



## Analisis Tegangan Tembus Minyak Jarak dan Minyak Shell Diala B Sebagai Isolasi Cair Transformator

Retno Aita Diantari<sup>1,2,\*</sup>, Aghus Sofwan<sup>1</sup>, Aries Susanty<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

<sup>2</sup>Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Cengkareng Jakarta Barat, 11750

\*Corresponding author: [retno.aita@itpln.ac.id](mailto:retno.aita@itpln.ac.id)

(Received: September 12, 2024; Accepted: October 29, 2024)

### Abstract

**Analysis of Breakdown Voltage of Castor Oil and Shell Diala B Oil as Liquid Transformer Insulation.** One of the most important parts of a transformer is transformer oil. The oil in the transformer functions as insulation and coolant. The oil used in this transformer oil generally uses mineral oil or shell diala B oil derived from petroleum. Mineral oil is a liquid insulation that is not environmentally friendly, because this oil is biologically difficult to degrade and its supply is limited. Therefore, research has now begun using vegetable oil, namely castor oil, where castor oil is biologically easy to degrade, making it more environmentally friendly. To determine the characteristics of the breakdown voltage, both shell diala B mineral oil, castor oil and a mixture of shell diala B mineral oil and castor oil, tests were carried out at the IT PLN Jakarta High Voltage Technology and Equipment Laboratory. The breakdown voltage value standard based on SPLN'49-1982 and IEC No. 56 of 1991, the minimum breakdown voltage value is 30 kV / 2.5 mm. The test results show that the breakdown voltage of shell diala B mineral oil, castor oil and a mixture of the two reaches the minimum breakdown voltage standard. The highest breakdown voltage value in the mixture of Shell Diala B mineral oil and castor oil 50%:50% with an average breakdown voltage of 53 kV and the highest dielectric strength of 212 kV/cm. The higher the breakdown voltage, the higher the dielectric strength.

**Keywords:** shell diala B oil, castor oil, breakdown voltage, dielectric strength, SPLN 49-1982

### Abstrak

Salah satu bagian terpenting dari transformator adalah minyak transformator. Minyak pada transformator berfungsi sebagai isolasi dan pendingin. Minyak yang digunakan pada minyak transformator ini secara umum menggunakan minyak mineral atau minyak *shell* diala B yang berasal dari minyak bumi. Minyak mineral merupakan isolasi cair yang tidak ramah lingkungan, sebab minyak ini secara biologis sulit terdegradasi dan persediaannya terbatas. Oleh karena itu, saat ini sudah mulai dilakukan penelitian dengan menggunakan minyak nabati yaitu minyak jarak dimana minyak jarak ini secara biologis mudah terdegradasi, sehingga lebih ramah lingkungan. Untuk mengetahui karakteristik tegangan tembus, baik minyak mineral *shell* diala B, minyak jarak dan campuran minyak mineral *shell* diala B dan minyak jarak, dilakukan pengujian di Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi IT PLN Jakarta. Standar nilai tegangan tembus berdasarkan SPLN'49-1982 dan IEC No. 56 tahun 1991, nilai tegangan tembus minimal sebesar 30 kV/2,5 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan tembus minyak mineral *shell* diala B, minyak jarak dan pencampuran antara keduanya mencapai standar minimal tegangan tembus. Nilai tegangan tembus terbesar pada pencampuran minyak mineral *shell* diala B dan minyak jarak 50%:50%

dengan rata-rata tegangan tembus sebesar 53 kV dan kekuatan dielektrik tertinggi yaitu 212 kV/cm. Semakin besar tegangan tembus, maka semakin besar pula kekuatan dielektriknya.

**Kata kunci:** minyak shell diala B, minyak jarak, tegangan tembus, kekuatan dielektrik, SPLN 49-1982

**How to Cite This Article:** Diantari, R. A., Sofwan, A. & Susanty, A. (2024). Analisis Tegangan Tembus Minyak Jarak dan Minyak Shell Diala B Sebagai Isolasi Cair Transformator. *JPII*, 2(4), 243-251. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2024.24586>

## PENDAHULUAN

Di era digital saat ini, kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi sangatlah pesat. Beberapa sektor seperti pendidikan, industri, transportasi, bisnis, perdagangan, bahkan rumah tangga ikut memanfaatkan kemajuan teknologi tersebut. Energi listrik sangat penting untuk menjalankan aktivitas sehari-hari. Pembangkit, transmisi dan distribusi adalah suatu proses untuk penyaluran tenaga listrik. Salah satu peralatan utama dalam proses penyaluran listrik adalah transformator (Irwanto & Prabustya, 2020; Moukengué Imano, 2003). Transformator dapat mengubah tegangan tanpa mengubah frekuensi sistem pembangkit tenaga listrik. Ketika tegangan berubah, dapat terjadi *hot spot* akibat besarnya arus yang mengalir melalui transformator. Oleh sebab itu diperlukan isolasi pada transformator yang digunakan sebagai proteksi agar menahan panas dan listrik. Bagian utama isolasi pada transformator yaitu minyak trafo dan kertas yang menutupi kumparan belitan pada transformator.

Dalam pengoperasiannya, sebuah transformator akan menghadapi beberapa fenomena degradasi, yang disebabkan oleh air, suhu, oksigen dan asam. Akibatnya, *degree of polymerization* (DP) akan berkurang, dan bila DP kurang dari 200, dalam kasus insulasi berbasis selulosa, resistansi kertas menjadi sangat rendah, trafo harus lebih sering dipantau dan dilakukan penggantian secepatnya (Fernandez-Diego et al., 2018). Di sebagian besar transformator daya, kertas dikaitkan dengan minyak untuk membentuk sistem isolasi.

Isolasi merupakan suatu material yang tidak dapat menghantarkan listrik. Ciri-ciri isolasi adalah memisahkan atau mengisolasi suatu bagian tegangan dari bagian lainnya untuk mencegah terjadinya kebocoran pada peralatan tegangan tinggi. Isolasi juga berfungsi sebagai proteksi untuk melindungi peralatan yang bertegangan sehingga orang yang berada di sekitar peralatan dan konduktor tidak terkena sengatan listrik. Isolasi listrik yang baik mengacu pada resistansi isolasi yang tinggi dan kekuatan dielektrik yang baik. Penggunaan material pada tegangan tinggi diklasifikasikan menjadi tiga material utama, di antaranya adalah isolasi padat, isolasi cair dan isolasi gas.

Isolasi minyak dan isolasi kertas adalah dua isolasi yang paling umum digunakan pada transformator. Isolasi minyak jenis mineral adalah yang paling umum digunakan karena memiliki kinerja penyerapan yang baik

dan kekuatan isolasi yang kuat. Secara umum, isolasi kertas digunakan sebagai lapisan gulungan kawat pada transformator. Kekuatan dan daya tahan bahan isolasi adalah komponen penting yang harus dipertimbangkan (Haryono & Danang, 2015). Pengujian tegangan *breakdown*, juga dikenal sebagai tegangan tembus, adalah prosedur dimana tegangan meningkat secara bertahap hingga atom-atom terionisasi hingga batas kemampuan isolator untuk menahan tegangan (Simanjuntak, 2019). Oleh karena itu, penting untuk memilih isolasi cair yang menunjukkan dielektrik yang baik yaitu batas saturasi air yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap pirolisis, kelembapan dan oksidasi.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa minyak mineral memiliki kekurangan sukar terdegradasi, tidak ramah lingkungan dan ketersediaannya terbatas dan juga belum dapat memenuhi semua persyaratan yang menunjukkan minyak mineral mempunyai dielektrik yang baik yaitu batas saturasi air yang tinggi, ketahanan yang tinggi terhadap pirolisis, kelembapan dan oksidasi. Di sisi lain, ester dapat memenuhi semua kriteria ini (Azis & Wang, 2011). Ester dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu ester alami dan ester sintetik. Ester sintetik memiliki sifat yang sangat baik, namun bahan ini memiliki kemampuan terurai secara hayati yang lebih rendah dibandingkan ester alami. Selain itu, biayanya yang tinggi membatasi penggunaannya dalam kasus-kasus tertentu, di mana keamanan pengguna adalah tujuan utama yang ingin dicapai (Lyutikova et al., 2022; Oommen, 2002).

Hal yang melatarbelakangi masalah tersebutlah sehingga rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana analisis karakteristik tegangan tembus dan kekuatan dielektrik dari minyak jarak?
2. Bagaimana analisis karakteristik tegangan tembus dan kekuatan dielektrik dari minyak shell diala B?
3. Bagaimana analisis karakteristik tegangan tembus dan kekuatan dielektrik dari campuran kedua minyak tersebut?

Beberapa penelitian pengujian tegangan tembus yang dilakukan antara lain :

Rahayu et al. (2019) dalam penelitiannya menganalisis karakteristik minyak pada transformator yang diperiksa secara rutin pada Gardu Induk dengan menggunakan ketentuan nilai tegangan tembus berdasarkan SPLN 50-1982 dan IEC No. 56 tahun 1991 yaitu sebesar lebih dari 30 kV per 2,5 mm. Dari hasil

pengujian menunjukkan bahwa rata-rata nilai tegangan tembus minyak pada trafo 2 sebesar 23,7 kV/2,5 mm dan nilai-nilai rata-rata tegangan tembus minyak pada trafo 3 sebesar 32,7 kV/2,5 mm. Sebagai hasilnya dapat dianalisa bahwa untuk nilai tegangan tembus minyak pada trafo 2 di bawah 30 kV/2,5 mm yang menunjukkan bahwa minyak trafo sudah harus dilakukan pemeliharaan lebih lanjut. Sedangkan tegangan tembus untuk minyak pada trafo 3, lebih tinggi dari standar 30 kV/2,5 mm yang menunjukkan bahwa minyak tersebut masih dapat digunakan.

Samsurizal et al. (2022) menyebutkan minyak jarak memiliki manfaat. Minyak nabati biasanya memiliki sifat lubrisitas yang tinggi, stabilitas oksidasi yang rendah dan viskositas yang tinggi. Hasil pengujian awal menunjukkan bahwa minyak jarak memiliki nilai tegangan tembus sebesar 68,73 kV, sesuai dengan standar SPLN 49-1 1982 yang menyatakan bahwa nilai tegangan tembus yang harus terpenuhi oleh minyak sebagai bahan isolasi transformator harus lebih dari 30 kV. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa minyak jarak dapat digunakan sebagai pengganti minyak yang biasa digunakan untuk transformator. Hal ini disebabkan karena minyak jarak memiliki tegangan tembus sesuai standar yang sudah ditetapkan oleh PLN.

Amali et al. (2022) menguji kegunaan minyak jarak sebagai bahan isolasi cair. Pada penelitian ini disimpulkan jika untuk minyak jarak yang sudah melalui pengujian memenuhi standar SPLN 49-91:1982 dalam standarisasi tegangan tembusnya.

Dari beberapa penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini dilakukan pengujian tegangan tembus antara minyak jarak, minyak shell diala B dan beberapa komposisi campuran minyak jarak dan minyak shell diala B untuk menganalisis karakteristik dari tegangan tembus dan kekuatan dielektriknya.

### Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang mempunyai fungsi untuk mengkonversi tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah atau dari tegangan rendah ke tegangan yang lebih tinggi. Berdasarkan surat edaran direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014, persentase pembebanan transformator yang baik dinyatakan kurang dari 60% (PT PLN (Persero), 2014). Semakin besar beban yang ditanggung transformator, maka rugi-rugi umur transformator juga semakin besar dan semakin kecil beban yang ditanggung transformator maka rugi-rugi umur trafo semakin kecil.

### Minyak Transformator

Minyak transformator yaitu salah satu material isolasi cair di mana berupa cairan dan digunakan sebagai isolasi serta pendingin. Minyak transformator harus mampu menghantarkan panas dengan baik dan minyak transformator harus mempunyai karakteristik untuk dapat

menahan tegangan tembus sebagai bahan isolasi (Rahayu et al., 2019). Alasan isolasi cair digunakan sebagai berikut:

1. Isolasi cair mempunyai nilai kerapatan 1000 kali, jadi mempunyai kekuatan dielektrik yang lebih baik berdasarkan hukum Paschen.
2. Dapat mengisi rongga di mana dapat mengisolasi bersama-sama melalui perubahan tanpa adanya panas yang timbul.
3. Cenderung dapat memperbaiki diri sendiri saat mengalami pelepasan muatan. Tetapi, kekurangannya yaitu mudah terkontaminasi.

Adapun faktor yang dapat memengaruhi kegagalan isolasi cair yaitu seperti luas dari elektroda, jarak celah, pendinginan dan juga pemeliharaan pada saat sebelum digunakan.

Sirkulasi minyak isolasi dengan pendinginan dilakukan melalui dua metode yaitu:

1. Metode ONAN (*Oil Natural Air Natural*), yang pada metode tersebut minyak dapat bersirkulasi dengan sendiri dibantu oleh udara yang ada di sekitar. Inti pada suatu transformator dan pada kumparannya akan dapat terendam oleh minyak isolasi transformator. Lalu, panas yang berada pada inti dan kumparan transformator tersebut dapat membuat suhu pada minyak nya meningkat dan bersirkulasi.
2. Metode ONAF (*Oil Natural Air Forced*), yang pada metode tersebut minyaknya dapat bersirkulasi dengan bantuan *fan*. Pada saat suhu suatu transformator meningkat lebih dari 95°C, pada *fan* tersebut akan berputar dan mendinginkan minyak isolasi transformator tersebut.

Suatu minyak isolasi dikatakan baik bila memenuhi standar layak guna sesuai dengan standar SPLN 49-1: 1982 seperti yang terlihat di Tabel 1 berikut ini.

**Tabel 1.** SPLN 49-1: 1982, minyak transformator baru memiliki standar layak pakai sesuai standar (PT PLN, 1982)

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Kelas 1	Kelas 2
1.	Kejernihan	-	Jernih	Jernih
2.	Massa jenis (20°C)	g/cm <sup>3</sup>	≤0,895	≤0,895
3.	Viskositas kinematik	cSt		
	a. 20°C		≤40	≤25
	b. -150°C		≤800	-
	c. -300°C		-	≤1.800
4.	Titik nyala ( <i>flash point</i> )	°C	≥140	≤130
5.	Titik tuang ( <i>pour point</i> )	°C	≤-30	≤-40

6.	Angka kenetralan	MgKOH/g	<0,03	<0,03
7.	Korosi belerang	-	Tidak korosif	Tidak korosif
8.	Tegangan tembus	kV/2,5 mm		
	a. Sebelum diolah		≥30	≥30
	b. Sesudah diolah		≥50	≥50
9.	Faktor kebocoran dielektrik	-	≤0,05	≤0,05
10.	Ketahanan oksidasi	mgKOH/g%		
	a. Angka kenetralan		≤0,40	≤0,40
	b. Kotoran		≤0,10	≤0,10

Seperti terlihat pada Tabel 1 di atas, terdapat beberapa parameter untuk menyatakan suatu minyak isolasi dikatakan baik bila memenuhi standar layak pakai sesuai dengan standar SPLN 49-1: 1982. Dalam penelitian ini, ruang lingkup masalah dibatasi hanya pada menganalisis tegangan tembus dan kekuatan dielektriknya.

### Isolasi Cair

Isolasi cair ini bahan yang dapat memisahkan dua buah penghantar menggunakan media zat cair. Isolasi ini untuk mengisolasi alat listrik, contohnya transformator. Transformator memerlukan isolasi cair sebagai bahan isolasi dan juga pendingin. Sebab, pendinginan pada transformator berfungsi agar dapat mengurangi panas dan menjaga suhu pada transformator agar dapat tetap berada pada suhu normal.

Minyak isolasi dibedakan menjadi dua jenis, menurut pembuatannya yaitu minyak isolasi yang terbuat dari fosil atau minyak bumi dan minyak transformator yang berasal dari tumbuh-tumbuhan. Minyak yang terbuat dari fosil disebut dengan minyak mineral dan jika asalnya dari tumbuh-tumbuhan disebut minyak nabati. Namun minyak transformator sebagian besar masih menggunakan minyak mineral, sedangkan untuk minyak nabati ini masih banyak diteliti untuk menjadi pengganti alternatif.

#### 1. Minyak Mineral

Minyak mineral adalah minyak isolasi di mana berasal dari minyak bumi yang diproses secara penyulingan sebagai bahan dasarnya. Harus melalui tahap proses lebih lanjut supaya didapat nilai tahanan isolasi yang tinggi, panas dengan stabilitas yang baik dan juga karakteristik stabilitas panas yang stabil serta memenuhi persyaratan teknisnya. Minyak ini sering digunakan untuk minyak pada transformator sebagai isolasi dan pendingin. Namun, minyak mineral ini banyak

kekurangan, seperti terjadinya korosi sulfidasi dan pencemaran lingkungan. Minyak mineral juga dapat habis dalam jangka waktu tertentu dan susah untuk didegradasi. Pada riset ini menggunakan minyak mineral yaitu minyak shell diala B, yang di mana minyak shell diala B merupakan minyak mineral cahaya tanpa hambatan khusus yang disertakan untuk aplikasi kelistrikan. Minyak ini memiliki sifat di kelistrikan yang baik, dapat dengan mudah memberikan perpindahan panas yang efisien. Sebagai pendingin, minyak ini dapat menghilangkan panas yang dihasilkan oleh transformator pada beban listrik.

#### 2. Minyak Nabati

Minyak nabati adalah minyak yang berasal dari tumbuhan. Minyak nabati ini memiliki viskositas yang tinggi dan juga merupakan sumber bahan baku yang luas, terbarukan dan dapat terurai secara hayati. Namun, sebagian besar minyak transformator masih menggunakan minyak mineral yang berasal dari minyak bumi, sedangkan untuk minyak nabati ini masih terus diteliti untuk menjadi alternatif pengganti. Pada penelitian ini menggunakan minyak nabati yaitu jenis minyak jarak yang bagus untuk digunakan sebagai bahan dielektrik dikarenakan memiliki karakteristik resistansi dan konstanta dielektrik yang tinggi, tidak beracun, *flash point* tinggi, titik lebur antara -10°C hingga dengan -18°C (Ansori, 2022).

### Karakteristik Minyak Jarak

Karakteristik minyak jarak dapat dimanfaatkan sebagai alternatif dari minyak isolasi cair pada transformator dapat dikatakan dengan pengujian parameter yang telah diuji seperti pengukuran kadar air pada Tabel 2, massa jenis pada Tabel 3, viskositas pada Tabel 4 dan tegangan tembus pada Tabel 5 di bawah ini.

#### a. Kadar Air

**Tabel 2.** Nilai kadar air minyak jarak dan minyak transformator (Amali et al., 2022)

Jenis	Parameter Uji	Nilai	IEC
			60296:2003
Minyak jarak	Kadar air	2,38 mg/kg	≤30 mg/kg
Minyak transformator	Kadar air	42,2 mg/kg	≤30 mg/kg

Tabel 2 menunjukkan bahwa minyak jarak atau minyak nabati memiliki kadar air yang jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan minyak transformator, sehingga dapat dikatakan minyak jarak memenuhi standar spesifikasi untuk dijadikan minyak isolasi cair transformator.

b. Massa Jenis

**Tabel 3.** Nilai massa jenis minyak jarak dan minyak transformator (Amali et al., 2022)

Jenis	Parameter Uji	Nilai	SPLN 49-91:1982
Minyak jarak	Massa jenis	0,911 gr/cm <sup>3</sup>	≤0,859 gr/cm <sup>3</sup>
Minyak transformator	Massa jenis	0,7886 gr/cm <sup>3</sup>	≤0,859 gr/cm <sup>3</sup>

Tabel 3 menunjukkan perbandingan massa jenis minyak jarak dan minyak transformator dan dapat dilihat bahwa minyak jarak belum memenuhi sebagai isolasi cair karena massa jenis minyak jarak lebih tinggi dibandingkan dengan minyak transformator dan melebihi nilai standar spesifikasi.

c. Viskositas

**Tabel 4.** Nilai viskositas minyak jarak dan minyak transformator (Amali et al., 2022)

Jenis	Parameter Uji	Nilai	SPLN 49-91:1982
Minyak jarak	Viskositas	48,70 cSt	<40 cSt
Minyak transformator	Viskositas	51,02 cSt	<40 cSt

Pada Tabel 4 diketahui bahwa minyak jarak atau minyak nabati memiliki nilai viskositas atau kekentalan yang lebih kecil dibandingkan dengan minyak transformator dan baik keduanya antara minyak jarak maupun minyak transformator melebihi nilai standar spesifikasi sebagai alternatif minyak transformator dimana dari standar SPLN 49-91: 1982 untuk nilai viskositas harus kurang dari 40 cSt.

d. Tegangan tembus

**Tabel 5.** Nilai tegangan tembus minyak jarak dan minyak transformator (Amali et al., 2022)

Jenis	Parameter Uji	Nilai	SPLN 49-91:1982
Minyak jarak	Tegangan tembus	34,47 kV	≥30 kV
Minyak transformator	Tegangan tembus	25,57 kV	≥30 kV

Tabel 5 menunjukkan perbandingan untuk nilai tegangan tembus antara minyak jarak dan minyak transformator, di mana minyak jarak memiliki nilai tegangan tembus yang lebih besar dibandingkan dengan nilai tegangan tembus dari minyak transformator. Sehingga dapat dilihat bahwa minyak jarak dapat dijadikan alternatif isolasi cair transformator.

Tujuan dilakukan penelitian ini yaitu untuk menganalisis karakteristik tegangan tembus dan juga kekuatan dielektrik antara minyak jarak (sebagai minyak

ester atau nabati) dan minyak mineral atau minyak *shell* diala B sebagai isolasi cair minyak transformator dengan melakukan pengujian di Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi (TP2T) IT PLN Jakarta berdasarkan SPLN'49-1982 dan IEC No. 56 tahun 1991.

**METODE PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi dan Peralatan Tegangan Tinggi (TP2T) Institut Teknologi PLN Jakarta. Pada penelitian ini dilakukan dalam 4 (empat) tahapan di mana tahap pertama adalah studi literatur, kemudian tahap kedua adalah pengumpulan data, kemudian tahap ketiga adalah analisis data dan tahapan terakhir adalah pembuatan laporan.

a. Studi Literatur

Pada bagian studi literatur ini, mencari landasan teori dari beberapa literatur seperti buku, jurnal dan sumber lainnya untuk melengkapi perbendaharaan konsep dan teori serta memberikan landasan ilmiah yang tepat.

b. Pengumpulan Data

Dalam tahap pengumpulan data, dilakukan dengan melakukan pengujian tegangan tembus dengan menggunakan alat pengujian BAUR *Oil Tester* DPA yang digunakan untuk mengukur tegangan tembus isolasi cair (minyak) dengan menggunakan standar IEC 60-156:2018. Jenis elektroda yang digunakan adalah elektroda setengah bola sebagai elektroda uji dengan jarak elektroda sebesar 2,5 mm. Minyak yang akan diujikan terdiri dari minyak jarak, minyak *shell* diala B dan campuran minyak jarak dan minyak *shell* diala B dengan beberapa komposisi campuran antara minyak jarak dan minyak *shell* diala B. Pengujian ini dilakukan sebanyak 5 kali pengujian untuk mendapatkan hasil rata-rata tegangan tembus. Gambar 1 di bawah ini merupakan alat pengujian BAUR *Oil Tester* DPA yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 1.** Alat uji BAUR *Oil Tester* DPA

Pada pengujian tegangan tembus (*breakdown test*) ini merupakan pengujian yang dilakukan dengan memberikan tegangan yang tinggi hingga terjadi tegangan tembus atau kegagalan isolasi.

### c. Analisis Data

Setelah pengujian tegangan tembus selesai dan mendapatkan data, kemudian data tersebut dianalisis dengan melakukan mengelola dari sampel-sampel minyak tersebut, dengan pengujian minyak selama 6 kali dan dicari nilai rata-rata dari tegangan tembus pada pengujian minyak tersebut, dengan membandingkan dengan syarat isolasi minyak baru SPLN 49-1:1982. Setelah itu mencari kekuatan dielektriknya, kekuatan dielektrik ini adalah kekuatan bahan atau material isolasi untuk mempertahankan tegangan tinggi.

### Tegangan Tembus

Tegangan tembus atau *breakdown voltage* yaitu kejadian ketika medan magnet terus menerus dinaikkan sampai isolator dapat menahan tegangan sesuai dengan batas kemampuannya, kemudian isolator yang semula isolator menjadi konduktor. Pengujian pada tegangan tembus ini diperlukan karena untuk mengetahui besarnya tegangan tembus pada minyak transformator. Minyak transformator, menurut standar pengujian PLN (SPLN) 49-1/1982 minimal memiliki tegangan tembus 30 kV/ 2,5 mm. Alat yang digunakan untuk mengukur tegangan tembus ini yaitu *Oil Tester* DPA dengan menggunakan dua elektroda yang berbentuk setengah bola yang berjarak 2,5 mm dalam bejana yang terendam minyak isolasi. Ketika pada saat pengujian hasil tegangan tembus itu rendah maka minyak isolasi tidak sesuai standar atau juga minyak isolasi tersebut terkontaminasi oleh kotoran dan lainnya.

Tegangan tembus pada minyak isolasi dapat dipengaruhi dengan beberapa faktor sebagai berikut:

- Temperatur
- Kontaminan
- Kekuatan dielektrik

### Kekuatan Dielektrik

Kekuatan dielektrik merupakan suatu nilai kemampuan dari suatu bahan dielektrik dalam menahan tegangan tinggi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan dielektrik (Saprianto, 2017). Kekuatan dielektrik suatu cairan bergantung pada sifat molekul atau pun sifat atom cairan sendirinya, bahan dari elektrodanya, suhunya dan jenis tegangan pada saat diberikan ataupun sebagainya. Hukum Paschen mengatakan bahwa kekuatan dielektrik cair kisarannya antara 107 V/cm.

Kemampuan suatu bahan atau material untuk menahan tegangan tembus tiap perketebalan isolasi disebut kekuatan dielektrik. Kegagalan pada minyak isolasi yang dalam melakukan fungsi sebagai bahan atau material dielektrik merupakan *breakdown* atau yang disebut tegangan tembus. Kebocoran dielektrik dapat terjadi ketika transformator berjalan atau beroperasi, maka dayanya akan hilang sebab kehilangan energi panas, pada saat kehilangan energi panas maka ada molekul yang terpisah-pisah yaitu adanya kontaminan

maupun oksidasi bisa dikatakan sebagai faktor kebocoran dielektrik yang disebabkan adanya kotoran.

Isolasi cair baru memiliki kekuatan dielektrik menurut SPLN 49-1:1982 yaitu 120 kV/cm. Dengan persamaan rumus untuk kekuatan dielektrik sebagai berikut.

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

di mana  $E$  adalah kekuatan dielektrik (kV/cm),  $V_s$  adalah tegangan standar (kV) dan  $d$  adalah jarak elektroda (cm).

Kegagalan dielektrik, tegangan dielektrik adalah suatu tekanan atau tarikan yang harus ditahan oleh gaya yang diberikan pada suatu isolator (Sayogi, 2011). Pada struktur molekul bahan dielektrik, muatan negatif terikat pada molekul, kemudian ketika tegangan diberikan, elektron yang masih terikat menciptakan hambatan. Ketika ikatan itu akhirnya putus pada titik tersebut, maka seluruh struktur menjadi elektron bebas dan sifat isolasi menjadi hilang.

Penyebab terjadinya kegagalan dielektrik diakibatkan oleh partikel padat, uap air dan gelembung udara.

- Partikel Padat

Partikel padat ini juga dapat terbentuk bila pemanasan (*thermal stress*) atau tegangan terlalu tinggi.

- Uap Air (*Moisture*)

Ketika uap dan air berada dalam medan listrik, molekul uap air terlarut terpisah dari minyak dan membentuk dipole (polarisasi). Ketika terdapat banyak molekul uap air, kemudian akan membentuk sejenis penyambung yang menghubungkan antar elektroda, membentuk kanal peluahan.

- Gelembung Gas

Kegagalan gelembung adalah jenis kegagalan dielektrik cair dimana penyebabnya adalah gelembung gas.

### Analisa Regresi Linier Sederhana

Analisis regresi digunakan terutama untuk tujuan peramalan, di mana ada sebuah variabel dependen (terikat) dan sebuah variabel bebas. Analisis regresi juga mencakup pembuatan persamaan estimasi, juga dikenal sebagai persamaan regresi (Hajarisman, 2023; Weisberg, 2005).

Persamaan regresi linier sederhana secara matematik dapat dituliskan seperti pada persamaan (2):

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

### d. Pembuatan Laporan

Setelah semua data didapat, kemudian dilakukan analisa dan pembahasan dan tahap terakhir adalah pembuatan laporan hasil penelitian.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

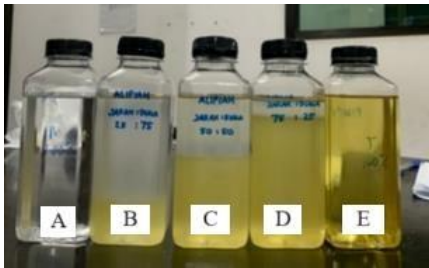
Sampel uji yang digunakan pada penelitian ini antara lain minyak jarak dan juga minyak *shell* diala B

dengan komposisi sampel yang berbeda. Dengan perbandingan komposisi minyak jarak: minyak *shell* diala B antara lain dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Sampel minyak komposisi minyak jarak dan minyak *shell* diala B

Sampel Minyak	Minyak Jarak		Minyak <i>Shell</i> diala B	
	%	ml	%	ml
A	100	450	0	0
B	75	337,5	25	112,5
C	50	225	50	225
D	25	112,5	75	337,5
E	0	0	100	450

Gambar 2 menunjukkan 5 sampel uji yang digunakan dalam penelitian ini dengan komposisi campuran antara minyak jarak dan minyak *shell* diala B.



**Gambar 2.** Sampel minyak

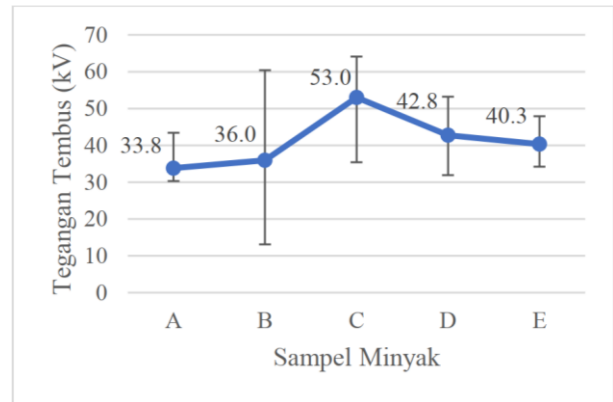
**Tegangan Tembus**

Pengujian tegangan tembus dilakukan sebanyak 6 (enam) kali pengujian, di mana hasil yang didapat kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Berdasarkan hasil data pengujian tegangan tembus yang didapat pada minyak jarak, minyak *shell* diala B dan pencampuran kedua minyak dilakukan pengujian pada setiap komposisi yang mana hasil pengujian tersebut dibandingkan dengan standar SPLN 49-1:1982. Pada Tabel 7 menunjukkan rata-rata nilai tegangan tembus pada berbagai komposisi sampel minyak.

**Tabel 7.** Hasil pengujian rata-rata nilai tegangan tembus minyak pada berbagai komposisi

Sampel Minyak	Minyak Jarak (%)	Minyak <i>Shell</i> Diala B (%)	Tegangan Tembus Rata-rata (kV)
A	100	0	33,8
B	75	25	36
C	50	50	53
D	25	75	42,8
E	0	100	40,3

Gambar 3 menunjukkan grafik rata-rata pengujian pencampuran minyak dengan berbagai komposisi.



**Gambar 3.** Grafik rata-rata pengujian tegangan tembus pencampuran minyak dengan berbagai komposisi

Untuk semua sampel minyak yang sudah diujikan, baik dari minyak jarak, minyak *shell* diala B dan dari pencampuran kedua minyak antara minyak jarak dan minyak mineral sesuai dengan standar SPLN 49-1:1982 yaitu melebihi 30 kV. Dari hasil pengujian tegangan tembus, diketahui bahwa dengan mencampur minyak jarak dan minyak *shell* diala B dapat menaikkan tegangan tembus dari masing-masing minyak hingga 53 kV pada variasi campuran 50% minyak jarak dan 50% minyak *shell* diala B. Hal ini dikarenakan pada pengujian variasi komposisi 50%:50% ini komposisinya sebanding dan karakteristik pada minyak jarak sendiri mempunyai karakteristik hambatan yang cukup tinggi, konstanta dielektrik yang tinggi sehingga dapat dijadikan untuk isolasi pada transformator dan untuk minyak *shell* diala B mempunyai sifat kelistrikan yang baik dan dapat dengan mudah melakukan perpindahan panas yang efisien, maka dari itu minyak *shell* diala B ini yang umum digunakan untuk isolasi pada transformator (Mariyam, 2023).

Selain itu, minyak jarak dan minyak *shell* diala B memiliki viskositas yang tidak terlalu besar, di mana semakin rendah viskositas minyak, maka nilai tegangan tembusnya akan semakin besar. Minyak dengan viskositas rendah lebih sulit tercemar oleh impuritas yang dapat membentuk jembatan konduktif pada minyak. Jadi, campuran minyak dengan viskositas rendah akan memiliki tegangan tembus yang lebih tinggi (Wibowo et al., 2018).

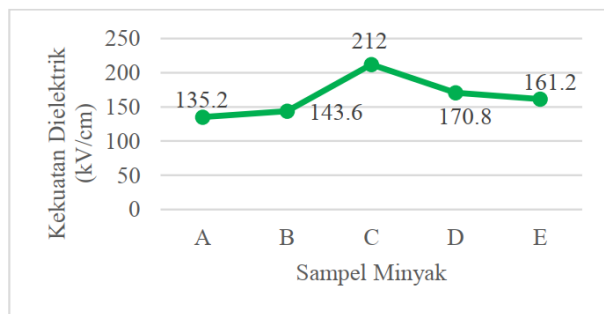
**Kekuatan dielektrik**

Berdasarkan dari data pengujian tegangan tembus dari komposisi campuran antara minyak jarak dan *shell* diala B dapat dilakukan perhitungan kekuatan dielektriknya dengan menggunakan persamaan (1) dengan dielektrik pencampuran minyak dengan berbagai komposisi. Berdasarkan hasil pada Tabel 8 dan grafik pada Gambar 4, didapatkan bahwa kekuatan dielektrik dan tegangan tembus berbanding lurus, yang artinya ketika tegangan tembus naik, maka kekuatan dielektrik

juga akan naik. Kekuatan dielektrik yang paling tinggi berada pada komposisi minyak jarak dan minyak *shell* diala B berada pada 50%:50%. Semakin tinggi nilai kekuatan dielektrik suatu material, semakin besar medan listrik yang dapat ditahan tanpa adanya kegagalan isolasi.

**Tabel 8.** Hasil perhitungan kekuatan dielektrik minyak murni dan pencampuran antara minyak jarak dan minyak *shell* diala B

No.	Komposisi		Tegangan Tembus Rata-rata (kV)	Kekuatan Dielektrik Rata-rata (kV/cm)
	Minyak Jarak (%)	Minyak <i>Shell</i> Diala B (%)		
A	100	0	33,8	135,2
B	75	25	35,9	143,6
C	50	50	53,0	212
D	25	75	42,7	170,8
E	0	100	40,3	161,2

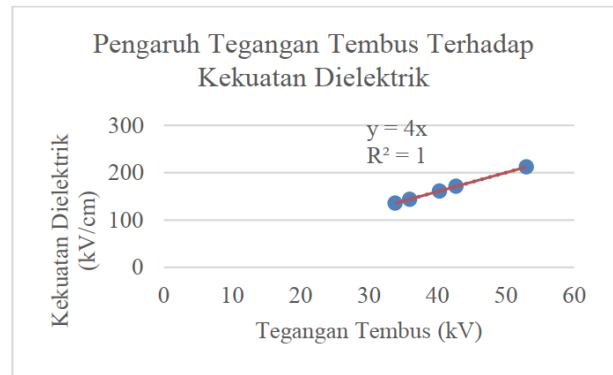


**Gambar 4.** Grafik rata-rata kekuatan dielektrik minyak murni dan pencampuran antara minyak jarak dan minyak *shell* diala B

Bahan atau material dengan kekuatan dielektrik yang tinggi dapat dikatakan bahan atau materialnya sangat baik. Pada tabel tersebut, semakin besar tegangan tembus maka semakin tinggi kekuatan dielektriknya. Jadi, semakin tinggi kekuatan dielektrik suatu material, semakin besar tegangan tembus yang dapat ditahannya dengan ketebalan tertentu. sebaliknya saat semakin besar ketebalan material dielektrik, semakin tinggi tegangan tembus yang dapat ditahannya dengan kekuatan dielektrik tertentu (Mariyam, 2023).

**Analisa Regresi Linier Sederhana Tegangan Tembus Terhadap Kekuatan Dielektrik**

Adapun hubungan antara tegangan tembus sebagai variabel bebas (X) dan kekuatan dielektrik sebagai variabel terikat (Y) dari hasil analisis sebelumnya, dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini.



**Gambar 5.** Grafik pengaruh tegangan tembus terhadap kekuatan dielektrik sampel minyak

Dari Gambar 5 didapatkan bahwa semakin besar tegangan tembus, maka semakin besar pula kekuatan dielektrik yang didapat. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan tegangan tembus dan kekuatan dielektrik berbanding lurus. Adapun persamaan regresi yang diperoleh antara tegangan tembus dan kekuatan dielektrik adalah  $y = 4x$ , di mana gradien sebesar 4 artinya adalah bahwa penambahan tegangan tembus sebesar 10 kV akan menyebabkan kekuatan dielektrik bertambah sebesar 40 kV/cm. Nilai korelasi antara tegangan tembus dan kekuatan dielektrik sebesar  $R^2 = 1$  di mana nilai korelasi 1 berarti antara tegangan tembus dan kekuatan dielektrik memiliki hubungan yang sangat kuat dan berbanding lurus.

**KESIMPULAN**

Minyak jarak memiliki karakteristik tegangan tembus lebih dari 30 kV dan kekuatan dielektrik lebih dari 120 kV/cm sesuai SPLN 49-1:1982 yaitu sebesar 33,8 kV untuk tegangan tembus dan 135,2 kV/cm untuk kekuatan dielektrik. Minyak *shell* diala B memiliki karakteristik tegangan tembus lebih dari 30 kV dan kekuatan dielektrik lebih dari 120 kV/cm sesuai SPLN 49-1 : 1982 yaitu sebesar 40,3 kV untuk tegangan tembus dan 161,2 kV/cm untuk kekuatan dielektrik. Pencampuran komposisi antara minyak jarak dan minyak *shell* diala B didapatkan karakteristik pencampuran komposisi terbaik dari kelima sampel tersebut yaitu pada komposisi 50%:50% dimana tegangan tembus mencapai 53,0 kV dan kekuatan dielektrik mencapai 212 kV/cm. Untuk mengetahui parameter lain sebagai syarat karakteristik isolasi cair untuk transformator, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Kami sampaikan ucapan terima kasih kepada Fakultas Ketengalistrikan dan Energi Terbarukan Institut Teknologi PLN Jakarta yang telah mendukung dan memfasilitasi riset ini.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Amali, L. M. K., Alim, M. & Gunawan, A. 2022. Uji Kelayakan Minyak Jarak Sebagai Bahan Isolasi Cair Pada Transformator Feasibility Test of Castor Oil As Liquid Insulation Material on Transformers. *Media Elektrik*, 19(3), 139–143.
- Azis, N., & Wang, Z. D. 2011. Acid generation study of natural ester. *International Symposium on High Voltage Engineering*, August 2011, 1–6.
- Diantari, R. A., & Fitri, V. A. 2022. Analysis of the Effect of Loading on Age Loss and Efficiency on Dry Type Transformer at PT MRT Jakarta. *ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy*, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/ICPERE56870.2022.10037469>.
- Fernandez-Diego, C., Ortiz, A., Fernandez, I., Carrascal, I., Renedo, C. J., & Delgado, F. 2018. Assessment of the effect of commercial vegetal oils on Kraft paper ageing through mechanical characterization. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(5), 1880–1887. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007231>.
- Hajarisman, N. B. 2023. *Buku Ajar Analisis Regresi dan Aplikasinya menggunakan SPSS Program Studi Statistika, FMIPA*. March. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14988.80008>.
- Irwanto, I., & Prabustya, R. D. 2020. Analisis Transformator Daya Berdasarkan Pengujian Minyak Trafo Pada Ring Main Unit (Rmu) Psk 151 Di Pt. Pln (Persero) Up3 Cikupa. *Jurnal INSTEK (Informatika Sains Dan Teknologi)*, 5(2), 168. <https://doi.org/10.24252/instek.v5i2.16200>
- Lyutikova, M. N., Korobeynikov, S. M., Rao, U. M., & Fofana, I. 2022. Mixed Insulating Liquids with Mineral Oil for High-Voltage Transformer Applications: A Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 29(2), 454–461. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3157908>.
- Mariyam, A. N. 2023. *Analisis pengaruh campuran minyak jarak dan shell diala b terhadap tegangan tembus sebagai alternatif isolasi cair pada transformator*.
- Moukengué Imano, A. (2003). The influence of the dielectric strength of the N2/SF 6-insulation by conducting particle on the spacer surface. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(3), 483–490. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1207476>.
- Oommen, T. V. 2002. Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(1), 6–11. <https://doi.org/10.1109/57.981322>
- PT PLN (Persero). 2014. *Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset*. Edaran Direksi PT PLN (Persero), 1–11.
- PT PLN. 1982. *SPLN 491-2:19EtP*.
- Rahayu, S., Okvasari, R., & Diantari, R. A. 2019. Pengujian Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator 60 MVA Di GIS Kebun Jeruk. *Sutet*, 9(1), 46–55. <https://doi.org/10.33322/sutet.v9i1.495>
- Samsurizal, Makkulau, A., Afrianda, R., & Deby, P. 2022. Pengujian Tegangan Tembus Minyak Jarak Sebagai Alternatif Isolasi Transformator. *SENTER : Seminar Nasional Teknik Elektro*, 07(November), 1–8.
- Simanjuntak, M. I. 2019. *Pengaruh Lama Perendaman Kertas Trafo (Pressboard) Pada Minyak Mineral, Minyak Nabati, Dan Minyak Sintetis Terhadap Karakteristik Elektris Kertas*. <https://repository.its.ac.id/60711/>.
- T. Haryono, & Danang, W. 2015. *Pengaruh Perendaman Berbagai Macam Jenis Kertas didalam Minyak Trafo Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Pada Suhu 30 derajat C, 40 derajat C, dan 50 derajat C*. Universitas Gadjah Mada.
- Weisberg, S. 2005. *Applied Linear Regression*. In *Wiley-Interscience* (Vol. 29, Issue 3rd). <https://doi.org/10.1080/00401706.1987.10488195>
- Wibowo, W. K., Nugroho, H., Pertiwi, N. I., & Irawan, A. 2018. Analisis Efek Viskositas Terhadap Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Jurnal Teknologi*, 1(1), 16-21.