

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam infrastruktur sistem tenaga listrik, isolasi cair memegang peranan krusial sebagai isolator utama. Hal ini disebabkan fungsinya yang multifungsi selain memisahkan dua konduktor bertegangan secara elektrik, isolasi cair juga berperan sebagai media pendingin pada transformator daya, pemadam busur api listrik, serta penyerap gas-gas hasil reaksi internal (Winanta et.al., 2019). Mengingat transformator merupakan jantung dari jaringan listrik, kualitas isolasinya sangat diperhatikan. Secara teknis, kekuatan dielektrik pada zat cair berbanding lurus dengan tegangan yang dialaminya, dengan nilai rata-rata mencapai 10^7 V/cm berdasarkan prinsip hukum Paschen (Wibowo et.al., 2011). Jika dikomparasikan dengan isolator gas, material cair memiliki tingkat kerapatan yang jauh lebih tinggi hingga 1000 kali lipat yang memungkinkan proses pembuangan panas melalui mekanisme konveksi terjadi secara lebih efisien. Oleh karena itu, cairan isolasi yang ideal wajib memiliki kemampuan dielektrik yang mumpuni, efisiensi perpindahan panas yang tinggi, serta stabilitas struktur kimia yang konsisten selama masa operasional perangkat (Agustina, 2014).

Transformator merupakan elemen krusial dalam infrastruktur pembangkitan dan distribusi tenaga listrik. Durabilitas serta performa operasional perangkat ini sangat dipengaruhi oleh kualitas material isolasi dan efektivitas sistem pendinginan dalam mereduksi panas selama proses konversi energi. Dalam konteks ini, minyak transformator memiliki peran ganda, yakni sebagai media isolasi elektrik sekaligus agen perpindahan panas. Sebagai media termal, minyak berfungsi mentransfer energi panas dari komponen aktif transformator menuju lingkungan luar. Sementara itu, sebagai isolator, cairan ini berperan krusial dalam mencegah terjadinya fenomena peluapan listrik (*flashover*) maupun percikan api (*sparkover*). Meskipun demikian, minyak transformator memiliki keterbatasan pada nilai konduktivitas termalnya yang relatif rendah. Kondisi beban berlebih (*overloading*) yang ekstrem dapat memicu lonjakan suhu yang signifikan, yang pada gilirannya berpotensi menurunkan efektivitas isolasi minyak tersebut. Namun, isolasi cair memiliki keunggulan komparatif dibandingkan isolasi padat, terutama kemampuannya untuk memulihkan diri secara mandiri (*self-healing*) pasca terjadinya pelepasan muatan. Jika disandingkan dengan isolasi gas, minyak memiliki kekuatan dielektrik yang jauh lebih superior karena densitas materialnya mencapai 1000 kali lebih rapat. Hingga saat ini, minyak mineral yang berasal dari distilasi minyak bumi tetap menjadi pilihan utama untuk isolasi transformator, kabel, *Circuit Breaker* (CB), dan kapasitor. Walaupun efektif sebagai isolator dan pendingin, penggunaan minyak mineral memiliki tantangan lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai secara hayati (*non-biodegradable*) serta memiliki risiko kerentanan terhadap bahaya kebakaran.

Dalam sistem ketenagalistrikan transformator memegang peranan vital pada seluruh tahapan mulai dari pembangkitan hingga transmisi dan distribusi. Mayoritas

unit transformator menggunakan dielektrik cair yang mengemban fungsi ganda sebagai isolator elektrik dan agen perpindahan panas. Kehadiran minyak isolasi ini sangat krusial untuk memisahkan konduktor-konduktor bertegangan di dalam tangki transformator guna mencegah terjadinya hubungan arus pendek (*short circuit*) yang berisiko memicu busur api atau percikan listrik. Meskipun telah diproteksi, kegagalan isolasi masih kerap dijumpai pada beberapa unit transformator yang berujung pada fenomena tegangan tembus (*breakdown voltage*). Secara teoritis, terjadinya tegangan tembus pada material isolasi cair dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme, antara lain teori kegagalan elektronik (zat murni), teori bola cair, teori gelembung gas, serta teori kegagalan akibat partikel padat atau ketidakmurnian (Adibah, 2016; Dhofir et al., 2017). Tegangan tembus merupakan tegangan ketika isolator sudah tidak mampu menghadapi tekanan berupa medan listrik diantara elektroda yang mempunyai beda potensial sehingga isolator berubah menjadi konduktor. Menurut standar SPLN 49 - 1 tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk minyak isolasi baru adalah $> 30 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ (Kurrahman et al., 2016).

Dalam operasional PLN minyak mineral merupakan jenis isolator cair yang paling umum diimplementasikan. Material ini merupakan derivat hasil pemurnian minyak bumi, khususnya yang berada di antara fraksi minyak diesel dan turbin, dengan karakteristik struktur kimia yang sangat kompleks. Agar dapat berfungsi secara optimal, minyak hasil distilasi tersebut wajib melewati proses modifikasi guna meningkatkan resistansi isolasi, stabilitas termal, serta kepatuhan terhadap standar teknis lainnya (Putra et al., 2017). Dalam konteks ini, kekuatan dielektrik menjadi indikator krusial yang merepresentasikan kapasitas material dalam menahan stres tegangan tinggi tanpa memicu kegagalan isolasi. Namun, ketergantungan pada minyak mineral menghadapi tantangan besar terkait ketersediaan sumber daya. Berdasarkan data Kementerian ESDM RI per 9 Januari 2021, cadangan minyak bumi nasional diprediksi akan habis dalam kurun waktu 9,5 tahun, dengan asumsi tidak adanya eksplorasi cadangan baru. Kondisi tersebut mendorong berbagai inisiatif untuk mereduksi pemakaian minyak mineral. Selain sifatnya yang tidak terbarukan (*non renewable*), minyak mineral juga memiliki kelemahan ekologis karena sifatnya yang sulit terurai secara hayati (*non biodegradable*), sehingga berisiko menimbulkan polusi lingkungan yang signifikan.

Kemajuan dalam bidang teknologi material skala nano telah memberikan inovasi baru dalam mengoptimalkan performa minyak isolasi melalui pembentukan *nanofluid* atau *nanodielectric*. Transformasi ini dilakukan dengan mendispersikan nanopartikel ke dalam minyak dasar (*base oil*) guna menciptakan karakteristik yang lebih unggul dibandingkan material induknya (Karusson et al., 2015). Sejumlah studi menunjukkan bahwa integrasi nanopartikel mampu meningkatkan kekuatan tembus dielektrik secara signifikan. Fenomena ini dipicu oleh mekanisme penangkapan elektron bebas (*electron trapping*), optimalisasi distribusi medan listrik, serta modifikasi sifat konduktivitas dan konstanta dielektrik pada minyak (Koutras et al., 2022). Di samping peningkatan aspek elektrik, keberadaan nanopartikel juga berperan dalam memperbaiki sifat termal cairan isolasi, yang pada akhirnya

memperkuat stabilitas operasional transformator daya (Amin, 2019). Hal ini dimungkinkan karena beberapa jenis nanopartikel memiliki parameter konduktivitas termal dan ketahanan dielektrik yang jauh melampaui kemampuan minyak mineral konvensional.

Fluktuasi suhu pada minyak transformator umumnya terjadi akibat penurunan beban operasional atau saat unit diaktifkan kembali dari keadaan nonaktif (*cold start*). Fenomena penurunan temperatur ini menjadi parameter yang kurang menguntungkan, khususnya pada pengoperasian di wilayah dengan iklim dingin. Sebagai elemen krusial dalam infrastruktur kelistrikan, transformator daya sangat bergantung pada isolasi cair yang menjalankan peran multifungsi: sebagai pemisah galvanis antar penghantar, media pendingin, pemadam busur api, serta penyerap gas-gas hasil proses internal (Winanta et al., 2019). Kualitas isolasi ini ditentukan oleh kekuatan dielektriknya, yang nilai ambangnya berkorelasi dengan level tegangan yang dialami. Merujuk pada prinsip Hukum Paschen, material isolasi cair memiliki estimasi kekuatan dielektrik pada kisaran 10^7 V/cm (Wibowo et al., 2011).

Dalam arsitektur sistem tenaga listrik, isolasi memainkan peran vital dalam memproteksi jaringan dari gangguan eksternal maupun internal, seperti fenomena *flashover* atau percikan listrik. Selain itu, isolasi berfungsi sebagai pembatas fisik antara komponen bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan, sebagaimana peran minyak isolasi pada unit transformator. Selain kapasitas dielektriknya, minyak ini juga berperan strategis sebagai media disipasi panas (pendingin) bagi peralatan. Sebagai material isolator cair, minyak transformator harus memiliki parameter tegangan tembus yang tinggi untuk menjamin integritas ketahanan isolasinya. Agar dapat dikategorikan sebagai media isolasi yang andal, minyak tersebut wajib memenuhi beberapa kriteria teknis, antara lain: memiliki kekuatan dielektrik minimal ($>10\text{kV/mm}$), memiliki massa jenis yang rendah guna mempercepat sedimentasi partikel kontaminan (mencegah pencampuran), serta memiliki volatilitas yang rendah agar stabil dan tidak membahayakan saat beroperasi. Namun, seiring dengan durasi operasionalnya, kualitas minyak transformator cenderung mengalami degradasi akibat akumulasi kontaminan yang secara bertahap mereduksi kekuatan dielektriknya (Bonggas, 2012).

Penambahan nanopartikel magnetik (Fe_3O_4) ke dalam minyak isolasi dapat secara signifikan meningkatkan nilai *Breakdown Voltage* (BDV). Hal ini dimungkinkan karena sifat magnetik dan luas permukaan spesifik nanopartikel Fe_3O_4 yang mampu memodifikasi mobilitas pembawa muatan dan menciptakan mekanisme penangkapan elektron (*electron scavenging*) yang lebih efektif, sehingga memperkuat integritas dielektrik minyak dalam menahan stres tegangan tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang yang telah penulis sampaikan pada bagian sebelumnya, penulis merumuskan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan nanopartikel Fe_3O_4 terhadap nilai *breakdown voltage* (BDV) minyak trafo mineral?

2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 terhadap perubahan nilai *breakdown voltage* minyak trafo mineral?
3. Bagaimana hubungan antara variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 dan peningkatan atau penurunan kinerja dielektrik minyak trafo yang ditunjukkan melalui nilai *breakdown voltage*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan nanopartikel Fe_3O_4 terhadap nilai *breakdown voltage* minyak trafo mineral.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 terhadap perubahan nilai *breakdown voltage* pada minyak trafo mineral.
3. Untuk mengetahui hubungan antara variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 dan peningkatan atau penurunan kinerja dielektrik minyak trafo yang ditunjukkan melalui nilai *breakdown voltage*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Menambah referensi ilmiah yang komprehensif terkait dengan peningkatan kinerja isolasi cair melalui teknologi nanofluida, khususnya mengenai dampak penambahan nanopartikel Fe_3O_4 terhadap parameter kritis yaitu *breakdown voltage*.
2. Memberikan gambaran umum dan rekomendasi teknis yang jelas mengenai potensi penggunaan minyak trafo yang dimodifikasi dengan nanopartikel Fe_3O_4 pada berbagai konsentrasi.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan yang dapat diberikan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada pengaruh penambahan nanopartikel Fe_3O_4 terhadap kinerja dielektrik minyak trafo mineral yang ditinjau berdasarkan nilai *breakdown voltage*, tanpa membahas karakteristik dielektrik lainnya seperti $\tan \delta$ atau resistivitas volume.
2. Variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada empat kondisi, yaitu 0 g/L (minyak murni), 0,01 g/L, 0,02 g/L, dan 0,04 g/L, dan 0,05 g/L dengan metode pencampuran (*stiring* dan *ultrasonikasi*) dan kondisi pengujian yang sama untuk seluruh sampel.
3. Pengujian *breakdown voltage* dilakukan menggunakan konfigurasi elektroda bola-bola dengan jarak sela 2,5 mm pada tegangan bolak-balik (AC) sesuai standar IEC, sehingga hasil penelitian hanya berlaku pada kondisi dan konfigurasi.
4. Karakteristik minyak isolasi yang diuji meliputi sifat dielektrik, sifat fisik, dan sifat kimia, antara lain:
 - Tegangan Tembus (*breakdown voltage*)

- Kadar Air (*water content*)
- Warna Minyak
- Viskositas (*viscosity*)
- Titik Nyala (*flash point*)
- FTIR (*Fourier Transform Infrared*)
- Data yang digunakan dalam penelitian diperoleh dari hasil pengujian di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Laboratorium Motor Bakar Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Laboratorium Kimia Organik Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin, dan Laboratorium Minyak Trafo PT PLN (PERSERO) UPT Makassar.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan untuk penelitian ini yang masing-masing uraian secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, Batasan Masalah, Sistematika Penulisan, dan Landasan Teori.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang Variabel penelitian, teknik analisis, metode pengumpulan data, serta tahapan penelitian.

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil yang diperoleh berdasarkan analisis yang dilakukan dan pembahasan.

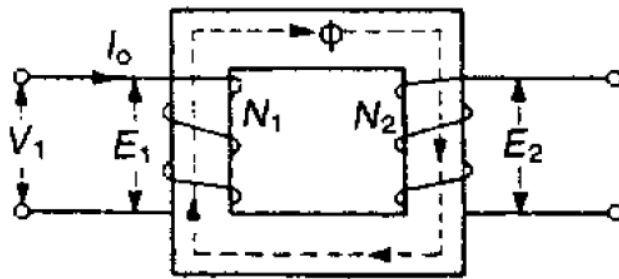
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan berdasarkan rumusan masalah yang ditentukan.

1.7 Landasan Teori

1.7.1 Transformator

Transformator adalah suatu perangkat listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip ini memungkinkan transformator untuk mampu memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya melalui suatu gandengan magnet. Transformator umum digunakan dalam berbagai penerapan dalam kehidupan sehari-hari, seperti pada sistem listrik. Penggunaan transformator memungkinkan penyesuaian besar tegangan yang tepat dan hemat, sehingga energi listrik dapat disalurkan dengan tegangan tinggi ke jarak yang jauh. Hal ini membantu mengurangi kerugian energi selama proses penyaluran. Prinsip kerja transformator didasarkan pada fenomena induksi elektromagnetik, yang terjadi karena adanya medan magnet yang terhubung antara kumparan primer dan sekunder pada transformator. Gandengan magnet tersebut terdiri dari inti besi yang kemudian akan menghasilkan fluks magnetik (Zuhal, 2000).



Gambar 1 Prinsip kerja Transformator

Sumber: Zuhal, 2000

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (1)$$

Dimana :

- V_1 : Tegangan Primer
- V_2 : Tegangan Sekunder
- N_1 : Jumlah Lilitan Primer
- N_2 : Jumlah Lilitan Sekunder
- α : Faktor Transformasi

Bila $\alpha > 1$, maka transformator disebut transformator step down sedangkan bila $\alpha < 1$, dinamakan transformator step up. Pada transformator ideal daya masuk (VA) pada sisi primer = daya keluar (VA) pada sisi sekunder (Mungkin, 2020).

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang melibatkan dua kumparan utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, yang dililitkan pada inti berbahan besi lunak dengan jumlah lilitan berbeda. Ketika tegangan bolak-balik diberikan pada kumparan primer, arus yang mengalir akan menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah di dalam inti. Perubahan medan magnet tersebut kemudian menginduksi kumparan sekunder yang terkopel secara magnetis, sehingga menimbulkan Gaya Gerak Listrik (GGL) pada sisi sekunder. Mekanisme ini memungkinkan terjadinya perpindahan energi listrik dari sisi primer ke sisi sekunder dengan besaran tegangan yang bergantung pada perbandingan jumlah lilitan kedua kumparan.

Dalam sistem tenaga listrik, transformator umumnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu sebagai berikut:

a. Transformator Daya

Transformator daya atau transformator tenaga merupakan peralatan listrik yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik, baik dengan menaikkan maupun menurunkan tingkat tegangan. Peran transformator ini sangat krusial dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, sehingga kondisinya harus selalu dijaga agar dapat beroperasi secara optimal dan andal.

b. Transformator Tegangan

Transformator tegangan adalah jenis transformator yang dirancang khusus untuk menurunkan tegangan dari level tinggi ke level yang lebih rendah secara aman dan terkendali. Perangkat ini umumnya digunakan dalam sistem pengukuran dan proteksi, dengan fungsi menyediakan besaran tegangan yang sesuai bagi peralatan ukur serta sistem proteksi jaringan listrik.

c. Transformator Arus

Transformator arus merupakan transformator yang digunakan untuk mengukur arus listrik dengan nilai yang sangat besar, hingga mencapai ratusan atau ribuan *ampere* pada sistem tegangan tinggi. Selain sebagai alat ukur, transformator ini juga berperan dalam melindungi relai pada gardu induk. Keunggulannya terletak pada kemampuannya melakukan pengukuran arus besar secara aman, terutama pada kondisi tegangan tinggi (Nugraha, 2023).

1.7.1.1 Transformator Daya

Transformator jenis ini merupakan peralatan yang umum digunakan di gardu induk karena memiliki kapasitas daya yang besar. Fungsinya adalah menyalurkan energi listrik dengan cara menaikkan tegangan dari level rendah ke tinggi pada sistem transmisi, maupun menurunkan tegangan dari level tinggi ke rendah pada sistem distribusi.

1. Sistem Transmisi

Transformator dalam sistem transmisi berperan sebagai perangkat listrik yang mengubah tingkat tegangan untuk mendukung penyaluran daya listrik secara efisien dalam jarak jauh. Penggunaan transformator memungkinkan penerapan tegangan tinggi (*High Voltage/HV*) pada proses transmisi, sehingga arus yang mengalir menjadi lebih kecil. Hal ini sejalan dengan hubungan daya listrik, yaitu $P = \sqrt{3} \times V \times I \cos \theta$, dimana peningkatan tegangan akan menurunkan arus untuk daya yang sama. Apabila tegangan tidak dinaikkan, maka arus yang mengalir akan menjadi besar dan berakibat pada meningkatnya rugi-rugi daya pada penghantar. Rugi daya tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan $P_{\text{loss}} = 3 \times I^2 \times R$, yang menunjukkan bahwa besarnya rugi daya sangat dipengaruhi oleh kuadrat arus dan resistansi penghantar. Oleh karena itu, peningkatan tegangan pada sistem transmisi menjadi sangat penting untuk meminimalkan kehilangan daya selama proses penyaluran energi listrik jarak jauh.

2. Sistem Distribusi

Pada sistem distribusi, transformator berfungsi untuk menyesuaikan tingkat tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan konsumen sekaligus menjaga efisiensi dan keandalan penyaluran daya. Tegangan yang sebelumnya dinaikkan pada sistem transmisi akan diturunkan kembali pada titik-titik tertentu dalam jaringan distribusi.

Adapun beberapa fungsi utama transformator dalam sistem distribusi adalah sebagai berikut:

- a. Penyesuaian Tegangan: Menurunkan tegangan dari tingkat transmisi ke tingkat yang lebih rendah agar aman digunakan oleh konsumen.

- b. Penyaluran Daya: Transformator *step down* mendistribusikan energi listrik dari jaringan tegangan menengah ke tegangan rendah sesuai kebutuhan beban lokal.
- c. Pengurangan Arus: Penurunan tegangan disertai pengaturan arus membantu mengurangi rugi-rugi daya akibat resistansi penghantar pada jarak pendek.
- d. Isolasi Sistem: Memberikan isolasi listrik antara jaringan transmisi dan distribusi, serta antar konsumen, sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem.
- e. Peningkatan Kualitas Daya: Membantu menjaga kestabilan tegangan dan faktor daya agar kualitas energi listrik tetap baik (Nugraha, 2023).

1.7.1.2 Bagian-Bagian Transformator

Secara umum, terdapat tiga bagian penting penyusun transformator:

- a. Bagian Utama
 - 1. Inti Besi

Inti besi berfungsi sebagai media penghantar fluks magnet yang dihasilkan oleh arus bolak-balik pada kumparan primer untuk kemudian menginduksi kumparan sekunder. Dalam upaya mengurangi rugi-rugi besi akibat arus pusar (*eddy current*), inti transformator dibuat dari susunan lempengan besi tipis yang disusun berlapis (PT PLN (Persero), 2014).
 - 2. Kumparan Indo

Kumparan transformator terdiri atas lilitan kawat tembaga yang dilapisi material isolasi guna mencegah terjadinya hubungan singkat, baik antara kawat dengan inti besi maupun antarbelitan. Pada transformator berkapasitas besar, kumparan umumnya direndam dalam minyak transformator. Media ini berfungsi sebagai pendingin dengan menyerap panas yang timbul selama operasi, sekaligus sebagai isolator tambahan untuk meningkatkan keandalan sistem.
 - 3. *Bushing*

Bushing merupakan komponen yang menghubungkan belitan transformator dengan jaringan eksternal (Almanda dan Ardiansyah, 2022). Komponen ini tersusun atas konduktor yang dilapisi isolator, dimana isolator tersebut berfungsi memisahkan konduktor *bushing* dari badan tangki utama transformator. Secara garis besar *bushing* dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

 - a. Sistem Isolasi

Terdiri dari 2 jenis:

 - 1. *Bushing* kondenser digunakan pada sistem dengan tegangan di atas 72,5 kV dan dilengkapi lapisan kapasitansi seri sebagai pembagi tegangan, yaitu kapasitansi antara konduktor dengan *tap* (C1) dan antara *tap* dengan ground (C2).
 - 2. *Bushing* non-kondenser digunakan pada tegangan hingga 72,5 kV dengan material isolasi padat seperti porselen atau keramik.
 - b. Konduktor

Terdiri dari 3 jenis:

1. *Hollow konduktor* dengan inti penguat logam
2. Konduktor pejal
3. *Flexible lead*
- c. Klem koneksi yaitu pengikat yang menghubungkan *stud bushing* dengan konduktor eksternal.
- d. Aksesoris meliputi indikator minyak, *gasket seal*, dan tap pengujian
4. Minyak Transformator
Minyak transformator memiliki dua fungsi utama yang sangat penting, yaitu sebagai media isolasi listrik dan pendingin. Sebagai isolator, minyak mencegah terjadinya pelepasan muatan atau percikan listrik antar kumparan pada saat transformator beroperasi dalam kondisi tegangan tinggi. Sebagai media pendingin, minyak menyerap panas yang dihasilkan selama pembebanan dan melepaskannya ke lingkungan sekitar. Selain itu, minyak juga membantu melindungi komponen internal dari kontaminasi zat asing yang dapat menurunkan performa transformator.
5. Tangki dan konservator
Tangki konservator berfungsi sebagai tempat penampungan cadangan minyak sekaligus ruang kompensasi terhadap perubahan volume minyak akibat pemuatan termal selama transformator beroperasi. Pada sistem ini dipasang *buchholz relay* di antara tangki utama dan konservator untuk mendeteksi gas hasil dekomposisi minyak akibat gangguan internal. Selain itu, saluran masuk udara pada konservator dilengkapi dengan *silica gel* yang berfungsi menyerap kelembapan agar kualitas minyak tetap terjaga (PT. PLN (Persero), 2014).
- b. Peralatan Bantu
 1. Pendingin
Sistem pendingin berfungsi untuk menjaga kestabilan suhu transformator selama beroperasi. Kinerja sistem ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi jaringan listrik, rugi-rugi energi selama operasi, serta suhu lingkungan sekitar. Media pendingin utama pada transformator adalah minyak isolasi yang bekerja melalui mekanisme sirkulasi. Panas yang dihasilkan oleh belitan akan diserap oleh minyak, kemudian dialirkan melalui jalur sirkulasi menuju radiator. Pada radiator, panas dilepaskan ke lingkungan melalui sirip-sirip pendingin yang didukung oleh kipas serta pompa sirkulasi guna meningkatkan efektivitas pendinginan. Dengan adanya sistem ini, suhu operasi transformator dapat dipertahankan dalam batas optimal.
 2. *Tap Changer*
Tap changer merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah rasio transformasi sehingga tegangan sekunder dapat disesuaikan dengan kebutuhan, meskipun tegangan primer mengalami perubahan. Jenis tap changer yang umum digunakan pada gardu induk adalah *On Load Tap Changer* (OLTC), yang memungkinkan pengaturan level tegangan dilakukan tanpa harus memutus operasi transformator.
 3. NGR (*Netral Ground Resistor*)

NGR (*Neutral Grounding Resistor*) adalah sistem pentanahan yang dipasang secara seri pada titik netral sekunder transformator sebelum dihubungkan ke tanah. Fungsi utamanya adalah membatasi besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah saat terjadi gangguan hubung tanah. Penggunaan NGR pada gardu induk bersifat kondisional, tergantung pada desain dan perencanaan sistem saat proses commissioning transformator daya.

4. Indikator

Untuk memantau kondisi operasi transformator, beberapa indikator dipasang sebagai alat pengawasan, antara lain:

- a. Indikator suhu minyak
- b. Indikator permukaan minyak
- c. Indikator suhu *winding*
- d. Indikator kedudukan tap

5. Alat Pernapasan Trafo

Alat pernapasan transformator berfungsi menjaga kualitas minyak isolasi dari kontaminasi udara luar, khususnya kelembapan yang dapat menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Komponen ini umumnya berupa tabung berisi material higroskopis, seperti *silica gel* yang berfungsi menyerap uap air.

Mekanisme kerja alat pernapasan ini mengikuti prinsip termodinamika :

- a. Ketika suhu minyak meningkat akibat kenaikan beban, volume minyak bertambah sehingga udara terdorong keluar melalui tabung penyaring.
- b. Saat suhu minyak menurun akibat penurunan beban, volume minyak menyusut dan udara luar masuk kembali setelah terlebih dahulu disaring oleh media pengering.

Perubahan beban operasional transformator menyebabkan fluktuasi suhu minyak yang berkelanjutan, sehingga alat pernapasan terus bekerja secara dinamis untuk menjaga kualitas minyak isolasi. Sistem ini memastikan udara yang masuk ke tangki transformator selalu dalam keadaan kering dan bebas kontaminan.

c. Peralatan Proteksi Trafo

1. Rele *Bucholz* merupakan sistem proteksi utama yang digunakan untuk mendeteksi gangguan internal pada transformator. Rele ini bekerja dengan memantau perubahan tekanan minyak isolasi serta terbentuknya gelembung gas akibat gangguan internal, seperti akumulasi gas, kehilangan minyak isolasi, maupun lonjakan aliran minyak (*insulation liquid flow surge*) (PT. PLN (Persero), 2016).
2. Rele *Jansen* adalah sistem proteksi yang secara khusus digunakan untuk memantau kondisi *On Load Tap Changer (OLTC)*. Rele ini mendeteksi gangguan melalui perubahan tekanan minyak dan akumulasi gas pada kompartemen OLTC.
3. Rele *Sudden Pressure* berfungsi sebagai pengaman terhadap kenaikan tekanan mendadak di dalam transformator. Perangkat ini dirancang sebagai pelepas tekanan (*pressure relief device*) ketika terjadi

gangguan internal yang menyebabkan peningkatan tekanan secara abnormal.

4. *Rele Thermal* digunakan untuk mendeteksi suhu operasi transformator serta memberikan indikasi apabila terjadi kenaikan suhu yang tidak normal. Suhu operasi yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi isolasi kertas pada transformator. Rele ini umumnya terdiri atas sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler, dan meter penunjuk temperatur (Persero), 2014).

1.7.1.3 Pemeliharaan Transformator

Pemeliharaan transformator merupakan rangkaian kegiatan sistematis yang bertujuan untuk memahami karakteristik peralatan, memantau parameter operasional, serta mengevaluasi kondisi dan kinerja transformator secara menyeluruh. Secara umum, pemeliharaan mencakup berbagai prosedur teknis yang dirancang untuk memastikan peralatan tegangan tinggi tetap beroperasi secara optimal sekaligus meminimalkan risiko gangguan yang berpotensi menyebabkan kerusakan.

Dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan, pemeliharaan transformator dilakukan melalui beberapa pendekatan utama yang berorientasi pada upaya mempertahankan kondisi operasi normal, memulihkan fungsi peralatan apabila terjadi gangguan, serta meningkatkan tingkat keandalan sistem. Dengan demikian, kegiatan pemeliharaan tidak hanya bersifat korektif, tetapi juga preventif untuk menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik.

a. *In service inspection*

In service inspection merupakan kegiatan inspeksi yang dilakukan saat transformator masih beroperasi. Metode ini bertujuan untuk mendeteksi secara dini potensi gangguan atau indikasi ketidaknormalan tanpa perlu melakukan pemadaman. Dengan pendekatan ini, kondisi internal transformator dapat dipantau sambil tetap mempertahankan kontinuitas pasokan listrik (PT. PLN (Persero), 2014).

b. *In service measurement*

In service measurement adalah kegiatan pengukuran parameter transformator yang dilakukan ketika peralatan masih dalam kondisi beroperasi. Metode ini memungkinkan pengambilan data kondisi transformator secara lebih rinci tanpa mengganggu operasi sistem, sehingga pemantauan dapat dilakukan secara berkelanjutan.

c. *Shutdown testing/measurement*

Shutdown testing/measurement merupakan serangkaian pengujian dan pengukuran yang dilakukan saat transformator dalam kondisi tidak beroperasi atau dimatikan.

Beberapa pengujian yang termasuk dalam proses *shutdown testing/measurement* dan dibahas pada penelitian ini meliputi:

1. Pengukuran tahanan isolasi
 - Uji indeks polarisasi trafo

2. Pengukuran tangen delta
 - Pengujian tangen delta pada isolasi trafo
 - Pengujian tangen delta pada *bushing*
3. Pengujian Minyak Trafo dengan Metode BDV (*Breakdown Voltage*), untuk mengetahui kemampuan minyak dalam menahan tegangan tembus sebagai indikator kualitas sistem isolasi cair.

Tabel 1 Syarat Minyak Isolasi

Parameter Uji	Nilai	Standar
Tegangan Tembus	>30 kV/2,5 mm	SPLN 49-91: 1982
Titik Nyala (Flash Point)	≥ 140 °C	SPLN 49-91: 1982
Titik Tuang (Pour Point)	≤ -30 °C	SPLN 49-91: 1982
Viskositas (Viscosity)	≤ 40 cSt	SPLN 49-91: 1982
Berat Jenis (<i>Density</i>) 20 °C	$\leq 0,859$ gr/cm ³	SPLN 49-91: 1982
Kandungan Air	≤ 30 mg/kg	IEC 60296- 2003

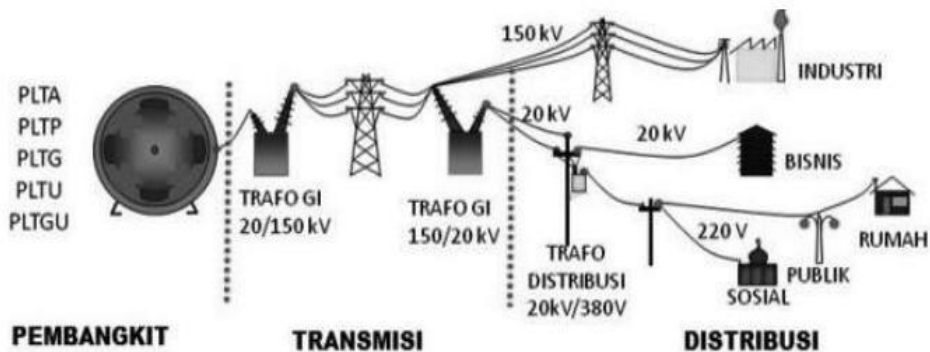
1.7.2 Tegangan Tinggi

Tegangan tinggi adalah semua tegangan yang dianggap cukup tinggi oleh praktisi kelistrikan sehingga diperlukan cara-cara khusus ketika dilakukan pengukuran. Secara umum, tegangan sebesar 1.000 V telah dikategorikan sebagai tegangan tinggi, sebab pada level tersebut diperlukan prosedur pengukuran khusus dan telah muncul fenomena medan listrik tinggi, seperti korona, khususnya apabila diterapkan pada konduktor dengan diameter kurang dari 1 mm (Arismunandar, 2001).

Tegangan tinggi digunakan pada berbagai tahapan penyaluran energi listrik, mulai dari pembangkitan, transmisi, hingga distribusi tegangan menengah sebesar 20 kV. Sementara itu, pada sisi saluran tegangan rendah, tegangan yang umum digunakan adalah 220 V untuk sistem satu fasa dan 380 V untuk sistem tiga fasa. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri atas tahapan pembangkitan, transmisi, dan distribusi sebelum energi listrik sampai ke konsumen akhir (Perdana, 2021).

PT Perusahaan Listrik Negara (PERSERO) atau PLN sebagai perusahaan listrik di Indonesia mengeluarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) no 1 pada tahun 1995. Pada SPLN 1:1995 tersebut tercantum keterangan bahwa standar PLN tersebut merujuk kepada publikasi IEC 33 (tahun 1983) dengan modifikasi sesuai pengalaman dan kebutuhan dari PLN. Di dalamnya terdapat definisi dari penyebutan klasifikasi tegangan listrik :

- Tegangan Rendah : Tegangan sistem antara 100 V s/d 1 kV
- Tegangan Menengah : Tegangan sistem di atas 1 kV s/d 35 kV
- Tegangan Tinggi : Tegangan sistem di atas 35 kV s/d 245 kV
- Tegangan Ekstra Tinggi : Tegangan sistem di atas 245 kV



Gambar 2 Tegangan tinggi pada sistem tenaga Listrik
Sumber : Halomoan, 2017

1.7.2.1 Macam-macam Tegangan Tinggi

1. Tegangan Tinggi AC

Tegangan tinggi arus bolak-balik (AC) diklasifikasikan berdasarkan frekuensinya, yaitu frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Pengujian tegangan tinggi AC frekuensi rendah dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan peralatan listrik pada sistem tegangan tinggi dalam menahan tegangan yang melebihi nilai operasional normalnya dalam jangka waktu tertentu. Pengujian ini penting karena pada kondisi nyata, tegangan sistem tidak selalu stabil dan dapat mengalami kenaikan di atas nilai nominal akibat gangguan, seperti putusnya penghantar atau kondisi abnormal lainnya (Manjang, 2023).

Sementara itu, pengujian tegangan tinggi AC frekuensi tinggi digunakan untuk mendeteksi kerusakan mekanis pada material isolasi, seperti retakan, rongga udara, atau cacat internal lainnya, khususnya pada isolator porselen. Pada pengujian ini, tegangan tinggi memungkinkan terjadinya pelepasan muatan atau lompatan api pada permukaan isolator. Jika isolator dalam kondisi baik, arus akan merambat melalui permukaan isolator. Sebaliknya, apabila terdapat kerusakan internal seperti retakan atau rongga udara, arus akan mengalir melalui bagian dalam isolator sehingga tidak terlihat percikan api pada permukaannya (Manjang, 2023).

2. Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi searah (DC) diperoleh melalui proses penyearahan tegangan tinggi bolak-balik. Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih stabil, pada terminal keluaran biasanya dipasang kapasitor sebagai perata tegangan. Tegangan tinggi DC banyak dimanfaatkan dalam pengujian dan penelitian

sistem isolasi yang memiliki sifat kapasitif, seperti kabel dan kapasitor (Manjang, 2023).

Selain itu, aplikasi tegangan tinggi DC juga banyak ditemukan pada instalasi elektrostatis, seperti sistem penyaring gas buang dan pengecatan elektrostatis, peralatan medis seperti alat rontgen, serta bidang fisika inti untuk akselerator partikel. Secara umum, pembangkitan tegangan tinggi DC dilakukan menggunakan rangkaian penyearah dengan dioda berbahan Selenium, Germanium, atau Silizium. Dioda Selenium diketahui memiliki ukuran fisik yang lebih besar, efisiensi lebih rendah, dan kapasitas penghantaran arus yang lebih kecil dibandingkan jenis lainnya (Manjang, 2023).

3. Tegangan Tinggi Impuls

Tegangan tinggi impuls digunakan untuk mensimulasikan kondisi tegangan lebih (*overvoltage*) yang berasal dari pengaruh eksternal, seperti sambaran petir maupun surja hubung. Dalam proses pengujian, tegangan dinaikkan hingga mencapai nilai tegangan lompatan standar pada kondisi kering, kemudian dilanjutkan sampai terjadi penembusan (*puncture*) dengan laju kenaikan tertentu, yaitu sekitar 4 kV/detik. Nilai tegangan tembus yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh kecepatan kenaikan tegangan selama pengujian berlangsung (Manjang, 2023).

Tegangan akibat pelepasan muatan oleh petir atau akibat surja hubung ini mempunyai bentuk gelombang aperiodik yang diredam (*damped aperiodic*) seperti pada waktu pelepasan muatan sebuah kapasitor melalui sebuah tahanan induktif. Pada lokasi yang mengalami sambaran petir langsung, bentuk gelombang umumnya ditandai dengan muka gelombang yang curam dan ekor gelombang yang relatif pendek (Manjang, 2023).

Besarnya tegangan impuls yang diterapkan pada peralatan uji telah ditentukan berdasarkan standar pengujian ketahanan terhadap petir. Nilai tersebut bergantung pada posisi peralatan dalam sistem tenaga listrik. Semakin dekat suatu peralatan dengan sumber sambaran petir, maka probabilitas terkena gangguan menjadi lebih besar sehingga nilai tegangan impuls yang harus diterapkan juga semakin tinggi (Manjang, 2023).

Tegangan lebih didefinisikan sebagai kenaikan tegangan yang terjadi dalam waktu sangat singkat atau dikenal sebagai lonjakan tegangan (*voltage surge*) maupun transien tegangan. Salah satu penyebab utama fenomena ini adalah sambaran petir, yang merupakan fenomena alam dengan energi sangat besar dan berpotensi menimbulkan bahaya serius terhadap sistem kelistrikan. Satu kali sambaran petir dapat menghasilkan tegangan hingga 300 kV, sehingga mampu merusak peralatan listrik maupun sistem isolasinya (Habsari, 2022).

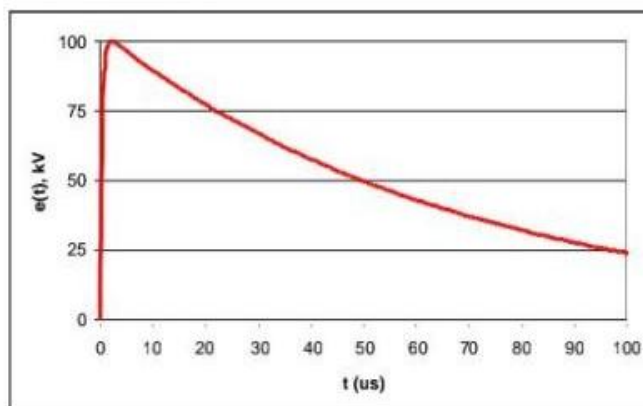
Gangguan tegangan lebih pada sistem jaringan listrik umumnya disebabkan oleh dua sumber utama, yaitu tegangan transien yang berasal dari luar maupun dari dalam sistem itu sendiri. Gangguan yang berasal dari luar biasanya dipicu oleh sambaran petir. Setiap sambaran petir akan menghasilkan gelombang tegangan berjalan yang merambat sepanjang jaringan, dengan

amplitudo yang dibatasi oleh kemampuan isolasi pada sistem transmisi listrik (Habsari, 2022).

Tegangan impuls yang dihasilkan oleh sambaran petir memiliki amplitudo yang sangat besar. Dalam skala laboratorium, tegangan impuls dapat dibangkitkan hingga mencapai 1000 kV. Gelombang tegangan tinggi impuls yang dihasilkan oleh generator impuls memiliki durasi sangat singkat, yaitu berkisar antara beberapa mikrodetik hingga puluhan mikrodetik. Durasi yang sangat pendek inilah yang menjadi salah satu karakteristik utama fenomena tegangan tinggi impuls. Berdasarkan standar IEC, gelombang tegangan impuls petir memiliki karakteristik waktu muka dan waktu ekor sebesar $1,2/50 \mu\text{s}$, sedangkan karakteristik arus impuls petir adalah $8/20 \mu\text{s}$ (Habsari, 2022).

Pada skala eksperimental, surja petir dapat direpresentasikan melalui pembangkitan tegangan tinggi impuls menggunakan beberapa jenis generator, seperti generator impuls RC, generator impuls RLC, dan generator Marx. Di antara ketiga jenis tersebut, generator impuls RLC mampu menghasilkan gelombang eksponensial ganda yang bentuknya menyerupai karakteristik tegangan impuls petir. Bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh sifat alami komponen resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C), serta nilai masing-masing komponen yang digunakan dalam rangkaian (Habsari, 2022).

Nilai puncak pada gelombang impuls berada pada titik 1,0 atau 100 % nya (Vs). Titik muka gelombang (Tf) merupakan perpotongan pada sumbu waktu yaitu ketika nilai tegangan atau arus bernilai 0 (V0) dengan garis yang menghubungkan titik ketika tegangan atau arus bernilai 10% (0,1) dan 90% (0,9) pada muka kurva. Selanjutnya untuk mendapatkan ekor gelombang (Tt) diambil dari titik awal muka gelombang (Tf) sampai dengan titik perpotongan antara tegangan atau arus ketika 50% (0,5) dengan sumbu T (Halomoan, 2017).



Gambar 3 Gelombang tegangan impuls

Sumber : Halomoan, 2017

1.7.3 Minyak

Minyak transformator mineral merupakan media isolasi cair utama yang banyak digunakan pada transformator daya. Minyak ini memiliki peran penting sebagai bahan dielektrik untuk menahan tegangan tinggi sekaligus sebagai media pendingin yang berfungsi menyerap dan melepaskan panas yang dihasilkan selama proses operasi transformator (Tambunan et al., 2024). Kinerja serta kualitas minyak transformator sangat menentukan keandalan peralatan, mengingat sekitar 50% kegagalan transformator disebabkan oleh kerusakan pada sistem isolasi (Shindu, 2023). Oleh karena itu, penelitian yang berfokus pada peningkatan sifat dielektrik minyak, khususnya kekuatan tembus listrik (*breakdown voltage*), menjadi salah satu topik penting dalam bidang rekayasa tegangan tinggi (Saputra et al., 2018).

Material isolasi cair yang umum digunakan pada transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dari hasil pengolahan minyak bumi, khususnya fraksi yang berada di antara minyak diesel dan minyak turbin. Minyak mineral memiliki struktur kimia yang kompleks karena tersusun atas campuran berbagai senyawa hidrokarbon (Samsurizal, 2022).

Namun demikian, minyak transformator berbasis mineral memiliki beberapa keterbatasan, salah satunya adalah kecenderungan terbentuknya gelembung udara di dalam minyak. Fenomena ini umumnya dipengaruhi oleh suhu operasi yang tinggi, kelembapan berlebih, pelepasan muatan (*discharge*), serta dekomposisi material isolasi (Zhang et al., 2022). Kelembapan diketahui memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik isolasi cair, terutama pada nilai tegangan tembus dan kekuatan dielektriknya. Selain itu, kenaikan suhu yang tinggi juga dapat memicu terbentuknya gelembung udara, yang selanjutnya berpotensi menurunkan performa isolasi cair (Zhang et.al., 2020).

Sebagai salah satu komponen utama dalam sistem penyaluran tenaga listrik, transformator berperan penting dalam menjaga kontinuitas suplai energi kepada konsumen melalui fungsi penaikan dan penurunan tegangan pada sistem transmisi maupun distribusi. Kerusakan pada transformator dapat menyebabkan terhentinya aliran listrik. Pada sektor rumah tangga, dampaknya mungkin relatif terbatas, namun pada sektor industri kerusakan transformator dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang sangat besar, termasuk biaya perbaikan dan penghentian proses produksi. Berdasarkan berbagai publikasi internasional, salah satu penyebab dominan kerusakan transformator adalah kegagalan isolasi yang dipicu oleh kualitas pemasangan yang kurang baik, penurunan mutu isolasi, serta terjadinya *short circuit*. Oleh sebab itu, kegiatan pemeliharaan transformator tidak hanya terbatas pada tindakan teknis langsung terhadap peralatan, tetapi juga membutuhkan perencanaan dan pengawasan yang baik dalam pelaksanaannya.

Identifikasi dini terhadap kerusakan material tertentu pada transformator dapat membantu meningkatkan umur pakai (*lifetime*) peralatan. Secara umum, transformator menggunakan dua jenis sistem isolasi, yaitu isolasi padat berupa mika dan kertas, serta isolasi cair berupa minyak transformator. Dibandingkan isolasi padat, isolasi cair memiliki keunggulan dalam hal kemampuan penghantaran panas

yang lebih baik sehingga efektif digunakan sebagai media pendingin. Selain itu, isolasi cair juga mampu memulihkan sifat dielektriknya setelah terjadi pelepasan muatan karena kerapatan dielektriknya lebih tinggi dibandingkan dielektrik gas. Fungsi utama sistem isolasi adalah melindungi dan memisahkan bagian konduktif, seperti belitan, inti, dan tangki transformator, agar tidak terjadi pelepasan muatan listrik. Jika medan listrik pada material isolasi melebihi nilai kritis akibat perbedaan potensial yang tinggi, maka dapat muncul fenomena peluahan sebagian (*partial discharge*) yang menjadi awal terjadinya *streamer breakdown*, *electrical treeing*, korona, hingga *flashover* (Arismunandar, 1983).

Kualitas minyak isolasi sangat dipengaruhi oleh keberadaan kontaminan (*impurities*) dan degradasi sifat dielektrik akibat peningkatan temperatur selama operasi transformator yang mengikuti variasi beban. Pada dasarnya, minyak mineral merupakan campuran hidrokarbon cair hasil distilasi dan pemurnian minyak mentah yang masih mengandung senyawa pengotor, seperti sulfur, oksigen, dan nitrogen. Selain itu, penggunaan minyak mineral juga menimbulkan beberapa perhatian, antara lain risiko kebakaran yang tinggi, keterbatasan sumber daya, waktu produksi yang panjang, serta isu lingkungan akibat berasal dari minyak bumi. Oleh karena itu, pengembangan minyak transformator dengan konduktivitas termal yang lebih baik dan karakteristik isolasi yang lebih unggul menjadi kebutuhan penting, khususnya untuk aplikasi sistem tenaga yang kritis (Kumar et al., 2016).

1.7.3.1 Minyak Transformator

Isolasi merupakan sifat suatu material yang berfungsi memisahkan dua atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan secara elektrik, sehingga dapat mencegah terjadinya kebocoran arus, lompatan api, *flashover*, maupun percikan listrik (*sparkover*). Selain itu, material isolasi juga berperan sebagai pelindung mekanis terhadap kerusakan yang disebabkan oleh korosi, tekanan elektrik, maupun tekanan mekanis. Adapun isolator merupakan komponen atau perangkat yang digunakan untuk menjalankan fungsi isolasi tersebut. Pada sistem tenaga listrik, khususnya transformator daya, penggunaan transformator bertujuan untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sistem. Dalam aplikasi industri maupun laboratorium, transformator sangat dibutuhkan karena umumnya suplai daya yang masuk memiliki tegangan relatif tinggi, misalnya 20 kV, sedangkan peralatan atau mesin listrik beroperasi pada tegangan yang lebih rendah, seperti 380 V tiga fasa. Oleh sebab itu, diperlukan transformator *step-down* untuk menyesuaikan level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika tegangan bolak-balik diberikan pada sisi primer, akan timbul fluks magnet bolak-balik pada inti transformator yang selanjutnya menghubungkan belitan primer dengan belitan sekunder. Fluks tersebut kemudian menginduksi Gaya Gerak Listrik (GGL) pada kumparan sekunder.

Didalam transformator ada dua bagian yang secara aktif membangkitkan panas yaitu tembaga (kumparan) dan besi (inti). Panas-panas ini bila tidak disalurkan atau diadakan pendinginan akan menyebabkan tembaga atau besi itu mencapai suhu

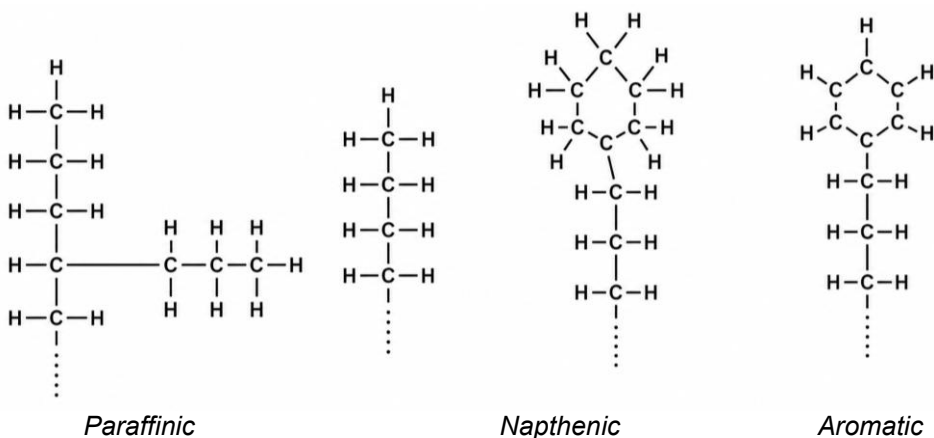
yang terlalu tinggi, sehingga bahan-bahan isolasi yang ada pada tembaga (kertas minyak) akan rusak, untuk itu diperlukan isolasi cair dimasukkan ke dalam dan mengisi celah kosong di antara lapisan berbahan selulosa lainnya yang dinamakan minyak isolasi (transformator). Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan, antara lain yang pertama adalah isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum Paschen. Kedua isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi melalui proses konveksi. Ketiga isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) setelah terjadi pelepasan muatan (*discharge*), namun kekurangan utama isolasi cair adalah mudah terkontaminasi. Transformator sering dioperasikan untuk jangka waktu yang pendek diatas tegangan ratingnya untuk menahan sistem yang sedang mengalami transien karena peristiwa *switching* atau geombang petir. Untuk itu komponen dari transformator, baik isolasi padat maupun minyak harus dapat beroperasi pada tekanan tegangan setinggi mungkin maupun kenaikan temperatur pada inti dan belitan yang dihasilkan dari panas rugi-rugi energi sehingga tidak mengganggu suplai energi ke konsumen. Belitan yang terbakar sering berhubungan dengan kerusakan email. *Short circuit* antar belitan mengakibatkan arus yang sangat besar melaluinya dan menyebabkan panas berlebih. 80% kerusakan mesin disebabkan dari kerusakan isolasinya (Cash et al., 2019).

Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan dari cara pembuatan dan bahan pembuatan yaitu:

a. Minyak Isolasi Mineral

Minyak Minyak mineral atau minyak bumi telah digunakan sebagai media isolasi transformator sejak tahun 1891 oleh Sebastian de Ferranti. Minyak bumi merupakan campuran berbagai senyawa hidrokarbon yang berada dalam fase cair di reservoir bawah permukaan tanah dan tetap berbentuk cair pada tekanan atmosfer setelah melalui proses distilasi. Secara umum, minyak bumi tersusun atas senyawa hidrokarbon dengan kandungan sulfur dalam jumlah kecil. Berdasarkan struktur rantai hidrokarbonnya, senyawa utama dalam minyak bumi dibedakan menjadi beberapa kelompok, yaitu: (1). Linear (Senyawa Parafinis), rumus umum pada senyawa Parafinis adalah C_nH_{2n+2} , misalnya metana CH_4 dalam bentuk gas dan normal butana C_4H_{10} . Minyak bumi linear digolongkan sebagai fraksi hidrokarbon jenuh yang mempunyai titik didih relatif rendah. (2). Sikloalifatik (Senyawa Naftenis), rumus umum pada senyawa Neftenis adalah C_nH_{2n} . Minyak bumi Sikoloafatik mempunyai struktur ikatan berbentuk lingkaran dengan enam atom karbon atau 14 atom karbon dengan tiga kelompok lingkaran. (3). Aromatik, minyak bumi aromatik merupakan senyawa yang mempunyai struktur enam atom karbon, terbagi menjadi dua golongan yakni monoaromatik (satu ikatan lingkaran) dan poliaromatik (dua atau lebih ikatan lingkaran). Minyak bumi Aromatik digolongkan dengan fraksi hidrokarbon paling berbahaya, dikarenakan mempunyai titik didih tinggi dan mudah terlarut dalam air laut.

Kelompok minyak bumi berdasarkan struktur molekul hidrokarbon dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Struktur hidrokarbon pada minyak mineral

Sumber : Pattanadech, 2013

Minyak bumi harus melalui proses pengolahan yang kompleks sebelum dapat digunakan untuk aplikasi tertentu, termasuk sebagai minyak isolasi transformator. Proses pengolahannya umumnya dilakukan menggunakan unit distilasi vakum yang melibatkan beberapa tahapan, seperti ekstraksi, filtrasi, redistilasi, dan hidrogenasi. Hasil penyulingan tersebut menghasilkan minyak mineral yang memiliki karakteristik fisik dan elektrik yang baik, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai bahan isolasi pada peralatan listrik, khususnya transformator. Meskipun demikian, penggunaan minyak mineral juga memiliki beberapa kelemahan, antara lain berpotensi menimbulkan dampak lingkungan serta meningkatkan risiko kebakaran atau ledakan pada transformator (Jauhari, 2017).

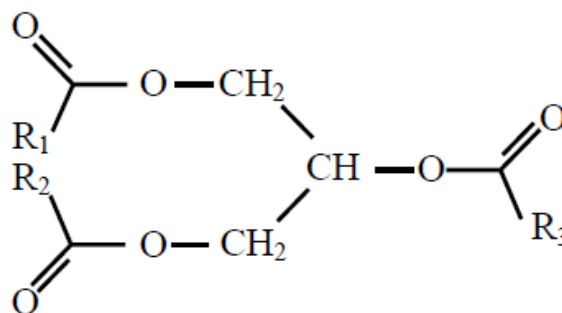
b. Minyak Isolasi Sintesis

Minyak isolasi sintesis merupakan minyak yang diproduksi melalui proses kimia untuk memperoleh karakteristik tertentu yang lebih baik dibandingkan minyak konvensional. Keunggulan utama minyak ini adalah sifatnya yang relatif tidak mudah terbakar, sehingga lebih aman digunakan pada kondisi operasi tertentu. Namun, minyak sintesis memiliki kelemahan berupa sensitivitas yang tinggi terhadap kontaminasi udara. Dibandingkan minyak mineral, minyak isolasi sintesis umumnya memiliki kekuatan dielektrik di atas 40 kV. Selain itu, minyak ini memiliki berat jenis sekitar 1,56 sehingga ketika bercampur dengan air, posisinya berada di bawah permukaan air. Karakteristik tersebut memudahkan proses pemurnian serta pemisahan kadar air dari minyak. Akan tetapi, pada kondisi operasi yang sama dengan minyak mineral, keberadaan uap air dapat mempercepat proses oksidasi dan menurunkan kekuatan dielektrik minyak

sintesis lebih cepat. Contoh minyak isolasi sintesis yang umum digunakan antara lain askarel, silikon cair, *poly alpha olefins*, *poly glycols*, dan ester sintetis.

c. Minyak Isolasi Nabati

Minyak isolasi nabati merupakan kelompok minyak yang berasal dari ekstrak tumbuhan, seperti minyak sayur. Penggunaan minyak jenis ini mulai berkembang pada akhir abad ke-19 seiring meningkatnya perhatian terhadap keterbatasan cadangan minyak mineral yang tidak terbarukan serta masih terbatasnya penggunaan minyak sintesis. Kondisi tersebut mendorong minyak nabati menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk aplikasi isolasi listrik. Contoh minyak isolasi nabati yaitu minyak jarak, minyak kelapa murni, minyak kelapa sawit, minyak kedelai dan minyak jagung, dan minyak dedak padi. Minyak nabati tersusun atas trigliserida dengan struktur sebagai berikut :



Gambar 5 Struktur Trigliserida

Sumber : Rofiatun, 2016

Trigliserida merupakan komponen utama yang banyak terkandung dalam minyak dan lemak, serta menjadi bagian terbesar dari kelompok lipid. Secara umum, lemak didefinisikan sebagai trigliserida yang berada dalam bentuk padat pada suhu ruang, sedangkan minyak merupakan trigliserida yang berbentuk cair pada kondisi suhu ruang. Minyak dan lemak umumnya tidak larut dalam air karena tersusun atas asam lemak dengan rantai karbon panjang dan minim gugus polar.

Karakteristik fisik minyak dan lemak dipengaruhi oleh struktur kimianya. Viskositas cenderung meningkat seiring bertambahnya panjang rantai karbon, namun menurun dengan kenaikan suhu serta tingkat ketidakjenuhan rantai karbon. Selain itu, minyak dan lemak memiliki massa jenis yang lebih tinggi pada kondisi padat dibandingkan cair. Nilai berat jenis juga dipengaruhi oleh berat molekul dan tingkat kejenuhan trigliserida, dimana trigliserida dengan berat molekul rendah dan tingkat ketidakjenuhan tinggi cenderung memiliki massa jenis lebih besar. Titik leleh minyak dan lemak turut dipengaruhi oleh panjang rantai asam lemak serta distribusi asam lemak dalam molekul trigliserida;

semakin pendek rantai asam lemak, semakin rendah titik leburnya (Rofiatun, 2016).

Minyak nabati seperti halnya lemak dari hewani telah lama dikenal dan telah dimanfaatkan secara luas bukan hanya sebagai minyak yang dapat dikonsumsi (*edible oil*) akan tetapi juga sebagai bahan baku oleochemical seperti pembuatan sabun, deterjen, dan sebagainya selain itu merupakan bahan utama pembuatan margarin. Asam lemak yang terdapat dalam minyak nabati terdiri dari gliserida-gliserida asam lemak, akibat proses pemanasan dan terjadinya proses hidrolisis maka asam lemak akan terpisah menjadi trigliserida, digliserida, dan monogliserida. Minyak dikatakan trigliserida karena lemak membentuk ester dari tiga molekul asam lemak yang terikat pada molekul gliserol atau triester dari asam lemak dan gliserol. Banyak asam karboksilat rantai lurus mula-mula dipisahkan dari lemak sehingga dijuluki asam lemak. Asam *propionat*, yaitu asam dengan tiga karbon, secara harafiah berarti "asam lemak pertama" (Yunani : *protos* = pertama; *pion* = lemak). Asam berkarbon empat atau asam butirat diperoleh dari lemak mentega. (latin: *butyrum* = mentega). Tata nama sistematis yang paling sering dipakai adalah berdasarkan penamaan asam karboksilat menurut hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang sama dan diberi akhiran *oat*, misalnya asam oktadekanoat $C_{18}H_{36}O_2$ (asam stearat).

Meskipun minyak dan lemak umumnya berkaitan dengan trigliserida sebagai bahan pangan maupun bahan baku oleokimia, industri tenaga listrik menggunakan jenis minyak yang berbeda, yaitu minyak transformator mineral (*mineral insulating oil*), yang berasal dari turunan petroleum. Secara kimia, minyak transformator merupakan campuran kompleks hidrokarbon, seperti parafin, naften, dan aromatik, sehingga tidak mengandung trigliserida. Namun demikian, minyak ini memiliki karakteristik penting yang serupa dengan minyak nabati, yaitu sifat dielektrik yang baik dan ketidaklarutan dalam air, sehingga efektif digunakan sebagai media isolasi dan pendingin pada transformator daya. Seiring meningkatnya beban operasi transformator dan tuntutan efisiensi sistem, performa minyak mineral perlu ditingkatkan, terutama dari aspek kekuatan dielektrik dan konduktivitas termal. Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang adalah modifikasi minyak mineral menjadi nanofluida melalui penambahan nanopartikel logam oksida. Dalam hal ini, nanopartikel magnetit Fe_3O_4 menjadi salah satu material yang banyak diteliti karena kemampuannya memengaruhi karakteristik listrik dan termal minyak isolasi (Halomoan, 2017).

Penambahan nanopartikel Fe_3O_4 pada minyak transformator mineral terbukti mampu meningkatkan sifat isolasi, khususnya nilai tegangan tembus (*breakdown voltage*). Peningkatan ini dijelaskan melalui mekanisme penangkapan elektron, dimana nanopartikel bertindak sebagai perangkap muatan yang tersebar dalam fluida. Pada sistem isolasi cair, kegagalan dielektrik umumnya diawali oleh pembentukan jalur konduktif akibat pergerakan elektron bebas. Nanopartikel Fe_3O_4 , yang memiliki sifat semikonduktor dan luas

permukaan spesifik tinggi, mampu menangkap elektron-elektron tersebut, membatasi energi kinetiknya, dan menghambat proses ionisasi yang dapat memicu kegagalan isolasi. Selain itu, nanopartikel ini juga berkontribusi dalam memperbaiki distribusi medan listrik di sekitar cacat atau ketidaksempurnaan dalam minyak, sehingga mampu menstabilkan pembentukan *streamer* dan meningkatkan ketahanan minyak terhadap tegangan tinggi. Agar manfaat tersebut optimal, dispersi nanopartikel harus stabil dan homogen, sehingga sering kali diperlukan agen penstabil untuk mencegah aglomerasi partikel (Halomoan, 2017).

Selain meningkatkan sifat dielektrik, penambahan nanopartikel Fe_3O_4 juga diteliti untuk meningkatkan konduktivitas termal minyak transformator. Hal ini penting karena panas merupakan salah satu faktor utama penyebab penuaan isolasi dan kegagalan transformator. Secara inheren, nanopartikel Fe_3O_4 memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dibandingkan minyak dasar, sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan perpindahan panas nanofluida. Namun, efektivitas peningkatan ini dipengaruhi oleh konsentrasi volume nanopartikel dan kualitas perpindahan panas pada antarmuka partikel dan fluida.

Tantangan utama dalam pengembangan nanofluida berbasis Fe_3O_4 adalah stabilitas dispersi jangka panjang. Fenomena aglomerasi dan sedimentasi nanopartikel, yang dapat dipercepat oleh pengaruh medan listrik, medan magnet, maupun variasi suhu selama operasi transformator, berpotensi menurunkan kualitas minyak. Aglomerasi tidak hanya mengurangi luas permukaan efektif untuk penangkapan elektron, tetapi juga dapat membentuk jalur konduktif yang justru menurunkan tegangan tembus. Oleh karena itu, penelitian terkini banyak berfokus pada teknik modifikasi permukaan nanopartikel, misalnya menggunakan surfaktan berbasis oleat, untuk meningkatkan stabilitas dispersi sehingga nanofluida Fe_3O_4 dapat menjadi alternatif yang andal dan berkelanjutan bagi transformator daya generasi mendatang (Halomoan, 2017).

1.7.3.2 Persyaratan Minyak Sebagai Isolasi

Menurut SPLN 49 – 1 (1982), minyak isolasi harus memiliki beberapa syarat yaitu:

1. Kejernihan (*Appearance*)
Minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi atau endapan (sedimen). 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.
2. Viskositas Kinematik (*Kinematic Viscosity*)
Viskositas memegang peranan dalam pendinginan, dipergunakan untuk menentukan kelas minyak dan kurang dipengaruhi oleh kontaminasi atau kerusakan minyak.
3. 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.

4. Titik Tuang (*Pour Point*)
Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi.
5. 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.
6. Korosi Belerang (*Corosive Sulphur*)
Pengujian ini menunjukkan kemungkinan korosi yang dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi.
7. Tegangan Tembus (*Breakdwon Voltage*)
Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak.
8. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation*)
Harga yang tinggi dari faktor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan dan sebagainya.
9. Kandungan 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*).
10. Tahanan Jenis (*Resistivity*)
Tahan jenis yang rendah menunjukkan terjadinya kontaminasi yang bersifat konduktif.
11. 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.
12. 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.

1.7.3.3 Pengujian Karakteristik Minyak Transformator

Oksidasi dan keberadaan kontaminan merupakan faktor utama yang dapat menurunkan kualitas minyak transformator, sehingga kemampuan minyak sebagai media isolasi ikut mengalami degradasi. Proses oksidasi pada minyak isolasi tidak hanya memengaruhi karakteristik minyak, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan kualitas kertas isolasi transformator. Ketika minyak mengalami oksidasi, akan terbentuk senyawa asam yang, apabila bereaksi dengan air pada kondisi suhu tinggi, dapat memicu proses hidrolisis pada kertas isolasi. Proses hidrolisis tersebut menyebabkan penurunan kualitas dan kekuatan isolasi kertas. Untuk mengetahui adanya kontaminan atau proses oksidasi didalam minyak, dilakukan pengujian *oil quality test* (karakteristik). Pengujian *oil quality test* melingkupi beberapa pengujian yang mengacu pada standar IEC 60422. Adapun jenis pengujiannya dijelaskan pada bagian selanjutnya yaitu:

a. Pengujian Kadar Air

Kandungan air dalam minyak transformator merupakan salah satu faktor yang dapat menurunkan kemampuan minyak sebagai media isolasi. Oleh karena itu, pengujian kadar air dilakukan untuk mengetahui jumlah air yang terlarut maupun terkandung dalam minyak. Metode yang umum digunakan adalah metode Karl Fischer, yang bekerja menggunakan elektroda dan generator. Generator berfungsi menghasilkan senyawa iodine melalui proses elektrolisis sebagai titran untuk menetralkan kadar air, sedangkan elektroda digunakan untuk mendeteksi keberadaan air melalui proses titrasi kolometrik. Besarnya kadar air ditentukan berdasarkan jumlah iodine yang terbentuk selama reaksi berlangsung. Hasil pengujian dinyatakan dalam satuan ppm (*part per million*), yaitu perbandingan massa air dalam miligram terhadap 1 kilogram minyak. Pengujian ini mengacu pada standar IEC 60814.

b. Pengujian Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan listrik atau *electrical stress*. Minyak yang bersih, jernih, dan kering umumnya memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi. Sebaliknya, keberadaan air bebas maupun partikel padat, terutama apabila keduanya hadir secara bersamaan, dapat menyebabkan penurunan nilai tegangan tembus secara signifikan. Dengan demikian, pengujian ini dapat digunakan sebagai indikator adanya kontaminan, seperti kadar air dan partikel padat di dalam minyak. Nilai tegangan tembus yang rendah umumnya menunjukkan adanya kontaminasi, meskipun nilai tegangan tembus yang tinggi belum tentu menjamin minyak sepenuhnya bebas dari kontaminan.

c. Pengujian Kadar Asam

Proses oksidasi pada minyak transformator menghasilkan senyawa asam yang dapat mempercepat degradasi kertas isolasi dan memicu korosi pada komponen logam, seperti tembaga dan bagian logam lainnya dalam transformator. Oleh karena itu, pengujian kadar asam dilakukan untuk menentukan jumlah senyawa asam yang terkandung dalam minyak. Nilai kadar

asam juga dapat dijadikan parameter dalam menentukan apakah minyak perlu direklamasi atau diganti. Secara umum, prosedur pengujian dilakukan dengan mencampurkan sampel minyak dengan larutan alkohol dalam komposisi tertentu. Campuran tersebut kemudian dititrasi menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH) yang bersifat basa. Besarnya kadar asam dihitung berdasarkan jumlah KOH yang digunakan dalam proses titrasi. Pengujian ini mengacu pada standar IEC 62021-1.

d. Pengujian Tegangan Antar Muka

Pengujian *Interfacial Tension* (IFT) antara minyak dan air dilakukan untuk mendeteksi keberadaan kontaminan polar yang larut akibat proses degradasi minyak. Nilai IFT cenderung mengalami penurunan secara signifikan seiring meningkatnya tingkat penuaan pada minyak isolasi. Selain itu, pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan interaksi negatif antara minyak isolasi dengan material isolasi lainnya maupun kesalahan dalam proses pengisian minyak yang menyebabkan kontaminasi. Karena nilai IFT berkorelasi dengan tingkat penuaan minyak, parameter ini sering digunakan sebagai verifikasi tambahan apabila ditemukan nilai kadar asam yang abnormal. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D 971-99a.

e. Pengujian Warna Minyak

Warna minyak transformator akan berubah seiring bertambahnya usia pemakaian dan adanya kontaminan, seperti karbon atau produk degradasi lainnya. Pengujian warna dilakukan dengan membandingkan warna minyak yang telah digunakan dengan minyak baru untuk menilai tingkat perubahan kualitas minyak. Pengujian ini mengacu pada standar ISO 2049.

f. Pengujian Sedimen

Minyak transformator dapat terkontaminasi oleh berbagai material, seperti partikel karbon dan endapan lumpur (*sludge*). Pengujian sedimen bertujuan untuk menentukan persentase kandungan zat pengotor dalam minyak isolasi. Proses pengujian dilakukan dengan membandingkan massa endapan yang tersaring terhadap massa total minyak yang diuji. Pengujian ini mengacu pada standar IEC 60422 Annex C.

g. Pengujian Titik Nyala Api

Pengujian titik nyala api (*flash point*) dilakukan untuk mengetahui suhu minimum saat uap minyak mulai dapat terbakar ketika terkena sumber api. Pengujian dilakukan dengan memanaskan sampel minyak menggunakan alat pemanas, sementara sumber api diletakkan di atas wadah pemanas sebagai pemicu pembakaran. Seiring peningkatan suhu, minyak akan mencapai kondisi dimana uap yang dihasilkan mulai terbakar. Suhu tersebut dicatat sebagai titik nyala api minyak. Pengujian ini mengacu pada standar ISO 2719.

h. Tangen Delta Minyak

Pengujian *tangent delta* dilakukan untuk mengevaluasi kondisi dielektrik minyak isolasi. Nilai *tangent delta* dipengaruhi oleh keberadaan kontaminan polar, produk penuaan, serta partikel koloid yang terlarut dalam minyak. Hasil

pengujian ini dapat digunakan untuk menilai sejauh mana minyak isolasi telah mengalami proses penuaan (*ageing*). Pengujian ini mengacu pada standar IEC 60247.

i. Metal In Oil

Pengujian *metal in oil* umumnya dilakukan sebagai pelengkap analisis Dissolved Gas Analysis (DGA). Ketika hasil DGA menunjukkan indikasi adanya gangguan, pengujian ini membantu mengidentifikasi jenis gangguan serta lokasi komponen yang mengalami kerusakan. Gangguan dengan energi tinggi tidak hanya menurunkan kualitas sistem isolasi, tetapi juga menghasilkan partikel logam yang tersebar di dalam minyak akibat sirkulasi internal transformator. Jenis partikel logam yang ditemukan dapat mengindikasikan sumber gangguan karena masing-masing komponen transformator memiliki material logam yang khas. Beberapa unsur logam yang umum terdeteksi dalam minyak transformator antara lain aluminium, tembaga, besi, karbon, perak, timah, dan seng. Sebagai contoh, tembaga umumnya berasal dari belitan atau material kuningan, karbon berasal dari sambungan dan konektor, sedangkan besi dapat berasal dari inti maupun tangki transformator. Aluminium umumnya ditemukan pada belitan, *corona shield*, atau bushing keramik. Analisis kadar logam dalam minyak umumnya dilakukan menggunakan metode Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) dan Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP). Pengujian ini mengacu pada standar IEC 60247.

1.7.3.4 Kekuatan Dielektrik

Suatu dielektrik tidak mempunyai elektron-elektron bebas, melainkan elektron-elektron terikat pada inti atom unsur yang membentuk dielektrik tersebut. Apabila kedua elektroda piring sejajar diberi tegangan searah V, maka dapat menimbulkan medan listrik (E) di dalam dielektrik. Medan elektrik ini memberikan gaya terhadap elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Dengan kata lain medan elektrik adalah sebuah beban terhadap dielektrik dapat berubah sifat menjadi konduktor. 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 (Wonda, 2018). Hal ini dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$E = \frac{V}{d} \quad (2)$$

Dimana, E adalah kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik (kV/cm), V adalah tegangan maksimum yang dapat dibaca oleh alat ukur (kV) dan d merupakan tebal isolasi. Pada prakteknya kekuatan dielektrik tergantung pada material dari suhu, jenis tegangan yang diberikan, elektroda dan gas pada cairan yang dapat mengubah molekul cair. Pada isolasi cair kekuatan dielektrik setara atau sama dengan tegangan kegagalan yang terjadi (Wonda, 2018).

1.7.3.5 Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair

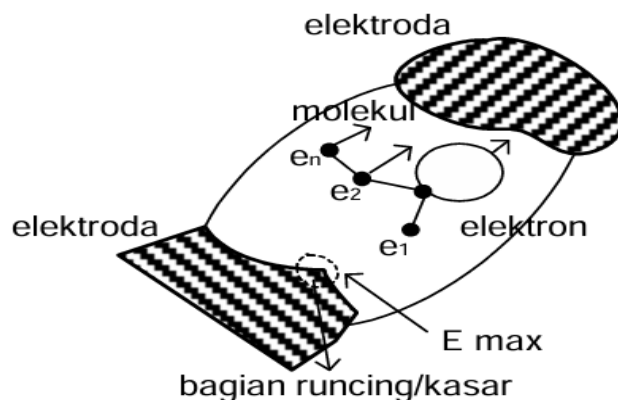
Kegagalan dielektrik pada bahan isolasi cair dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis cairan isolasi, durasi pemakaian, serta besar tegangan yang diberikan. Selain itu, bentuk dan material elektroda yang digunakan selama pengujian juga turut memengaruhi terjadinya kegagalan pada isolasi cair. Faktor lain yang berkontribusi terhadap penurunan performa isolasi cair meliputi keberadaan partikel padat, kandungan air, dan gelembung gas.

Secara umum, terdapat empat teori utama yang menjelaskan mekanisme kegagalan pada bahan isolasi cair, yaitu kegagalan elektronik pada zat murni, kegagalan akibat gelembung udara atau kavitasi, kegagalan bola cair, dan kegagalan yang disebabkan oleh partikel padat dalam cairan isolasi. Apabila tegangan diberikan pada dua elektroda yang dicelupkan ke dalam minyak isolasi, akan timbul arus konduksi dengan nilai relatif kecil. Namun, apabila tegangan dinaikkan secara bertahap dan kontinu, maka pada kondisi tertentu akan tercapai titik kritis yang menyebabkan terjadinya lecutan listrik di antara kedua elektroda.

Lecutan listrik pada isolasi cair ditandai oleh beberapa fenomena, seperti terbentuknya aliran arus listrik yang besarnya dipengaruhi oleh rangkaian pengujian, munculnya lintasan cahaya terang yang menghubungkan kedua elektroda, terbentuknya gelembung gas serta partikel padat akibat dekomposisi material, dan kemungkinan munculnya kerusakan berupa lubang pada permukaan elektroda (Wonda, 2018). Berikut penjelasan lebih lanjut mengenai beberapa teori kegagalan pada bahan isolasi cair

a. Kegagalan Elektronik Pada Zat Cair

Teori kegagalan elektronik atau kegagalan zat murni merupakan pengembangan dari teori kegagalan pada media isolasi gas, sehingga mekanisme kegagalan pada isolasi cair dianggap memiliki kesetaraan dengan media gas. Pada kondisi ketika permukaan elektroda tidak seragam atau memiliki bagian yang tajam, distribusi medan listrik akan terkonsentrasi pada area tersebut sehingga menghasilkan kuat medan listrik yang sangat tinggi (Latif, 2008).



Gambar 6 Kegagalan elektronik pada zat cair

Sumber: Latif, 2008

Elektron yang dihasilkan e_1 , e_2 , e_3 dan e_n yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam media isolasi cair pada kuat medan listrik yang tinggi.

b. Kegagalan Gelembung atau Kavitasi Pada Zat Cair

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan mekanisme kegagalan isolasi cair yang terjadi akibat adanya gelembung gas di dalam cairan. Menurut Kao dan Krasucki, pembentukan gelembung gas dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

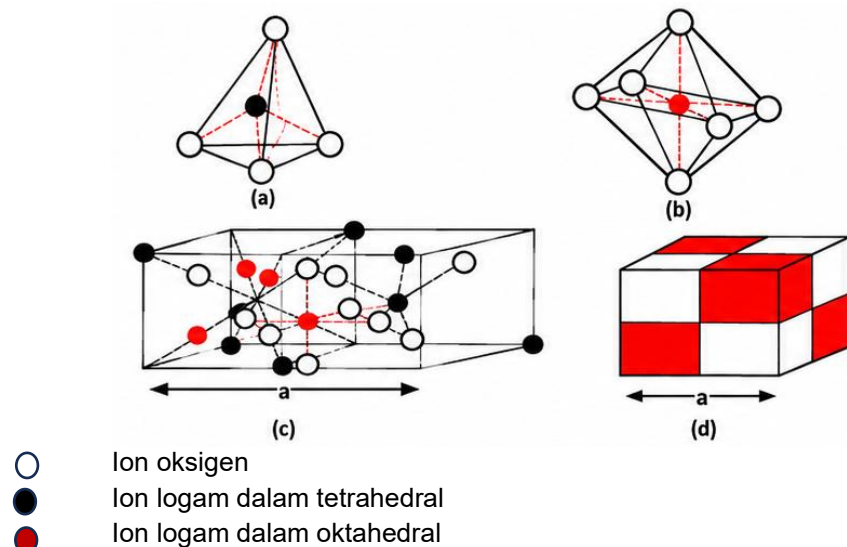
1. permukaan elektroda yang tidak rata sehingga membentuk kantong-kantong udara pada permukaannya;
2. tumbukan elektron yang menghasilkan produk baru berupa gas;
3. penguapan cairan akibat adanya lucutan listrik pada bagian elektroda yang tajam atau tidak beraturan; dan
4. perubahan temperatur serta tekanan pada zat cair.

Keberadaan gelembung gas dalam isolasi cair menyebabkan distribusi medan listrik menjadi tidak seragam, sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya tembus listrik pada bahan isolasi.

1.7.4 Pengertian Nanopartikel Fe_3O_4

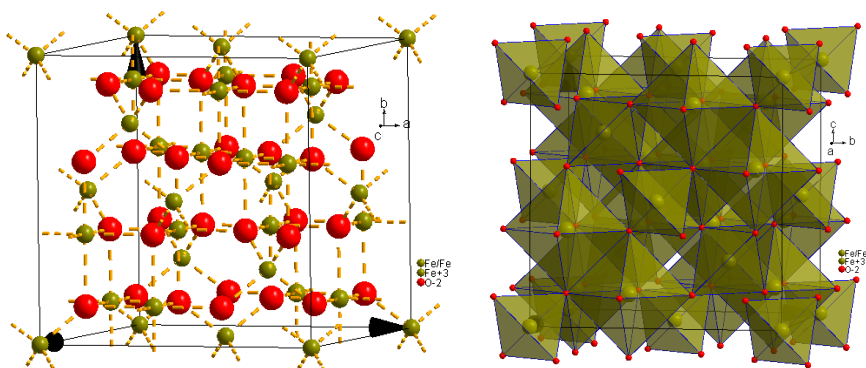
Nanopartikel Fe_3O_4 merupakan salah satu kelompok material oksida besi (*iron oxide*). Material Fe_3O_4 dalam bidang geologi diistilahkan dengan mineral magnetit. Material Fe_3O_4 dapat ditemukan secara bebas dan melimpah di alam dalam deposit pasir besi (*iron sand*). Material Fe_3O_4 memiliki berbagai potensi aplikasi. Potensi aplikasi tersebut berkaitan erat dengan sifat-sifat fisika dan kimia yang dimiliki nanopartikel Fe_3O_4 . Sifat fisika meliputi: sifat mekanik, optik, magnetik, elektromagnetik, akustik, dan termodinamik. Sementara sifat kimia meliputi: reaktivitas, laju reaksi, ikatan kimia, dan stabilitas dalam reaksi kimia. Nanopartikel besi oksida merupakan material magnetik dengan ukuran mikroskopis 1-100 nm (Nugraha et al., 2018). Material tersebut memiliki beberapa fasa diantaranya fasa magnetit (Fe_3O_4), maghemit (Fe_2O_3) dan hematit ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$). Pada fasa magnetit (Fe_3O_4) besi oksida dapat diaplikasikan dalam bidang medis sebagai material antibakteri (Behera et al., 2012). Namun nanopartikel Fe_3O_4 memiliki beberapa kelemahan diantaranya mudah teroksidasi, tidak stabil terhadap termal maupun asam, dan mudah mengalami aglomerasi (Heriansyah dkk., 2015).

Struktur kristal nanopartikel Fe_3O_4 adalah kubik, dimana tersusun atas sejumlah ion yaitu oksigen, Fe^{2+} dan Fe^{3+} seperti pada Gambar 7. Satu sel unit terbagi menjadi delapan oktan (empat oktan yang terakisir bagian tetrahedral dan empat tidak terakisir bagian oktahedral) masing-masing berukuran $a/2$. Bagian tetrahedral setiap sel diisi oleh delapan ion Fe^{3+} dan empat ion oksigen pada setiap sudut yang berada di tengah tetrahedron. Bagian oktahedral setiap sel diisi oleh delapan ion Fe^{3+} , delapan ion Fe^{2+} dan enam ion oksigen pada setiap sudut oktahedron (Perdana, 2011).

Gambar 7 Struktur Kristal Kubik Fe_3O_4

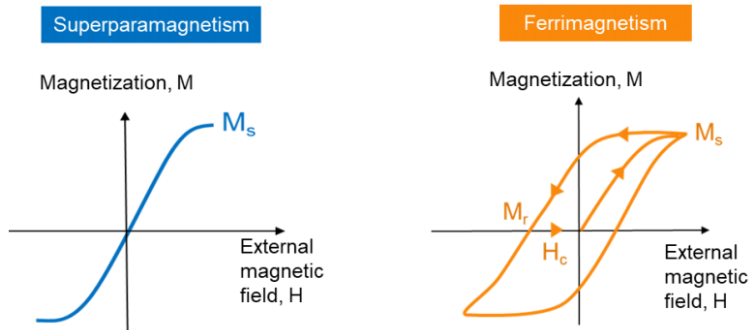
Sumber: Perdana, 2011

Secara struktur, nanopartikel Fe_3O_4 memiliki struktur kristal kubik invers spinel (Gambar 8). Rumus molekul Fe_3O_4 dapat dituliskan sebagai $(\text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$. Berdasarkan Gambar 8, maka terdapat 8 kation divalen Fe^{2+} menempati *site* oktahedral, 8 kation trivalen Fe^{3+} menempati *site* tetrahedral, dan 8 kation Fe^{3+} juga menempati *site* oktahedral. Kation Fe^{3+} yang menempati *site* tetrahedral dan oktahedral memiliki resultan momen magnetik yang sama besar, namun orientasi berlawanan (Khan et al., 2011). Oleh karena itu, struktur kristal yang unik ini menghasilkan sifat fisika yang unik pula pada nanopartikel Fe_3O_4 . Contoh sifat magnetik yang dimiliki oleh nanopartikel Fe_3O_4 adalah ferrimagnetik. Sifat ferrimagnetik akan menghasilkan nilai magnetisasi saturasi tinggi ± 92 emu/gram (Koo dkk., 2019), magnetisasi remanen kecil, dan medan koersivitas juga kecil (Gambar 9). Artinya, sifat ferrimagnetik Fe_3O_4 menghasilkan potensi aplikasi nanopartikel Fe_3O_4 sebagai *switch*.

Gambar 8 Struktur kristal Fe_3O_4 : (a) *ball and stick* model dan (b) geometri tetrahedral dan oktahedral untuk struktur invers spinel

Sumber: Indrayana, 2019

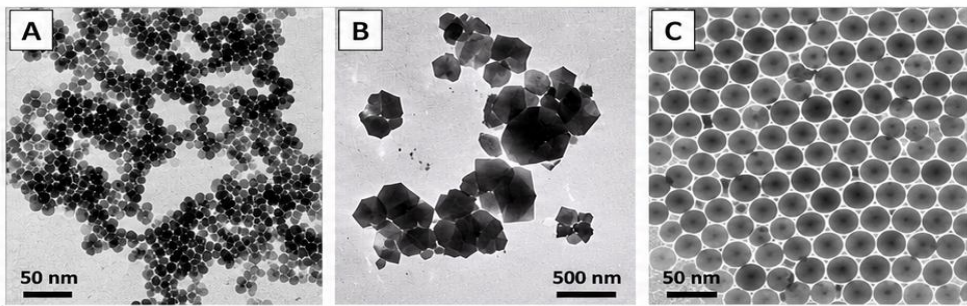
Sifat magnetik nanopartikel bergantung pada ukuran partikel. Fe_3O_4 dengan ukuran ≤ 10 nm, maka Fe_3O_4 tersebut memiliki sifat superparamagnetik (Wu et al., 2015). Pada kondisi ini Fe_3O_4 berada domain tunggal. Sifat superparamagnetik dicirikan dengan respon kemagnetan Fe_3O_4 yang sangat kuat dengan medan magnet eksternal (Indrayana, 2019).



Gambar 9 Kurva histeresis sifat superparamagnetik dan ferrimagnetik nanopartikel Fe_3O_4

Sumber: Indrayana, 2019

Sifat-sifat fisika dan kimia nanopartikel Fe_3O_4 tidak terlepas dari pemilihan metode dan parameter sintesis. Metode dan parameter sintesis sangat berperan dalam menentukan ukuran partikel, bentuk, morfologi, kristalinitas, serta polidisversivitas partikel. Parameter tersebut berdampak secara langsung terhadap sifat-sifat fisika dan kimia nanopartikel Fe_3O_4 . Hasil penelitian Salviano et al (2018) membuktikan bahwa laju pengadukan (*stirring rate*) campuran prekursor dan suhu sintesis mempengaruhi morfologi nanopartikel Fe_3O_4 .



Gambar 10 Ragam bentuk dan morfologi nanopartikel Fe_3O_4 akibat variasi metode sintesis: (a) metode kopresipitasi; (b) oksidasi parsial ferrous hidroksida; dan (c) metode polyol injeksi panas (*hot-injection polyol process*)

Sumber: Staniland et al., 2014

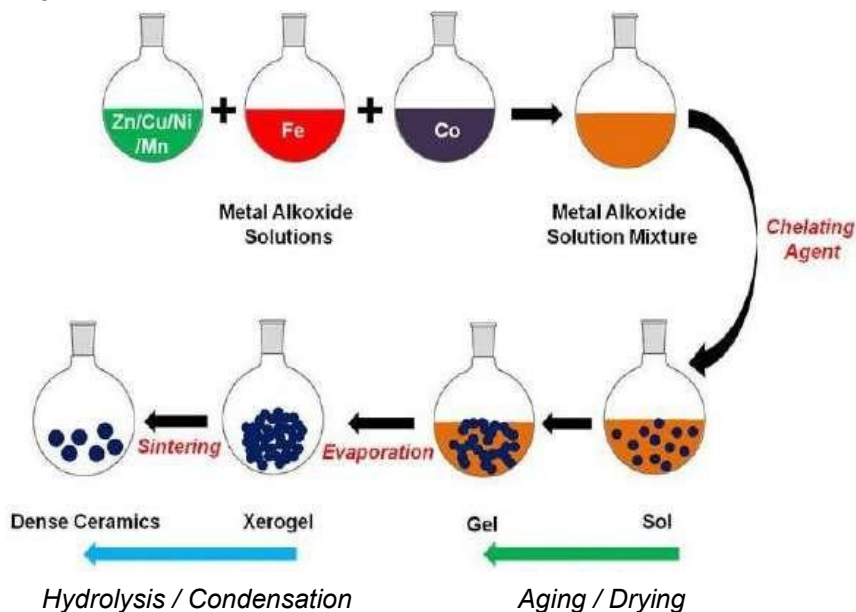
1.7.5 Sintesis Nanopartikel Fe_3O_4

Nanopartikel Fe_3O_4 dapat disintesis menggunakan berbagai metode, seperti metode sol-gel, hidrolisis, dan kopresipitasi. Di antara metode tersebut, metode kopresipitasi

merupakan salah satu metode yang paling sederhana karena proses reaksinya berlangsung pada suhu relatif rendah serta membutuhkan biaya operasional yang lebih ekonomis dibandingkan metode lainnya (Sholihah, 2010).

1.7.5.1 Metode Sol Gel

Metode sol-gel merupakan salah satu teknik sintesis berbasis rekayasa kimia yang banyak digunakan dalam pembuatan nanopartikel karena prosesnya relatif sederhana dan mudah diterapkan (Indrayana, 2019). Metode ini umumnya digunakan untuk sintesis material keramik, namun memiliki keterbatasan dalam penerapannya pada sintesis beberapa jenis nanopartikel oksida. Metode sol-gel dikategorikan sebagai *wet method* karena dalam proses sintesisnya menggunakan larutan sebagai media reaksi. Selama proses berlangsung, larutan mengalami transformasi fase menjadi **sol**, yaitu sistem koloid yang mengandung partikel padat tersuspensi di dalam larutan, kemudian berkembang menjadi gel, yaitu sistem koloid dengan fraksi padatan yang lebih tinggi dibandingkan fase sol.



Gambar 11 Tahapan proses sintesis nanopartikel menggunakan metode sol gel
Sumber : Sanpo et al., 2013

1.7.5.2 Metode Dekomposisi Termal

Metode dekomposisi termal merupakan teknik sintesis nanopartikel yang dilakukan pada suhu tinggi, umumnya di atas 200°C, untuk menghasilkan nanopartikel Fe_3O_4 dengan ukuran partikel yang kecil serta tingkat kristalinitas yang tinggi. Pada metode ini digunakan dua jenis prekursor, yaitu logam Fe dalam bentuk senyawa organometalik dan surfaktan organik. Beberapa surfaktan organik yang umum digunakan antara lain asam oleat, oleylamine, dan phenyl ether (Koo et al., 2019).

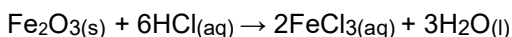
Karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 yang dihasilkan, khususnya ukuran partikel dan derajat kristalinitas, dipengaruhi oleh beberapa parameter proses seperti temperatur sintesis, waktu reaksi, jenis pelarut, serta surfaktan yang digunakan. Meskipun metode ini mampu menghasilkan nanopartikel dengan kualitas yang baik, terdapat beberapa keterbatasan, yaitu kebutuhan suhu sintesis yang tinggi dan biaya operasional yang relatif mahal. Selain itu, nanopartikel hasil sintesis umumnya hanya dapat terdispersi atau larut dalam pelarut nonpolar (Indrayana et al., 2019).

1.7.5.3 Metode Kopresipitasi

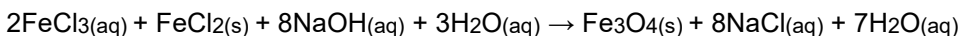
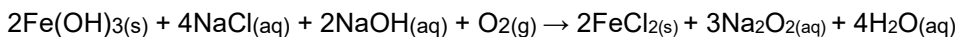
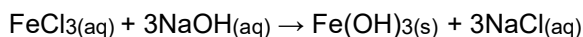
Metode kopresipitasi merupakan teknik sintesis yang efektif untuk menghasilkan serbuk dengan tingkat homogenitas reaktan yang tinggi serta mampu meminimalisasi suhu reaksi. Metode ini umumnya diterapkan dalam sintesis serbuk oksida logam sederhana melalui pengendapan simultan kation logam dalam bentuk senyawa hidroksida, karbonat, oksalat, atau sitrat (Saragi, 2017). Dalam prosedur ini, garam logam anhidrat berfungsi sebagai prekursor penyedia ion logam, sementara senyawa basa hidroksida berperan sebagai agen pengendap atau *coprecipitant* (Indrayana, 2019). Keunggulan utama metode kopresipitasi meliputi:

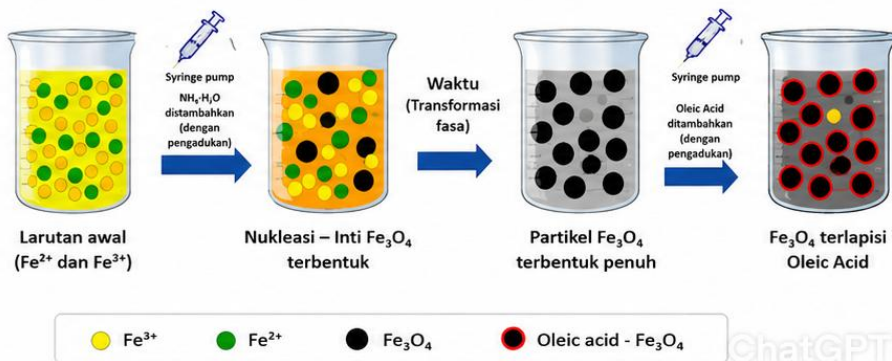
1. Distribusi ukuran partikel yang relatif sempit.
2. Struktur kristal dan sifat magnetik yang dapat dioptimalkan melalui kontrol parameter sintesis seperti suhu, jenis pelarut, dan derajat keasaman (pH).
3. Prosedur yang sederhana dan dapat dilaksanakan pada kondisi lingkungan normal.

Salah satu aplikasi metode ini adalah pada sintesis magnetit (Fe_3O_4). Tahapan awal dimulai dengan separasi pasir magnetik dari pengotor non-magnetik menggunakan magnet batang (Alaway et al., 2018). Selanjutnya, pasir besi dilarutkan dalam 53 ml HCl 37% pada suhu 70°C untuk mengekstraksi larutan FeCl_3 (Freitas et al., 2015). Proses pelarutan tersebut mengikuti persamaan reaksi berikut:



Setelah larutan Fe_2O_3 larut sempurna, dilakukan proses filtrasi untuk memisahkan residu pasir dengan filtrat FeCl_3 . Pembentukan nanopartikel dilakukan dengan penambahan 48 ml NaOH 12 M secara perlahan (*dropwise*) ke dalam larutan FeCl_3 pada suhu 70°C . Penambahan NaOH berfungsi sebagai agen pengendap yang memicu reaksi asam-basa untuk membentuk endapan Fe_3O_4 (Indrayana, 2019). Secara kimiawi, tahapan pembentukan tersebut diprediksi melalui rangkaian reaksi berikut:



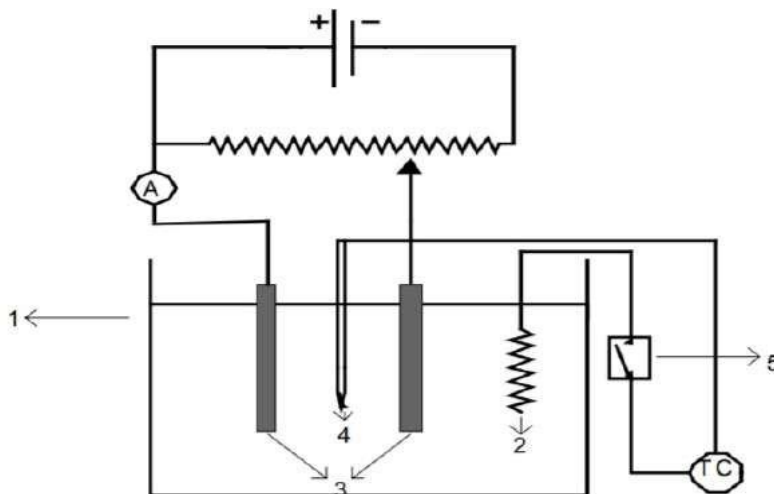


Gambar 12 Tahapan proses sintesis nanopartikel menggunakan metode kopresipitasi

Sumber : Nalle et al., 2019

1.7.5.4 Metode Elektrokimia

Sintesis Fe_3O_4 dapat dilakukan menggunakan metode elektrokimia dengan memanfaatkan elektroda besi dan elektrolit berupa air demineralisasi. Dalam proses ini, variasi nilai rapat arus diterapkan pada kondisi suhu yang dijaga konstan guna mengamati pengaruhnya terhadap hasil sintesis. Tahapan awal prosedur eksperimen dimulai dengan perangkaian instrumen penelitian sesuai dengan skema yang telah ditentukan.



Gambar 13 Rangkaian Alat Elektrokimia

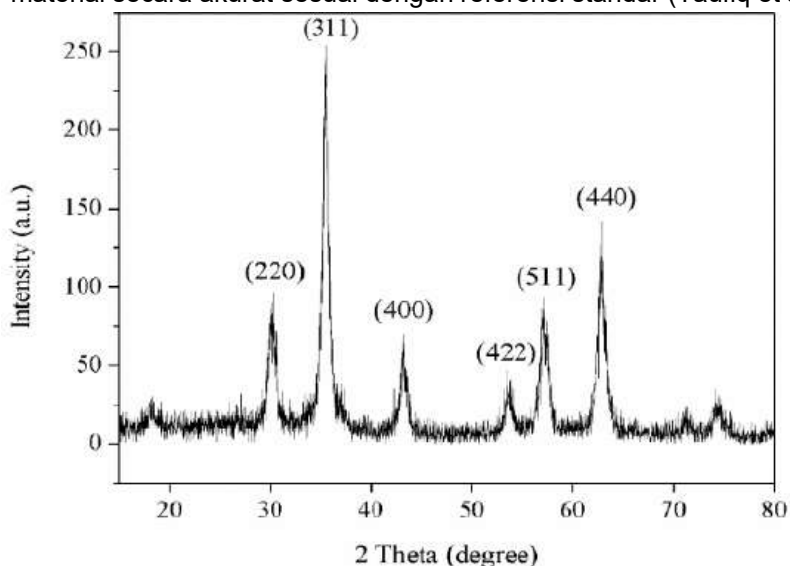
Sumber : Freitas et al., 2015

Prosedur dilanjutkan dengan mengkondisikan suhu elektrolit (*demineralized water*) hingga mencapai 30°C, yang diikuti dengan pengaliran arus listrik melalui *power supply* DC sesuai dengan parameter arus yang telah ditentukan. Proses elektrolisis ini berlangsung selama 12 jam. Setelah durasi tersebut terpenuhi, endapan yang terbentuk dipisahkan dari larutan, dilakukan proses pencucian untuk menghilangkan pengotor, dan diakhiri dengan tahap pengeringan (Freitas et al., 2015).

1.7.6 Karakterisasi Fe_3O_4

1.7.6.1 Karakterisasi XRD

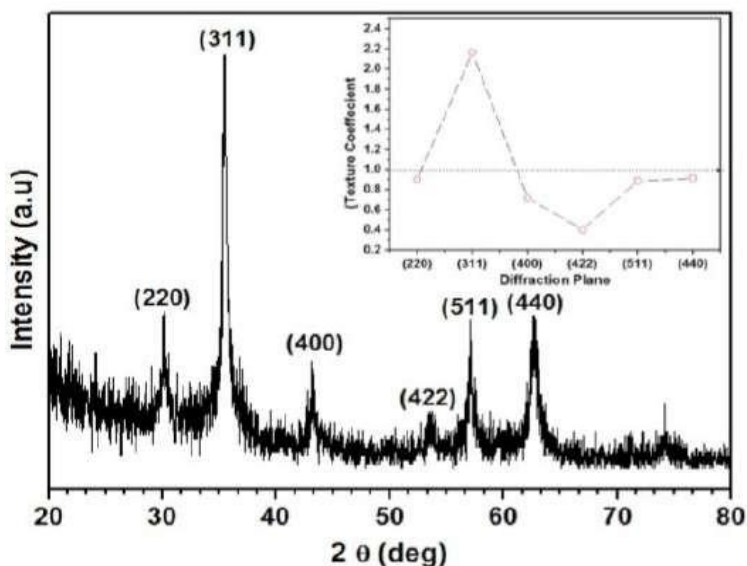
Identifikasi fasa magnetit pada sampel besi oksida dilakukan melalui karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD). Pengujian ini bertujuan untuk menentukan fasa kristalin yang terbentuk di dalam sampel. Data primer yang dihasilkan dari karakterisasi ini meliputi sudut difraksi (2θ), indeks miller, dan intensitas difraksi (I). Data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak *Match* untuk menghasilkan pola difraksi spesifik, sebagaimana yang direpresentasikan pada Gambar 13 dan Gambar 14. Analisis pola difraksi berdasarkan distribusinya memungkinkan identifikasi struktur material secara akurat sesuai dengan referensi standar (Taufiq et al., 2012).



Gambar 14 Pola Difraksi Fe_3O_4

Sumber : Wan Nor et al., 2018

Berdasarkan Analisis pola difraksi pada Gambar 13 menggunakan perangkat lunak *Match* menunjukkan kehadiran fasa magnetit (Fe_3O_4). Hal ini dikonfirmasi melalui kemunculan indeks Miller pada bidang (220), (311), (400), (422), (511), dan (440). Data tersebut memiliki kesesuaian dengan standar *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) nomor 19-629 untuk senyawa Fe_3O_4 (Wan Noe et al., 2018).



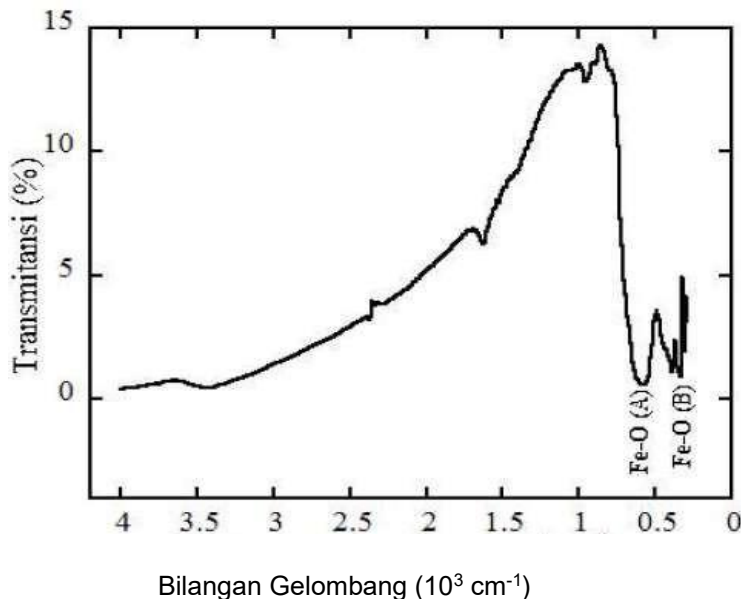
Gambar 15 XRD Fe₃O₄

Sumber : Indrayana et al., 2020

Struktur kristal Fe₃O₄ hasil sintesis direpresentasikan melalui pola difraksi sinar-X pada Gambar 14. Hasil karakterisasi menunjukkan puncak-puncak difraksi pada sudut 2θ 30,21°, 35,47°, 43,13°, 53,45°, 57,03°, dan 62,63°. Sudut-sudut tersebut berkorespondensi dengan bidang kristal indeks Miller [220], [311], [400], [422], [511], dan [440], yang merupakan karakteristik khas fasa Fe₃O₄ berdasarkan standar JCPDS nomor 11-0614 (Indrayana et al., 2020). Temuan ini selaras dengan studi yang dilakukan oleh Malega et al. (2018), yang mengidentifikasi sampel tersebut sebagai material polikristalin alami. Munculnya puncak difraksi dengan intensitas tertinggi mengindikasikan bahwa partikel yang terbentuk memiliki ukuran dalam skala nanometer. Lebih lanjut, diperoleh nanopartikel Fe₃O₄ fasa tunggal dengan struktur kristal kubik tanpa adanya kontaminasi fasa pengotor pada sampel (Indrayana et al., 2020).

1.7.6.2 Karakteristik FTIR

Identifikasi gugus fungsi pada nanopartikel Fe₃O₄ dilakukan melalui karakterisasi *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Hasil pengujian ini dipresentasikan dalam bentuk spektrum FTIR yang mengukur hubungan antara bilangan gelombang (cm⁻¹) dan persentase transmitansi (%), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 16. Berdasarkan analisis spektrum tersebut, ditemukan puncak absorpsi pada bilangan gelombang 578,64 cm⁻¹ dan 393,48 cm⁻¹. Munculnya puncak-puncak tersebut mengindikasikan adanya vibrasi ikatan Fe-O yang merupakan karakteristik spesifik dari senyawa magnetit (Riyanto, 2019).



Gambar 16 Spektrum FTIR Fe₃O₄

Sumber : Riyanto, 2019

FTIR adalah teknik yang digunakan sebagai identifikasi untuk menentukan gugus fungsi yang terkandung dalam suatu senyawa dan komposisi dari suatu campuran. Pengukuran pada spektrum inframerah dilakukan pada daerah cahaya inframerah tengah (*mid-infrared*) yaitu pada Panjang gelombang 2.5-50 μm atau bilangan gelombang 4000-200 cm^{-1} . Energi yang dihasilkan oleh radiasi akan menyebabkan vibrasi atau getaran pada molekul. Pita absorpsi inframerah sangat khas dan spesifik untuk setiap tipe ikatan kimia atau gugus fungsi.

FTIR digunakan untuk menganalisa senyawa organik dan anorganik serta analisa kualitatif dan analisa kuantitatif dengan melihat kekuatan absorpsi senyawa pada panjang gelombang tertentu. Spektroskopi FTIR menggunakan sistem optik dengan laser yang berfungsi sebagai sumber radiasi yang kemudian diinterferensikan oleh radiasi inframerah agar sinyal radiasi yang diterima oleh detektor memiliki kualitas yang baik dan bersifat utuh. Prinsip FTIR adalah serapan dari senyawa dengan tingkat energi vibrasi pada ikatan kovalen akan mengalami perubahan momen dipol di dalam molekul. Atom-atom pada molekul tidak hanya diam melainkan bervibrasi. Ikatan kimia yang menghubungkan dua atom dapat diilustrasikan sebagai bola yang dihubungkan dengan pegas. Radiasi inframerah dilewatkan melalui suatu cuplikan kemudian molekul-molekul dapat mengabsorpsi energi. Transisi terjadi diantara tingkat vibrasi awal (*ground state*) ke tingkat vibrasi tereksitasi (*excited state*). Absorpsi energi di setiap frekuensi dapat dideteksi dengan mengakumulasi jumlah radiasi inframerah yang diteruskan melalui cuplikan. Saat suatu frekuensi tertentu dari radiasi inframerah dilewatkan pada sampel, akan terjadi

penyerapan frekuensi oleh senyawa tersebut. Detektor akan mendeteksi frekuensi yang dilewatkan pada sampel yang tidak diserap oleh senyawa. Banyaknya frekuensi yang melewati senyawa (yang tidak diserap) akan diukur sebagai persen transmittan. Persen transmittan 100 berarti tidak ada frekuensi IR yang diserap oleh senyawa. Pada kenyataannya, hal ini tidak pernah terjadi. Selalu ada sedikit dari frekuensi ini yang diserap dan memberikan suatu transmittan sebanyak 95%. Transmittan 5% berarti bahwa hampir seluruh frekuensi yang dilewatkan diserap oleh senyawa. Serapan yang sangat tinggi akan memberikan informasi penting tentang ikatan dalam senyawa (Pebakirang, 2021).

1.7.7 Mekanisme Penjebakan Muatan pada Nanofluida

Peningkatan kekuatan dielektrik pada minyak mineral melalui penambahan nanopartikel Fe_3O_4 dapat dijelaskan melalui teori penjebakan muatan (charge trapping theory). Sebagai material semikonduktor dengan konstanta dielektrik yang lebih tinggi dibandingkan minyak dasar, Fe_3O_4 menciptakan area "perangkap" bagi elektron bebas yang muncul saat stres elektrik tinggi terjadi. Berdasarkan mekanisme electron scavenging, nanopartikel ini mampu menangkap elektron bebas berkecepatan tinggi dan mengubahnya menjadi ion negatif yang bergerak lambat melalui polarisasi antarmuka (Du, Y., et al., 2012).

Proses ini secara signifikan mengurangi energi kinetik elektron, yang pada gilirannya menghambat proses ionisasi berantai dalam fluida isolasi. Penurunan energi elektron ini mengakibatkan perlambatan laju perambatan *streamer* (jalur konduktif), sehingga penundaan waktu kegagalan elektrik dapat tercapai (Hwang, J. G., et al. 2010). Model matematis menunjukkan bahwa efektivitas penjebakan muatan ini sangat bergantung pada luas permukaan spesifik nanopartikel; semakin kecil ukuran partikel, semakin besar probabilitas elektron tertangkap sebelum memicu kegagalan total pada minyak (Lv, Y., et al. 2014).

Selain itu, keberadaan nanopartikel magnetik seperti Fe_3O_4 membantu dalam mendistribusikan kembali medan listrik lokal di sekitar elektroda. Melalui mekanisme relaksasi dielektrik Maxwell-Wagner, partikel-partikel ini menyerap muatan ruang (*space charge*) yang terakumulasi, sehingga mencegah terjadinya distorsi medan listrik berlebihan yang biasanya menjadi pemicu awal fenomena tegangan tembus (Rafiq, M., et al. 2020).

1.7.8 Tantangan Material Nanofluida

Penelitian Pemanfaatan nanofluida sebagai agen perpindahan panas merupakan bidang kajian nanoteknologi yang sedang berkembang pesat. Berdasarkan tinjauan pustaka, prosedur pembuatan suspensi standar masih menghadapi tantangan metodologis yang signifikan, terutama akibat kecenderungan nanopartikel untuk membentuk aglomerasi yang dipicu oleh kuatnya interaksi gaya *Van der Waals*. Dalam aplikasi nanofluida hibrida, stabilitas dispersi jangka panjang menjadi parameter krusial yang harus dipenuhi. Stabilitas sistem dispersi ini berkorelasi langsung dengan peningkatan sifat termal material, tingkat dispersi yang optimal

akan menghasilkan sifat termofisika yang lebih baik (Hardalupas, 2011). Oleh karena itu, performa konduktivitas termal dan viskositas nanofluida hibrida sangat bergantung pada stabilitas dispersinya. Beberapa studi mengindikasikan bahwa konduktivitas termal cenderung mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu (Thompos et al., 2001). Fenomena ini disebabkan oleh degradasi kualitas dispersi akibat aglomerasi dan sedimentasi nanopartikel. Tanpa penanganan stabilitas yang tepat, nanopartikel cenderung mengalami pengendapan apabila nanofluida disimpan dalam durasi yang lama.

Namun, Pencapaian stabilitas nanofluida umumnya dilakukan melalui pendekatan fisik dan kimia, yang meliputi penerapan gaya eksternal pada aglomerat nanopartikel koloid, modifikasi permukaan, pengaturan pH, serta penambahan surfaktan. Secara literatur, gaya eksternal yang sering diterapkan adalah pengadukan mekanis (*stirring*) dan ultrasonikasi. Namun, durasi optimal untuk kedua metode tersebut bervariasi secara signifikan tergantung pada jenis nanofluida, sehingga memerlukan kontrol parameter yang presisi. Sejauh ini, mayoritas penelitian masih terbatas pada evaluasi stabilitas jangka pendek. Kurangnya kepastian mengenai stabilitas jangka panjang menjadi hambatan utama dalam komersialisasi teknologi nanofluida di sektor industri. Di sisi lain, penggunaan surfaktan menuntut ketepatan dalam pemilihan jenis, kuantitas, dan fungsi aditif. Ketidaksesuaian dalam penggunaan surfaktan berisiko mendegradasi sifat termofisika nanofluida serta memicu pembentukan busa pada temperatur tinggi, yang secara akumulatif menurunkan kualitas performa nanofluida tersebut (Chen et al., 2008; Yu & Xie, 2012).

Di Selain aspek stabilitas, perilaku korosif dari surfaktan dan nanopartikel merupakan parameter penting yang memerlukan kajian mendalam melalui pengendalian nilai pH. Hingga saat ini, literatur yang membahas aspek korosivitas tersebut secara spesifik masih sangat terbatas. Di samping itu, laporan komprehensif mengenai analisis biaya total produksi untuk berbagai jenis nanofluida juga belum tersedia secara luas. Walaupun substitusi fluida konvensional dengan nanofluida dalam volume besar berpotensi mereduksi dimensi dan biaya operasional peralatan, biaya preparasi beberapa jenis nanopartikel tertentu masih relatif tinggi. Oleh sebab itu, analisis kuantitatif terkait struktur biaya berbagai kategori nanofluida, yang diintegrasikan dengan kebutuhan spesifikasi peralatan pada berbagai aplikasi teknik, menjadi topik krusial yang prospektif untuk dikaji dalam penelitian mendatang.

1.7.9 Pengujian *Breakdown Voltage* pada Transformator Daya

Pengujian kualitas minyak isolasi pada transformator merupakan langkah krusial dalam pemeliharaan sistem tenaga listrik tegangan tinggi. Salah satu metode utama yang digunakan adalah uji Tegangan Tembus atau *Breakdown Voltage* (BDV). Sebagai media dielektrik cair, minyak transformator berfungsi vital untuk mengisolasi komponen internal dari stres tegangan elektrik yang signifikan. Pengujian BDV bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas minyak dalam menahan tekanan elektrik tanpa terjadi kegagalan isolasi. Karakteristik minyak yang jernih dan kering biasanya

berkolerasi positif dengan nilai tegangan tembus yang tinggi. Sebaliknya, penurunan nilai BDV sering kali menjadi indikator awal adanya kontaminan, seperti kadar air yang berlebihan, partikel padat atau sedimen hasil oksidasi. Parameter tegangan tembus menjadi indikator fundamental dalam menentukan kelayakan operasional minyak transformator. Tujuan akhir dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa isolasi cair tersebut masih berada dalam batas standar teknis yang diizinkan, guna menjaga keandalan peralatan tegangan tinggi secara berkelanjutan.

Pengujian tegangan tembus pada transformator dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas dielektrik minyak isolasi dalam memitigasi stres elektrik. Parameter keberhasilan pengujian ini ditentukan oleh kesesuaian hasil ukur terhadap ambang batas standar yang telah ditetapkan. Kondisi isolasi cair dikategorikan optimal apabila nilai tegangan tembusnya memenuhi atau melampaui standar teknis. Karakteristik minyak dengan nilai tegangan tembus yang tinggi mengindikasikan:

1. Integritas Isolasi, kemampuan material dalam menahan lonjakan tegangan tanpa terjadi kegagalan fungsi.
2. Keandalan Sistem, ketahanan terhadap tembusan listrik yang menjamin stabilitas kinerja transformator. (Sutjipto, K. & Dzulfikar, 2024).

Jarak elektroda tergantung pada standar yang digunakan, dalam hal ini 2,5 mm. Pengujian tegangan tembus ini mengacu pada standar pengujian IEC 60156. Adapun standar pengujian minyak transformator menggunakan metode *breakdown voltage* adalah seperti yang terlihat pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2 Standar Pengujian BDV Menggunakan IEC 60156

Tegangan	Baik	Sedang	Buruk
500 kV	> 60 kV	50 – 60 kV	< 50 kV
150 kV	> 50 kV	40 – 50 kV	< 40 kV
70 kV	> 40 kV	30 – 40 kV	< 30 kV

1.8 Penelitian Terkait

Tabel 3 Penelitian-Penelitian Terkait

No.	Judul & Peneliti	Metode Penelitian	Hasil
1.	<i>Statistical Investigation of AC Dielectric Strength of Natural Ester Oil-Based Fe₃O₄, Al₂O₃, and SiO₂ Nano Fluids</i> (Khaled et al., 2019)	- Analisis statistik - distribusi Weibull dan Normal tegangan tembus nabati MIDEL 1204 penambahan <i>nanomagnetite</i> , <i>nano silica</i> , dan nanoalumina variasi konsentrasi dan ukuran nanopartikel	- Peningkatan terbaik tidak melebihi 7%; itu diperoleh dengan Fe ₃ O ₄ (50nm) pada konsentrasi 0,4 g / L dan Al ₂ O ₃ (13 nm) pada konsentrasi 0,05 g / L. Namun penurunan 15% dengan SiO ₂ pada konsentrasi 0,05 g / L. Sementara nilai tegangan tembus nanofluid mengikuti distribusi normal.
2.	<i>Investigations on PD, Dielectric, and Thermal Characteristics of Nano-SiO₂ Modified Sunflower Oil</i> (Nagendran et al., 2018)	- Metode penelitian yang digunakan adalah penambahan nano-SiO ₂ (0.01–0.1 wt%), pengujian PD, BDV, <i>lightning impulse</i> , tanδ, resistivitas, viskositas, <i>flash/fire point</i> sesuai standar IEC	- Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nano-SiO ₂ meningkatkan PDIV, menurunkan <i>magnitude</i> PD, menaikkan BDV dan kemampuan <i>lightning impulse</i> (hingga 123 kV). Nano-oil jauh lebih baik dibanding minyak bunga matahari murni.
3.	<i>Partial Discharge Characteristics of Nanofilled Mineral Oil</i> (Jacob et al., 2019)	- Penilaian stabilitas dan analisis karakteristik <i>partial discharge</i> penambahan nanoalumina (0.1 wt% dan 0.03 wt%) dengan dan tanpa <i>surfaktan Oleic acid</i> pada minyak mineral	- Nanofluid dengan 0,03wt% nanopartikel dan 0,1wt% asam oleat menunjukkan stabilitas yang menguntungkan, meningkatkan <i>partial discharge</i> , dan kekuatan tegangan tembus yang lebih tinggi.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan desain eksperimental, di mana fokus utamanya terletak pada pengukuran besaran-besaran fisis dari minyak transformator mineral, terutama nilai tegangan tembus yang dikaji berdasarkan data yang diperoleh langsung dari serangkaian pengujian di laboratorium.

2.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang dibutuhkan dalam penelitian ini yaitu :

1. Variabel Bebas :
Variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 yang ditambahkan ke dalam minyak mineral, yaitu 0 g/L (murni), 0,01 g/L, 0,02 g/L, 0,04 g/L, dan 0,05 g/L.
2. Variabel Terikat :
Parameter yang diukur sebagai respon dari penambahan nanopartikel, meliputi :
 - Karakteristik Dielektrik : Nilai Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)
 - Karakteristik Fisis : Viskositas kinematik, warna minyak, dan titik nyala (*flash point*)
 - Karakteristik Kimia : Kadar Air dan FTIR (*Fourier Transform Infrared*)
3. Variabel Kontrol :
Faktor yang dijaga tetap selama pengujian agar hasil konsisten:
 - Jenis minyak dasar (minyak mineral)
 - Jarak sela elektroda (2,5 mm)
 - Bentuk elektroda (Bola-bola sesuai standar IEC 60156)

2.3 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan oleh mahasiswa grup riset Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin pada bulan November 2025 dan diperkirakan akan selesai pada bulan Maret 2026. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Pembakaran Dalam Fakultas Teknik, Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Fakultas Teknik, Laboratorium Kimia Organik Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin, dan Laboratorium Minyak Trafo PT PLN (PERSERO) UPT Makassar.

Tabel 4 *Barchart* Pelaksanaan Penelitian

Tahapan Penelitian	Nov	Des	Jan	Feb	Mar
Studi Literatur dan Penentuan Metode					
Persiapan Sampel dan Pembuatan Campuran Nanopartikel Fe ₃ O ₄					
Pengujian <i>Breakdown Voltage</i>					
Pengujian Kadar Air, Viskositas, Warna, Titik Nyala Api, dan FTIR					
Analisis Data dan Pembahasan Hasil					
Penyusunan Laporan dan Hasil					

2.4 Alat dan Bahan

A. Alat

1. Alat Uji Tegangan Tembus

Alat ini berfungsi untuk mengetahui kemampuan minyak insulasi dalam menahan stress tegangan. Pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air dan partikel lainnya karena akan mempengaruhi hasil pengujian tegangan tembus.



Gambar 17 Alat Uji Tegangan Tembus

2. Alat Uji Titik Nyala Api

Alat ini berfungsi untuk mengetahui titik nyala api atau *flash point* pada minyak transformator. Pengujian ini mengacu pada ISO 2719.



Gambar 18 Alat Uji Titik Nyala Api

3. Alat Uji Viskositas

Alat ini berfungsi untuk mengetahui kondisi kekentalan atau resistensi suatu cairan terhadap aliran. Viskositas menggambarkan kemampuan minyak untuk mengalir dan melumasi komponen internal trafo.



Gambar 19 Alat Uji Viskositas

4. Alat Uji Kadar Air

Alat ini berfungsi untuk mengetahui seberapa besar kadar air yang terlarut / terkandung pada minyak transformator.



Gambar 20 Alat Uji Kadar Air

5. *Magnetic Stirrer*

Alat ini digunakan untuk mencampur nanopartikel Fe_3O_4 ke dalam minyak trafo agar tercapai dispersi partikel yang seragam. Gelombang ultrasonik yang dihasilkan alat ini menghasilkan gaya kavitasi pada fluida, yang membantu memecah aglomerasi partikel nano dan meningkatkan homogenitas suspensi. Homogenisasi yang baik penting agar nanopartikel dapat tersebar merata dan efektif dalam memperbaiki karakteristik dielektrik minyak.



Gambar 21 *Magnetic Stirrer*

6. *Beaker Glass* dan Pipet

Beaker glass dan pipet digunakan untuk menakar volume minyak dan bahan tambahan dengan tingkat ketelitian yang tinggi. *Beaker glass* berfungsi sebagai wadah sementara dalam proses pengambilan dan pengukuran volume minyak, sedangkan pipet berperan untuk mengontrol volume cairan secara presisi ketika dilakukan proses pengambilan atau pencampuran bahan. Penggunaan kedua alat ini memastikan konsistensi volume sampel yang penting untuk menjaga validitas hasil pengujian sifat dielektrik.



Gambar 22 *Beaker Glass* dan Pipet

7. Ultrasonik

Alat ultrasonik digunakan untuk mendispersikan nanopartikel ke dalam minyak secara homogen melalui gelombang ultrasonik yang menghasilkan kavitasi, sehingga mengurangi penggumpalan partikel dan meningkatkan kestabilan campuran minyak.



Gambar 23 Ultrasonik

8. *Analytical Balance*

Timbangan analitik (*analytical balance*) berfungsi untuk mengukur massa sampel uji. Instrumen ini krusial dalam analisis laboratorium untuk menjamin akurasi penimbangan bahan kimia dan reagen yang memerlukan presisi maksimal.



Gambar 24 *Analytical Balance*

B. Bahan Yang Digunakan

1. Minyak Trafo Mineral

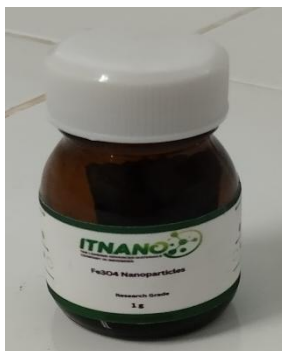
Minyak trafo mineral berfungsi sebagai media dielektrik cair dalam sistem isolasi transformator. Bahan ini memiliki kemampuan isolasi tinggi serta berfungsi sebagai pendingin. Dalam penelitian ini, minyak trafo digunakan sebagai bahan dasar yang dimodifikasi dengan penambahan nanopartikel Fe_3O_4 . Kualitas minyak diuji berdasarkan standar IEC 60296 dengan memperhatikan nilai *breakdown voltage*, *moisture content*, dan *dielectric loss*.



Gambar 25 Minyak Trafo Mineral

2. Nanopartikel Fe_3O_4 (Magnetite)

Nanopartikel Fe_3O_4 merupakan bahan aditif utama dalam penelitian ini. Partikel dengan ukuran 58 nm digunakan karena memiliki sifat magnetik dan konduktivitas terbatas yang dapat memperbaiki kestabilan medan listrik di dalam minyak. Penambahan nanopartikel Fe_3O_4 dapat menurunkan mobilitas elektron bebas dan meningkatkan tegangan tembus minyak melalui mekanisme *charge trapping*.



Gambar 26 Nanopartikel Fe_3O_4 (Magnetite)

3. Botol Sampel

Botol sampel berfungsi sebagai wadah penyimpanan minyak hasil campuran nanopartikel Fe_3O_4 dengan kondisi tertutup rapat untuk mencegah kontaminasi udara, kelembapan, dan oksidasi. Setiap botol diberi label identitas sesuai konsentrasi dan tanggal pembuatan sampel



Gambar 27 Botol Sampel

2.5 Karakteristik Nanopartikel Fe_3O_4

Karakteristik nanopartikel Fe_3O_4 yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5 Spesifikasi dan Karakteristik Nanopartikel Fe_3O_4

Parameter	Spesifikasi
Purity	99 %
Grade	Research Grade
Form	Black
Molecular Formula	Fe_3O_4
Molecular Weight	231.533 g/mol
XRD (Crystallite Size)	16 nm
SEM (Particle Size)	58 nm

2.6 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data untuk penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data empiris di PT. PLN (Persero) UPT Makassar dan Laboratorium Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Departemen Teknik Elektro.

2.7 Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 6 Sampel Pengujian

Kode	Volume minyak	Massa Fe_3O_4	Konsentrasi Fe_3O_4
S0	1 L	0 g	0 g/L
S1	1 L	0,01 g	0,01 g/L
S2	1 L	0,02 g	0,02 g/L
S3	1 L	0,04 g	0,04 g/L
S4	1 L	0,05 g	0,05 g/L

A. Persiapan Umum Sampel Nanopartikel

1. Siapkan minyak transformator mineral baru sebanyak ± 1 liter untuk setiap sampel. Pastikan seluruh sampel berasal dari *batch* yang sama untuk menjaga konsistensi karakteristik awal minyak.
2. Timbang massa Fe_3O_4 sesuai variasi. Untuk S0 lewati langkah penambahan nanopartikel. Timbang nanopartikel Fe_3O_4 sesuai variasi konsentrasi:
 - a. S0 : tanpa penambahan nanopartikel (kontrol).
 - b. S1 : 0,01 g (10 ppm)
 - c. S2 : 0,02 g (20 ppm)
 - d. S3 : 0,04 g (40 ppm)
 - e. S4 : 0,05 g (50 ppm)
3. Tuangkan minyak transformator ke dalam *beaker glass* bersih sebagai media pencampuran awal
4. Masukkan nanopartikel Fe_3O_4 ke dalam minyak sesuai variasi konsentrasi masing-masing sampel.
5. Lakukan proses *magnetic stirring* dengan kecepatan 1600 rpm selama 60 menit untuk menghasilkan pencampuran awal dan memastikan nanopartikel terdistribusi secara merata dalam minyak.
6. Setelah proses pengadukan magnetik selesai, sampel didiamkan selama ± 30 menit. Tahap ini bertujuan untuk menstabilkan aliran fluida serta mengurangi turbulensi sebelum dilakukan proses lanjut.
7. Selanjutnya dilakukan proses ultrasonikasi selama 30 menit untuk memecah kemungkinan aglomerasi nanopartikel dan meningkatkan homogenitas dispersi.
8. Setelah proses ultrasonikasi selesai, sampel didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang.
9. Beri label pada masing-masing sampel sesuai kode dan konsentrasi.
10. Sampel kontrol S0 diperlakukan dengan prosedur yang sama tanpa penambahan Fe_3O_4 .

B. Pengujian Kadar Air Pada Minyak Transformator

- a. Gunakan sampel S0 sampai S4 yang telah melalui tahap Persiapan Umum Nanopartikel.
- b. Tahapan pengujian dilakukan sebagai berikut: Siapkan sampel minyak transformator yang akan di uji
 1. Siapkan sampel minyak yang akan dianalisis.
 2. Bilas *syringe* menggunakan sampel minyak yang sama sebanyak kurang lebih 6 kali agar tidak terjadi kontaminasi silang.
 3. Isi *syringe* dengan sampel dan pastikan tidak terdapat gelembung udara di dalamnya.
 4. Timbang sampel yang telah dimasukkan ke dalam *syringe* sesuai prosedur alat ukur kadar air.
 5. Catat nilai kandungan air dalam satuan ppm untuk masing-masing sampel (S0–S4). Pengukuran dilakukan minimal dua kali untuk memastikan konsistensi hasil.

C. Pengujian Tegangan Tembus Pada Minyak Transformator

- a. Gunakan sampel S0 sampai S4 hasil preparasi sebelumnya.
- b. Pastikan alat uji tegangan tembus dalam kondisi siap dan telah dikalibrasi.
- c. Prosedur pengujian dilakukan sebagai berikut:
 1. Siapkan sampel minyak transformator yang akan di uji.
 2. Periksa kembali jarak elektroda ($2.5 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$).
 3. Tuangkan sampel minyak transformator yang akan di uji.
 4. Hindari terbentuknya gelembung udara. Jika muncul gelembung, diamkan minyak sekitar 5–10 menit hingga gelembung hilang.
 5. Letakkan wadah uji ke dalam alat kemudian jalankan proses pengujian hingga terjadi *breakdown*.

D. Pengujian Viskositas Pada Minyak Transformator

- a. Persiapan sampel gunakan S0–S4 hasil Persiapan Umum.
- b. Pastikan alat dalam kondisi siap pakai.
- c. Untuk pengujian terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut :
 1. Siapkan sampel minyak transformator yang akan di uji.
 2. Siapkan *viscometer* untuk melakukan pengujian viskositas.
 3. Siapkan tabung ukur atau labu erlenmeyer bersih untuk menampung sampel.
 4. Tuangkan minyak isolasi melalui tabung pengisian hingga batas volume yang ditentukan.
 5. Hindari pembentukan gelembung udara saat menuang sampel pada tabung ukur.
 6. Panaskan minyak yang telah dituangkan hingga mencapai suhu 40°C .

7. Setelah mencapai suhu 40 °C, mulai lakukan pengujian.
 8. Cata data hasil pengujian yang telah dilakukan.
 9. Bersihkan *viscometer* untuk pengujian sampel lainnya.
 10. Bersihkan tabung ukur atau tabung erlenmeyer untuk pengujian sampel lainnya.
 11. Ulangi Langkah 1-10 untuk pengujian sampel lainnya.
- d. Pencatatan data, rekapitulasi hasil pengukuran yang di dapatkan.

E. Pengujian Warna Minyak Transformator

- a. Persiapan sampel gunakan S0–S4 hasil Persiapan Umum.
- b. Pastikan alat dalam kondisi siap pakai.
- c. Untuk pengujian terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:
 1. Siapkan sampel minyak yang akan diuji.
 2. Bandingkan warna minyak yang akan diuji dengan data warna minyak yang telah disediakan.
 3. Ulangi langkah 1-2 untuk pengujian sampel lainnya.
- d. Pencatatan data, rekapitulasi hasil pengukuran yang di dapatkan.

F. Pengujian Titik Nyala Api Minyak Transformator

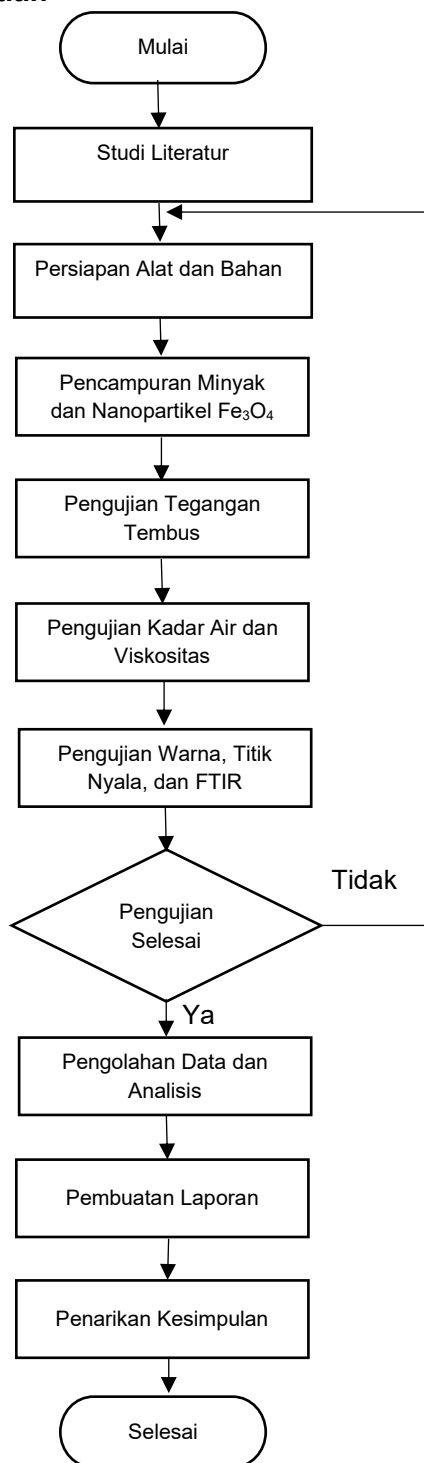
- a. Persiapan sampel gunakan S0–S4 hasil Persiapan Umum.
- b. Pastikan alat dalam kondisi siap pakai.
- c. Untuk pengujian terdiri dari beberapa langkah sebagai berikut:
 1. Siapkan sampel minyak transformator yang akan di uji.
 2. Bersihkan cawan uji dengan sampel minyak transformator dengan cara membilas cawan uji dengan sampel minyak transformator yang akan di uji secara merata hingga minyak mengenai seluruh bagian dari cawan uji.
 3. Isi cawan uji dengan sampel minyak transformator yang akan di uji hingga mencapai level yang telah ditentukan dalam alat uji.
 4. Pastikan tidak ada gelembung udara dalam minyak.
 5. Letakkan cawan uji ke dalam tempat pengujian alat *Pensky Martens*.
 6. Pasang termometer kalibrasi hingga menyentuh permukaan minyak tanpa menyentuh dinding cawan uji.
 7. Nyalakan alat uji dan mulai pemanasan dengan mengatur arus pada alat pengujian sebesar 2A.
 8. Amati kenaikan suhu pada termometer dan dekatkan sumber api ke dalam wadah penguji pada suhu 135°C.
 9. Jika sampel minyak tidak terbakar, lakukan langkah yang sama dengan mendekatkan sumber api ke dalam wadah penguji dengan selisih kenaikan suhu 5°C secara berurutan hingga sampel minyak transformator terbakar.

G. Pengujian FTIR

FTIR (*Fourier Transform Infrared*) merupakan metode spektroskopi yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa organik maupun anorganik melalui analisis kualitatif. Analisis ini dilakukan dengan mengamati intensitas absorpsi (penyerapan) radiasi inframerah oleh sampel pada bilangan gelombang tertentu. Dalam sistem optiknya, instrumen FTIR memanfaatkan sinar laser sebagai sumber radiasi yang kemudian ditangkap oleh detektor untuk menghasilkan data spektrum dengan akurasi dan integritas yang tinggi.

Prinsip kerja FTIR didasarkan pada interaksi antara energi radiasi dengan molekul sampel. Ketika senyawa menyerap energi inframerah, tingkat energi vibrasi pada ikatan kovalen akan meningkat, yang memicu terjadinya perubahan momen dipol di dalam molekul tersebut. Perubahan inilah yang menghasilkan pola serapan khas (spektrum) yang berfungsi sebagai "sidik jari" molekuler untuk menentukan struktur kimia dan stabilitas minyak trafo setelah penambahan nanopartikel.

2.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 28 Diagram Alir Penelitian

