

**Studi Eksperimental Tegangan Tembus Kertas Isolasi Transformator
Presspaper Pada Kondisi Perendaman**

*Experimental Study of Breakdown Voltage of Press Paper Insulation Paper
for Transformers under Immersion Conditions*

Samsurizal¹, Andi Makkulau², Rio Afrianda³, Finka Rizkina Sani⁴, Humaida⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

³Program Studi Teknologi Listrik, 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*}, finka1811079@itpln.ac.id^{4*},

Humaida2211121@itpln.ac.id^{5*},

Abstrak – Dalam proses penyaluran energi listrik memerlukan sebuah transformator. Transformator merupakan peralatan yang digunakan untuk mentransformasikan tegangan tanpa merubah frekuensi yang digunakan pada sistem pembangkit. Dalam transformator terdapat isolasi untuk melapisi kumparan pada transformator. Isolasi yang umum digunakan pada transformator adalah isolasi minyak dan isolasi kertas. Isolasi kertas bersifat lentur atau fleksibel dapat mengikuti bentuk yang diinginkan. Faktor penting yang harus diperhatikan pada suatu bahan isolasi adalah kekuatan dan daya tahannya. Berdasarkan hal tersebut perlu diuji apakah isolasi kertas tetap menjadi pilihan yang handal dan efisien untuk trafo listrik. Merendam isolasi dalam minyak juga digunakan pemantauan kualitas minyak. Pengujian minyak isolasi secara berkala dapat mengidentifikasi masalah potensial dalam transformator lebih awal sehingga tindakan perawatan dapat diambil. Dalam penelitian ini menggunakan metode kuantitatif komparasi dan regresi linier. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kertas press dan memvariasikan ketebalan kertas dalam keadaan direndam minyak isolasi. Hasil dari pengujian kertas isolasi dengan ketebalan 1,04 mm pada keadaan direndam minyak menunjukkan nilai rata-rata breakdown voltage sebesar 23,82 kV, hal tersebut menandakan bahwa kertas isolasi dengan metode perendaman memiliki breakdown voltage lebih baik dibandingkan kertas isolasi dalam keadaan kering.

Kata Kunci: Kertas Press, Tegangan Tembus, Isolasi

Abstract – The process of distributing electrical energy requires a transformer. A transformer is a piece of equipment used to transform voltage without changing the frequency used in the power system. In a transformer, there is insulation to coat the coils on the transformer. The insulation commonly used in transformers is oil insulation and paper insulation. Paper insulation is pliable or flexible and can follow the desired shape. An important factor that must be considered in an insulating material is its strength and durability. Based on this, it is necessary to test whether paper insulation remains a reliable and efficient choice for electrical transformers. Soaking insulation in oil is also used for oil quality monitoring. Periodic insulation oil testing can identify potential problems in transformers early so that maintenance measures can be taken. This study uses quantitative methods of comparison and linear regression. The test is performed using press paper and varying the thickness of the paper in a state soaked in insulating oil. The results of testing insulation paper with a thickness of 1.04 mm in the oil-soaked state showed an average breakdown voltage value of 23.82 kV, indicating that insulation paper with the immersion method has a better breakdown voltage than insulation paper in a dry state.

Keywords: Presspaper, Breakdown Voltage, Insulation



1. Pendahuluan

Transformator dan peralatan tegangan tinggi lainnya memerlukan pemeliharaan rutin. Ini termasuk memeriksa kualitas isolasi, mendeteksi tanda-tanda kebocoran minyak atau kerusakan kertas, dan melakukan perbaikan jika diperlukan. Kertas isolasi transformator, seperti pressboard atau presspaper, adalah bahan isolasi yang sering digunakan dalam pembuatan transformator dan peralatan tegangan tinggi lainnya. Bahan ini memiliki sifat isolasi yang baik dan tahan terhadap panas, sehingga mereka digunakan untuk mengisolasi gulungan kumparan dan komponen inti dalam transformator [1]. Umumnya isolasi kertas digunakan pada peralatan listrik seperti transformator. Isolasi kertas memiliki karakteristik yang dapat mengikuti bentuk (fleksibel) yang dibutuhkan oleh produsen transformator. Isolasi kertas merupakan salah satu indikator penting dalam penentuan masa umur transformator. Karena isolasi kertas tidak dapat direkondisi ataupun direklamasi. Jika transformator dioperasikan pada suhu yang tinggi maka karakteristik dielektrik dan mekanik pada transformator akan menurun [2]. Hal tersebut dapat mempersingkat masa pakai transformator [3].

Kertas isolasi trafo merupakan jenis kertas khusus yang digunakan dalam produksi trafo untuk keperluan isolasi listrik. Kertas jenis ini mempunyai beberapa sifat penting sehingga sangat cocok digunakan sebagai bahan isolasi pada trafo. Beberapa fitur utama kertas isolasi transformator meliputi: Sifat isolasi: Kertas isolasi transformator memiliki sifat isolasi listrik yang sangat baik. Artinya, kertas jenis ini dapat mencegah arus melewatinya, yang penting untuk mencegah sambungan listrik antar bagian transformator yang berbeda. Tahan panas: Transformator dapat menghasilkan panas selama pengoperasian normal. Kertas insulasi transformator dirancang untuk tahan terhadap suhu tinggi dan dapat mempertahankan sifat insulasinya bahkan di lingkungan yang panas. Ketahanan terhadap minyak isolasi: Beberapa trafo diisi dengan minyak isolasi [4]. Kertas insulasi transformator harus mampu menahan minyak tersebut untuk menghindari perubahan sifat insulasi selama penggunaan [5]. Ketebalan dan kekuatan mekanik: Kertas insulasi transformator hadir dalam berbagai ketebalan dan kekuatan mekanik. Hal ini memungkinkan pemilihan kertas untuk memenuhi kebutuhan konverter tertentu, termasuk ketahanan terhadap tekanan mekanis selama perakitan dan pengoperasian. Ketahanan kelembaban: Kertas isolasi trafo juga harus tahan lembab [6]. Kelembapan dapat mengurangi sifat isolasi kertas. Oleh karena itu, penting untuk memilih jenis kertas yang sesuai dengan lingkungan pengoperasian trafo. Kemampuan Perendaman: Beberapa kertas insulasi transformator mungkin diresapi dengan isolator cair, seperti minyak, untuk meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan sifat insulasi listrik [1]. Ini adalah langkah umum dalam pembuatan transformator. Pemilihan kertas insulasi trafo yang tepat sangat penting dalam perancangan dan pembuatan trafo. Itu harus sesuai dengan spesifikasi transformator spesifik dan lingkungan pengoperasiannya. Selain itu, pemeliharaan rutin trafo harus mencakup pengujian kertas insulasi untuk memastikan bahwa sifat insulasinya tetap terjaga seiring waktu. Jika ditemukan kerusakan atau penurunan kualitas, perbaikan atau penggantian mungkin diperlukan untuk menjaga kinerja dan keamanan transformator.

Isolasi yang umum digunakan pada transformator diantaranya adalah isolasi minyak dan isolasi kertas. Isolasi minyak yang sering digunakan adalah isolasi minyak jenis mineral. Karena isolasi minyak jenis mineral memiliki kinerja penyerapan serta kekuatan isolasi yang cukup baik. Isolasi kertas umumnya diaplikasikan sebagai lapisan gulungan kawat pada transformator. Faktor penting yang harus diperhatikan pada suatu bahan isolasi adalah kekuatan dan daya tahannya [7]. Salah satu pengujian yang digunakan untuk mengetahui kekuatan isolasi adalah pengujian breakdown voltage atau tegangan tembus. Breakdown voltage atau tegangan tembus merupakan suatu peristiwa dimana tegangan dinaikkan secara terus menerus, hingga atom-atom terionisasi sampai dengan batas kemampuan isolator untuk menahan tegangan [8].

Presspaper adalah kertas yang diproduksi berdasarkan selulosa murni yang diekstraksi dari pohon konifer berserat panjang. Kemudian dibentuk menjadi bahan non-anyaman tanpa

menggunakan bahan pengikat tambahan (tanpa bahan kimia) dan ditekan. Sifat material ini berada di kelas insulasi A (105°C) [9]. *Presspaper* mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap tegangan tembus. Pada transformator *Presspaper* diaplikasikan sebagai pembatas antara coil dengan core serta core dengan core [10]. Impregnasi isolasi kertas, impregnasi merupakan proses perendaman isolasi kertas ke dalam isolasi minyak dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan dielektrik pada transformator. Perendaman kertas isolasi ke dalam isolasi minyak dapat mengurangi efek kelembaban serta mengisi pori-pori kertas sehingga meningkatkan kekuatan dielektriknya. Semakin lama waktu operasi, maka keandalan transformator akan menurun serta resiko kegagalan akan semakin tinggi [11]. Keandalan operasional transformator ditentukan oleh sistem perendaman isolasi kertas ke dalam isolasi minyak. Proses impregnasi dilakukan dengan merendam isolasi kertas ke dalam isolasi minyak sehingga terbentuk ikatan adhesi diantara minyak dan kertas. Kekuatan ikatan bergantung pada kemampuan daya tarik partikel minyak dan kertas. Secara mikroskopis, pada isolasi kertas terdapat pori-pori (void). Melalui proses impregnasi, pori-pori (void) akan ditutupi dengan minyak sehingga meningkatkan nilai tegangan tembus pada isolasi kertas. Proses impregnasi bertujuan untuk mengurangi sifat hidroskopis pada kertas [12].

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian kekuatan isolasi terhadap kertas isolasi transformator jenis *Presspaper* dengan variasi ketebalan dan dengan dua keadaan yang berbeda, yaitu keadaan kering serta keadaan direndam minyak isolasi. Kertas isolasi yang digunakan adalah jenis *presspaper* dimana kertas jenis ini memiliki kepadatan, kehalusan permukaan, kekuatan mekanik yang tinggi serta ketahanan terhadap tegangan tembus yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh ketebalan kertas isolasi terhadap tegangan tembus atau breakdown voltage pada keadaan kering dan keadaan direndam minyak isolasi transformator.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, untuk mendapatkan data penelitian dengan menggunakan metode eksperimen dan observasi. Pada metode eksperimen, data penelitian diperoleh dari pengujian tegangan tembus atau breakdown voltage pada sampel-sampel kertas isolasi yang telah disiapkan. Selanjutnya dilakukan pengujian pada sampel-sampel kertas isolasi dengan variasi ketebalan kertas dan dengan dua keadaan kertas yang berbeda, yaitu keadaan kering dan keadaan direndam minyak isolasi. Untuk metode observasi yang dilakukan penulis adalah dengan mengamati pengujian tegangan tembus pada kertas isolasi, kemudian data hasil pengujian dicatat dan di plot ke dalam grafik. Pengujian yang dilakukan dalam upaya untuk memperoleh data pada penelitian ini adalah pengujian tegangan tembus (*breakdown voltage*). Pengujian *breakdown voltage* ini menggunakan alat BAUR *breakdown voltage tester* dengan kapasitas maksimal 100 kV. Elektroda yang digunakan dalam modul pengujian ini adalah elektroda mushroom sesuai dengan IEC 60156.



Gambar 1. BAUR breakdown voltage tester

Pada pengujian isolasi kertas ini menggunakan kertas isolasi jenis *presspaper*. Dimana kertas tersebut akan diuji tegangan tembusnya atau *breakdown voltage* dalam keadaan kering dan direndam minyak isolasi jenis mineral. Pengujian ini menggunakan delapan variasi ketebalan kertas, yaitu 0,13 mm; 0,26 mm; 0,39 mm; 0,52 mm; 0,65 mm; 0,78 mm; 0,91 mm; 1,04 mm yang telah diukur dengan mikrometer. Kertas isolasi yang digunakan sebelumnya sudah dikeringkan melalui proses pemanasan (oven) dari pabrikannya. Proses pemanasan tersebut bertujuan untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam kertas isolasi. Selanjutnya dilakukan pengujian pada kertas isolasi sampai terjadi *breakdown voltage*. Nilai hasil *breakdown voltage* tersebut dicatat lalu diamati apa pengaruh variasi ketebalan kertas terhadap *breakdown voltage* atau tegangan tembusnya.

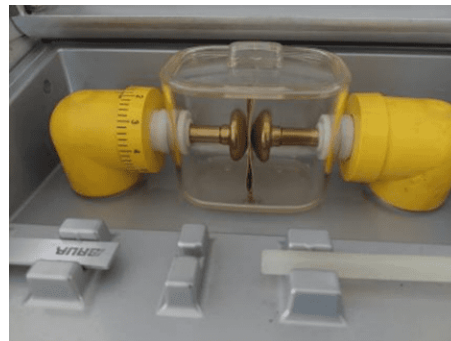
3. Hasil dan Pembahasan

Pada pengujian ini menggunakan 8 (delapan) variasi ketebalan kertas isolasi yang berbeda-beda, yaitu 0,13 mm; 0,26 mm; 0,39 mm; 0,52 mm; 0,65 mm; 0,78 mm; 0,91 mm; 1,04 mm. Kertas isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi jenis *presspaper*. Berikut ini gambar 2 yang menunjukkan perendaman isolasi kertas kedalam minyak isolasi transformator.



Gambar 2. Isolasi Kertas Yang Direndam Minyak Isolasi Transformator

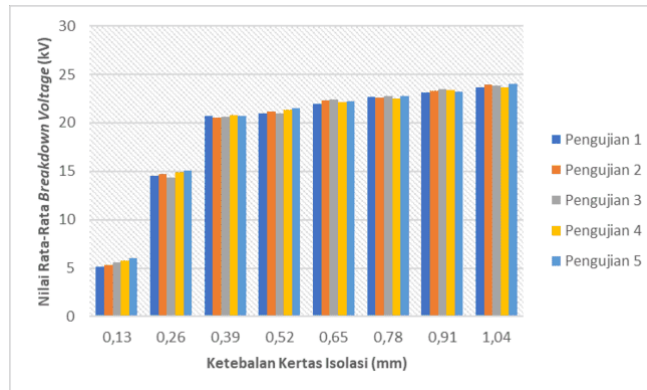
Dari gambar 2 menunjukkan bahwa semua sampel kertas isolasi jenis *presspaper* dengan variasi ketebalan akan direndam ke dalam minyak isolasi transformator selama 1 minggu. Minyak isolasi yang digunakan adalah jenis minyak isolasi mineral. Perendaman dilakukan untuk membandingkan nilai *breakdown voltage* yang dihasilkan saat keadaan direndam dan saat keadaan kering.



Gambar 3. Pengujian Isolasi Kertas Setelah Perendaman

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan terhadap tegangan tembus dalam keadaan direndam dalam minyak isolasi. Nilai *breakdown voltage* yang telah diperoleh dari 5 (lima) kali pengujian disetiap variasi ketebalan kertas isolasi yang berbeda

tersebut akan dirata-rata kemudian diplot kedalam grafik. Berikut ini adalah data hasil pengujian isolasi kertas dengan perendaman disajikan pada grafik gambar 4.



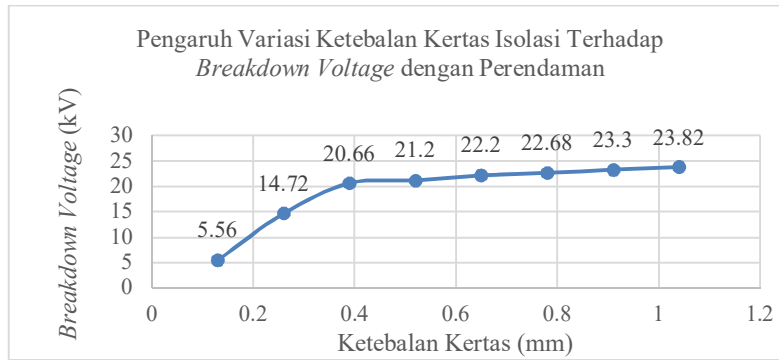
Gambar 4. Grafik Lima kali Pengujian dengan Variasi Ketebal Kertas Isolasi

Pada pengujian ini kertas isolasi diperlakukan dengan direndam ke dalam minyak isolasi jenis mineral dengan tujuan untuk melihat pengaruh perendaman terhadap nilai *breakdown voltage* yang dihasilkan. Perendaman dilakukan selama 1 minggu pada setiap ketebalan kertas isolasi. Dari hasil pengujian selama lima kali dengan memvariasikan ketebalan kertas maka didapat nilai rata-rata breakdown voltage pada masing-masing ketebalan kertas, berikut ini adalah tabel hasil pengujian isolasi kertas dengan perendaman.

Tabel 1. Hasil Pengujian Isolasi Kertas dengan Perendaman

Ketebalan Kertas (mm)	Nilai Rata-Rata Breakdown Voltage (kV)
0,13	5,56
0,26	14,72
0,39	20,66
0,52	21,2
0,65	22,2
0,78	22,68
0,91	23,3
1,04	23,82

Berdasarkan tabel 1 dapat dianalisa bahwa setelah dilakukan proses perendaman pada kertas isolasi jenis *presspaper* selama 1 minggu menghasilkan rata-rata nilai breakdown voltage yang lebih tinggi disetiap ketebalan kertas yang berbeda dibandingkan dengan pengujian isolasi kertas saat keadaan kering. Dapat dilihat pada ketebalan kertas 0,13 mm menghasilkan nilai *breakdown voltage* sebesar 5,56 kV hingga ketebalan kertas 1,04 mm menghasilkan nilai *breakdown voltage* sebesar 23,82 kV. Sehingga dapat disimpulkan semakin tebal suatu kertas isolasi maka semakin tinggi nilai *breakdown voltage* yang dihasilkan. Rata-rata nilai breakdown voltage hasil pengujian isolasi kertas dengan perendaman tersebut akan dituangkan kedalam grafik untuk memudahkan dalam menganalisa lebih lanjut. Berikut ini adalah gambar grafik hasil pengujian isolasi kertas dengan perendaman:



Gambar 5. Pengaruh Variasi Ketebalan Kertas Isolasi Terhadap Breakdown Voltage

Dari gambar 5 grafik pengaruh variasi ketebalan kertas isolasi terhadap breakdown voltage dengan perendaman dimana variabel ketebalan kertas sebesar 0,13 mm; 0,26 mm; 0,39 mm; 0,52 mm; 0,65 mm; 0,78 mm; 0,91 mm; 1,04 mm, dapat dianalisa bahwa semakin tebal kertas isolasi, nilai rata-rata breakdown voltage yang dihasilkan juga semakin tinggi. Menunjukkan bahwa besarnya breakdown voltage pada ketebalan kertas 0,13 mm hingga 0,39 mm mengalami peningkatan secara linier. Sedangkan 0,52 mm hingga 1,04 mm kenaikan breakdown voltage cenderung mendatar. Hal ini dikarenakan pengaruh ketebalan kertas isolasi terhadap nilai breakdown voltage pada keadaan direndam tidak terlalu besar.

Untuk melihat seberapa besar pengaruh dari variasi ketebalan kertas isolasi terhadap tegangan tembusnya saat keadaan direndam dilakukan perhitungan dengan menggunakan SPSS, sehingga diperoleh tabel model summary sebagai berikut:

Tabel 2. Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0,832 ^a	0,693	0,642	3,72717

Berdasarkan tabel 2 dapat diketahui bahwa nilai korelasinya sebesar 0,832. Nilai korelasi sebesar 0,832 termasuk ke dalam korelasi yang sangat kuat. Dari tabel model summary juga diperoleh nilai koefisien determinasi sebesar 0,693 yang berarti bahwa pengaruh yang diberikan variabel X (ketebalan kertas) sebesar 69,3%. Untuk mengetahui analysis of variance dapat dilihat pada bagian regresi yang dimuat dalam tabel 3.

Tabel 3. Analysis of Varians

Model		Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	188,129	1	188,129	13,543	0,010 ^b
	Residual	83,351	6	13,892		
	Total	271,480	7			

Dari tabel analysis of variance diatas dapat diketahui besarnya nilai uji ANOVA atau nilai F yaitu sebesar 13,543. Dilakukannya uji ANOVA bertujuan untuk melihat pengaruh signifikan yang diberikan variabel X terhadap variabel Y. Kemudian dilakukan uji T untuk melihat pengaruh variabel X terhadap variabel Y. Berikut ini adalah tabel hasil uji T.

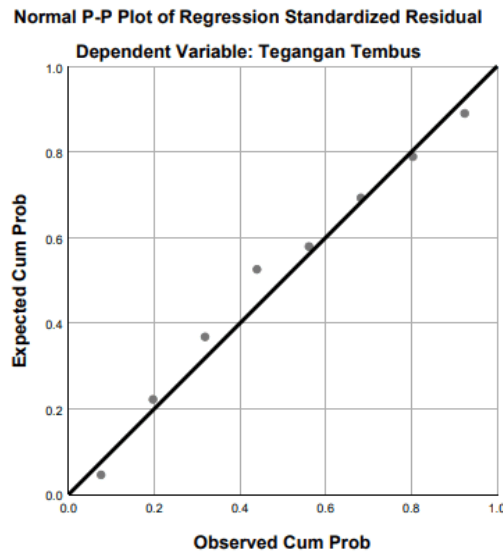
Tabel 4. Hasil Uji T

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	9,744	2,904		3,355	0,015
	Ketebalan Kertas	16,280	4,424	0,832	3,680	0,010

Dapat diketahui dari tabel 4 bahwa besarnya nilai T signifikan terhadap variabel Y. Maka hal ini menyatakan bahwa variabel Y memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabel X. Sehingga diperoleh persamaan regresi sebagai berikut:

$$Y = 9,744 + 16,280X$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka dapat diketahui bahwa semakin besar nilai variabel X maka nilai Y juga akan semakin besar. Hal tersebut berarti semakin tebal suatu kertas isolasi maka menghasilkan tegangan tembus yang semakin besar juga. Berikut ini adalah grafik gambar 6 yang menggambarkan persamaan regresi.



Gambar 6. Grafik Regresi

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian pada penelitian ini dapat ditarik disimpulkan bahwa, pengaruh ketebalan kertas isolasi terhadap tegangan tembus atau breakdown voltage adalah semakin tebal suatu kertas isolasi maka semakin besar juga tegangan tembus atau breakdown voltage yang dihasilkan. Tegangan tembus atau breakdown voltage pada kertas isolasi pada keadaan direndam minyak isolasi rongga udara atau pori-pori dalam kertas isolasi tertutupi oleh minyak isolasi sehingga dapat meningkatkan tegangan tembus atau breakdown voltage serta meningkatkan kualitas isolasi. Sehingga kertas isolasi pada keadaan direndam memiliki kualitas isolasi lebih baik dibandingkan saat keadaan kering. Besar nilai tegangan tembus atau breakdown voltage pada kertas isolasi direndam dengan minyak isolasi transformator pada ketebalan 0,13 mm

menghasilkan breakdown voltage sebesar 5,56 kV hingga ketebalan 1,04 mm menghasilkan nilai breakdown voltage sebesar 23,82 kV. Hasil pemodelan melalui metode regresi linier menyatakan bahwa variabel X berpengaruh terhadap variabel Y dengan nilai korelasi sebesar 0,998.

Referensi

- [1] A. Kadir, Transformator., Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press), 2010.
- [2] SPLN. 49 -1, Minyak Isolasi. Minyak Isolasi, Jakarta: PT.PLN (Persero), 1982.
- [3] L. S. Nasrat, N. Kassem and N. Shukry, "Aging Effect on Characteristics of Oil Impregnated Insulation Paper for Power Transformers," *Journal Engineering*, pp. 1-7, 2013.
- [4] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, Australia: McGraw-Hill, 2005.
- [5] D. M. E. Nugroho, "Kegagalan Isolasi Minyak Trafo," *Media ElektriKa*, vol. 2, no. 2, pp. 1-10, 2010.
- [6] S. Tresgallo Arozamena, J. Sanz Asensio, C. Olmo Salas, C. Méndez Gutiérrez, P. J. Quintanilla Cavia, D. F. García Gómez and C. Vila Montañés, " Adaptation of the impregnation conditions of cellulosic transformer solids to the use of natural esters," 2022.
- [7] F. Jatmiko, "Pengaruh Perendaman Berbagai Macam Jenis Kertas Di Dalam Minyak Trafo Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Pada Suhu 30°C, 40°C, dan 50°C.," Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2015.
- [8] M. Simanjuntak, "Pengaruh Lama Perendaman Kertas Trafo (Pressboard) Pada Minyak Mineral, Minyak Nabati, Dan Minyak Sintetis Terhadap Karakteristik Elektris Kertas," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [9] Pucaro, "Press paper in rolls," 2 Maret 2022. [Online]. Available: <https://pucaro.com/en/press-paper-in-rolls.html>.
- [10] R. A. Elfreda, "Analisis Tegangan Tembus Kertas Isolasi Transformator Akibat Lama Perendaman Pada Isolasi Minyak Transformator," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [11] T. K. Saha and P. Purkait, Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques, Singapore: Wiley, 2017.
- [12] M. F. Nichal, "Analisis Pengaruh Penuaan Termal Dari Isolasi Kertas Kraft Dengan Perendaman Minyak Mineral, Minyak Nabati, Dan Minyak Sintetis Terhadap Karakteristik Elektris," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.