

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Secara umum bahan dielektrik pada transformator dibagi menjadi dua jenis, yaitu bahan dielektrik padat dan bahan dielektrik cair. Dielektrik sendiri merupakan salah satu sifat bahan atau material yang memiliki kemampuan untuk memberikan jarak antara dua buah penghantar (elektroda) atau lebih yang saling berdekatan baik secara elektrik untuk mengurangi kebocoran arus yang dapat diakibatkan oleh sifat korosif dari suatu material ataupun berbagai macam tekanan yang terjadi dan diterima oleh bahan baik pada saat pengoperasian sistem, proses akomodasi dari tempat asal ke tempat pemasangan, maupun pada saat pengujian material bahan dilakukan (Tambunan et al., 2015).

Bahan dielektrik pada transformator dapat mempengaruhi kinerja dari transformator dan dapat menyebabkan kegagalan apabila terdapat kerusakan pada isolasinya. Isolasi ini sangat bergantung pada suhu kerja transformator. Oleh karena itu pemilihan kelas isolasi sangat diperlukan agar material isolasi atau bahan dielektrik yang dipilih sesuai dengan standar atau kebutuhan sistem. Berikut ini merupakan beberapa kelas isolasi seta suhu kerja maksimum dari isolasi tersebut.

Tabel 2.1 Pembagian kelas isolasi

No.	Kelas	Suhu Kerja Maksimum
1.	Y	90°C
2.	A	105°C
3.	E	120°C
4.	B	130°C
5.	F	155°C
6.	H	180°C
7.	C	>180°C

Sumber: (Tambunan et al., 2015)

Minyak transformator sebagai bahan dielektrik cair termasuk ke dalam kelas A dalam pembagian kelas isolasi di atas. Bahan dielektrik cair sebagai salah satu material elektrik memiliki beberapa fungsi utama antara lain untuk mengisolasi antara satu penghantar dan penghantar lainnya, untuk menahan gaya mekanik akibat adanya arus pada konduktor yang diisolasi, dan mampu menahan tekanan yang diakibatkan panas dan reaksi kimia. Tekanan yang disebabkan oleh medan listrik, gaya mekanik, maupun temperature panas bisa terjadi secara bersamaan. Bahan dielektrik cair mempunyai kerapatan seribu kali lebih besar dibandingkan bahan dielektrik gas sehingga kekuatan dielektriknya lebih tinggi daripada dielektrik gas. Kekuatan dari dielektrik cair berkisar antara $10^7 V/cm$ menurut hukum Paschen (Evianisa et al., 2018).

2.1.1 Transformator Daya

Transformator daya adalah salah satu perangkat kelistrikan yang memiliki fungsi utama untuk menyalurkan energi listrik bertegangan rendah melalui kumparan primer ke energi listrik bertegangan tinggi melalui kumparan sekunder maupun sebaliknya. Dengan kata lain transformator daya digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan listrik dengan frekuensi yang sama untuk didistribusikan sesuai dengan kebutuhan sistem atau konsumen.

Prinsip kerja dari transformator daya adalah masing-masing kumparan baik primer maupun sekunder mengelilingi inti besi pada trafo dalam bentuk belitan. Jika kumparan pada sisi primer trafo (N_p) diberikan sumber tegangan AC, maka pada inti besi akan mengalir arus bolak balik (AC) pada kumparan primer (I_p). Arus bolak balik ini kemudian akan menginduksi kumparan sekunder dan menghasilkan flux magnetik di sekeliling kumparan. Dengan adanya inti trafo yang menghubungkan antara belitan disisi primer dan sisi skunder, maka flux magnetik akan mengalir bersama pada inti trafo dimana arah pergerakannya dari kumparan primer (N_p) menuju kumparan sekunder (N_s) yang menghasilkan aliran arus pada sisi skunder (I_s). Jika sisi skunder diberi beban, maka energi listrik ditransfer secara keseluruhan (secara magnetik) (Manullang & Anita, 2020).

Banyaknya lilitan pada kedua sisi dapat mempengaruhi tegangan baik pada sisi primer maupun sisi sekunder. Sehingga perbandingan atau rasio antara tegangan dan lilitan harus sama. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut (Manullang & Anita, 2020):

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} \quad (2.1)$$

Dimana:

N_P = Jumlah lilitan primer

N_S = Jumlah lilitan sekunder

V_P = Tegangan primer

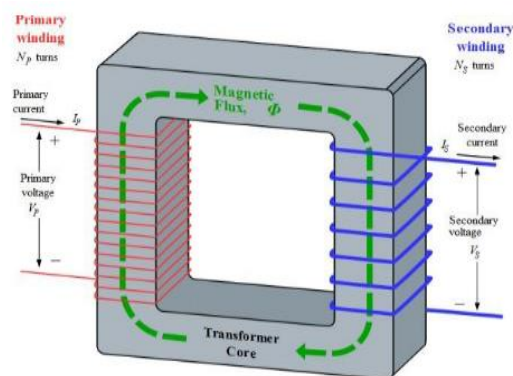
V_S = Tegangan sekunder

Adapun komponen peralatan atau bagian-bagian pada transformator daya antara lain sebagai berikut (Manullang & Anita, 2020):

1. Bagian-Bagian Utama Transformator Daya

a. Inti Besi

Inti besi merupakan bagian terpenting pada transformator yang dapat mempermudah aliran flux magnetik dari belitan ke bagian lain pada tubuh transformator. Inti besi tersusun atas lempengan yang dapat mengurangi panas akibat adanya rugi-rugi daya yang disebabkan oleh arus eddy. Arus eddy ini disebabkan oleh induksi magnetik yang mengalir di sekitar inti besi, sehingga inti besi dibuat berlapis untuk mengatasi kerugian akibat hal tersebut.



Gambar 2.1 Inti Besi

Sumber: (Manullang & Anita, 2020)

b. Kumparan

Kumparan pada transformator berfungsi untuk mengalirkan arus dari sumber tegangan AC sehingga dapat dialirkan ke beban. Kumparan terdiri dari kumparan primer sebagai penghantar trafo ke sumber tegangan dan kumparan sekunder sebagai penghantar ke beban. Besar nilai tegangan yang dihasilkan oleh kumparan dipengaruhi oleh banyaknya belitan pada setiap kumparan. Oleh karena itu besar kecilnya nilai tegangan yang dihasilkan oleh trafo dapat disesuaikan dengan mengatur jumlah belitan pada kumparan.

c. Minyak Trafo

Minyak trafo merupakan bagian yang berfungsi sebagai media isolator sekaligus pendingin pada transformator. Minyak trafo yang digunakan biasanya minyak mineral maupun minyak nabati yang banyak digunakan sebagai alternatif untuk penggunaan isolator yang lebih ramah lingkungan dan *reusable*. Minyak trafo memiliki karakteristik dielektrik yang dapat mempengaruhi kinerjanya sebagai isolator pada transformator. Karakteristik dielektrik tersebut diatur dalam beberapa standar yang harus terpenuhi agar transformator dapat bekerja dengan baik.

d. Bushing

Bushing merupakan bagian pelengkap pada transformator yang menghubungkan kumparan dengan jaringan luar pada transformator. Bushing terbuat dari bahan konduktor yang berisolasi dan berfungsi sebagai pembatas arus atau pengaman antara konduktor dengan bagian tangki dan konservator.

e. Tangki dan Konservator

Tangki merupakan bagian yang digunakan sebagai wadah atau tempat minyak trafo. Sedangkan konservator merupakan bagian pendukung pada trafo yang berfungsi untuk menampung minyak cadangan ataupun udara yang masuk akibat kenaikan suhu operasi sehingga terjadi

pemuaian dan kontraksi yang menyebabkan bertambah dan berkurangnya volume minyak pada tangki transformator.



Gambar 2.2 Tangki dan Konservator

Sumber: (Sugiarto, 2016)

2. Bagian-Bagian Pendukung Transformator Daya

a. Pendingin (Radiator)

Sistem pendingin pada transformator biasanya berbentuk cairan, minyak, maupun udara yang berfungsi untuk mencegah kerusakan isolasi akibat dari kenaikan suhu yang dihasilkan dari rugi-rugi pada tembaga atau inti besi. Radiator biasanya berbentuk sirip-sirip yang ada di sekitar *body* transformator.

b. *Tap Changer*

Besarnya nilai tegangan yang berubah-ubah dari sumber listrik utama dapat mempengaruhi kestabilan tegangan yang dihasilkan oleh transformator. *Tap changer* digunakan untuk menstabilkan sumber tegangan dengan cara mengubah jumlah lilitan pada kumparan primer pada kondisi berbeban maupun tidak berbeban, sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna.

c. Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Dehydrating Breather atau alat pernapasan pada transformator umumnya digunakan sebagai komponen untuk mencegah adanya kontak secara langsung antara kelembaban udara dengan minyak yang terdapat pada konservator. *Dehydrating Breather* biasanya dilengkapi dengan perangkat minyak yang berfungsi untuk mencegah adanya

hubungan langsung yang terjadi secara terus-menerus antara udara lembab dengan *silica gel* yang ada didalamnya untuk memungkinkan perkiraan umur yang lebih lama pada *silica gel* (Sugiarto, 2016).

d. Indikator

Transformator juga biasanya dilengkapi dengan alat indikator yang memiliki fungsi untuk mengawasi atau memberikan kendali penuh pada kondisi inti sekaligus sebagai alat yang digunakan untuk membantu transformator ketika beroperasi dan menyalurkan energi listrik. Indikator yang terdapat pada transformator yaitu Indikator suhu minyak (*temperature Gauge*), Indikator permukaan minyak (*Level gauge*), Indikator sistem pendingin, dan Indikator Kedudukan atau posisi Tap (Manullang & Anita, 2020).

e. NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

Suatu sistem proteksi berupa sistem tahanan yang berfungsi untuk mengawasi besarnya arus gangguan yang mengalir ke titik netral dan dipasang secara seri dengan kumparan primer.

2.1.2 Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan dielektrik cair berupa minyak mineral yang proses pembentukannya didapatkan dari kegiatan penyulingan minyak mentah yang berasal dari hasil endapan fosil berjuta-juta tahun yang lalu. Minyak transformator dapat berasal dari beberapa bahan kimia organik yaitu senyawa atom karbon (C) dan atom hidrogen (H). Tidak hanya itu, minyak transformator juga dapat berasal dari bahan-bahan organik lainnya contohnya yaitu piranol dan silikon (Nurul Handayani, Iqbal Hasanudin, Abd. Hafid, 2023).



Gambar 2.3 Minyak Transformator

Minyak transformator digunakan sebagai media isolasi sekaligus pendingin bila terjadi kenaikan suhu pada transformator. Artinya selain berfungsi untuk memisahkan beda fasa pada bagian bertegangan, minyak transformator juga bertanggungjawab dalam mengatur sirkulasi atau penyebaran suhu secara optimal. Saat transformator bekerja mengalirkan tegangan dalam jangka waktu tertentu, maka akan terjadi kenaikan suhu yang menimbulkan panas dan menghambat aliran minyak. Hal ini disebabkan oleh kontaminan atau endapan partikel yang dapat mempengaruhi viskositas atau kadar kekentalan minyak yang mengakibatkan terhambatnya aliran sirkulasi pada minyak.

Apabila minyak transformator tidak berfungsi dengan baik, maka isolasi kertas pada kumparan (*coil*) transformator akan rusak. Selain itu suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *overheat* dan menurunkan kualitas tahanan isolasi yang dapat mengakibatkan kerusakan pada transformator. Minyak transformator sebagai media isolasi memiliki beberapa persyaratan yang diatur dalam standar berikut:

Tabel 2.2 Standar Minyak Transformator

No.	Standar	Keterangan
1.	IEC	Standar Internasional
2.	BS, ASTM, JIS, SNI	Standar Nasional
3.	ABB, GEC- Ahlstom, Unindo	Transformer producer specifications
4.	TNB, PLN	Power distributor Specifications

Sumber: (Nurul Handayani, Iqbal Hasanudin, Abd. Hafid, 2023)

2.1.3 Karakteristik Dielektrik Minyak Transformator

Sebagai salah satu bahan dielektrik cair, minyak transformator memiliki karakteristik dielektrik. Karakteristik atau kekuatan dielektrik merupakan nilai dari ukuran kemampuan suatu material untuk bisa menahan dan mencegah medan elektrik tanpa mengakibatkan terjadinya tembus listrik pada bahan dielektrik tersebut. Medan elektrik yang timbul akan memberikan gaya pada elektron agar terlepas dari ikatannya untuk menjadi elektron bebas. Kondisi tersebut merupakan beban bagi dielektrik yang memaksa atau menekan dielektrik berubah menjadi bahan konduktor (Manullang & Anita, 2020). Sementara itu, nilai dari kekuatan dielektrik dapat diketahui melalui persamaan berikut (Manullang & Anita, 2020):

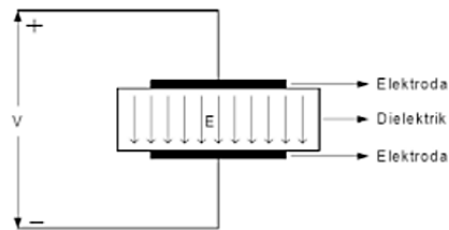
$$E = \frac{Vb}{d} \quad (2.2)$$

Dimana:

E = Kekuatan bahan dielektrik (Kv/cm)

Vb = Tegangan tembus bahan isolasi (Kv)

d = Jarak sela elektroda (mm)



Gambar 2.4 Rangkaian dielektrik diantara dua elektroda

Sumber: (Bukit, 2021)

Kekuatan dielektrik minyak transformator sangat bergantung pada beberapa faktor, diantaranya struktur atom dan molekul yang membentuk minyak transformator tersebut. Selain itu karakteristik atau sifat-sifat dari bahan elektroda, perubahan temperatur, perubahan nilai dari sumber tegangan, serta gas dan partikel yang terkandung pada minyak transformator dapat berpotensi untuk mengubah karakteristik dielektrik dari suatu minyak transformator. Karakteristik dielektrik tersebut dapat dibedakan berdasarkan sifat fisika, kimia, dan kelistrikan pada bahan dielektrik minyak transformator. Adapun sifat-sifat dari bahan tersebut antara lain sebagai berikut (Wibowo et al., 2018).

1. Sifat Fisika

a. Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis atau densitas dapat diartikan sebagai hasil nilai dari massa per satuan volume dari suatu benda atau bahan dielektrik cair. Nilai massa jenis suatu benda cair berbanding lurus dengan volumenya. Semakin besar nilai massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula nilai volume dari benda tersebut. Begitupula sebaliknya, semakin kecil besar nilai massa jenis suatu benda, maka semakin kecil pula nilai volume dari benda tersebut (Alim et al., 2017).

Untuk menghitung massa jenis dari suatu benda cair dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Dimana:

ρ = massa jenis (g/cm^3)

$m = \text{massa (g)}$

$v = \text{volume (cm}^3\text{)}$

b. Viskositas

Viskositas adalah tingkat kekentalan suatu cairan pada laju aliran yang kontinu. Nilai dari kadar viskositas sangat berpengaruh terhadap tingkat kemurnian cairan dan kekuatan isolasi dari cairan tersebut. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya partikel yang mengotori cairan serta kemampuan cairan dalam memerangkap energi panas (dielektrik cair sebagai media pendingin pada transformator).

Bahan dielektrik cair yang baik haruslah mempunyai viskositas yang rendah sehingga kemungkinan isolasi cair terkontaminasi akan kecil. Namun viskositas dari suatu bahan dielektrik juga dapat dipengaruhi oleh kandungan air pada bahan dielektrik tersebut. Jika viskositas isolasi cair rendah, proses sirkulasi isolasi cair pada peralatan listrik akan berlangsung dengan baik sehingga akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung (Wibowo et al., 2018).

Menurut Hukum Stokes, koefisien viskositas pada suatu fluida dapat diketahui melalui persamaan:

$$F_s = 6\pi\eta rv \quad (2.4)$$

Dimana:

$F_s = \text{gaya gesek Stokes (N)}$

$\eta = \text{koefisien viskositas fluida (poise)}$

$r = \text{jari-jari bola (m)}$

$v = \text{kelajuan relatif bola terhadap fluida (m/s)}$

$\pi = 3,14$

Pada fluida yang kental, viskositas dinamis dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9v} (\rho - \rho^1) \quad (2.5)$$

Dimana:

$\eta = \text{viskositas (poise)}$

r = jari-jari bola ukur (cm)

g = gaya gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

v = kecepatan bola ukur (cm/s)

ρ = massa jenis bola ukur (g/cm^3)

ρ^1 = massa jenis isolasi cair (g/cm^3)

Sedangkan nilai viskositas pada minyak trafo dinyatakan dengan satuan cSt, yaitu satuan untuk viskositas kinematik yang dinyatakan dengan persamaan (Wibowo et al., 2018):

$$V = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.6)$$

Dimana:

V = viskositas kinematik (St)

η = viskositas dinamis (Poise)

ρ = massa jenis isolasi cair (g/cm^3)

1 St = 100 cSt

c. Kejernihan

Tingkat kejernihan bahan dielektrik cair merupakan salah satu sifat fisik dielektrik cair yang dapat diamati atau diobservasi secara langsung dari minyak transformator. Tingkat kejernihan dari minyak transformator dapat menentukan ada tidaknya kontaminan pada minyak transformator baik kontaminan dalam bentuk partikel-partikel padat ataupun cairan yang dapat mengotori minyak transformator.

d. Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala (*flash point*) merupakan kondisi atau keadaan sebelum uap yang dihasilkan oleh proses pemanasan minyak transformator berubah menjadi api. Semakin tinggi nilai titik nyala pada suatu dielektrik cair (minyak transformator), maka bahan dielektrik cair tersebut semakin baik digunakan untuk media isolasi peralatan (Prianggoro, 2022).

e. Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang (*pour point*) adalah titik toleransi emperatur atau suhu terendah dimana minyak transformator masih memiliki kemampuan

untuk mengalir. Hal ini disesuaikan dengan kebutuhan operasi transformator apabila berada di lingkungan yang dingin. Semakin besar nilai titik tuang pada dielektrik cair maka semakin buruk jika digunakan untuk bahan isolasi suatu peralatan (Prianggoro, 2022).

2. Sifat Kimia

Umumnya, bahan dielektrik cair tersusun atas senyawa hidrokarbon dan non hidrokarbon. Senyawa hidrokarbon berasal dari unsur hidrogen dan karbon, sedangkan senyawa non hidrokarbon berasal dari senyawa organik. Adapun kandungan lain yang menjadi sifat kimia pada minyak transformator antara lain:

a. Kandungan Air

Kandungan air pada minyak transformator dapat diakibatkan oleh masuknya udara yang mengandung uap air pada saat trafo dibuka untuk keperluan pemeriksaan ataupun perbaikan. Ketahanan isolasi minyak transformator dapat menurun seiring dengan adanya reaksi kimia berupa proses ionisasi yang dapat memicu terjadinya *short circuit* atau hubung singkat pada belitan transformator. Selain itu, kandungan air dan oksigen pada minyak transformator juga berpotensi menghasilkan asam, endapan, dan korosi yang dapat mengakibatkan penuaan dan berkurangnya umur transformator.

Sementara itu kadar air yang terkandung pada minyak transformator dapat diukur melalui metode perbandingan massa sebelum dan setelah dilakukan pemanasan pada minyak transformator yang dihitung melalui persamaan berikut (Widyastuti et al., 2019):

$$Kadar\ air\ (\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dimana:

m_0 = Massa wadah yang digunakan

m_1 = Massa minyak transformator sebelum pemanasan

m_2 = Massa minyak transformator setelah pemanasan

b. Kandungan Gas

Perubahan suhu merupakan salah satu penyebab utama adanya kandungan gas dalam minyak transformator. Semakin tinggi kandungan gas pada minyak, maka semakin tinggi pula tingkat kegagalan isolasi yang dapat mengakibatkan terbakarnya minyak transformator.

c. Kandungan Asam

Kandungan asam yaitu jumlah miligram dari Potassium Hydroxide (KOH) yang diperlukan untuk menitrasi semua unsur-unsur asam yang ada pada 1 gram sampel minyak. Proses oksidasi pada cairan minyak isolasi trafo akan menghasilkan senyawa asam dan akan meninggalkan endapan pada trafo (Prianggoro, 2022).

3. Sifat Kelistrikan

a. Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)

Tegangan tembus adalah suatu keadaan dimana bahan dielektrik cair kehilangan kemampuan isolasinya dan menjadi konduktor, sehingga tegangan menembus isolator di antara dua buah elektroda pada suhu kamar. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi terjadinya tegangan tembus diantaranya yaitu kandungan air, gas, dan partikel pengotor pada minyak transformator (Manullang & Anita, 2020).

b. Resistivitas

Resistivitas atau tahanan jenis didefinisikan sebagai kemampuan suatu material dalam menghambat arus listrik. Semakin tinggi nilai resistivitas suatu bahan, maka semakin kecil kandungan konduktor dalam bahan dan semakin tinggi kemampuan isolasi dari bahan tersebut. Resistivitas dinyatakan dalam satuan Ω -m. Suatu cairan dapat digolongkan sebagai isolasi cair bila resistivitasnya lebih besar dari 10^9 Ω -m. Pada sistem tegangan tinggi, resistivitas yang diperlukan untuk material isolasi adalah 10^{16} Ω -m atau lebih (Bukit, 2021).

c. Faktor Disipasi ($\tan \delta$)

Faktor disipasi atau kebocoran dielektrik mengacu pada rugi-rugi dielektrik yang dihasilkan oleh dielektrik cair pada saat peralatan diberi tegangan bolak-balik dalam kondisi berbeban.

d. Permittivitas Relatif

Permittivitas relatif berkaitan dengan pengaruh medan listrik pada bahan dielektrik dalam medium udara. Permittivitas relatif atau disebut juga sebagai konstanta dielektrik merupakan nilai perbandingan antara energi listrik pada bahan dielektrik terhadap ruang hampa. Nilai kapasitansi pada bahan dielektrik dipengaruhi oleh permittivitas ruang hampa (ϵ_0), permittivitas bahan (ϵ_r), medan listrik (E), dan kerapatan fluks (D) (Bukit, 2021).

2.1.4 Syarat-Syarat Minyak Transformator

Menurut standar dari PLN yang mengacu pada IEC (*International Electrotechnical Commission*) minyak sebagai bahan dielektrik cair yang berfungsi sebagai media isolasi dan pendingin harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut (SPLN 49 -1, 1982):

1. Kejernihan (*Appearance*)

Sebagai bahan isolasi, minyak transformator harus terjaga tingkat kejernihannya yang artinya minyak transformator tidak boleh mengandung endapan yang dapat dilihat dari tingkat kejernihannya.

2. Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis atau densitas haruslah memiliki batasan tertentu, hal ini dimaksudkan untuk beberapa hal diantaranya agar air tidak tercampur ke dalam minyak isolasi yang menyebabkan minyak melayang karena massa jenis yang berbeda dengan kontaminasi air tersebut.

3. Viskositas Kinematik (*Kinematic Viscosity*)

Viskositas memegang peranan dalam pendinginan dan sirkulasi, kadar viskositas digunakan untuk menentukan kelas minyak dan biasanya tidak

terlalu dipengaruhi oleh kontaminasi atau kerusakan yang ada pada minyak.

4. Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala yang rendah dapat menunjukkan adanya kontaminasi zat yang kemungkinan dapat dengan mudah terbakar. Hal ini dapat membahayakan keselamatan karena menyebabkan kerusakan yang cukup massif bila tidak diatasi dengan baik.

5. Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi.

6. Angka Kenetralan (*Neutralization Number*)

Angka kenetralan adalah angka atau nilai yang menunjukkan susunan kadar asam yang terkandung dalam minyak isolasi dan dapat mendeteksi ada tidaknya kontaminan pada minyak, juga dapat menunjukkan kecenderungan perubahan susunan zat kimia atau ketidakaturan serta indikasi perubahan susunan kimia dalam bahan tambahan (*additive*). Angka kenetralan dapat digunakan sebagai petunjuk atau acuan umum untuk menentukan apakah minyak sudah diolah.

7. Korosi Belerang (*Corosive Sulphur*)

Pengujian yang menunjukkan adanya korosi yang dihasilkan dari belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi.

8. Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)

Tegangan tembus yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi dalam minyak.

9. Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation Factor*)

Harga yang tinggi dari faktor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan (*deterioration product*) misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan dan sebagainya.

10. Ketahanan Oksidasi (*Oxydation Stability*)

Pengujian ini berguna untuk melihat apakah minyak tahan terhadap oksidasi.

11. 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*).

12. 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.

13. Tahanan Jenis (*Resistivity*)

Tahanan jenis yang rendah menunjukkan terjadinya kontaminasi yang bersifat konduktif (*conductive contaminants*).

14. 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.

Tabel di bawah ini merupakan spesifikasi minyak isolasi menurut SPLN 49-1:1982.

Tabel 2.3 Spesifikasi Minyak Isolasi menurut SPLN 49-1:1982

No.	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Metode Uji
1.	Kejernihan	Gardner Scale	3,5		IEC 296
2.	Massa Jenis (20°C)	g/cm^3	$\leq 0,895$		IEC 296
3.	Viskositas Kinematik:				IEC 296
	a. 20°C	cSt	≤ 25		
	b. -15°C	cSt	≤ 40		

No.	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Metode Uji
	c. -30°C	cSt	≤800		IEC 296
4.	Titik Nyala	°C	≥140	≥130	IEC 296 A
5.	Titik Tuang	°C	≤-30	≤-40	IEC 296 C
6.	Angka Kenetralan	mg KOH/g	<0,03		IEC 296
7.	Korosi Belerang	-	Tidak korosif		IEC 296
8.	Tegangan Tembus:	kV/2,5 mm	-	≥30	IEC 156 & IEC 296
	a. sebelum diolah				
	b. sesudah diolah			≥50	
9.	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	-	≤0,05	IEC 250
10.	Ketahanan Oksidasi	-	≤0,40		IEC 474 & IEC 74
11.	Kandungan Air	≥170 kV	≤20 mg/l		ISO R 760
		≤170 kV	≤30 mg/l		
12.	Tegangan Permukaan	≥170 kV	≥15×10 ⁻³ Nm ⁻¹		IEC 296
13.	Tahanan Jenis	Semua Tegangan	1,0 GΩrn		IEC 93 dan IEC 247
14.	Kandungan Gas	≥170 kV	*)		Sedang digarap oleh IEC

Sumber: (SPLN 49 -1, 1982)

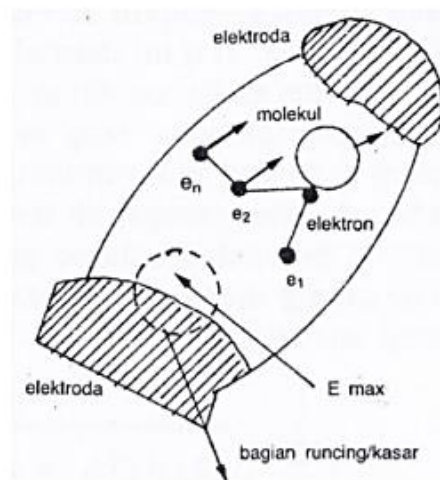
*) Menunjuk publikasi IEC 599 (1978): *"Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service"*, yang baru terbit. Dalam publikasi IEC ini disebutkan bahwa metode uji dilaksanakan dengan alat kromatograf gas, tetapi tidak diuraikan metodenya

2.1.5 Kegagalan Isolasi Minyak Transformator

Teori kegagalan isolasi pada minyak transformator umumnya dikelompokkan menjadi empat jenis, diantaranya:

1. Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektronik

Apabila diterapkan kuat medan yang sangat kuat diantara elektroda yang memiliki permukaan tidak rata, maka kuat medan terbesar terletak pada bagian elektroda yang tidak rata tersebut. Kemudian kuat medan maksimum pada permukaan elektroda yang tidak rata tersebut akan menghasilkan banjir elektron (e) akibat adanya ionisasi molekul dan benturan pada dielektrik cair (Rosyidi & Deki, 2021).

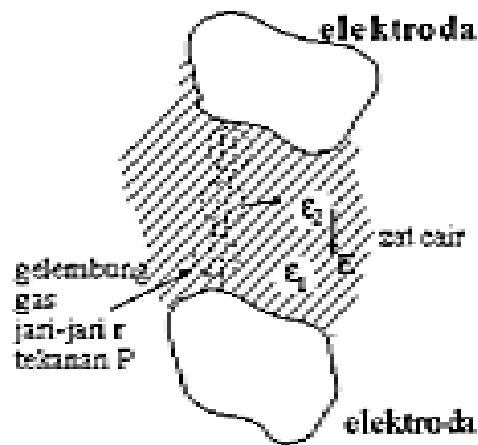


Gambar 2.5 Kegagalan Zat Murni

Sumber: (Prianggoro, 2022)

2. Teori Kegagalan Gelembung Gas

Kegagalan gelembung gas atau kavitasi merupakan awal dari kegagalan total pada dielektrik cair. Adanya gelembung gas yang searah dengan pergerakan medan listrik dapat menyebabkan lompatan listrik pada gelembung-gelembung gas tersebut. Hal ini dikarenakan besar tegangan tembus pada gas lebih rendah dibandingkan dengan tegangan tembus pada zat cair (Rosyidi & Deki, 2021).

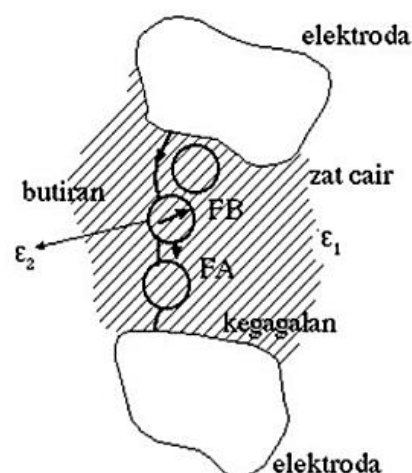


Gambar 2.6 Kegagalan Gelembung Gas

Sumber: (Prianggoro, 2022)

3. Teori Kegagalan Partikel Padat

Saat terjadi tegangan berlebih yang mengakibatkan kenaikan suhu, maka akan terbentuk suatu partikel padat. Partikel-partikel padat seperti debu atau serat selulosa yang terletak di sekeliling kertas isolasi biasanya akan ikut masuk dan mengotori minyak. Jika terdapat medan listrik, partikel-partikel tersebut akan terpolarisasi membentuk sebuah jembatan, kemudian arus akan mengalir dan menghasilkan energi panas pada isolasi dan menyebabkan terjadinya kegagalan (Wibowo et al., 2018).



Gambar 2.7 Kegagalan Partikel Padat

Sumber: (Prianggoro, 2022)

4. Teori Kegagalan Uap Air

Minyak isolasi yang telah lama digunakan berpotensi memiliki kandungan air dan uap air di dalamnya. Apabila diterapkan medan listrik pada minyak, maka molekul dari uap air akan terpolarisasi dan membentuk momen dipole. Kemudian molekul-molekul uap air ini akan membentuk saluran yang dikenal sebagai saluran peluahan (pelepasan muatan akibat tekanan medan listrik). Saluran ini akan menghubungkan dua buah elektroda yang dapat mengakibatkan kegagalan isolasi sehingga terjadi tegangan tembus (Rosyidi & Deki, 2021).

2.1.6 Material Bentonit



Gambar 2.8 Bentonit

Bentonit merupakan salah satu jenis lempung atau bahan mineral alam yang sering dimanfaatkan sebagai material penyerap partikel-partikel pengotor (kontaminan) pada bahan dielektrik cair. Selain itu bentonit juga digunakan untuk berbagai proses produksi seperti proses adsorpsi, proses katalis, ataupun sebagai resin penukar ion dalam bidang industri.

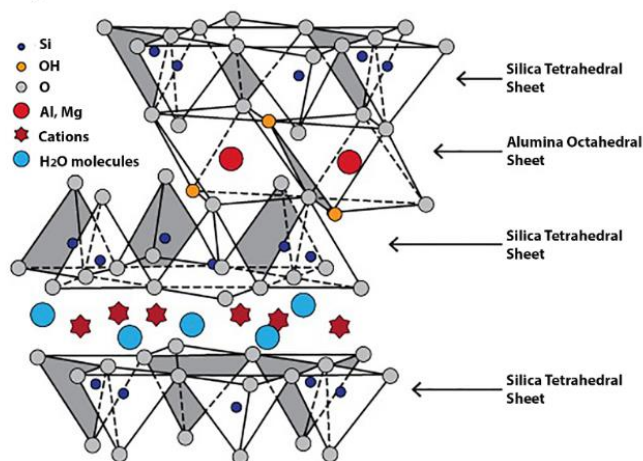
Material bentonit banyak digunakan sebagai bahan adsorben karena memiliki kapasitas antar ruang yang besar pada tiap lapisannya. Sebagai bahan adsorben, daya serap maksimum bentonit berkisar pada ukuran partikel 80-100 mesh (Handayani & Yusnimar, 2013). Kandungan utama dari bentonit yaitu kurang lebih sekitar 85% monmorillonit dengan rumus kimia $(\text{Mg,Ca})\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. Diameter dari mineral ini kurang dari 2 μm dan mengandung beberapa lapis mineral phyllosilicate yang terdiri dari 66%

silika (SiO_2), aluminium oksida 28,3% (Al_2O_3), serta 5% H_2O sehingga memiliki kemampuan yang baik dalam mengikat air (Amari, 2023).

1. Struktur Bentonit

Mineral montmorillonit penyusun bentonit terdiri dari partikel yang sangat kecil sehingga hanya dapat diketahui melalui studi menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*). Struktur montmorillonit memiliki konfigurasi 2:1 yang terdiri dari dua silikon oksida tetrahedral dan satu aluminium oksida oktahedral. Pada tetrahedral, 4 atom oksigen berikatan dengan atom silikon di ujung struktur (Sains et al., 2019).

Struktur atom monmorilonit disusun dari lapisan oktahedral alumina yang diapit oleh lapisan tetrahedral silika. Sedangkan kedua sisi lapisan oktahedral diapit oleh 2 lapisan tetrahedral yang disusun oleh $\text{Si}(\text{O},\text{OH})$. Saat ada perlakuan penyisipan unsur dengan bilangan oksidasi yang lebih rendah, contohnya Si^{4+} diubah dengan Al^{3+} (dalam lapisan tetrahedral) atau Al^{3+} diubah dengan Mg^{2+} atau Fe^{2+} (dalam lapisan oktahedral) maka strukturnya bermuatan negatif secara permanen (Prianggoro, 2022).



Gambar 2.9 Struktur Monmorillonit pada Bentonit

Sumber: (Amari, 2023)

2. Porositas Bentonit

Sebagai salah satu bahan mineral alam berjenis lempung, bentonit memiliki nilai porositas. Porositas adalah tingkat kerapatan suatu benda yang berhubungan dengan jumlah pori-pori pada benda tersebut. Semakin tinggi

kerapatan benda tersebut, maka nilai porositasnya semakin rendah dan jumlah porinya semakin sedikit. Sebaliknya, semakin rendah kerapatan suatu benda, maka nilai porositasnya semakin tinggi dan jumlah porinya semakin banyak.

Porositas atau pori adalah ukuran dari ruang kosong yang ada pada material dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volumenya. Rentang nilai porositas ada pada nilai antara 0 dan 1 atau sebagai persentase antara 0-100%. Porositas bergantung pada jenis bahan, ukuran bahan, distribusi pori, sementasi, riwayat diagenetik, dan komposisinya. Menentukan porositas benda dapat dengan menyelupkan kedalam suatu fluida cair (Alim et al., 2017). Besarnya porositas pada bentonit dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Carvalho et al., 2015):

$$U = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (2.8)$$

Dimana:

U = Nilai porositas bentonit

W₀ = Massa bentonit kering

W₁ = Massa bentonit setelah menyerap cairan

3. Jenis-Jenis Bentonit dan Pemanfaatannya

Material bentonit terbagi menjadi dua jenis berdasarkan sifatnya yang dapat mengembang apabila dimasukkan ke dalam air.

a. Na-Bentonit

Memiliki kemampuan untuk mengembang (*Swelling*) yang lebih besar apabila dimasukkan ke dalam air dan membentuk endapan kental setelah tercampur air dengan pH 8,5-9,8. Pemanfaatannya yaitu sebagai lumpur pembilas pada kegiatan pemboran, pembuatan pelet biji besi, penyumbat kebocoran pada bendungan dan kolam. Selain itu digunakan juga dalam berbagai kegiatan industri seperti minyak sawit dan farmasi (Sains et al., 2019).

b. Ca-Bentonit

Berbeda dengan Na-Bentonit, kemampuan Ca-Bentonit dalam menyerap air dinilai kurang efisien kemampuan mengembangnya lebih kecil. Namun, baik secara alami (non-aktivasi) maupun setelah diaktivasi baik secara fisik maupun kimia, Ca-Bentonit memiliki daya serap yang tinggi serta dapat terdistribusi dengan baik dalam air. Biasanya dimanfaatkan sebagai bahan penjernih (*bleaching*) pada purifikasi minyak trafo (Sains et al., 2019).

Adapun komposisi senyawa penyusun bentonit dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.4 Komposisi Bentonit

Senyawa	Na-Bentonit (%)	Ca-Bentonit (%)
SiO ₂	61,4	62,12
Al ₂ O ₃	19,8	17,33
Fe ₂ O ₃	3,9	5,30
CaO	0,6	3,68
MgO	1,3	3,30
Na ₂ O	2,2	0,50
K ₂ O	0,4	0,55
H ₂ O	7,2	7,22

Sumber: (Sains et al., 2019)

2.2 Penelitian Terkait

Banyak penelitian yang mengkaji tentang pengaruh adsorben bentonit terhadap karakteristik dielektrik maupun perbaikan isolasi minyak transformator bekas setelah dipurifikasi. Namun penelitian-penelitian tersebut memperoleh hasil dan karakteristik yang berbeda. Adapun penelitian yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

Tabel 2.5 Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
1.	Analisis Tegangan Tembus Minyak Trafo Bekas dengan Menggunakan Bentonit (Studi Kasus pada PT. Artha Graha Pratama Berdikari)	(Prianggoro, 2022)	<p>Penelitian ini membahas mengenai analisis tegangan tembus minyak transformator bekas menggunakan bentonit dengan parameter yang diukur yaitu tegangan tembus dan kejernihan warna dari minyak trafo.</p> <p>Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk purifikasi yaitu menggunakan <i>oil treatment plant</i>. Dan menggunakan alat uji elektroda setengah bola untuk pengujian tegangan tembus serta spektrofotometer UV-Vis <i>double beam</i> untuk mengukur kejernihan minyak trafo. Hasil pengujian menunjukkan</p>

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			tegangan tembus sebesar 2,94 kV, artinya belum memenuhi standar isolator yang baik menurut SPLN 49-91:1982.
2.	Analisis Tegangan Tembus <i>Crude Palm Oil</i> dengan Penambahan Bentonit dan Zeolit Teraktivasi Sebagai Alternatif Isolator Cair	(Amari, 2023)	<p>Pada penelitian ini dilakukan pengujian parameter dielektrik minyak isolasi <i>crude palm oil</i> menggunakan campuran bentonit dan zeolit teraktivasi dengan metode <i>boiling</i>. Parameter yang diukur yaitu tegangan tembus dan viskositas kinematik.</p> <p>Hasil pengujian dengan penambahan bentonit menunjukkan nilai tegangan tembus sebesar 32,0 kV; 35,9 kV; 32,3 kV; 34,2 kV; dan 36,2 kV (memenuhi standar). Sementara hasil</p>

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			<p>pengujian dengan zeolit menghasilkan nilai tegangan tembus sebesar 29 kV dan viskositas <12 cSt, nilai tersebut belum memenuhi standar SPLN 49-91:1982.</p>
3.	<p>Analisis Perbandingan Karakteristik Dielektrik Pada Minyak Bekas Transformator 20 Kv Sebelum dan Setelah Purifikasi dengan Adsorben</p>	<p>(Herviany et al., 2015)</p>	<p>Penelitian ini membahas mengenai perbaikan isolasi bahan dielektrik cair pada minyak transformator dengan metode <i>boiling</i>, <i>regeneration</i>, dan <i>filtering</i>. Data yang diperoleh dari hasil pengujian menunjukkan peningkatan nilai tegangan tembus seiring kenaikan temperatur. hasil percobaan menunjukkan nilai tegangan tembus sebesar 67,4 kV dan</p>

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			57,3 kV.
4.	Purifikasi Faktor Rugi Dielektrik ($\tan \Delta$) dan Resistivitas Serta Warna dari Minyak Isolasi Transformator Setelah Mengalami Pembebanan, dengan Bentonit Aktif	(S. Mahardika, Juningtyastuti, 2015)	<p>Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas minyak transformator melalui proses purifikasi dengan bentonit aktif. Pengujian menggunakan lima sampel minyak transformator setelah mengalami pembebanan dari transformator distribusi 3 fasa. Metode yang digunakan</p>
			<p>pada penelitian ini yaitu pengukuran faktor disipasi, resistivitas, dan perubahan warna dari minyak transformator setelah dipurifikasi. Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan pada faktor</p>

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			disipasi, peningkatan resistivitas, dan perubahan warna yang cukup signifikan.
5.	Perbaikan Parameter Dielektrik (Tegangan Tembus, Tan Δ , Resistivitas dan Water Content) Minyak Isolasi Transformator dengan Metode Purifikasi (Boiling) Pada Suhu 26°C-100°C	(Mahardika et al., 2017)	Penelitian ini membahas mengenai perbandingan parameter dielektrik minyak transformator sebelum dan setelah dipurifikasi dengan metode boiling pada suhu 26°C-100°C. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbaikan isolasi pada minyak transformator dengan nilai tegangan tembus sebesar 68,1 kV yang sesuai dengan standar IEC 60422.
6.	<i>Effect of Bentonite on the Properties of Liquid Insulating Oil</i>	(Nasrat & Hassan, 2012)	Penelitian ini membahas mengenai modifikasi struktural dan kekuatan

No.	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			<p>pemurnian bentonit melalui difraksi sinar-X dan spektroskopi inframerah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentonit teraktivasi dapat digunakan untuk penyulingan minyak trafo.</p> <p>Kekuatan dielektrik minyak terbukti meningkat hingga 79 kV setelah diolah dengan bentonit aktif. Selain itu viskositas kinematik berubah dari 19 menjadi 11 mm²/s.</p>

Penelitian terkait bertujuan untuk memberikan penjelasan tambahan pada penelitian, memudahkan analisa, serta sebagai pembandingan antara penelitian-penelitian terkait dengan penelitian yang akan dilakukan. Pada penelitian ini terdapat lima jurnal yang berkaitan dengan purifikasi minyak transformator dan perbaikan isolasinya. Hal tersebut diantaranya sebagai berikut:

1. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 1 digunakan sebagai sumber referensi untuk menjelaskan teori mengenai purifikasi minyak transformator dengan menggunakan adsorben bentonit. Pada penelitian tersebut bentonit yang digunakan belum diaktivasi, sedangkan pada penelitian ini bentonit yang

digunakan akan diaktivasi dengan memanaskan bentonit pada variasi temperatur 25°C, 100°C, 200°C, 300°C, dan 400°C.

2. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 2 digunakan sebagai acuan untuk proses aktivasi material bentonit yang akan digunakan sebagai campuran pada purifikasi bahan dielektrik cair. Pada penelitian tersebut minyak yang digunakan adalah *crude palm oil* yang ditambahkan dengan minyak mineral, sedangkan pada penelitian ini minyak yang digunakan adalah minyak transformator bekas Shell Diala S4.
3. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 3 digunakan sebagai acuan dalam proses purifikasi minyak transformator menggunakan adsorben bentonit. Pada penelitian tersebut metode yang digunakan pada proses purifikasi yaitu memanaskan minyak dengan teknologi manual menggunakan *magic com*. Sedangkan pada penelitian ini proses purifikasi dilakukan dengan mengaktivasi adsorben terlebih dahulu melalui pemanasan bentonit pada tanur kemudian mencampurkannya dengan minyak transformator menggunakan *magnetic stirrer*.
4. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 4 membahas mengenai purifikasi minyak transformator dengan bentonit aktif setelah mengalami pembebanan. Parameter dielektrik yang diukur berfokus pada penurunan faktor disipasi dan kejernihan minyak trafo (mempertimbangkan perubahan warna terhadap keberadaan kontaminan pada minyak). Pada penelitian ini parameter dielektrik berfokus pada peningkatan tegangan tembus, penurunan kadar viskositas, serta persentase kadar air pada minyak transformator.
5. Penelitian pada tabel 2.3 nomor 5 digunakan sebagai acuan untuk penjelasan teori mengenai perbandingan karakteristik dielektrik cair sebelum dan sesudah dipurifikasi. Metode yang digunakan yaitu metode *boiling* dengan variasi peningkatan suhu yang berbeda, sedangkan pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu pencampuran sampel dengan adsorben yang sudah melewati proses *steaming*. Yaitu memanaskan

material bentonit pada tungku tanur (*furnace*) dengan variasi temperatur 25°C, 100°C, 200°C, 300°C, dan 400°C.

6. Penelitian pada tabel 2.3 no 6 digunakan sebagai acuan untuk menentukan karakteristik dielektrik minyak trafo yang akan diuji. Pada penelitian tersebut proses aktivasi bentonit dilakukan melalui difraksi sinar-X dan spektrokopi inframerah. Sedangkan pada penelitian ini melalui metode pemanasan material bentonit untuk mengukur besarnya porositas pada material bentonit setelah dilakukan aktivasi.