrik (*electric stress*) yang tinggi (Junaidi, 2008).
- b. Kapasitansi listrik per unit
Volume yang menentukan permitivitas relatifnya. Minyak petroleum merupakan substansi nonpolar yang efektif karena merupakan campuran cairan hidrokarbon. Minyak ini memiliki permitivitas kira-kira 2 atau 2,5. Ketidakbergantungan permitivitas substansi nonpolar pada rekuensi nonpolar pada rekuensi membuat bahan ini lebih banyak dipakai dibandingkan dengan bahan yang bersifat polar. Misalnya air memiliki permitivitas 78 untuk frekuensi 50 Hz, namun hanya memiliki permitivitas 5 untuk gelombang mikro (Junaidi, 2008).
- c. Faktor daya
Faktor dissipasi daya dari minyak dibawah tekanan bolak-balik dan tinggi akan menentukan unjuk kerjanya karena dalam kondisi berbeban terdapat sejumlah rugi-rugi dielektrik. Faktor dissipasi sebagai ukuran rugi-rugi daya merupakan parameter yang penting bagi kabel dan kapasitor. Minyak transformator murni memiliki factor dissipasi yang bervariasi antara 10^{-4} pada 20°C dan 10^{-3} pada 90°C pada frekuensi 50HZ (Junaidi, 2008).
- d. Resistivitas
Suatu cairan dapat digolongkan sebagai isolasi cair bila resistivitasnya lebih besar dari $10^9\Omega\text{-m}$. Pada sistem tegangan tinggi, resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah $10^{16}\Omega\text{-m}$ atau lebih (Junaidi, 2008).



2.7 Teori Kegagalan Isolasi Cair

Suatu kegagalan dielektrik yang dialami pada isolasi cair dapat dipengaruhi oleh berbagai hal diantaranya jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu, bentuk dan material dari elektroda pengujian juga berpengaruh pada gagalnya isolasi cair. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair diantaranya partikel, air, dan gelembung. Terdapat empat jenis teori kegagalan pada bahan isolasi cair, yaitu kegagalan zat murni atau elektronik, gelembung udara atau kavitasi, kegagalan bola cair, dan kegagalan butiran padat pada isolasi cair. Jika suatu tegangan diberikan pada dua elektroda yang di celupkan ke dalam minyak (isolasi cair), maka muncul konduksi arus yang kecil. Jika tegangan dinaikan secara kontinyu maka, pada titik kritis tertentu akan terjadi lecutan pada kedua elektroda. Lecutan pada zat cair ini terdiri dari beberapa unsur antara lain aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh rangkaian, lintasan cahaya yang cerah dari elektroda yang satu ke elektroda lainnya, terjadi gelembung gas butiran zat padat hasil dekomposisi zat lain dan terjadi lubang pada elektroda (Wonda, 2018).

Karakteristik pada isolasi cair akan berubah jika terjadi ketidakmurnian di dalamnya. Hal ini akan mempercepat terjadinya proses kegagalan. Teori kegagalan zat isolasi cair dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut:

1. Teori kegagalan Elektronik

Teori ini merupakan perluasan teori kegagalan dalam gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam zat cair dianggap serupa dengan yang terjadi dalam gas. Oleh karena itu supaya terjadi kegagalan diperlukan elektron awal yang dimasukkan ke dalam zat cair. Elektron awal inilah yang akan memulai proses kegagalan. ini merupakan perluasan dari teori kegagalan pada gas, artinya proses kegagalan yang terjadi dalam dielektrik cair karena adanya banjir elektron pada gas. Pancaran medan elektron dari katoda di umiskan bertabrakan dengan atom dielektrik cair. Jika energi medan yang dihasilkan dari tabrakan sudah cukup besar, sebagian elektron akan terlepas dari atom dan akan bergerak menuju anoda bersama dengan elektron bebas.



Banjiran elektron ini serupa dengan peluahan yang terjadi pada gas dan peristiwa ini akan mengawali proses terjadinya kegagalan (Irsyad, 2016).

2. Teori kegagalan karena adanya gelembung gas

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas didalam isolasi cair. Gelembung-gelembung udara yang ada dalam cairan tersebut akan memanjang searah dengan medan. Hal ini disebabkan karena gelembung-gelembung tersebut berusaha membuat energi potensialnya minimum (Irsyad, 2016).

Gelembung-gelembung yang memanjang tersebut kemudian akan saling sambung-menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali proses kegagalan. Ketidakmurnian misalnya gelembung udara mempunyai tegangan gagal yang lebih rendah dari zat cair, disini adanya gelembung udara dalam cairan merupakan awal dari pencetus kegagalan total dari pada zat cair. Kegagalan gelembung merupakan bentuk kegagalan isolasi cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya (Irsyad, 2016).

Kuat medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam minyak isolasi dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$Eb = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \quad (2)$$

Dimana:

ε_1 = permitivitas minyak isolasi

ε_0 = medan listrik dalam minyak isolasi tanpa gelembung gas

Yang dimana bila E_b sama dengan medan batas untuk ionisasi gas, maka terjadi percikan dalam gelembung gas. Ini akan mempercepat pembentukan gelembung gas karena struktur dari minyak isolasi dan dapat mengakibatkan kegagalan pada minyak isolasi sebagai bahan isolasi (Abduh, 2020).



Teori kegagalan tak murnian padat

Kegagalan tak murnian padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat (partikel) di dalam isolasi cair yang akan memulai

terjadi kegagalan. Partikel debu atau serat selulosa yang ada disekeliling isolasi padat (kertas) seringkali ikut tercampur dengan minyak. Selain itu partikel padat ini pun dapat terbentuk Ketika terjadi pemanasan dan tegangan lebih. Pada saat terjadi medan listrik, partikel-partikel ini akan terpolarisasi dan membentuk jembatan. Arus akan mengalir melalui jembatan dan menghasilkan pemanasan local serta menyebabkan terjadinya kegagalan (Irsyad, 2016).

Untuk butiran berbentuk bola dengan jari-jari R (cm), medan kritis dimana butiran ini kehilangan kestabilannya diberikan dari (Abduh, 2020):

$$E = 487,7 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{R \cdot \epsilon_1}} \quad (3)$$

Dimana:

E = Harga medan kegagalan

R = Jari-jari butiran (cm)

ϵ_1 = Permittivitas dari cairan

σ = Tekanan permukaan yang bekerja pada gelembung (dyne/cm).

4. Teori kegagalan bola cair

Jika suatu zat isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lainnya, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan bola cair yang tertahan di dalam minyak yang memanjang searah medan dan pada medan yang kritis tetesan ini menjadi tidak stabil. Setelah menjadi tidak stabil bola air akan memanjang, dan bila panjangnya telah mencapai dua pertiga celah elektroda maka saluran saluran lucutan akan timbul sehingga kemudian kegagalan total akan terjadi. Air dan uap terdapat pada minyak, terutama pada minyak yang telah lama digunakan. Jika terdapat medan listrik, maka molekul uap air yang terlarut memisah dari minyak dan terpolarisasi membentuk suatu dipole. Jika jumlah molekul-molekul uap air ini banyak, aka akan tersusun semacam jembatan yang menghubungkan kedua elektroda, sehingga terbentuk suatu kanal peluahan. Kanal ini akan erambat dan memanjang sampai terjadi tembus listrik (Irsyad, 2016).



5. Teori kegagalan tekanan volume minyak

Kekuatan peristiwa kegagalan pada suatu cairan minyak sangat dipengaruhi oleh kadar gas didalamnya, faktor kekentalan minyak, dan kehadiran partikel asing lainnya. Faktor-faktor ini dapat tersebar merata, meningkatnya volume minyak yang mengalami tekanan akan mengakibatkan penurunan tegangan penyebab dan kegagalan (Abduh, 2020).

2.8 Minyak Transformator

Minyak transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dengan pemurnian minyak mentah. Sebagai bahan isolasi, minyak transformator harus mempunyai tegangan tembus yang tinggi. Selain itu minyak ini berfungsi sebagai media pendingin yaitu untuk mengantisipasi kenaikan temperatur (suhu) pada transformator, adanya kenaikan temperature yang terlalu tinggi bisa merusak isolasi kertas pada gulungan (*coil*) di dalam transformator, dan suhu yang terlalu panas sehingga dapat menurunkan tahanan isolasi yang dapat mengakibatkan hubung singkat antara fasa dengan fasa dan fasa dengan *body* di dalam transformator sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada transformator. Sedangkan fungsi minyak sebagai media isolasi adalah merupakan sesuatu yang mutlak untuk menghindari terjadinya short circuit atau hubung singkat di dalam transformator baik antara fasa maupun sisi fasa dengan *body*, dimana hubung singkat tersebut akan mengakibatkan transformator meledak (Jumardin, 2019).



Gambar 6 Minyak Transformator (Sumber: Putri, 2018)



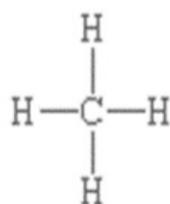
2.9 Bahan Dasar Pembuatan Minyak Transformator

Minyak transformator terbuat dari bahan kimia organik, merupakan senyawa atom-atom C (karbo) dan H (hidrogen). Bahan dasar pembuatan minyak transformator berasal dari minyak mentah (*crude oil*). Untuk mendapatkan kualitas dielektrik yang baik maka pabrik-pabrik pembuat minyak transformator menambahkan zat-zat tertentu pada bahan tersebut. Secara umum pembuatan transformator dimulai dari minyak mentah sampai didapat unsur yang mempunyai sifat sebagai bahan isolasi. Minyak mentah yang ditambang masih bercampur dengan air, gas dan unsur-unsur lainnya. Kandungan gas tersebut akan dibuang melalui pipa tertentu dengan jarak yang cukup aman pada pabrik pengolahannya. Sedangkan lumpur dan air tadi masih mengandung bahan padat yaitu tanah liat, pasir dan unsur-unsur lainnya, yang mana pemisahannya dilakukan di sekitar pemboran. Selanjutnya cairan ini disalurkan ke kilang-kilang untuk disuling dengan bahan yang dibutuhkan. Selanjutnya proses penyulingan juga akan berbeda sebagai produksi utama yang akan dihasilkan (Puteri, 2018).

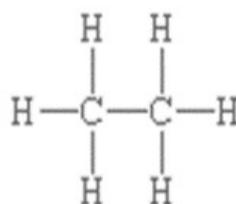
Klasifikasi hidrokarbon yang diperoleh dari minyak mentah ini dapat dibagi dalam tiga tingkatan yaitu:

1) Parafin atau hidrokarbon parafin

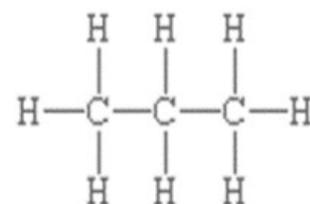
Yang dimana rumus kimianya adalah C_nH_{2n+2} . Parafin adalah senyawa hidrokarbon jenuh yang mempunyai rantai karbon lurus atau bercabang, yang dalam kimia organik dikenal sebagai senyawa dengan rantai terbuka atau senyawa alifatis. Senyawa alifatis terbagi menjadi 3 bagian yaitu metana, etana dan propana (Puteri, 2018).



Metana (CH₄)



Etana (C₂H₆)



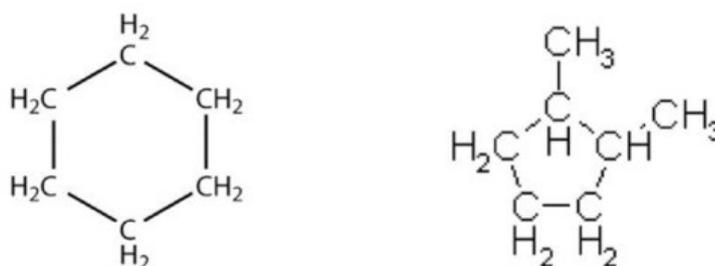
Propana (C₃H₈)



Gambar 7 Struktur Kimia Senyawa Parafin Hidrokarbon (Sumber : Rosita, 2010)

2) Naphtena

Yang dimana rumus kiamanya adalah C_nH_{2n} . Senyawa naphtena adalah senyawa hidrokarbon yang mempunyai rantai tertutup atau struktur berbentuk cincin senyawa ini dikenal pula sebagai senyawa alisiklik. Masing-masing cincin dapat berisi lima atau enam atom karbon. Senyawa naphtena dapat berupa monosiklik, disiklik, dan seterusnya tergantung pada jumlah cincin yang dimilikinya. Pada masing-masing cincin dapat pula terhubung, didalam minyak bumi mentah naphtena merupakan kelompok senyawa hidrokarbon yang memiliki kadar terbanyak kedua setelah n-parafin (Arimbawa & Dantes, 2019).

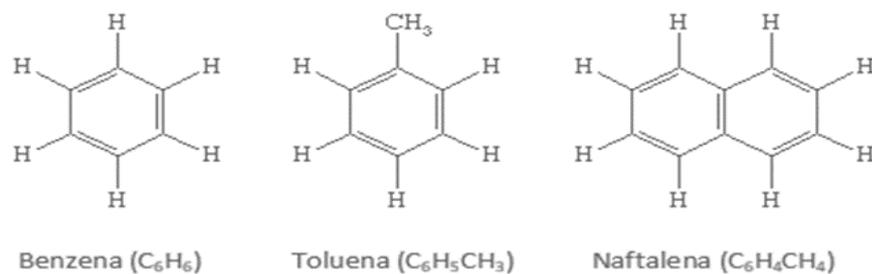


Gambar 8 Struktur Kimia Senyawa Naphtena (Sumber : Arimbawa & Dantes, 2019)

3) Aromatik

Yang dimana rumus kiamanya adalah C_nH_n . Senyawa ini memiliki satu atau lebih cincin aromatik yang dapat bergabung dengan cincin alisiklik. Beberapa senyawa aromatik berfungsi sebagai penghambat oksidasi (inhibitor) dan penjaga kestabilan, tetapi jika jumlahnya terlalu banyak akan bersifat merugikan yaitu berkurangnya kekuatan dielektrik, serta berkurangnya sifat pelarutan minyak terhadap isolasi padat di dalamnya. Ketiga hidrokarbon diatas memiliki fungsi yang berbeda pada minyak mentah (Puteri, 2018).





Gambar 9 Struktur Kimia Senyawa Aromatik Hidrokarbon (Sumber : Puteri, 2018)

2.10 Persyaratan Minyak Sebagai Isolasi

Menurut standar IEC 60296 (2012), minyak transformator baru (*unused mineral oils*) adalah minyak isolasi yang belum pernah digunakan dan tidak pernah kontak dengan peralatan listrik atau peralatan lain yang tidak diperlukan pada saat pembuatan, penyimpanan atau transportasi. Dan minyak tersebut harus dipastikan tidak ada kontaminasi bifenil atau trifenil poliklorinat atau kontaminan-kontaminan lainnya. Sedangkan minyak transformator pakai adalah minyak isolasi yang sedang digunakan atau dipakai pada transformator. Minyak transformator pakai ini sudah mengalami beberapa proses pada saat digunakan sebagai media isolasi dan pendingin transformator sehingga terdapat kontaminan berupa kandungan air, partikel padat atau kontaminan lain yang terkandung dalam minyak, minyak isolasi harus memiliki beberapa syarat yaitu:

a. Kejernihan (*Appearance*)

Minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi atau endapan (sedimen) yang dimana tidak terukur dan bebas dari sedimen dan benda-benda tersuspensi.

b. Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis dibatasi agar air dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak melayang. Hal ini sangat membantu dalam mempertahankan homogenitas minyak isolasi. Masa jenis 20°C batas yang diizinkan 0.895 g/cm³.



ositas Kinematik (*Kinematic Viscosity*)

ositas memegang peranan dalam pendinginan, dipergunakan untuk menentukan kelas minyak dan kurang dipengaruhi oleh kontaminasi atau

kerusakan minyak. Viskositas pada 40°C batas yang diizinkan maksimal 12mm²/s dan pada viskositas pada -30°C batas yang diizinkan maksimal 1800mm²/s.

d. Titik Nyala (*Flash Point*)

Temperatur ini adalah temperatur campuran antara uap dari minyak dan udara yang akan meledak (terbakar) bila didekati dengan bunga api kecil. Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat yang mudah terbakar. Batas yang diizinkan minimal 135°C.

e. Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi. Batas yang diizinkan maksimal -40°C.

f. Angka Kenetralan (*Neutralization Number*)

Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam minyak isolasi dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia atau cacat atau indikasi perubahan kimia dalam bahan tambahan (*additive*). Angka kenetralan dapat dipakai sebagai petunjuk umum untuk menentukan apakah minyak sudah harus diganti atau diolah. Angka kenetralan batas yang diizinkan 0.03 MgKOH/g.

g. Korosi Belerang (*Corosive Sulphur*)

Pengujian ini menunjukkan kemungkinan korosi yang dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi. Batas yang diizinkan tidak terdapat korosif.

h. Tegangan Tembus (*Breakdwon Voltage*)

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak. Batas yang diizinkan minimal 30kV.

i. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation*)

Hasil yang tinggi dari faktor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil sakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan dan gainya. Batas yang diizinkan maksimal 0.005.

lungan Air (*Water Content*)



Adanya air dalam minyak isolasi akan menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi dan juga adanya air akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi (*insulating paper*). Batas yang diizinkan maksimal 30mg/kg.

k. Tahanan Jenis (*Resistivity*)

Tahan jenis yang rendah menunjukkan terjadinya kontaminasi yang bersifat konduktif.

l. Tegangan Permukaan (*Interfacial Tension*)

Adanya kontaminasi dengan zat yang terlarut (*soluble contamination*) atau hasil-hasil kerusakan minyak, umumnya menurunkan nilai tegangan permukaan. Penurunan tegangan permukaan juga menurunkan indikator yang peka bagi awal kerusakan minyak.

m. Kandungan Gas (*Gas Content*)

Adanya gas terlarut dan gas bebas dalam minyak isolasi dapat digunakan untuk mengetahui kondisi transformator dalam operasi. Adanya gas seperti hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilen (C_2H_4) dan asetilin (C_2H_2) menunjukkan terjadinya dekomposisi minyak isolasi pada kondisi operasi, sedangkan adanya karbondioksida (CO_2) dan karbon monoksida (CO) menunjukkan kerusakan pada bahan isolasi.

2.11 Permurnian dan Perawatan Pada Minyak Transformator

Minyak transformator dapat terkontaminasi oleh berbagai macam pengotor seperti kelembaban, serat, resin dan sebagainya. Ketidakmurnian dapat tinggal di dalam minyak karena pemurnian yang tidak sempurna. Pengotoran dapat terjadi saat pengangkutan dan penyimpanan, ketika pemakaian, dan minyak itu sendiri pun dapat membuat pengotoran pada dirinya sendiri. Ada beberapa metode pemurnian minyak transformator, yakni (Puteri, 2018):

a. Mendidihkan (*Boiling*)

Minyak dipanaskan hingga titik didih air dalam alat yang disebut Boiler. Air

ada dalam minyak akan menguap karena titik didih minyak lebih tinggi pada titik didih air. Metode ini merupakan metode yang paling sederhana dan memiliki kekurangan. Pertama hanya air yang dipindahkan dari



minyak, sedangkan serat, arang dan pengotor lainnya tetap tinggal. Kedua minyak dapat menua dengan cepat karena suhu tinggi dan adanya udara. Kekurangan yang kedua dapat diatasi dengan sebuah boiler minyak hampa udara (*vacum oil boiler*). Alat ini dipakai dengan minyak yang dipanaskan dalam bejana udara sempit (*air tight vessel*) dimana udara dipindahkan bersama dengan air yang menguap dari minyak. Air mendidih pada suhu rendah dalam ruang hampa oleh sebab itu menguap lebih cepat ketika minyak dididihkan dalam alat ini pada suhu yang relatif rendah. Alat ini tidak menghilangkan kotoran pada kendala pertama, sehingga pengotor tetap tinggal.

b. Alat Sentrifugal (*Centrifuge reclaiming*)

Air serat, karbon dan lumpur yang lebih berat dari minyak dapat dipindahkan minyak setelah mengendap. Untuk masalah ini memerlukan waktu lama, sehingga untuk mempercepatnya minyak dipanaskan hingga 45-55°C dan diputar dengan cepat dalam alat sentrifugal. Pengotor akan tertekan ke sisi bejana oleh gaya sentrifugal, sedangkan minyak yang bersih akan tetap berada ditengah bejana. Alat ini mempunyai efesiensi yang tinggi. Alat sentrifugal hampa merupakan pengembangannya.

c. Penyaringan (*Filtering*)

Dengan metode ini minyak disaring melalui kertas penyaring sehingga pengotor tidak dapat melalui pori-pori penyaring yang kecil, sementara embun atau uap telah diserap oleh kertas yang mempunyai *hygroscopicity* yang tinggi. Jadi filter press ini sangat efisien memindahkan pengotor padat dan uap dari minyak yang merupakan kelebihan dari pada alat sentrifugal. Walaupun cara ini sederhana dan lebih mudah untuk dilakukan, keluaran yang dihasilkan lebih sedikit jika dibandingkan dengan alat sentrifugal yang menggunakan kapasitas motor penggerak yang sama. *Filter press* ini cocok digunakan untuk memisahkan minyak dalam circuit breaker (CB), yang biasanya tercemari oleh partikel jelaga (arang) yang kecil dan sulit dipisahkan dengan menggunakan



sentrifugal.

enerasi (*Regeneration*)

Produk-produk penuaan tidak dapat dipindahkan dari minyak dengan cara sebelumnya. Penyaringan hanya baik untuk memindahkan bagian endapan yang masih tersisa dalam minyak. Semua sifat-sifat minyak yang tercemar dapat dipindahkan dengan pemurnian menyeluruh yang khusus yang disebut regenerasi. Dengan menggunakan adsorben untuk regenerasi minyak transformator sering dipakai di gardu induk dan pembangkit. Adsorben adalah substansi yang partikel partikelnya dapat menyerap produk-produk penuaan dan kelembaban pada permukaannya. Hal yang sama dilakukan adsorben dalam ruang penyaring tabung gas yang menyerap gas beracun dan membiarkan udara bersih mengalir. Regenerasi dengan adsorben dapat dilakukan lebih menyeluruh bila minyak dicampur dengan asam sulfur. Ada dua cara merawat minyak dengan adsorben yaitu:

- Pertama, minyak yang dipanasi dapat dicampur secara menyeluruh dengan adsorben yang dihancurkan dan kemudian disaring.
- Kedua, minyak yang dipanaskan dapat dilewatkan melalui lapisan tebal adsorben yang disebut perkolasi.

Adsorben untuk regenerasi minyak transformator terdiri dari selinder yang dilas dengan lubang pada dasarnya dimana adsorben ditempatkan dengan minyak yang dipanaskan ($80 - 100^{\circ}\text{C}$) hingga mengalir ke atas melalui adsorber. Ketika minyak mengalir ke atas, filter tersumbat oleh partikel halus adsorber dan udara dibersihkan dari adsorber lebih cepat dan lebih menyeluruh pada awalnya. Adsorber yang digunakan untuk regenerasi minyak transformator kebanyakan yang terbuat silica gel dan alumina atau sejenis tanah liat khusus yang dikenal sebagai pemutih (*bleaching earth*), lempung cetakan (*moulding clay*).

2.12 Hubungan Antara Suhu dan Resistivitas



Resistivitas isolasi minyak tergantung dari sifat listrik asli (original) material. Pada isolasi minyak resistivitas dipengaruhi juga oleh partikel-partikel (nan) yang terkandung pada isolasi minyak tersebut. Resistivitas yang menunjukkan bahwa minyak tersebut sudah mengalami kontaminasi oleh

bahan yang bersifat konduktif seperti air, asam, partikel bermuatan lainnya. Sesuai dengan fungsinya, bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang resistivitasnya besar sehingga arus bocor yang mengalir pada isolasi akan sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya.

Nilai resistansi isolasi diperoleh dari pengukuran nilai arus bocor isolasi minyak dan setelah mendapatkan nilai resistansinya barulah dihitung nilai resistivitas isolasi minyak transformator dengan menggunakan persamaan (4).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4)$$

dimana:

ρ = resistivitas (Ωm)

R = resistansi (Ohm)

A = luas permukaan elektroda (m^2)

L = jarak celah elektroda pengukuran (m)

Besar resistansi isolasi juga dipengaruhi oleh temperatur material isolasi pada saat pengukuran. Hal ini disebabkan oleh adanya koefisien temperatur bahan isolator. Persamaan (3) menyatakan hubungan linear antara temperature dengan resistansi suatu bahan

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (5)$$

Jika disubstitusi dengan persamaan (2), maka diperoleh persamaan:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (6)$$

Dimana:

ρ_2 = Resistivitas pada temperatur t_2 (Ohm)

ρ_1 = Resistivitas pada temperatur t_1 (Ohm)

t = suhu ($^{\circ}\text{C}$)

α = Koefisien temperatur resistansi isolasi ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$)

