

ID: 01

Pengujian Tegangan Tembus Minyak Jarak Sebagai Alternatif Isolasi Transformator

Castor Oil's Translucent Voltage Testing as a Transformer Insulation Alternative

Samsurizal¹, Andi Makkulau², Rio Afrianda³, Putu Deby⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Jalan Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta. 11750

samsurizal@itpln.ac.id^{1*}, andi.mk@itpln.ac.id^{2*}, rio@itpln.ac.id^{3*},

deby1811238@itpln.ac.id^{4*}

Abstrak – Minyak merupakan sumber energi yang paling lama digunakan penduduk Indonesia. Minyak bumi adalah sumber energi yang berasal dari bahan organik organisme hidup yang telah terkubur selama jutaan tahun, berubah menjadi batuan sedimen, terakumulasi dan matang dalam cairan hidrokarbon, dipindahkan dan terperangkap dalam sistem perminyakan. Penggunaan minyak bumi sebagai isolator untuk peralatan listrik semakin meningkat setiap tahunnya dikarenakan fungsinya menahan tegangan tembus pada peralatan listrik seperti transformator, minyak mineral ini dapat menahan tegangan tembus > 30 kV / 2,5 mm sesuai standar yang ditetapkan oleh PLN. Berdasarkan data yang diperoleh Kementerian ESDM RI, Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), mengumumkan cadangan minyak bumi Indonesia akan mencapai 9,5 tahun dan cadangan gas bumi Indonesia akan mencapai 19,9 tahun. Berdasarkan data tersebut dan besarnya kebutuhan padaperalatan listrik, pada penelitian ini akan menguji minyak nabati jenis minyak jarak untuk dapat mengurangi atau menggantikan fungsi guna dari minyak mineral yang semakin tahun semakin menipis. Metode yang digunakan penelitian yang dilakukan ialah pengujian langsung menggunakan minyak nabati yaitu jenis minyak jarak sebagai bahan isolasi cair pada transformator terhadap tegangan tembus. Dalam pengujian yang telah dilakukan terhadap minyak jarak didapatkan hasil nilai tegangantembus sebesar 68,73 kV, hal tersebut sesuai standar SPLN 49-1 1982 dimana nilai tegangan tembus yang harus dipenuhi oleh minyak sebagai bahan isolasi untuk transformator sebesar >30 kV. Sehingga dapat dikatakan berdasarkan hasil pengujian awal yang dilakukan memungkinkan minyak jarak dijadikan sebagai pengganti alternatif minyak transformator yang biasa digunakan, dikarenakan memiliki tegangan tembus sesuai standar yang ditetapkan PLN.

Kata Kunci: Minyak jarak, Tegangan tembus, Isolasi, Transformator

Abstract – Oil is the most widely used energy source for Indonesians. Petroleum is a source of energy derived from organic matter of living organisms that have been buried for millions of years, turned into sedimentary rock, accumulated, and matured in liquid hydrocarbons, transported, and trapped in the petroleum system. The use of petroleum as an insulator for electrical equipment is increasing every year due to its function to withstand breakdown voltages in electrical equipment such as transformers, this mineral oil can withstand breakdown voltages > 30 kV / 2.5 mm according to the standards set by PLN. Based on data obtained by the Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources, the Minister of Energy and Mineral Resources (ESDM), announced that Indonesia's oil reserves will reach 9.5 years and Indonesia's natural gas reserves will reach 19.9 years. Based on these data and the magnitude of the need for electrical equipment, this study will test castor oil type vegetable oil to be able to reduce or replace the function of mineral oil which is getting thinner every year. The method used in this research is direct testing using vegetable oil, namely the type of castor oil as a liquid insulating material in transformers against breakdown voltages. In the tests that have been carried out on castor oil, the result is that the breakdown voltage value is 68.73 kV, this is in accordance with the SPLN 49-1 1982 standard where the breakdown voltage value that must be met by oil as an insulating material for transformers is >30 kV. So that it can be said that based on the results of the initial tests carried out, it is possible to use castor oil as an alternative to

SENTER 2022, 17 November 2022, pp. 01-08

ISSN (p): 2985-4903

ISSN (e): 2986-2477

transformer oil that is commonly used, because it has abreakdown voltage according to the standards set by PLN.

Keywords: *Castor oil's, Breakdown voltage, Insulating liquid, Transformer*

1. Pendahuluan

Pada transformator penggunaan Isolasi minyak merupakan bagian yang penting untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan yang terdapat didalam transformator, sehingga antar penghantar yang bertegangan tersebut tidak terjadi hubung singkat yang dapat menyebabkan lompatan api atau menimbulkan percikan[1]. Tegangan tembus pada isolasi cair disebabkan oleh beberapa hal seperti teori kegagalan zat murni atau elektronik, teori kegagalan bola cair, teori kegagalan gelembung gas dan teori kegagalan tak murnian padat. Menurut standar SPLN 49 - 1 tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk minyak isolasi baru adalah $> 30 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ [2], [3]. Tegangan tembus merupakan tegangan ketika isolator sudah tidak sanggup menghadapi tekanan berupamedan 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. Tegangan tembus pada isolator cair juga dapat dipengaruhi oleh sifat alami tegangan, sistem tegangan, serta durasi waktu tegangan diterapkan. Selain itu besar tegangan tembus bergantung pada kuat dielektrik masing-masing bahan dan kehadiran unsur lain. Untuk jenis minyak yang sering digunakan sebagai isolasi minyak di PLN adalah jenis minyak mineral, minyak mineral adalah minyak yang berbahan dasar dari pengolahan minyak bumi yaitu antara fraksi minyak diesel dan turbin yang mempunyai struktur kimia yang sangat kompleks. Berdasarkan data dari Kementerian ESDM RI, menyatakan bahwa cadangan minyak di indonesia akan habis dalam kurun waktu 9,5 tahun dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan baru kedepannya[4]. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi penggunaan minyak mineral, yang dimana ketersediaannya yang sangat terbatas, tidak terbarukan juga memiliki kelemahan diantaranya tidak terdegradasi sehingga dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi penggunaan minyak mineral adalah dengan mencari alternatif pengganti isolasi cair menggunakan minyak nabati.

Minyak nabati pada umumnya mempunyai viskositas yang tinggi dan memiliki stabilitas oksidasi yang rendah, dan memiliki sifat lubrisitas yang bagus[5],[6]. Oleh karena itu minyak nabati dapat digunakan untuk mengganti dari penggunaan minyak mineral sebagai isolasi dan pendingin. Peneliti ingin menguji sejauh mana minyak nabati jenis minyak jarak dapat digunakan sebagai alternatif pengganti minyak trafo yang sudah ada, dengan melakukan pengujian tegangan tembus dari minyak tersebut. Ketersediaan minyak mineral yang semakin tahun semakin menipis menjadikan dibutuhkan sebuah alternatif sebagai salah satu cara untuk menanggulangi kehabisan ketersediaan minyak mineral dengan syarat memiliki kekuatan dielektrik yang bagus dan sesuai dengan syarat-syarat isolasi minyak transformator[4]. Minyak isolasi mineral adalah minyak isolasi yang bahan dasarnya berasal dari minyak bumi yang diproses dengan cara destilasi. Minyak isolasi hasil destilasi ini harus mengalami beberapa proses lagi agar diperoleh tahanan isolasi yang tinggi, stabilitas panas yang baik, mempunyai karakteristik panas yang stabil, dan memenuhi syarat – syarat teknis yang lain. Minyak isolasi mineral banyak digunakan pada transformator daya, kabel, pemutus daya (CB), dan kapasitor[6],[7]. Minyak isolasi dapat berfungsi sebagai bahan dielektrik, bahan pendingin, dan sebagaipemadam busur api. Beberapa jenis minyak nabati yang dapat digunakan sebagai alternatif untuk pengganti minyak transformator. Minyak nabati adalah minyak yang berasal tumbuhan yang disari/diekstrak terlebih dahulu.

Minyak jarak tergolong kedalam minyak organik atau minyak nabati, minyak jarak merupakan dielektrik yang baik untuk kapasitor tenaga pada tegangan tinggi karena karakteristik resistansi koronanya cukup tinggi, konstanta dielektrik tinggi, tidak beracun, titik nyalanya tinggi,

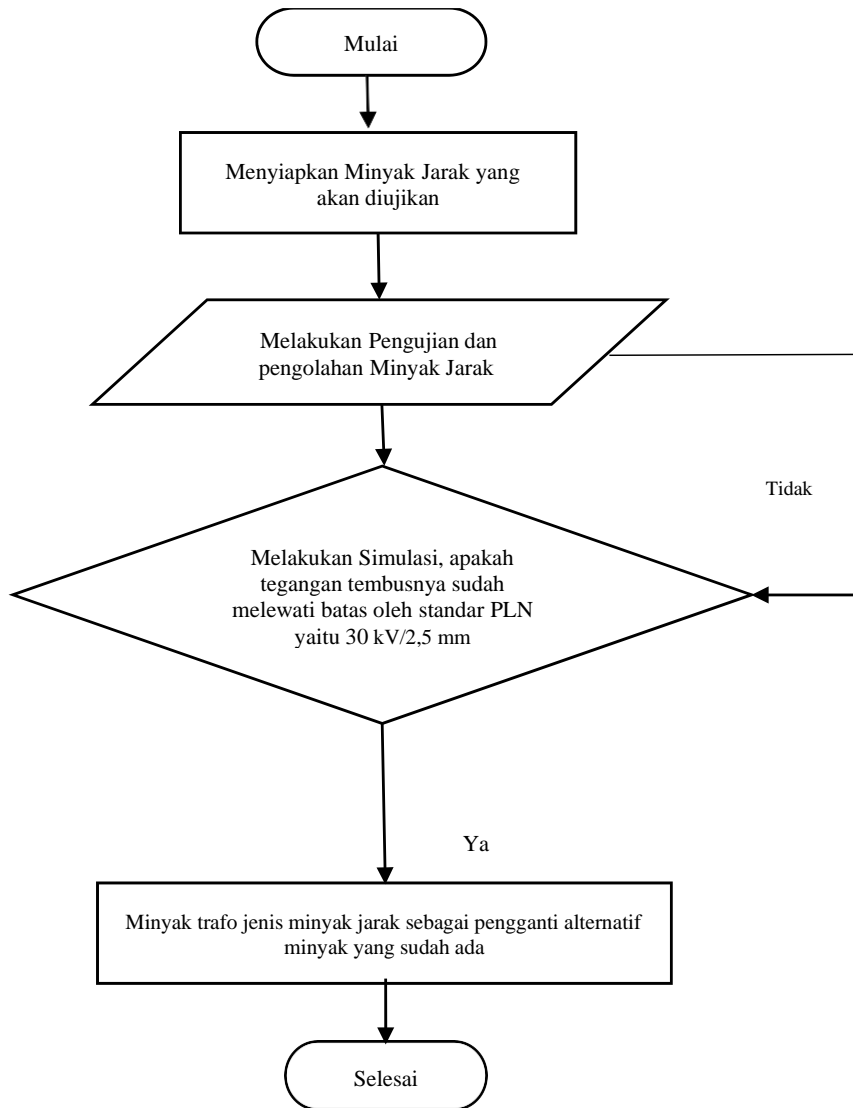
titik lebur pada -10° sampai -18° C, dan tidak terlarut. Warna minyak kuning pucat bahkan hampir transparan (tak berwarna), dan memiliki bau khas yang cukup menyengat. Agar tidak berbau tengik minyak tidak boleh dibiarkan terbuka dalam waktu yang lama pada suhu diatas 40° C. Pembuatan minyak jarak yang digunakan saat ini adalah dengan metode pengepresan. Pertama biji jarak yang sudah tua, di jemur selama 3 hari hingga kulitnya akan pecah dengan sendirinya. Untuk memisahkan bagian biji dengan kulinya digunakan alat pemisah biji, hal ini dilakukan untuk mendapatkan biji utuh yang lebih banyak. Biji yang sudah dipisahkan dari cangkangnya kemudian diberi pemanasan pendahuluan, yaitu berupa pemanasan dengan uap pada suhu 170° C selama 30 menit, pemanasan dengan oven pada suhu 105° C selama 30 menit serta pemanasan dengan penggongsengan biji sehingga biji cukup panas untuk dilakukan pengepresan. Pengepresan dilakukan dengan alat pengepres hidraulik. Daging biji yang telah dipanaskan, dimasukkan ke dalam kain saring, untuk selanjut dipress dalam alat pengepres hidraulik, untuk menghasilkan minyak jarak. Biji pohon jarak mengandung 40–50% minyak jarak (oleum ricini, kastrol) yang mengandung bermacam-macam trigliserida, asam palmitat ($C_{16}H_{32}O_2$), asam risinoleat, asam isorisinoleat, asam oleat ($C_{18}H_{34}O_2$), asam linoleat ($C_{18}H_{32}O_2$), asam linolenat ($C_{18}H_{30}O_2$), asam stearat ($C_{18}H_{36}O_2$), dan asam dihidroksistearat. Juga mengandung alkaloida risinin, beberapa macam toksalbumin yang dinamakan risin (risin D, risin asam, dan risin basa), dan beberapa macam enzim diantaranya lipase. Castor oil atau sering disebut juga minyak jarak, atau dalam bidang medicine sering disebut minyak kastrol, adalah minyak nabati yang diperoleh dari ekstrak biji tanaman jarak (*Ricinus communis*). Minyak yang memiliki titik didih 313° C dan densitas 961 kg/m^3 merupakan trigliserida yang mengandung kira-kira 90%-nya adalah rantai fatty acid (asam lemak) “ricinoleic acid”. Untuk Minyak jarak berasal dari tanaman jarak yang dimana 75% berasal dari daging buah dan 25% berasal dari kulit buahnya, karakteristik minyak jarak ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Minyak Jarak

Parameter	Nilai
Viskositas	25°C u-v (6.3-8.8 st)
Bobot Jenis	$20/20^{\circ}\text{C}$ 0.957-0.963
Bilangan Asam	0.4-4.0
Bilangan Penyabunan	176-181
Bilangan Tak Tersabun	0.7
Bilangan lod	82-88
Warna (appearance)	Bening
Warna gardner (Max)	Tidak lebih gelap dari 3'
Indeks Bias	1,477-1,478
Kelarutan Dalam Alkohol	(20°C) Jernih
Bilangan Asetil	145-154
Titik Nyala	$230^{\circ}\text{C} - 285^{\circ}\text{C}$
Antoignition Temperature	499°C
Titik Api	322°C
Titik Didih	Dec
Putaran Optik	$200\text{ mm} + 7,5 + 9,0$
Koefisien Muai per C	0,00066
Pour Point	-33°C
Tegangan Permukaan Pada 20 derajat	$C\ 39,9\text{ dyne/cm}$

2. Metode Penelitian

Diagram alir penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Diagram alir

Metodologi yang digunakan adalah metode pengujian langsung dengan menguji tegangan tembus pada minyak jarak selanjutnya hasil yang didapat dibandingkan dengan standar yang berlaku. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi IT PLN DKI Jakarta dengan menggunakan peralatan pengujian seperti ditunjukkan gambar 2. Tahapan pengujian sebagai berikut:

1. Hubungkan Oil Tester dengan kabel Power Supply dan kabel pembumiannya.
2. Nyalakan Oil Tester.
3. Pilihlah standar elektroda yang akan digunakan.
4. Atur jarak antar elektroda sesuai dengan permintaan pada data pengamatan.
5. Masukkan isolasi cair yang akan diujikan.
6. Aduk isolator zat cair dalam bejana secara perlahan, untuk menghilangkan gelembung udarasewaktu pengisian kemudian tutup kembali wadahnya.
7. Lakukan pengukuran tegangan breakdown.

8. Save atau print hasil pengujian.
9. Keluarkan isolasi cair yang sudah diisi kemudian bersihkan wadahnya.
10. Ulangi untuk beberapa Oil Tester lainnya.
11. Matikan alat percobaan.



Gambar 2. Alat pengujian

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian yang dilakukan pada isolasi cair yaitu minyak jarak dengan melakukan 6 kali percobaan. Minyak jarak merupakan jenis minyak lemak yang didapat dengan pemerasan dingin biji *Ricinus communis, L* yang telah dikupas. Di era modern ini minyak jarak (*Oleu ricini*) banyak dimanfaatkan untuk industri otomotif, industri farmasi dan kosmetik. Kandungan asam lemak pada minyak jarak 90% terdiri dari asam risinoleat, hanya sedikit mengandung asam dihidroksi *stearat, linoleat, oleat dan stearat*. Adapun minyak yang digunakan sebagai bahan dalam pengujian ditunjukkan gambar 3.



Gambar 3. Bahan pengujian

Pada pengujian ini alat yang digunakan adalah Set Oil Tester DPA, pada alat ini didalamnya terdapat bejana dengan elektroda setengah bola, pada pengujian elektroda setengah bola diatur jaraknya sebesar 2,5 mm sebagai tempat wadah minyak yang akan dilakukan pengujian tegangan tembus. Untuk alat Oil Tester DPA memiliki kemampuan pengukuran yang terbatas, dimana pengukuran maksimal yang dapat dibaca oleh alat ini sebesar 75 kV. Hasil pengujian minyak jarak yang telah dilakukan didapatkan hasil yang ditunjukkan pada table 2

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Minyak Jarak

Temperatur	28 °C
Pengukuran 1	>75,1 kV
Pengukuran 2	58,8 kV
Pengukuran 3	>75,0 kV
Pengukuran 4	68,6 kV
Pengukuran 5	70,3 kV
Pengukuran 6	64,6 kV
Nilai Rata	68,7 kV
Stand.dev	6,3 kV

Dari hasil yang dilakukan selama 6 kali pengujian ditunjukkan gambar 4 didapat nilai tegangantembus rata-rata sebesar 68,7 kV pada jarak sela 2,5 mm, dengan suhu 28⁰C dan standar dev 6,3 kV. Berdasarkan pengujian minyak jarak yang telah dilakukan sebanyak 6 kali dalam durasi waktu 2 menittiap pengukurannya dapat dikatakan bahwa tegangan tembus minyak jarak berdasarkan SPLN 49-1 1982, nilai tegangan tembus yang harus dipenuhi oleh minyak sebagai bahan isolasi untuk transformatorsebesar >30 kV. Dari hasil 6 kali pengujian tersebut dapat dilihat bahwa minyak jarak memenuhi standar tegangan tembus SPLN, berdasarkan pengujian tegangan tembus yang dilakukan pada minyakjarak dapat dilihat perbandingan nilai terhadap nilai tegangan tembus standarisasi SPLN seperti yang disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Nilai Tegangan Tembus

Nilai Standar Tegangan Tembus Standar SPLN 49-1 1982	30 kV
Nilai Tegangan Tembus Dengan Pengujian Minyak Jarak	68,7 kV

Dari hasil yang diperoleh hasil pengujian dibuat perbandingan kurva karakteristik berdasarkan selang waktu 2 menit selama 6 kali, dimulai dari menit ke-5 hingga menit ke-15 menit yang disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Kurva karakteristik tegangan tembus minyak

Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat dari hasil pengujian ke-1 hingga ke-6 rata-rata tegangan tembus68,7 kV. Pada pengujian yang dilakukan menggunakan minyak jarak sebagai salah satu alternatif pengganti minyak existing atau minyak mineral trafo didapat hasil yang cukup baik dan

memenuhi standar persyaratan minyak isolasi baru yang diatur SPLN 49-91: 1982. Pada pengujian yang sudah dilakukan jarak sela antara elektroda dibuat konstan pada jarak 2,5 mm, sedangkan kadar air pada minyak meskipun mempengaruhi nilai tegangan tembus pada minyak isolasi saat pengujian berlangsung diabaikan.

Dalam sistem tenaga listrik isolasi mempunyai fungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantarlistrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar-penghantar yang bertegangan tidak terjadi lompatan listrik ataupun percikan. Minyak merupakan bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi dan mendinginkan peralatan listrik tegangan tinggi. Isolator minyak sebagian besar berasal dari minyak bumi atau minyak mentah yang diolah secara khusus sehingga mempunyai sifat-sifat sebagai isolator, perkembangan saat ini menuntut suatu produk yang aman dan ramah lingkungan untuk mengurangi efek pemanasan global yang akan terjadi. Tentunya keneadaan ini membuka peluang penggunaan bahan energi terbarukan yang berasal dari minyak nabati. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa ada nilai tegangan tembus dielektrik minyak jarak melebihi standar yang ada, sehingga bisa dikatakan minyak jarak dapat digunakan sebagai alternatif pengganti minyak trafo jenis lain, yang tentunya akan menjadi alternatif disaat kelangkaan atau semakin menipisnya ketersediaan minyak.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa dalam pengujian minyak jarak yang telah dilakukan maka didapatkan kekuatan dielektrik rata-rata dari 6 kali pengujian sebesar 68,7 kV. Dari pengujian tegangan tembus minyak jarak sebagai pengganti minyak existing dapat dikatakan bahwa minyak nabati jenis jarak memiliki kemungkinan sebagai pengganti minyak existing hal tersebut dibuktikan dari nilai tegangan tembus pada minyak jarak. Dari standar SPLN yang telah ditetapkan persyaratan minyak isolasi baru diatur dalam standar SPLN 49-91: 1982 yang harus dipenuhi agar suatu minyak bisa digunakan sebagai minyak isolasi baru adalah ≥ 30 kV/2,5 mm yang berarti pada tahap ini hasil pengujian melampaui dan sesuai standar SPLN 49-91: 1982 tentang tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk spesifikasi minyak isolasi.

Referensi

- [1] I. N. O. Winanta, A. A. N. Amrita, and W. G. Ariastina, "Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator," *J. SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, pp. 10–18, 2019, [Online]. Available: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/spektrum/article/download/52807/31268>.
- [2] R. Kamerlisa Putra *et al.*, "Karakteristik Tegangan Tembus Arus Bolak Balik Pada Minyak Jarak Pagar (*Jatropha curcas*) Sebagai Alternatif Isolasi Cair," *Jom FTEKNIK*, vol. 4, p. 1, 2017.
- [3] S. N. Singgih and H. Berahim, "Analisis Pengaruh Keadaan Suhu Terhadap Tegangan Tembus Ac Dan Dc Pada Minyak Transformator," *J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 93–99, 2009.
- [4] S. Samsurizal, A. Makkulau, and S. A. Zahra, "Studi Pengujian Karakteristik Minyak Nabati Terhadap Tegangan Tembus Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Trafo," *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 11, no. 1, pp. 81–89, 2022, doi: 10.36055/setrum.v11i1.14051.
- [5] Winanta, I. N. O., Amrita, A. A. N., & Ariastina, W. G. (2019). Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Jurnal SPEKTRUM* Vol, 6(3).
- [6] Mieller, B. (2019). Influence of test procedure on dielectric breakdown strength of alumina. *Journal of Advanced Ceramics*, 8(2), 247-255.
- [7] Adibah, F. (2016). Studi Karakteristik Minyak Jarak Sebagai Alternatif Isolasi Cair Pada Transformator Daya Menggunakan Destilasi Vakum Dengan Variasi Fenol. 1–55.

- [8] Naidu, M. S., dan V Kamaraju. (1996). *High Voltage Engineering Second Edition*. United States: TheaMcGraw Hill.
- [9] Setiyandani, E., & Prasetyono, S. (2021). Uji Karakteristik Bio Minyak Trafo Berbahan Dasar Minyak Kemiri Sunan dengan Penambahan Zat Aditif Butylated Hydroxytoluene (BHT) Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator Daya 150 KVA. *Jurnal Intake: Jurnal Penelitian Ilmu Teknik dan Terapan*, 12(1), 1-11.
- [10] Kurrahman, H. T., Abduh, S., Teknik, J., Fakultas, E., Industri, T., & Trisakti, U. (2016). Studi tegangan tembus minyak kamiri sunan sebagai alternatif pengganti minyak transformator daya. *JETri*, 13(2), 11–28.
- [11] IEEE C2. (2007). *National Electrical Safety Code*. Washington DC: Jefferson Country Public Library. (standar minyak)
- [12] Putra, R. K., & Murdiya, F. (2017). Karakteristik Tegangan Tembus Arus Bolak Balik Pada Minyak Jarak Pagar (*Jatropha curcas*) Sebagai Alternatif Isolasi Cair. *Jom FTEKNIK*, 4(2), 1– 11.
- [13] Marsudi, Djiteng, (2011). “Pembangkitan Energi Listrik”. Erlangga
- [14] Modul Praktikum Teknik Tegangan Tinggi, IT-PLN
- [15] Dhofir, M., Dona, N. R., Wibawa, U., & Hasanah, N. (2017). Minyak kelapa beraditif minyak zaitun sebagai isolasi peralatan tegangan tinggi. *Eeccis*, 11(2), 69–76.
- [16] Garniwa, I., & S, J. F. (2011). Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur Dan Umur Minyak Transformator Terhadap Degradasi Tegangan Tembus Minyak Transformator. *Jurnal Teknik Elektro, Universitas Indonesia*. Depok
- [17] Feng, D., Yang, L., Zhou, L., Liao, R., & Chen, X. (2019). Effect of oil–paper–pressboard massratio on furfural content in transformer oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(4), 1308-1315.
- [18] Samsurizal, & Hadinoto, B. (2020). Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN (Persero) Up3 Pondok Gede. *KILAT*, 9(1), 136-142.
- [19] Rajnak, M., Timko, M., Kopcansky, P., Paulovicova, K., Kuchta, J., Franko, M & Cimbala, R. (2019). Transformer oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(4), 1343-1349.