

Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator

I Nyoman Oksa Winanta, Anak Agung Ngurah Amrita*, Wayan Gede Ariastina

Program Studi Teknik elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*Email : ngr_amrita@unud.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh perubahan suhu, kandungan air, serta jarak sela elektroda terhadap tegangan tembus minyak transformator. Minyak transformator yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak Shell Diala-B dan Nynas. Pengujian pengaruh suhu dilakukan pada variasi suhu 28^o C hingga 81^o C, pengaruh kandungan air dilakukan dengan variasi mulai dari 11 ppm hingga 31 ppm, serta pengaruh jarak sela elektroda dilakukan pada variasi jarak sela 1,2 mm hingga 2,5 mm. Metode pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda setengah bola sesuai standar IEC 60156 tahun 1995. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka semakin tinggi pula tegangan tembus minyak transformator. Tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak Nynas saat suhu 81^o C yakni sebesar 59,27 kV. Hasil penelitian berikutnya yakni semakin tinggi kandungan air maka tegangan tembusnya semakin rendah. Tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak Shell Diala-B dengan kandungan air 11 ppm yakni sebesar 61,35 kV. Kemudian semakin besar jarak sela elektroda maka tegangan tembusnya akan semakin besar pula. Tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak Nynas dengan jarak sela elektroda 2,5 mm yakni sebesar 60,02 kV.

Kata Kunci : Tegangan Tembus, Minyak Transformator, Suhu, Kandungan Air, Jarak Sela Elektroda

Abstract

This study aims to identify the effect of changes in temperature, water content, and electrode gap on the breakdown voltage of transformer oil. The transformer oil used in this study was Shell Diala-B and Nynas oil. Testing the effect of temperature was carried out at temperature variation of 280 C to 810 C, the effect of water content was carried out with variations ranging from 11 ppm to 31 ppm, and the effect of electrode gap was carried out in variation ranges between 1.2 mm to 2.5 mm. Breakdown voltage testing method uses hemispherical electrodes according to IEC 60156 standard of 1995. The results of the study show that the higher the temperature, the higher the breakdown voltage of transformer oil. The highest breakdown voltage in Nynas oil occurs when the temperature is 810 C which is equal to 59.27 kV. The results also show that the higher the water content, the breakdown voltage is lower. The highest breakdown voltage in Shell Diala-B oil occurs with a water content of 11 ppm which is equal to 61.35 kV. Also the greater the electrode gap, the greater the breakdown voltage. The highest breakdown voltage in Nynas oil occurs with the gap of electrode 2.5 mm which is equal to 60.02 kV.

Keywords : Breakdown Voltage, Transformer Oil, Temperature, Water Content, Electrode Gap

1. PENDAHULUAN

Salah satu masalah yang paling sering dihadapi dalam penyaluran tenaga listrik adalah mengenai transformator, sebab transformator selalu beroperasi secara terus-menerus. Salah satu bagian penting dalam transformator adalah isolasi cair minyak transformator karena merupakan isolator yang berfungsi sebagai pemisah secara listrik dua buah penghantar, pendingin transformator, peredam busur listrik, serta pelarut gas yang timbul [1]. Selain itu, minyak transformator sebagai

bahan dielektrik cair memiliki kecenderungan untuk memperbaiki diri sendiri jika terjadi pelepasan muatan sebagian. Pelepasan tersebut dapat terjadi akibat ketidaksempurnaan isolasi minyak berupa kontaminan seperti partikel diantara dua konduktor. Hal ini mengakibatkan pelepasan muatan di sebagian isolasi dan menjembatani ruang antara dua konduktor secara tidak sempurna.

Umumnya, permasalahan pada transformator terjadi akibat kegagalan

isolasi minyak transformator yang dapat disebabkan oleh penurunan nilai tegangan tembus. Berdasarkan penelitian terdahulu, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi penurunan tegangan tembus antara lain, perubahan suhu dan kontaminasi air. Minyak transformator akan selalu mendapat beban berupa medan listrik dan beban thermal yang berasal dari belitan maupun inti transformator selama beroperasi. Perubahan suhu yang terjadi selama transformator beroperasi dapat mengakibatkan timbulnya kontaminan pada minyak transformator. Kontaminan yang timbul dapat berupa partikel padat, uap air, ataupun gelembung gas [2]. Jika faktor-faktor tersebut terjadi dalam jangka waktu yang cukup lama dan kontinyu, maka dapat membuat minyak transformator tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Oleh karena itu, perlu diteliti karakteristik minyak transformator dengan melakukan pengujian tegangan tembus pada variabel uji dan jenis minyak yang bervariasi.

Penelitian ini membahas tentang karakteristik tegangan tembus minyak transformator menggunakan minyak berjenis Shell Diala-B dan Nynas. Pengujian karakteristik tersebut meliputi pengujian pengaruh suhu pada variasi suhu 28°C hingga 81°C , pengaruh kandungan air dengan variasi mulai dari 11 ppm hingga 31 ppm, serta pengaruh jarak sela elektroda pada variasi jarak sela 1,2 mm hingga 2,5 mm. Pengujian tegangan tembus isolasi cair mengacu pada standar IEC 60156 tahun 1995 menggunakan elektroda setengah bola dengan tegangan uji berupa tegangan tinggi bolak-balik frekuensi 50 Hz.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Minyak Transformator

Isolasi cair minyak transformator merupakan media isolasi dan pendingin pada sebuah transformator [3]. Minyak transformator sebagai bahan isolasi harus memiliki kemampuan untuk memisahkan bagian-bagian bertegangan yang memiliki beda fasa dan minyak transformator sebagai pendingin harus mampu mensirkulasikan panas dengan optimal [1]. Ketika minyak transformator diaplikasikan untuk mengalirkan panas pada suhu tinggi dalam jangka waktu tertentu, akan mengakibatkan proses penuaan pada minyak. Selain itu, panas juga dapat menyebabkan proses aliran minyak menjadi terhambat. Hal ini terjadi akibat

adanya kontaminan dan resin yang mengendap pada minyak sehingga warna minyak akan menjadi keruh dan memperlambat sirkulasi minyak [4].

2.2 Kegagalan Isolasi Minyak Transformator

Kegagalan isolasi dapat terjadi karena beberapa faktor utama antara lain isolasi sudah mengalami penuaan, menurunnya kekuatan dielektrik, serta tegangan lebih yang mengenai isolasi. Selain itu, faktor lain yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi yaitu jarak sela elektroda, luas daerah elektroda, serta sistem pendinginan.

Gambar 1 Suatu Material Isolasi diantara Dua Elektroda

Teori kegagalan isolasi yang terjadi pada minyak transformator dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut [2] :

1. Teori kegagalan elektronik
Teori ini menyebutkan bahwa medan listrik yang tinggi diantara elektroda akan memicu timbulnya suatu elektron yang nantinya akan memulai banjir elektron sehingga terjadilah kegagalan.
2. Teori kegagalan kavitasi
Teori tersebut menyatakan bahwa gelembung udara dalam cairan yang terbentuk akibat tabrakan elektron merupakan awal dari pencetus kegagalan total pada zat cair.
3. Teori kegagalan partikel padat
Teori ini terjadi karena adanya butiran-butiran penghantar diantara elektroda di dalam minyak transformator yang memicu terjadinya kegagalan.
4. Teori kegagalan bola cair
Teori ini terjadi akibat ketidakstabilan bola cair yang mengandung uap air dalam suatu medan listrik yang kritis sehingga tetesan bola cair tertahan di dalam minyak dan akan mengakibatkan terjadinya kegagalan total.

C. Tegangan Tembus

Tegangan tembus merupakan tegangan ketika isolator sudah tidak sanggup menghadapi tekanan berupa medan listrik diantara elektroda yang mempunyai beda potensial sehingga isolator berubah menjadi konduktor. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi proses tembus listrik pada minyak transformator. Salah satunya dapat diakibatkan oleh kontaminan yang bergerak ke daerah yang bertekanan listrik diantara kedua elektroda [5]. Tegangan tembus pada isolator cair juga dapat dipengaruhi oleh sifat alami tegangan, sistem tegangan, serta durasi waktu tegangan diterapkan [6]. Selain itu besar tegangan tembus bergantung pada kuat dielektrik masing-masing bahan dan kehadiran unsur lain [7].

D. Kandungan Air

Kandungan air dapat menurunkan ketahanan listrik minyak transformator serta memicu terjadinya ionisasi sehingga mengakibatkan kerusakan isolasi padat dan cair. Jika terjadi hubung singkat antar lilitan maka isolasi kertas dari lilitan bisa terbakar dan menghasilkan karbon. Hal ini disebabkan karena minyak transformator dan kertas isolasi merupakan bahan organik yang mengandung atom karbon [1]. Ionisasi pada isolasi kertas akan memunculkan atom-atom bebas berupa atom hidrogen dan oksigen yang akan menciptakan senyawa baru, yaitu air (H₂O). Kandungan air dan oksigen yang terbentuk dapat menghasilkan asam, menyebabkan korosi, menimbulkan endapan, serta mempercepat penurunan usia transformator.

3. METODE PENELITIAN

Alur penelitian terdiri dari beberapa tahapan yakni mulai dari mempersiapkan sampel dan alat uji, melakukan pengujian tegangan tembus pada sampel uji, hingga mencatat dan menganalisa hasil uji. Hasil uji yang dianalisa berupa tampilan grafik yang diolah menggunakan *Microsoft Excel*.

A. Persiapan Uji Tegangan Tembus

Pengujian pada minyak transformator dilakukan dengan menggunakan minyak berjenis *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Pengujian dilakukan pada suhu udara lingkungan $\pm 30^{\circ}$ C, kelembaban lingkungan 60%-70%, serta tekanan udara lingkungan 0,95 atm (755 mmHg, 966 Mbar). Volume minyak yang digunakan untuk setiap pengujian tegangan tembus minyak

transformator yakni 500 mL. Minyak transformator yang digunakan sebagai bahan pengujian berasal dari beberapa transformator dengan kondisi dan warna yang bervariasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Warna minyak yang masih dalam kondisi baik atau layak pakai adalah minyak berwarna kuning bening hingga kuning cerah [8].

Gambar 3 Warna Minyak Transformator

Minyak transformator pada sampel (a) dan (b) merupakan minyak yang diambil pada kondisi transformator mengalami gangguan berupa hubung singkat dengan warna yang masih jernih dan belum begitu terlihat kemunculan kontaminan. Untuk sampel (c) dan (d) merupakan minyak yang diambil pada kondisi transformator telah mengalami kegagalan isolasi akibat penuaan dengan warna minyak kuning dan terlihat adanya kontaminan. Untuk sampel (e) dan (f) merupakan minyak yang diambil pada kondisi transformator mengalami kegagalan isolasi setelah sebelumnya telah dilakukan pemurnian. Pada sampel (e), warna minyak kuning keruh, sementara pada sampel (f), warna minyak merah tua dan tampak keruh, kemungkinan minyak sempat ditambahkan suatu zat aditif untuk mengubah sifat listriknya dan terlihat cukup banyak kontaminan di kedua sampel tersebut.

Sementara itu, untuk peralatan yang digunakan untuk pengujian tegangan tembus meliputi *Hypotronic OC Series 60 kV*, *Microwave Oven Oxone OX-78TS*, *Thermometer Alkohol*, *Gelas Beker Jangka Sorong*, *Aneroid Barometer*, serta *Haar-Synth Hygro*. Sedangkan peralatan yang digunakan untuk pengujian kandungan air adalah *Vaisala HM70*.

B. Prosedur Uji Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus mengacu pada standar [9]. Berikut merupakan prosedur uji tegangan tembus isolasi cair :

1) Persiapan *sampling*

Sampling harus dikocok berulang kali secara lembut sebelum mengisi kotak uji agar tercipta homogenisasi cairan dan tidak memunculkan gelembung udara.

2) Pengisian kotak uji

Kotak uji, elektroda, serta komponen terkait harus dibersihkan dahulu. Kemudian *sampling* dituangkan ke dalam kotak uji sebanyak 500 mL secara perlahan agar tidak memunculkan gelembung udara yang dapat mengganggu keakuratan hasil uji.

3) Pemberian tegangan

Berikan tegangan pada elektroda dengan kenaikan yang konstan secara perlahan dimulai dari 0 kV dengan laju 2,0 kV/dt ± 0.2 kV/dt hingga terjadi kegagalan. Pengujian dilakukan pada suhu udara lingkungan yakni 20° C ± 5° C.

4) Pencatatan data

Percobaan dilakukan sebanyak enam kali untuk setiap pengujian pada kotak uji yang sama dengan jeda waktu minimal dua menit dan dilakukan secara berulang. Jeda waktu tersebut bertujuan untuk menghindari munculnya gelembung udara diantara jarak sela. Percobaan dapat dilakukan secara kontinyu jika memakai pengaduk.

5) Laporan data

Catat hasil setiap kali percobaan, kemudian hitung nilai rata-rata dari enam kali percobaan yang sudah dilakukan untuk mendapatkan nilai hasil satu kali pengujian.

C. Metode Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi adalah suatu angka atau bilangan yang menunjukkan seberapa dekat korelasi dari suatu variabel dengan variabel lainnya. Koefisien korelasi dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut [10] :

$$r = \frac{(n \sum XY) - (\sum X \sum Y)}{\sqrt{[(n \sum X^2) - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (1)$$

Keterangan :

- r = koefisien korelasi antara variabel X dan variabel Y
- $\sum X$ = Jumlah nilai variabel X
- $\sum Y$ = Jumlah nilai variabel Y

Sementara untuk persamaan regresi linear dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [12] :

$$Y = a + bX \quad (2)$$

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (4)$$

Keterangan :

- Y = Variabel Akibat (*Dependent*)
- X = Variabel Faktor Penyebab (*Independent*)
- a = Konstanta
- b = Koefisien regresi (kemiringan)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Minyak Shell Diala-B

Hasil uji minyak Shell Diala-B didapatkan setelah dilakukan pengujian suhu, kandungan air, serta jarak sela elektroda terhadap tegangan tembusnya. Tabel I sampai Tabel III menunjukkan hasil pengujian minyak Shell Diala-B.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN SUHU TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

Kandungan Air (ppm)	Tegangan Tembus (kV)		
	Suhu 29° C	Suhu 52° C	Suhu 80° C
15	51,28	55,36	58,42
30	27,72	38,28	43,57
44	20,1	26,33	32,72

TABEL II
HASIL PENGUJIAN KANDUNGAN AIR TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

Jarak Sela Elektroda	Tegangan Tembus (kV)		
	Kadar Air 11 ppm	Kadar Air 23 ppm	Kadar Air 26 ppm
1,2 mm	48,27	21,28	19,48
2 mm	55,35	27,63	22,57
2,5 mm	61,35	28,95	24,28

TABEL III
HASIL PENGUJIAN JARAK SELA ELEKTRODA TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

Suhu (° C)	Tegangan Tembus (kV)		
	Jarak Sela 1,2 mm	Jarak Sela 2 mm	Jarak Sela 2,5 mm
27	24,02	28,5	30,15
55	32,47	42,73	49,38
82	42,18	48,23	54,93

B. Hasil Pengujian Minyak Nynas

Hasil uji minyak Nynas didapatkan setelah dilakukan pengujian suhu, kandungan air, serta jarak sela elektroda terhadap tegangan tembusnya. Tabel IV sampai Tabel VI menunjukkan hasil pengujian minyak Nynas.

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN SUHU TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

Kandungan	Tegangan Tembus
-----------	-----------------

Air (ppm)	(kV)		
	Suhu 28 ^o C	Suhu 53 ^o C	Suhu 81 ^o C
16	44,03	52,08	59,27
19	37,46	41,58	44,7
28	23,53	30,42	33,13

TABEL V
HASIL PENGUJIAN KANDUNGAN AIR TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

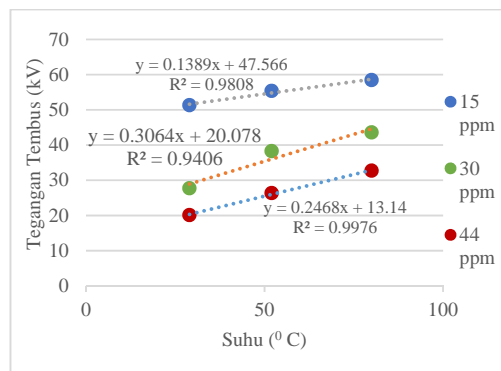
Jarak Sela Elektroda	Tegangan Tembus (kV)		
	Kadar Air 12 ppm	Kadar Air 14 ppm	Kadar Air 31 ppm
1,2 mm	40	35,57	22,38
2 mm	49,69	44,03	25,58
2,5 mm	50,56	49,08	27,32

TABEL VI
HASIL PENGUJIAN JARAK SELA ELEKTRODA TERHADAP TEGANGAN TEMBUS

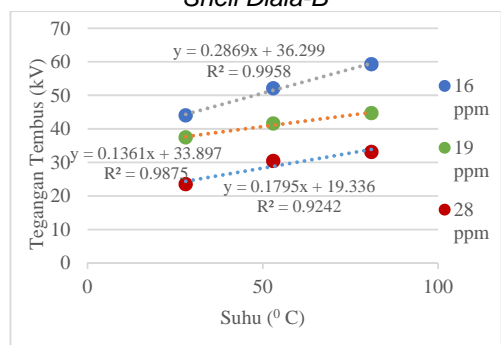
Suhu (°C)	Tegangan Tembus (kV)		
	Jarak Sela 1,2 mm	Jarak Sela 2 mm	Jarak Sela 2,5 mm
28	23,12	27,2	29,4
50	33,62	43,55	52,06
80	41,21	53,38	60,02

C. Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Transformator

Dari hasil pengujian yang telah didapatkan sesuai Tabel I dan Tabel IV, dapat ditentukan korelasi linear antara suhu, kandungan air, dan tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Gambar 12 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* sebagai fungsi suhu. Gambar 13 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Nynas* sebagai fungsi suhu.



Gambar 12 Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak *Shell Diala-B*



Gambar 13 Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak *Nynas*

Berdasarkan Gambar 12 dan 13 dengan sampel minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*, perubahan suhu mempengaruhi nilai tegangan tembus dari masing-masing objek uji. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi suhu yang diberikan pada objek uji, tegangan tembus yang didapatkan juga semakin tinggi. Pada Gambar 12, kenaikan nilai tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak *Shell Diala-B* yang memiliki kandungan air 30 ppm dengan kenaikan sebesar 15,85 kV dari suhu awalnya. Sedangkan kenaikan nilai tegangan tembus terendah terjadi pada minyak *Shell Diala-B* yang memiliki kandungan air 15 ppm dengan kenaikan sebesar 7,14 kV dari suhu awalnya. Pada Gambar 13, kenaikan nilai tegangan tembus tertinggi terjadi minyak *Nynas* yang memiliki kandungan air 16 ppm dengan kenaikan sebesar 15,24 kV dari suhu awalnya. Sedangkan kenaikan nilai tegangan tembus terendah terjadi pada minyak *Nynas* yang memiliki kandungan air 19 ppm dengan kenaikan sebesar 7,24 kV dari suhu awalnya.

Sementara itu, nilai R^2 di atas 0,9 menunjukkan bahwa korelasinya positif, dengan kata lain kedua parameter tersebut saling mempengaruhi dalam tingkatan korelasi yang tinggi.

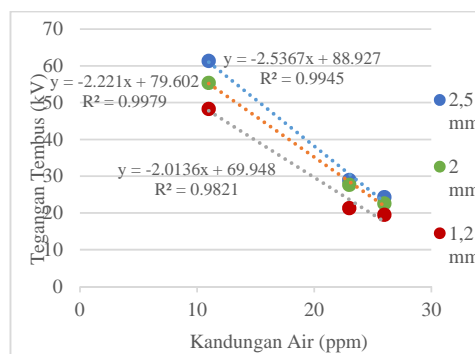
Berdasarkan hasil pengujian tersebut, kenaikan suhu selalu diikuti dengan kenaikan tegangan tembus minyak transformator. Hal ini terjadi karena saat pemanasan berlangsung dan suhu mulai meningkat, kandungan air bawaan yang berasal dari minyak transformator dan gelembung-gelembung gas yang terbentuk karena penguraian molekul cair ataupun tabrakan elektron pada permukaan elektroda yang tidak rata dalam minyak transformator akan menguap sebagian. Penguapan sebagian terjadi akibat titik didih gelembung-gelembung gas tersebut lebih rendah dibandingkan titik didih minyak transformator. Berkurangnya kontaminan tentunya mengurangi tingkat konduktivitas minyak sehingga kegagalan isolasi sulit terjadi karena dibutuhkan kuat medan listrik yang lebih besar, dengan kata lain medan listrik tidak cukup kuat untuk menciptakan jembatan konduktif diantara elektroda. Namun menurut hasil penelitian [11], terdapat beberapa faktor yang dapat menjadi penyebab turunnya tegangan tembus seiring dengan kenaikan suhu yaitu resistansi yang semakin menurun, degradasi material, timbulnya kontaminan yang mempengaruhi kualitas isolasi, tingkat pemanasan yang tinggi, serta umur transformator.

Pada dasarnya, minyak transformator yang mengalami kondisi terekspos pada suhu tinggi akan mengalami penurunan sifat-sifat listriknya. Penurunan tegangan tembus juga dapat terjadi karena timbulnya kontaminan baru. Minyak transformator yang dipanaskan secara terus menerus akan mengalami pemecahan molekul sehingga menghasilkan kontaminan baru dan membuat resiko terjadinya loncatan bunga api semakin meningkat. Selain itu, transformator yang telah mengalami penuaan juga dapat mempengaruhi tingkat viskositas dan resistivitas dari minyak transformator [12]. Hal ini terjadi karena pada minyak transformator yang telah mengalami penuaan memiliki nilai viskositas yang tinggi sehingga menyebabkan panas yang timbul tidak tersirkulasi dengan baik. Kemudian lamanya pemakaian minyak transformator dapat mempengaruhi kinerja minyak

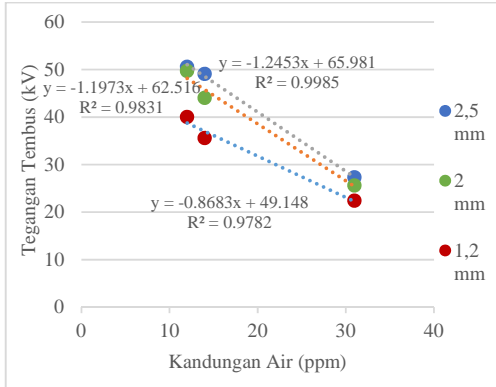
sehingga kualitas sistem isolasi dapat mengalami degradasi. Namun dengan teknologi yang dimiliki dalam pengolahan dan perawatan minyak transformator, kontribusi beberapa faktor penurunan nilai tegangan tembus menjadi berkurang sehingga variabel suhu dapat dianggap sebagai faktor yang dominan dalam proses terjadinya degradasi kualitas isolasi. Hal-hal tersebut menjadi sebab mengapa *trendline* dari grafik penelitian ini dan penelitian terdahulu mengalami perbedaan.

D. Pengaruh Kandungan Air Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Transformator

Berdasarkan hasil pengujian yang telah didapatkan sesuai Tabel II dan Tabel V, dapat ditentukan korelasi linear antara kandungan air, jarak sela elektroda dan tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Untuk menentukan korelasi tersebut, maka dapat dibuat grafik *trendline* secara linear seperti ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15. Gambar 14 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* sebagai fungsi kandungan air. Gambar 15 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Nynas* sebagai fungsi kandungan air.



Gambar 14 Pengaruh Kandungan Air terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak *Shell Diala-B*



Gambar 15 Pengaruh Kandungan Air terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Nynas

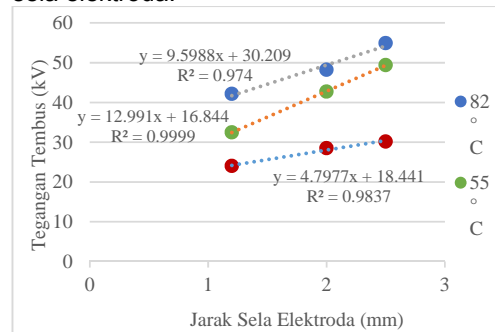
Berdasarkan Gambar 14 dan 15 dengan sampel minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*, kontaminasi berupa kandungan air mempengaruhi nilai tegangan tembus dari masing-masing objek uji. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi jumlah air yang terkandung pada objek uji, tegangan tembus yang didapatkan semakin rendah. Pada Gambar 14, nilai tegangan tembus tertinggi terdapat pada minyak *Shell Diala-B* yang memiliki kandungan air sebesar 11 ppm dengan nilai 61,35 kV. Sedangkan nilai tegangan tembus terendah terdapat pada minyak *Shell Diala-B* yang memiliki kandungan air sebesar 26 ppm dengan nilai 19,48 kV. Pada Gambar 15, nilai tegangan tembus tertinggi terdapat pada minyak *Nynas* yang memiliki kandungan air sebesar 12 ppm dengan nilai 50,56 kV. Sedangkan nilai tegangan tembus terendah terdapat pada minyak *Nynas* yang memiliki kandungan air sebesar 31 ppm dengan nilai 22,38 kV. Sementara itu, nilai R^2 di atas 0,9 dan y yang bernilai minus menunjukkan bahwa korelasinya negatif, dengan kata lain kedua parameter tersebut saling mempengaruhi dalam tingkatan korelasi yang tinggi namun dengan *trendline* berbanding terbalik antara kedua parameter tersebut.

Hasil pengujian tersebut memperlihatkan bahwa kenaikan kandungan air dalam minyak transformator selalu diikuti dengan penurunan tegangan tembusnya. Hal ini terjadi karena kandungan air yang tinggi mengakibatkan korosi, menghasilkan asam, serta endapan. Bahan kontaminan seperti air memiliki sifat alami untuk bergerak ke daerah yang bertekanan listrik tinggi diantara dua elektroda karena air merupakan

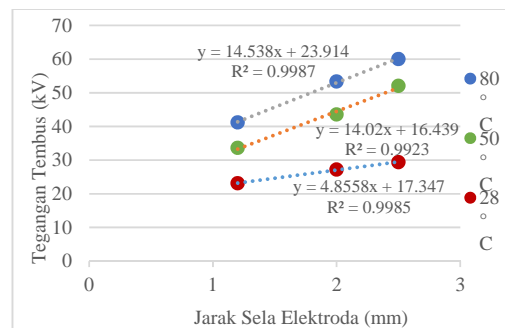
molekul polar yang bersifat konduktif. Jika kontaminan tersebut semakin banyak, maka kerapatan minyak transformator berkurang akibat pergerakan elektron semakin cepat dan akan terbentuk semacam jembatan yang terdiri atas gelembung-gelembung udara mengandung gas diantara elektroda terpisah sehingga dapat mengakibatkan terjadinya konduksi hingga kegagalan isolasi minyak transformator.

E. Pengaruh Jarak Sela Elektroda Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Transformator

Berdasarkan hasil pengujian sesuai Tabel III dan Tabel VII, dapat ditentukan korelasi linear antara jarak sela elektroda, suhu, dan tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Pada Gambar 16 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* sebagai fungsi jarak sela elektroda. Sedangkan pada Gambar 17 memperlihatkan grafik karakteristik tegangan tembus minyak transformator *Nynas* sebagai fungsi jarak sela elektroda.



Gambar 16 Pengaruh Jarak Sela Elektroda terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak *Shell Diala-B*



Gambar 17 Pengaruh Jarak Sela Elektroda terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak *Nynas*

Berdasarkan Gambar 16 dan 17 dengan sampel minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*, mengubah jarak sela elektroda mempengaruhi nilai tegangan tembus dari masing-masing objek uji. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa semakin jauh jarak sela elektroda yang diberikan pada objek uji, tegangan tembus yang didapatkan juga semakin tinggi. Pada Gambar 16, nilai tegangan tembus tertinggi terdapat pada minyak *Shell Diala-B* dengan jarak sela elektroda 2,5 mm sebesar 54,93 kV. Sedangkan nilai tegangan tembus terendah terdapat pada minyak *Shell Diala-B* dengan jarak sela elektroda 1,2 mm sebesar 24,02 kV. Pada Gambar 17, nilai tegangan tembus tertinggi terdapat pada minyak *Nynas* dengan jarak sela elektroda 2,5 mm sebesar 60,02 kV. Sedangkan nilai tegangan tembus terendah terdapat pada minyak *Nynas* dengan jarak sela elektroda 1,2 mm sebesar 23,12 kV. Sementara itu, nilai R^2 di atas 0,9 menunjukkan bahwa korelasinya positif, dengan kata lain kedua parameter tersebut saling mempengaruhi dalam tingkatan korelasi yang tinggi.

Hasil pengujian tersebut memperlihatkan bahwa penambahan jarak sela elektroda selalu diikuti dengan kenaikan tegangan tembus minyak transformator. Hal ini terjadi karena semakin jauh jarak sela elektroda, maka tegangan yang dibutuhkan untuk proses ionisasi semakin besar. Tegangan yang besar diterapkan agar medan listrik yang timbul semakin besar sehingga energi yang diperlukan elektron untuk melepaskan diri dari ikatan molekulnya terpenuhi. Dengan kata lain, kuat medan listrik yang timbul belum cukup untuk mencapai terjadinya kegagalan isolasi. Sedangkan pada jarak sela elektroda yang kecil, energi yang dibutuhkan untuk melepas elektron dari ikatan molekulnya tidak begitu besar. Hal ini mengakibatkan proses ionisasi akan semakin mudah terjadi dengan medan listrik yang tidak begitu besar sehingga tegangan yang diterapkan juga semakin mudah menembus minyak transformator.

5. KESIMPULAN

Kenaikan suhu memberi pengaruh yang signifikan terhadap tegangan tembus minyak transformator *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka tegangan tembus minyak transformator juga semakin

tinggi. Tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak *Nynas* saat suhu 81°C yakni sebesar 59,27 kV. Namun kenaikan suhu tidak selamanya membuat nilai tegangan tembus minyak transformator mengalami kenaikan karena dipengaruhi oleh kondisi minyak transformator sebagai bahan dielektrik seperti resistansi, kontaminasi, tingkat pemanasan, serta umur minyak.

Jumlah kandungan air yang terdapat pada minyak *Shell Diala-B* dan *Nynas* memberi pengaruh yang signifikan terhadap tegangan tembus minyak tersebut. Semakin tinggi kandungan air pada minyak transformator maka semakin rendah tegangan tembusnya. Tegangan tembus tertinggi terdapat pada minyak *Shell Diala-B* dengan kandungan air 11 ppm yakni sebesar 61,35 kV. Grafik *trendline* pengaruh kandungan air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak transformator menunjukkan korelasi negatif.

Jarak sela antara elektroda memberi pengaruh yang cukup signifikan terhadap tegangan tembus minyak *Shell Diala-B* dan *Nynas*. Semakin besar jarak sela elektroda maka semakin besar pula tegangan tembusnya. Tegangan tembus tertinggi terjadi pada minyak *Nynas* dengan jarak sela elektroda 2,5 mm yakni sebesar 60,02 kV. Grafik *trendline* pengaruh jarak sela elektroda terhadap karakteristik tegangan tembus minyak transformator menunjukkan korelasi positif.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [2] Arismunandar, A. 1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- [3] Suherman, Andri. 2016. Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Transformator Dan Minyak Kelapa Murni. *Gravity*, 2 (2) 99-111.
- [4] Tobing, L. 2012. *Dasar-dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta: Erlangga.
- [5] Muhaimin. 1999. *Bahan-Bahan Listrik*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [6] Abduh, Syamsir. 2003. *Teori Kegagalan Isolasi*. Jakarta: Universitas Trisakti.
- [7] Naidu, M. S., dan V Kamaraju. 1996. *High Voltage Engineering Second Edition*. United States: The McGraw Hill.

- [8] ASTM D1500-12, Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale)- *Test Methods*, 1997.
- [9] IEC 60156, Insulating liquids- Determination Of Breakdown Voltage At Power Frequency- *Test Methods*, 1995.
- [10] Saprianto. 2017. Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Kekuatan Dielektrik Minyak Isolasi Transformator 6,6 kV/380 V di PT. Intibenua Perkasatama Dumai. *Jom FTEKNIK*, 4 (2) 1-8.
- [11] Hidayat, Ahmad Y. 2013. Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Tegangan Tembus Dan Nilai Harapan Hidup Isolasi Padat Dan Cair Transformator. *Skripsi*. TE. Fakultas Teknik. Universitas Indonesia.
- [12] Putra. I. G. N Segara. 2015. An Experience in Oil Testing of Medium Voltage Transformers. *IEEE ICPADM*, 1007-1010.