

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Dalam peralatan tegangan tinggi, material dielektrik atau dikenal sebagai bahan isolasi, memegang peran penting dalam memisahkan konduktor listrik yang membawa tegangan tinggi. Tujuannya adalah untuk mencegah terjadinya hubung singkat antara konduktor yang berpotensi menghasilkan loncatan api atau percikan. Salah satu contoh peralatan tegangan tinggi yang memanfaatkan prinsip ini adalah transformator. Dalam transformator, untuk memisahkan konduktor yang bertegangan tinggi, digunakan bahan dielektrik yang sering kali berupa minyak trafo (Wahyu et al., 2018).

2.2.1. Transformator

Transformator adalah salah satu perangkat kunci dalam infrastruktur listrik yang memainkan peran penting dalam mentransfer energi listrik dari satu titik ke titik lain dalam sistem tenaga listrik. Prinsip kerjanya didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana perubahan arus listrik dalam satu kumparan menghasilkan medan magnet yang kemudian menginduksi arus listrik di kumparan lainnya. Dalam transformator, dua kumparan yang terpisah oleh inti besi atau ferromagnetik digunakan untuk memfasilitasi proses transfer energi. Salah satu kumparan disebut sebagai kumparan primer, sementara yang lainnya adalah kumparan sekunder. Kumparan primer menerima tegangan listrik dan menghasilkan medan magnet yang kemudian menginduksi tegangan listrik di kumparan sekunder. Prinsip ini memungkinkan transformator untuk mengubah

tegangan listrik tanpa memodifikasi frekuensinya, sehingga menjadikannya alat yang sangat penting dalam distribusi tenaga listrik. Transformator dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama yaitu transformator step up dan step down. Transformator step up meningkatkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi, sementara transformator step down mengurangi tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah (Erwin et al., 2021).

Proses kerja transformator dimulai ketika arus bolak-balik mengalir melalui kumparan primer. Arus ini menciptakan medan magnet di sekitar inti besi, yang kemudian menginduksi arus listrik di kumparan sekunder. Karena kumparan sekunder memiliki jumlah lilitan yang berbeda dengan kumparan primer, perbandingan antara tegangan input dan output dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu.

Selain itu, transformator juga memainkan peran penting dalam menjaga efisiensi dan keamanan dalam distribusi tenaga listrik. Transformator digunakan untuk menyesuaikan tegangan antara sumber daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan kebutuhan beban yang beragam. Ini membantu mengoptimalkan transfer daya dan meminimalkan kerugian energi selama proses distribusi.

2.1.2 Minyak Transformator

Minyak transformator ialah minyak mineral yang didapatkan dari hasil pemurnian minyak mentah. Minyak transformator juga merupakan komponen vital dalam transformator, tidak hanya berperan sebagai media isolasi, tetapi juga sebagai pendingin untuk mencegah kenaikan suhu yang berpotensi merusak

perangkat. Fungsinya sebagai isolator adalah untuk memisahkan bagian-bagian yang bertegangan tinggi dalam transformator, seperti gulungan kumparan, dari rangka atau dari bagian lain yang berpotensi menyebabkan arus bocor. Selain itu, minyak transformator juga bertugas untuk menyerap panas yang dihasilkan oleh kerja transformator dan menghilangkannya melalui perpindahan panas ke atmosfer sekitarnya. Minyak sebagai media isolasi memegang peran yang penting dalam menjaga stabilitas dan kinerja optimal transformator.

Fungsinya tidak hanya sekadar sebagai penghalang terhadap potensi short circuit, tetapi juga sebagai penyerap panas yang efisien, menjaga kestabilan suhu, dan melindungi komponen internal dari keausan dan kerusakan. Ketika terjadi short circuit di dalam transformator, potensi bahaya yang timbul tidak hanya pada komponen transformator itu sendiri, tetapi juga pada sistem keseluruhan. Oleh karena itu, kualitas minyak isolasi menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan dengan cermat dalam perawatan dan pengawasan terhadap kemurnian minyak transformator dan menjadi hal yang sangat penting dalam menjaga kinerja dan keandalan transformator selama masa pakai transformator. Dengan menjaga minyak isolasi dalam kondisi yang optimal, dapat dipastikan bahwa transformator dapat beroperasi dengan aman, efisien, dan dapat diandalkan dalam jangka waktu yang panjang (Raisah et al., 2022)

Minyak yang digunakan dalam transformator merupakan suatu jenis bahan kimia organik, yang terdiri dari senyawa atom karbon (C) dan hidrogen (H) (Erwin et al., 2021). Secara umum, minyak transformator terdiri dari campuran senyawa hidrokarbon dan non-hidrokarbon. Selain hidrokarbon, minyak

transformator juga mengandung sedikit zat aditif. Minyak transformator dihasilkan melalui proses pemurnian minyak mentah dan bahan organik seperti silikon dan piranol juga dapat digunakan dalam pembuatannya. Beberapa jenis minyak transformator yang umum digunakan adalah Diala B, Mectrans, dan Diala A. Kenaikan suhu pada transformator dapat memengaruhi sifat hidrokarbon dalam minyak, seperti konduktivitas arus dan tegangan tembus, yang merupakan indikator penting untuk mengukur ketahanan listriknya. Menurut para ahli, analisis menunjukkan bahwa ketahanan listrik minyak transformator dapat menurun karena pengaruh asam dan pencampuran air. Untuk menetralkan tingkat keasaman minyak, dapat digunakan potasium hidroksida, sedangkan untuk menghilangkan kandungan air, silica gel bisa digunakan sebagai bahan higroskopis (Trie et al., 2018).

Tabel 2.1 Spesifikasi Minyak Transformator menurut IEC 60296-2003

No	Parameter Uji	Batasan
1	Viskositas 40 °C	Max 12 cSt
2	Titik Tuang	Max -40 °C
3	Kadar Air	Max 30 mg/kg
4	Tegangan Tembus - Sebelum <i>Treatment</i> - Setelah <i>Treatment</i>	Min. 30 kV/2,5 mm Min. 70 kV/2,5 mm
5	Densitas pada 20 °C	Max 0,895 g/ml
6	Kenetralan (Keasaman)	Max 0,01 mg KOH/kg

2.1.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Minyak Transformator

Minyak transformator adalah bahan isolasi cair yang sangat penting dalam menjaga kinerja transformator. Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas minyak

transformator dapat dilihat dari karakteristik fisik dan elektriknya. Karakter fisik meliputi kejernihan, viskositas, dan massa jenis. Sedangkan untuk karakteristik elektrik dapat dilihat dari tegangan tembus, kandungan air, dan suhu. Pemakaian transformator dalam jangka panjang dapat menyebabkan minyak trafo mengalami penurunan karakteristik dielektrik, fisik dan kimia.

a) Karakteristik Fisik Minyak Trafo

1. Kejernihan

Kualitas minyak transformator merupakan faktor penting dalam menjaga kinerja optimal perangkat tersebut. Kejernihan warna minyak adalah indikator utama dari kondisi minyak isolasi. Minyak transformator yang berkualitas baik akan menunjukkan warna yang jernih, bersih, dan tidak mengandung endapan. Selama transformator beroperasi, minyak isolasi akan terus-menerus berinteraksi dengan berbagai material yang ada di dalamnya, seperti kertas isolasi dan komponen listrik lainnya. Proses ini dapat menyebabkan suspensi atau endapan terlarut dalam minyak. Seiring berjalannya waktu, akumulasi endapan yang terlarut tersebut dapat menyebabkan perubahan warna minyak, yang akan menjadi semakin gelap seiring bertambahnya jumlah endapan yang terlarut. (Fachry et al., 2018).

2. Viskositas

Kekentalan atau viskositas merupakan aspek yang sangat penting dalam karakteristik minyak transformator. Yang memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kemurnian isolasi cair, berkaitan dengan jumlah kontaminan partikel padat di dalamnya, serta berperan penting dalam proses pendinginan peralatan listrik.

Selain sebagai medium isolasi, isolasi cair juga berperan dalam menjalankan proses pendinginan. Kualitas isolasi cair yang optimal ditandai dengan viskositas yang rendah, sehingga kemungkinan terkontaminasinya isolasi cair dengan kontaminan menjadi minimal. Selain itu, dengan viskositas yang rendah, proses sirkulasi isolasi cair pada peralatan listrik akan berjalan dengan lancar, memastikan pendinginan inti dan belitan transformator berlangsung dengan efisien dan tanpa hambatan. Nilai viskositas untuk minyak baru harus $\leq 18 \text{ cSt}$. Metoda yang dipakai mengacu pada ISO 3104. (Wahyu et al., 2008). Menurut Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) 49-1 Tahun 1982, nilai maksimum viskositas kinematik minyak transformator yang diperbolehkan adalah sebesar $\leq 40 \text{ cSt}$ pada suhu 20°C . Nilai viskositas yang rendah menunjukkan kemampuan aliran minyak yang lebih baik sehingga proses sirkulasi dan perpindahan panas di dalam transformator dapat berlangsung secara optimal. Sebaliknya, peningkatan nilai viskositas dapat menghambat proses pendinginan dan menurunkan kinerja transformator karena sirkulasi minyak menjadi kurang efektif. (SPLN 49-1, 1982)

Pengujian viskositas dilakukan menggunakan Digital Display Viscometer tipe NDJ-5S, dengan metode perendaman rotor ke dalam sampel cairan. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada putaran motor dengan kecepatan yang dikendalikan oleh sistem dan ditampilkan pada layar digital. Putaran motor diteruskan melalui sumbu viskometer yang menggerakkan rotor standar. Ketika rotor berputar di dalam cairan, timbul hambatan akibat sifat viskositas fluida yang menyebabkan terjadinya histeresis viskos. Besarnya torsi yang terdeteksi oleh sensor kemudian

dikonversi menjadi nilai viskositas dan ditampilkan secara langsung pada layar viskometer.

Nilai viskositas minyak transformator dipengaruhi oleh perubahan suhu. Peningkatan suhu menyebabkan energi kinetik molekul minyak bertambah sehingga gaya tarik antar molekul menjadi lebih lemah. Kondisi tersebut menyebabkan molekul-molekul minyak bergerak lebih bebas dan mengakibatkan nilai viskositas menurun. Dengan demikian, hubungan antara suhu dan viskositas bersifat berbanding terbalik, di mana semakin tinggi suhu minyak maka semakin rendah nilai viskositasnya.

Penurunan viskositas akibat kenaikan suhu dapat meningkatkan kemampuan sirkulasi minyak transformator sebagai media pendingin. Namun, apabila suhu terlalu tinggi, maka perubahan viskositas dapat mempengaruhi kestabilan sifat fisik minyak dan mempercepat proses degradasi minyak transformator (Adib et al., 2012).

Viskositas dinamis dalam isolasi cair dinyatakan dalam persamaan:

$$\mu = \frac{2r^2 g}{9v} \rho - \rho' \quad (2.1)$$

Dimana:

μ = viskositas (poise)

r = jari-jari bola ukur (cm)

g = gaya gravitasi

v = kecepatan bola ukur (cm/s)

ρ = massa jenis bola ukur (g/cm³)

ρ' = massa jenis isolasi cair (g/cm^3)

Persamaan (2.1) menunjukkan hubungan umum viskositas dinamis pada suatu fluida. Namun, karena pengukuran viskositas pada penelitian ini dilakukan menggunakan Digital Display Viscometer tipe NDJ-5S, maka perhitungan viskositas dinamis disesuaikan dengan metode pengujian yang digunakan. Berdasarkan standar ASTM D445, nilai viskositas dinamis (η) dapat ditentukan dari nilai viskositas kinematik (ν) dan massa jenis (ρ) minyak isolasi menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{\nu}{\rho \times 10^{-3}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

η : viskositas dinamis (mPa.s)

ρ : massa jenis minyak isolasi (kg/m^3)

ν : viskositas kinematik (cSt)

Sedangkan nilai viskositas pada minyak trafo dinyatakan dengan satuan cSt, yaitu satuan untuk viskositas kinematik yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Dimana,

ρ = Massa jenis (g/cm^3)

m = Massa benda (gram)

V = Volume benda (cm^3)

3. Massa Jenis

Massa jenis adalah parameter yang menggambarkan perbandingan antara massa suatu volume cairan pada suhu $15,56^\circ\text{C}$ dengan massa air pada volume dan

suhu yang sama. Minyak transformator memiliki massa jenis yang lebih rendah daripada air, sehingga air yang terdapat dalam minyak transformator akan cenderung terpisah secara alami. Dengan kata lain, air akan condong turun ke bagian bawah minyak transformator, memungkinkan untuk kemudian mudah diekstraksi dari tangki minyak transformator. Fenomena ini memberikan keunggulan dalam proses pemisahan dan pengeluaran air yang terkontaminasi dari minyak transformator, yang secara signifikan mendukung efisiensi dalam pemeliharaan dan perawatan transformator. Berdasarkan standar IEC 60296:2003 mengenai minyak isolasi mineral baru untuk transformator, massa jenis minyak transformator pada suhu 20°C dibatasi maksimum sebesar 0,895 g/cm³. Nilai massa jenis yang melebihi batas tersebut dapat mengindikasikan adanya kontaminasi, produk degradasi, atau perubahan komposisi kimia minyak yang berpotensi menurunkan kualitas isolasi dan kemampuan pendinginan minyak transformator.

Perubahan massa jenis minyak akibat kenaikan suhu dapat mempengaruhi karakteristik perpindahan panas dan kemampuan pendinginan transformator. Selain itu, perubahan massa jenis juga dapat digunakan sebagai salah satu indikator terjadinya perubahan kualitas minyak transformator selama proses operasi maupun proses pemurnian (Adib et al., 2012).

b) Karakteristik Elektrik Minyak Trafo**a. Tegangan Tembus**

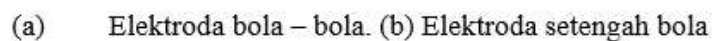
Tegangan tembus minyak transformator merupakan faktor penting dalam sistem isolasi transformator. Faktor yang mempengaruhi tegangan tembus meliputi tegangan antar muka, kadar air, kadar asam, dan warna. Perubahan suhu dan kandungan air dalam minyak transformator dapat mempengaruhi kualitas isolasi dan tegangan tembus. Tegangan tembus merupakan tingkat tegangan di mana isolator kehilangan kemampuannya untuk menahan tekanan akibat medan listrik antara dua elektroda dengan potensi berbeda, sehingga isolator berubah menjadi konduktor, merupakan fenomena yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor. Proses kerusakan pada minyak transformator juga dipengaruhi oleh berbagai faktor.

Standardisasi pengujian pada tingkat internasional ditetapkan oleh komite teknis IEC (International Electrotechnical Commission). Sementara itu, di Indonesia standar nasional disusun dan diterbitkan oleh PLN melalui SPLN yang merujuk pada ketentuan IEC 156. Nilai kekuatan dielektrik sangat dipengaruhi oleh jenis dan kondisi ruang uji yang digunakan. Ruang uji yang dipakai dalam pengujian ini memiliki konstruksi sederhana karena hanya membutuhkan volume minyak yang relatif kecil. Konfigurasi penggunaan elektroda pada pengujian tegangan tembus media isolasi cair ditunjukkan pada gambar berikut:

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi tegangan tembus adalah perpindahan kontaminan di area tekanan listrik antara dua elektroda. Jenis tegangan, pola tegangan, dan durasi aplikasi tegangan semuanya memiliki dampak

terhadap tegangan tembus pada isolasi cair. Selain itu, keberadaan material tambahan serta kekuatan dielektrik masing-masing material juga berperan dalam menentukan tingkat tegangan tembus. Faktor lain yang dapat memengaruhi tegangan tembus adalah kenaikan suhu, yang dapat terjadi karena beberapa alasan seperti penurunan resistansi, kerusakan material, akumulasi polusi yang dapat mengurangi kualitas isolasi, tingkat tegangan tinggi, serta usia transformator. (Adi et al., 2023)

Peralatan yang digunakan dalam pengujian tegangan tembus minyak isolasi terdiri dari transformator tegangan tinggi (HV Trafo) sebagai penaik tegangan dengan spesifikasi 220/100 kV, 1 fasa, 3 belitan, daya 5 kVA, tegangan hubung singkat (U_k) sebesar 3,5%, dengan tegangan primer 220 V dan tegangan sekunder hingga 100 kV. Transformator ini dilengkapi dengan unit catu daya dan panel pengendali yang berfungsi untuk memberikan serta mengatur tegangan masukan sekaligus memantau nilai tegangan input dan output yang ditampilkan melalui layar monitor. Untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi digunakan pembagi kapasitif berupa kapasitor dengan spesifikasi kapasitansi 100 pF dan tegangan kerja maksimum 100 kV. Proses pengujian dilakukan di dalam ruang uji atau bejana uji yang berisi minyak isolasi dengan volume relatif kecil, di dalamnya dipasang sepasang elektroda uji dengan jarak sela 2,5 mm untuk menghasilkan medan listrik hingga terjadi tegangan tembus.



Menurut standar IEC 156, tegangan tembus minyak transformator pada suhu 30°C adalah sebesar 30 kV, dengan pengujian dilakukan dengan jarak sela sebesar 2,5 mm yang terdapat pada gambar 2.1. Sementara itu, titik didih minyak transformator menurut standar SPLN 49-1 dengan metode uji IEC 296 adalah pada suhu 130°C. Dalam rangka pengujian tersebut, karakteristik tegangan tembus (breakdown voltage) yang muncul pada dielektrik minyak transformator jenis Shell Diala B akan dianalisis terkait dengan perubahan suhu dari 30°C hingga 130°C. Pengujian dilakukan dengan menggunakan elektroda uji yang diberikan tegangan uji berupa tegangan tinggi bolak-balik (AC) pada frekuensi 50 Hz. Jenis pengujian yang diterapkan adalah pengujian yang bersifat merusak hingga terjadi tembus pada dielektrik (breakdown). Proses pengujian akan melibatkan pemantauan terhadap bahan uji secara berkala hingga terjadi peristiwa tembus isolasi. Rangkaian pengujian ini memiliki tujuan untuk memahami perilaku minyak transformator dalam kondisi ekstrim dan memvalidasi kecocokannya sesuai dengan standar keamanan dan kinerja yang ditetapkan.

Standar IEC 156 telah menetapkan besarnya tegangan tembus berdasarkan tegangan yang melewatinya saat dilakukan pengujian *Dielectric Strength*.

Tabel 2.2 Besar tegangan tembus berdasarkan IEC 156.

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

(Adib et al., 2012).

Tegangan tembus terjadi ketika isolasi tidak dapat lagi menahan medan listrik yang diterapkan dan menyebabkan kerusakan pada bahan isolasi tersebut. Ketika terjadi tegangan tembus, bahan padat akan mengalami kerusakan yang permanen, (tidak bisa lagi berfungsi dengan baik sebagai isolator listrik). Untuk bahan gas ketika terjadi tegangan tembus, dapat pulih sepenuhnya setelah tidak ada tegangan listrik. Sedangkan bahan cair hanya sebagian yang pulih dari kerusakan yang terjadi pada kekuatan dielektriknya setelah tegangan listrik dihilangkan (Naidu & Kamaraju, 1993). Terdapat juga penjelasan mengenai berbagai mekanisme yang dapat menyebabkan tegangan tembus:

1. *Electronic Breakdown*

Mekanisme ini menjelaskan tentang aliran listrik yang terjadi di katoda saat tegangan tinggi diterapkan pada cairan isolasi. Ada dua cara utama aliran ini bisa terjadi yaitu melalui emisi medan dan emisi termionik.

Emisi medan terjadi medan listrik yang kuat menciptakan daya tarik yang cukup untuk menarik elektron keluar dari katoda. Penelitian menunjukkan bahwa arus listrik ini dipengaruhi oleh suhu. Sedangkan, emisi termionik terjadi ketika energi termal meningkatkan energi kinetik elektron di katoda sehingga mereka dapat melompat keluar dari permukaan katoda. Pengukuran pada berbagai suhu menunjukkan bahwa perubahan suhu tidak terlalu memengaruhi aliran listrik di katoda. Ini menunjukkan bahwa penyebab utama aliran listrik di katoda adalah emisi medan, bukan emisi termionik.. Itu terjadi karena ion positif dan partikel lain kembali ke katoda, ini menciptakan medan listrik lokal yang tinggi, memicu pelepasan elektron di daerah itu. Saat elektron bergerak melalui cairan, mereka mendapatkan energi dari tegangan listrik. (Kuffel E, 2000)

2. *Suspended Particels Theory*

(Naidu & Kamaraju, 1993)(Naidu & Kamaraju, 1993)Keberadaan zat padat dalam cairan dapat mempengaruhi kerusakan isolasi. Jika terdapat serat atau partikel kecil dalam cairan dan medan listrik diterapkan, partikel-partikel tersebut akan tertarik ke arah medan listrik. Hal tersebut terjadi karena zat padat memiliki permitivitas yang lebih tinggi daripada cairan, sehingga mereka akan tertarik ke daerah dengan tekanan maksimum. Sebaliknya, jika permitivitasnya lebih rendah, partikel tersebut akan tertarik ke daerah dengan tekanan yang lebih rendah. Pada kondisi tegangan terus-menerus atau berkepanjangan, partikel akan bergerak menuju daerah dengan tekanan maksimum. Jika jumlah partikel cukup banyak, dapat membentuk rantai yang

stabil antara elektroda dan menyebabkan kerusakan isolasi. (Naidu & Kamaraju, 1993)

3. *Cultivation and the Bubble Theory*

Mekanisme ini menunjukkan bahwa ketika cairan mengalami perubahan fase menjadi uap, berpengaruh pada proses kerusakan isolasi. Penemuan ini menjelaskan bahwa pembentukan gelembung uap memegang peranan penting dalam fenomena kerusakan isolasi tersebut. Terdapat berbagai proses penyebab terbentuknya gelembung uap, termasuk adanya kantong-kantong gas pada permukaan elektroda, gaya tolak elektrostatik antar muatan ruang, terbentuknya produk gas akibat tumbukan elektron, dan penguapan cairan yang terjadi akibat pembongkaran corona dari titik-titik tajam dan ketidakrataan pada permukaan elektroda. Ketika sebuah gelembung uap terbentuk akan mengalami perpanjangan sejalan dengan arah medan listrik yang diberikan. Kerusakan isolasi terjadi saat penurunan tegangan sepanjang gelembung mencapai nilai minimum pada kurva Paschen yang berkaitan dengan gas yang terdapat dalam gelembung tersebut. (Naidu & Kamaraju, 1993)

4. *Thermal Mechanism of Breakdown*

Mekanisme ini didasarkan pada pengamatan eksperimental dari arus yang sangat besar tepat sebelum terjadi keruntuhan. Pulsa arus yang sangat besar ini diyakini berasal dari ujung proyeksi mikroskopis pada permukaan katoda dengan kerapatan sekitar 1 A/cm³. Pulsa arus dengan kerapatan yang tinggi ini menyebabkan pemanasan lokal pada minyak yang mungkin

menyebabkan pembentukan gelembung uap. Gelembung uap terbentuk ketika energi melebihi 10^7 J/cm^2 . Ketika sebuah gelembung terbentuk, keruntuhan akan mengikuti, baik karena memanjangnya hingga mencapai ukuran kritis atau ketika secara sempurna menghubungkan celah antara elektroda. Dalam kedua kasus tersebut, ini akan menghasilkan pembentukan percikan listrik. Menurut mekanisme ini, kekuatan keruntuhan tergantung pada tekanan dan struktur molekuler cairan. Sebagai contoh, pada n-alkana, kekuatan keruntuhan diamati bergantung pada panjang rantai molekulnya. Namun, teori ini hanya berlaku pada panjang yang sangat kecil ($\leq 100 \text{ }\mu\text{m}$) dan tidak menjelaskan penurunan kekuatan keruntuhan dengan peningkatan panjang celah. (Naidu & Kamaraju, 1993)

b. Faktor Disipasi Dielektrik

Tingginya nilai faktor ini mencerminkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan pada minyak transformator, seperti keberadaan air, produk oksidasi, koloid logam alkali yang bermuatan, dan sejenisnya. Faktor disipasi elektrik merupakan indikator dari tingkat kerugian dielektrik dalam minyak. Ketika nilai faktor disipasi dielektrik tinggi, itu menandakan adanya kontaminasi atau kerusakan yang disebabkan oleh air, oksidasi, koloid logam alkali, dan faktor lainnya. Faktor disipasi dielektrik berkaitan erat dengan resistivitas, sehingga peningkatan nilai faktor disipasi dielektrik akan menunjukkan penurunan resistivitas minyak. Hal ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya degradasi isolasi, yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan transformator. (Fachry et al., 2018).

c. Tahanan Jenis

Tingkat tahanan jenis yang rendah adalah indikasi adanya kontaminasi yang memiliki sifat konduktif, yaitu kontaminan yang dapat mengalirkan arus listrik. Nilai tahanan jenis memiliki dampak signifikan terhadap kontaminan yang bersifat konduktif, dimana semakin tinggi jumlah kontaminan konduktif yang terdapat dalam minyak, maka semakin rendah tahanan jenis isolasi minyak tersebut. Fenomena ini menandakan bahwa adanya kontaminasi yang bersifat konduktif dapat mengganggu kemampuan isolasi minyak dalam mempertahankan resistensi terhadap arus listrik. (Chumaidy & MohKahfi Jagakarsa-Jakarta Selatan, 2012)

c) Karakteristik Kimia Isolasi Minyak Transformator

Selain tersusun dari senyawa hidrokarbon dan non hidrokarbon, minyak transformator juga memiliki kandungan air dan gas didalamnya. Perubahan suhu merupakan salah satu penyebab dari adanya kandungan gas dalam minyak transformator. Semakin tinggi kandungan gas yang terkandung maka semakin tinggi pula kegagalan isolasi yang terjadi. Dan untuk adanya kandungan air yang terdapat dalam minyak transformator disebabkan oleh masuknya udara yang mengandung uap air pada saat perbaikan. Endapan air ini sangat berbahaya karena bisa menimbulkan korosi yang mengakibatkan berkurangnya umur trafo. Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan dalam pengukuran kadar air: (Oktaria et al., 2018)

$$kadar\ air\ (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2.4)$$

Dimana:

m_1 = massa minyak trafo sebelum penambahan adsorben

m_2 = massa minyak trafo setelah penambahan adsorben

d) Kekuatan Dielektrik

Kekuatan dielektrik merupakan parameter yang mengukur kemampuan suatu material untuk menahan tegangan tinggi tanpa mengalami kegagalan dielektrik. Faktor-faktor yang memengaruhi kekuatan dielektrik cair meliputi sifat atom dan molekul cairan itu sendiri, material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, kandungan gas dalam cairan, dan sebagainya yang dapat mengubah sifat molekul cairan tersebut. Dalam konteks isolasi cair, kekuatan dielektrik dianggap setara dengan tegangan yang diberikan, seperti yang diatur oleh hukum Paschen's yang menyatakan bahwa kekuatan dielektrik cair biasanya berada dalam kisaran 10^7 V/cm. Dielektrik cair, selain berfungsi sebagai isolator, juga berperan dalam proses pendinginan dengan menyerap dan mendispersikan panas yang timbul melalui konveksi. Dibandingkan dengan dielektrik gas, dielektrik cair memiliki kerapatan yang jauh lebih tinggi, sehingga kekuatan dielektriknya juga lebih tinggi. Keunggulan lain dari dielektrik cair adalah kemampuannya untuk melakukan pemulihan diri sendiri jika terjadi pelepasan muatan (discharge). Namun, salah satu kelemahannya adalah kerentanannya terhadap kontaminasi, yang dapat mempengaruhi kinerja isolasi cair tersebut (Hafeez et al., 2015).

2.1.4 Purifikasi Minyak Transformator

Kegagalan transformator sering terjadi, terutama disebabkan oleh kerusakan isolasi. Salah satu penyebab utama kegagalan transformator minyak adalah kontaminasi oleh berbagai zat seperti debu, air, oksigen, dan gas terlarut, serta kotoran dari bahan padat yang terurai dan endapan. Kontaminan ini memiliki tegangan tembus yang lebih rendah daripada minyak trafo, sehingga jika kontaminasi meningkat, minyak dapat bocor pada tegangan yang lebih rendah dari yang seharusnya. Selain itu, kontaminasi juga meningkatkan kekentalan minyak, menghambat sirkulasi sebagai pendingin. Minyak yang tercemar harus dibuang, yang dapat merusak lingkungan dan menyebabkan pemborosan sumber daya alam karena minyak isolasi berasal dari minyak bumi yang tidak dapat diperbaharui.

Purifikasi adalah proses penyaringan atau pemurnian suatu bahan atau substansi dengan tujuan untuk menghilangkan kontaminan atau zat-zat asing yang tidak diinginkan dari bahan tersebut. Tujuan utama dari proses purifikasi adalah untuk meningkatkan kualitas atau kemurnian bahan tersebut sehingga sesuai dengan standar atau spesifikasi yang ditetapkan. Dalam konteks minyak transformator, purifikasi mengacu pada proses pengolahan minyak trafo dengan menggunakan berbagai metode penyaringan atau filtrasi untuk menghilangkan kontaminan seperti air, partikel padat, gas terlarut, dan zat-zat asing lainnya. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kualitas minyak transformator agar sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Metode purifikasi minyak trafo dapat melibatkan beberapa tahapan, seperti pemanasan dan penyaringan, penggunaan adsorben seperti tanah liat kaolin untuk menyerap

kontaminan, atau penggunaan sistem vakum untuk menghilangkan gas terlarut (Fandy et al., 2021).

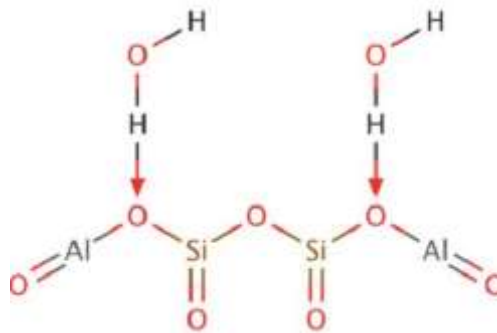
Purifikasi minyak transformator merupakan proses pemurnian yang bertujuan untuk menghilangkan kontaminan seperti air, partikel padat, gas terlarut, serta senyawa hasil degradasi kimia yang dapat menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Salah satu metode purifikasi yang umum digunakan adalah proses adsorpsi menggunakan bahan berpori seperti kaolin. Kaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) memiliki kandungan utama silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang bersifat inert, berpori, dan memiliki luas permukaan besar, sehingga efektif digunakan sebagai adsorben untuk menyerap kontaminan polar maupun non-polar (Utari, 1994). Aktivasi kaolin melalui pemanasan diperlukan untuk meningkatkan daya serapnya, karena pemanasan dapat menghilangkan air bebas dan memperbesar pori-pori permukaan. Pada pemanasan hingga sekitar 100°C , air fisik pada permukaan kaolin menguap sehingga pori-pori terbuka lebih luas dan situs aktif adsorpsi meningkat (Sahara, 2011). Pada suhu lebih tinggi, khususnya mendekati $350\text{--}400^\circ\text{C}$, struktur kristal kaolin mulai mengalami dehidroksilasi, yaitu pelepasan gugus $-\text{OH}$ yang mengubah kaolin menjadi metakaolin serta menghasilkan uap air $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O})$.

Proses tersebut mengurangi jumlah pusat aktif adsorpsi sehingga efektivitas penyerapan air dan kontaminan menurun pada suhu tinggi (Alfin F, 2021). Dengan demikian, keberhasilan proses purifikasi minyak menggunakan kaolin dipengaruhi oleh kondisi aktivasi termal adsorben, terutama pada rentang suhu $100\text{--}400^\circ\text{C}$.

2.1.5 Adsorben Kaolin

2.1.5.1 Definisi

Kaolin merupakan salah satu jenis lempung yang memiliki kandungan utama mineral kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Biasanya berwarna putih atau hampir



Gambar 2. 1 Formula Molekul Kaolin

putih dengan plastisitas dan kekuatan yang rendah. Kaolin telah memiliki berbagai aplikasi dalam industri, termasuk sebagai bahan pelapis dan pengisi dalam produksi kertas, sebagai bahan baku dalam industri keramik dan refraktori, serta sebagai pengisi dalam industri cat, polimer, dan fiberglass (Pruett, 2016).

Komposisi utama kaolin, yang terdiri dari silikon (Si) dan aluminium (Al), juga telah digunakan secara luas dalam sintesis berbagai jenis zeolit, hidrosodalit, dan faujasit (Cristobal et al., 2010; Davidovits, 2008). Kalimantan memiliki cadangan kaolin yang cukup besar, diperkirakan sekitar 66 juta ton, yang tersebar terutama di Bangka Belitung dan Kalimantan, serta di Sumatera, Jawa, dan Sulawesi (Daud, 2015). Struktur kristal kaolinit, komponen utama dalam kaolin, memiliki bentuk pseudo-heksagonal yang tersusun dari lembaran tetrahedral silika dan oktahedral alumina (Cheng et al., 2010). Reaktivitas kaolinit dalam kaolin dapat ditingkatkan dengan mengubahnya menjadi metakaolin melalui proses

termal (Stubna et al., 2006; Ilic et al., 2010) dan mekanis (Valaskova et al., 2011; Dellisanti and Valdre, 2012; Mitrovic and Zdujic, 2014).

Tabel 2.3 Kandungan oksida dalam kaolin berdasarkan hasil analisis XRF (X-Ray Fluorescence)

Oksida	Kadar (% berat)
SiO ₂	46,4
Al ₂ O ₃	36,5
Fe ₂ O ₃	1,01
CaO	0,17
MgO	0,18
K ₂ O	0,96
Na ₂ O	0,16
MnO	0,007
TiO ₂	0,35
P ₂ O ₅	0,28
SO ₃	<0,001
LOI	13,3
H ₂ O	0,6

(Purbasari et al., 2021)

Dalam proses purifikasi minyak trafo, kaolin dapat bertindak sebagai adsorben yang menyerap molekul-molekul kontaminan, termasuk senyawa-senyawa yang berasal dari oksidasi. Oksigen dalam kaolin juga dapat berperan dalam reaksi redoks dengan senyawa oksidasi dalam minyak trafo, membantu mengurangi kandungan kontaminan yang tidak diinginkan. Selain itu, kandungan oksidasi dalam kaolin juga dapat mempengaruhi sifat-sifat fisik dan kimia dari adsorben tersebut, seperti aktivitas permukaan, kekuatan adsorpsi, dan kapasitas adsorpsi. Semakin tinggi kandungan oksidasi dalam kaolin, semakin baik kemampuan adsorpsi dan efektivitasnya dalam proses purifikasi minyak trafo.

Kaolin juga memiliki massa jenis (Kerapatan Elektron) sebesar 2,62 gm/cc serta berat jenis kaolinit sebesar 2,60 gm/cc. Jika dihubungkan dengan mengapa kaolin digunakan sebagai adsorben dalam proses purifikasi ini karena massa jenis dan berat jenis merupakan parameter yang penting dalam mengevaluasi kelayakan kaolin sebagai adsorben pada proses purifikasi. Massa jenis adalah ukuran dari massa per unit volume suatu bahan, sementara berat jenis adalah ukuran dari berat per unit volume. Kedua nilai ini menggambarkan seberapa padat suatu bahan, di mana bahan yang lebih padat memiliki massa jenis dan berat jenis yang lebih tinggi. Nilai massa jenis dan berat jenis yang relatif tinggi (seperti yang dimiliki oleh kaolin) dapat dianggap sebagai indikasi bahwa kaolin memiliki struktur yang padat dan kompak. Hal ini menunjukkan bahwa kaolin memiliki kapasitas untuk menahan dan menyerap kontaminan dari minyak trafo dengan efektif.

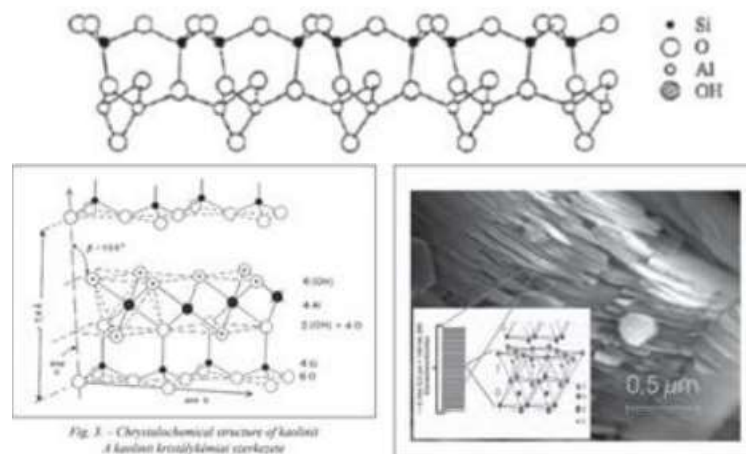
Selain itu, kerapatan elektron kaolin yang tinggi (2,62 gm/cc) menunjukkan bahwa kaolin memiliki kepadatan elektron yang tinggi, yang dapat mempengaruhi interaksi antara kaolin dan molekul kontaminan dalam minyak trafo. Interaksi ini merupakan faktor penting dalam proses adsorpsi, di mana kaolin dapat menyerap molekul-molekul kontaminan secara efisien.

Dengan demikian, keuntungan menggunakan tanah liat kaolin sebagai adsorben dibandingkan dengan adsorben lainnya adalah karena tanah liat kaolin memiliki kemampuan untuk menghilangkan keasaman, kandungan air, dan kotoran dari minyak transformator yang telah tua, sehingga dapat meningkatkan kembali sifat-sifat listrik dan fisik dari minyak transformator yang telah tua.

Selain itu, tanah liat kaolin juga dapat menghilangkan beberapa gas yang tidak diinginkan dari minyak transformator yang telah tua (Hafeez et al., 2015).

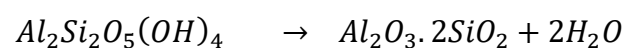
2.1.5.2 Aktivasi Kaolin

Aktivasi kaolin dengan proses fisika melalui proses pemanasan bertujuan untuk menguapkan air yang masih tersimpan di dalam pori-pori kristal lempung, sehingga jumlah pori dan luas permukaan spesifiknya meningkat. Peningkatan luas permukaan ini akan meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorben (Sahara, 2011). Menurut Akar et al. (2009) aktivasi kaolin melalui pemanasan memberikan peningkatan kapasitas adsorpsi, dimana pada suhu 100°C kaolin menunjukkan kemampuan penyerapan Cr(V) yang lebih tinggi (4,20 mg/g) dibandingkan kondisi tanpa aktivasi (3,61 mg/g). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Yuliani (2010) juga mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat setelah kaolin mengalami perlakuan pemanasan.



Gambar 2. 2 Struktur Kaolin yang dirancang oleh *Brindley Nakahira*

Selain itu, penelitian lain menggunakan jenis montmorillonit yang diperkaya Fe_2O_3 menunjukkan adanya peningkatan kapasitas adsorpsi pada rentang pemanasan $300\text{--}400^\circ\text{C}$, yaitu mencapai $98,2635\text{ mg/g}$ dan $117,1008\text{ mg/g}$. Peningkatan tersebut berkaitan dengan reaksi dehidroksilasi kaolin, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:



Kaolin memiliki dominasi komposisi SiO_2 dan Al_2O_3 yang menghasilkan sifat berpori, inert, serta luas permukaan besar yang sangat mendukung proses adsorpsi kontaminan pada minyak trafo bekas. Kandungan Al_2O_3 juga berfungsi sebagai pusat aktif adsorpsi ion logam. Dalam penelitian ini, proses pemanasan ganda dilakukan untuk menghilangkan air bebas dan bahan aktif pengotor alami pada kaolin, serta mengaktifkan permukaan adsorpsi melalui proses dehidroksilasi pada rentang $\pm 400^\circ\text{C}$. Pada suhu tersebut terjadi pelepasan gugus OH yang menyebabkan terbukanya pori-pori kaolin sehingga efektivitas adsorpsi

meningkat. Namun pada suhu yang terlalu tinggi ($\geq 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$), struktur kaolin berubah menjadi silika dan mullite sehingga kehilangan sifat adsorbennya.

Aktivasi termal kaolin pada variasi suhu menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu menyebabkan hilangnya komponen berbeda dalam struktur kaolin. Pada rentang $25\text{--}100^{\circ}\text{C}$ terjadi penguapan air bebas, sedangkan pada suhu 200°C air terikat mulai dilepaskan sehingga pori-pori kaolin terbuka lebih optimal. Pada suhu $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ terjadi proses dehidroksilasi yang menyebabkan gugus OH dalam struktur $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ menghilang dan kaolin mulai berubah menjadi metakaolin yang sangat reaktif serta bersifat higroskopis. Kondisi ini menyebabkan kaolin pada suhu tinggi berpotensi membawa kembali air ke dalam minyak. (Varga, 2007)

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merujuk pada beberapa penelitian dan jurnal terdahulu yang berkaitan dengan Kaolin sebagai Adsorben pada Pemurnian Minyak Transformator Tua, berikut beberapa jurnal dan penelitian terdahulu yang menjadi rujukan untuk penelitian ini.

Tabel 2.4 Penelitian terkait

NO	JUDUL PENELITIAN	IDENTITAS PENULIS	HASIL BAHASAN	TAHUN
1	<i>Reclamation of Old Transformer Oil using</i>	<i>A. I. Hafez, Central Chemical lab. Egyptian Electricity</i>	Pada peneltian ini ditemukan bahwa tanah liat kaolin dapat menjadi	2015

	<i>Kaoling Clay</i>	<i>Transmission Company</i> N. S. Gerges, <i>National institute for standards</i> S. E. Mohamed, <i>Egyptian Environmental Affairs Agency, Cairo, Egypt</i> A. I. Hashem, <i>Chemistry Department, Faculty of Science, Ain-shams University, Cairo, Egypt.</i>	metode yang efektif dalam mendaur ulang minyak transformator tua. Proses tersebut menghasilkan peningkatan tegangan tembus, pengurangan kandungan air, dan keasaman total. Dan melalui Spektrum sinar-X, ditemukan bahwa kaolin bekas setelah proses pengolahan masih menunjukkan karakteristik yang sama, menunjukkan bahwa kaolin dapat didaur ulang dan digunakan untuk pemrosesan lebih lanjut. Studi ini mengeksplorasi penggunaan kaolin dalam perlakuan minyak transformator yang sudah tua. Hasil penelitian	
--	----------------------------	---	--	--

			menunjukkan bahwa perlakuan dengan kaolin berhasil mengurangi tingkat keasaman, meningkatkan warna, memperbaiki tegangan tembus, dan mengurangi kandungan air dalam minyak. Artikel juga melakukan analisis terhadap gas-gas terlarut dan komposisi unsur dalam minyak. Dampak lingkungan dari penggunaan kaolin untuk mendaur ulang minyak juga dibahas secara rinci. Kesimpulan dari studi ini adalah bahwa perlakuan dengan kaolin dapat secara efektif meningkatkan kualitas minyak transformator yang sudah	
--	--	--	---	--

			tua, sambil mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan pembuangannya.	
2	Evaluation of Kaolin Clay as Natural Material for Transformer Oil Treatment to Reduce the Impact of Ageing on Copper Strip	Ashraf I. Hafez, Naser S. Gerges, Heba N. Ibrahim, <i>Central Chemical Lab. Egyptian Electricity Transmission Company, Egypt</i> Wael S.I. Abou El-magd, Ahmed I. Hashem, <i>Chemistry Department, Faculty of Science, Ain-shams University, Cairo 11566, Egypt</i>	Pada penelitian ini menyatakan bahwa penggunaan kaolin clay sebagai agen penyerap dalam proses pengolahan minyak trafo tua berhasil mengurangi kandungan sulfur yang bersifat korosif dalam minyak trafo. Proses pengolahan minyak trafo tua dengan kaolin clay dilakukan dengan memasukkan kaolin clay ke dalam katrid penghilang keasaman dan kotoran, kemudian minyak trafo tua dipanaskan dan disaring melalui katrid dengan	2016

			kaolin clay pada suhu 60 °C. Setelah perlakuan, minyak yang telah diolah dianalisis untuk menentukan jumlah ion tembaga yang terlarut dalam minyak. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan kaolin clay mampu mengurangi kandungan sulfur korosif dalam minyak trafo, sehingga mengurangi tingkat korosi pada strip tembaga. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kandungan sulfur dalam minyak trafo tua berpengaruh terhadap tingkat keasaman minyak. Minyak trafo tua dengan	
--	--	--	--	--

			kandungan sulfur yang lebih tinggi cenderung memiliki tingkat keasaman yang lebih tinggi. Fenomena ini diakibatkan oleh kandungan sulfur yang lebih tinggi dalam minyak tua, yang menyebabkan pembentukan zat-zat asam yang lebih banyak. Selain itu, penelitian ini juga mengungkapkan bahwa penggunaan kaolin clay dalam proses pengolahan minyak trafo tua mampu mengurangi korosi pada strip tembaga. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan kaolin clay efektif dalam mengurangi	
--	--	--	--	--

			dampak penuaan pada strip tembaga dalam minyak trafo.	
--	--	--	---	--

Penelitian pada tabel diatas bertujuan untuk menganalisis dan memperluas cakupan diskusi penelitian, serta membedakannya dari penelitian yang sedang dilakukan. Dalam penelitian ini, disertakan 2 jurnal nasional yang relevan dengan konsep peningkatan isolasi melalui proses purifikasi. Beberapa jurnal tersebut antara lain:

1. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian Tabel 2.4 nomor 1 akan digunakan sebagai acuan peneliti untuk menjelaskan teori tentang proses purifikasi minyak trafo tua dengan menggunakan adsorben kaolin. Penelitian tersebut juga menjelaskan mengenai unsur yang terkandung dalam kaolin sehingga bisa dijadikan sebagai bahan adsorben purifikasi. Pada Penelitian tersebut tidak dilakukan proses aktivasi terhadap kaolin. Sedangkan pada penelitian ini digunakan proses aktivasi dengan variasi suhu tertentu.
2. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian Tabel 2.4 nomor 2 akan digunakan sebagai acuan penelitian untuk menjelaskan teori tentang proses purifikasi minyak trafo tua untuk menghilangkan kandungan sulfur yang terdapat dalam minyak transformator tua dengan menggunakan variasi suhu pada proses aktivasi kaolin. Fokus penelitian tersebut hanya pada proses

penghilangan zat sulfur pada minyak trafo tua. Sedangkan pada penelitian ini ditambahkan parameter untuk mengukur kadar air dan viskositas.