

Analisa Winding Insulation Motor Induksi Tiga Fasa Circulation Water Pump-B Di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon

Hartono
Teknik Elektro,
Universitas Sultan Ageng
Tirtayasa
email :
hartono@untirta.ac.id

**Muhammad Dzaki Jhon
Ramadhan**
Teknik Elektro,
Universitas Sultan Ageng
Tirtayasa
email :
jhonzaki93@gmail.com

Rusydhan Baniardho
Teknik Elektro,
Universitas Sultan Ageng
Tirtayasa
email :
rusydhan0987@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kondisi isolasi lilitan stator motor induksi tiga fasa *Circulation Water Pump-B* (CWP-B) di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon, di mana kegagalan isolasi merupakan penyebab utama kegagalan motor akibat *stress* termal dan kelembaban. Metode yang digunakan adalah pengujian diagnostik non-destruktif Tahanan Isolasi (IR) dan Indeks Polarisasi (PI) yang dilakukan sebelum dan setelah *overhaul*. Hasil sebelum *overhaul* menunjukkan kondisi isolasi tergolong Normal dengan nilai PI 2,59 dan arus bocor isolasi 0,364 mA. Setelah *overhaul*, kualitas isolasi meningkat signifikan, dibuktikan dengan kenaikan nilai PI menjadi 3,55 (Baik) dan penurunan drastis arus bocor isolasi menjadi hanya 0,00029 mA. Peningkatan ini mengonfirmasi bahwa *overhaul* efektif membuat isolasi lebih kering dan bersih, menjadikan motor berada dalam kondisi yang lebih baik dan lebih andal untuk operasi berkelanjutan

Keywords: *Motor Induksi Tiga Fasa, Tahanan Isolasi, Indeks Polarisasi.*

Abstract

This study analyzes the stator winding insulation condition of a three-phase induction motor, Circulation Water Pump-B (CWP-B) at PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon, where insulation failure is a major cause of motor breakdown due to thermal stress and humidity⁶. The methodology employed was non-destructive diagnostic testing of Insulation Resistance (IR) and Polarization Index (PI), conducted both before and after an overhaul. Results before the overhaul indicated the insulation condition was classified as Normal with a PI value of 2.59 and an isolation leakage current of 0.364mA. Following the overhaul, the insulation quality improved significantly, evidenced by the PI value increasing to 3.55 (Good) and a drastic drop in isolation leakage current to only 0.00029mA. This improvement confirms that the overhaul was effective in making the insulation drier and cleaner, thus placing the motor in a better and more reliable condition for continuous operation.

Keywords: *Three-Phase Induction Motor, Insulation Resistance, Polarization Index.*

I. LATAR BELAKANG

Kerusakan isolasi lilitan stator merupakan penyebab utama kegagalan motor induksi tiga fasa pada aplikasi pompa sirkulasi. Degradasi terjadi akibat kombinasi faktor termal, stress listrik, kelembapan dan kontaminasi, sehingga mengurangi resistansi isolasi dan meningkatkan resiko hubung singkat antar-fase atau fase-tanah.[1].

Metode daignostik non-destruktif seperti pengukuran resistansi isolasi (IR), polarization index (PI) dan pengujian tegangan tinggi (hipot/surge) telah banyak digunakan untuk menilai kondisi sistem isolasi pada motor listrik dan memberi indikator dini kegagalan.[2]. Stator winding mengalami stress tambahan ketika motor dikendalikan oleh inverter (*common-mode voltage*), yang menyebabkan peningkatan aktivitas partial discharge dan percepatan penuaan isolasi pada lapisan *groundwall*. Fenomena ini sangat penting ketika motor digunakan di plant dengan sistem kontrol modern.[3].

Pengukuran *partial discharge* (PD) baik online atau offline terbukti efektif mendeteksi kelemahan lokal pada isolasi sebelum terjadi *breakdown* penuh. Studi kasus menunjukkan PD sering muncul lebih dulu di daerah ujung lilitan (*end-winding*) dan sambungan terminal.[4]. Pemantauan arus bocor (*leakage current*) dan estimasi suhu lilitan memberikan sinyal komposit yang berguna untuk memantau penuaan isolasi dalam operasi berkelanjutan, cara ini dapat diintegrasikan ke sistem pemeliharaan preventif.[5]. Survey material dan sistem isolasi menunjukkan variasi besar dalam praktek *impregnasi*, *varnish* dan material *dielectric* (mica, epoxy, polyester) yang mempengaruhi ketahanan terhadap kelembapan, panas dan discharge. Pilihan material dan metode perawatan mempengaruhi umur layanan lilitan.[6].

Studi diagnostik pada berbagai motor menunjukkan bahwa gabungan beberapa metode pengukuran (IR, PI, Surge, PD, thermal imaging) memberikan penilaian kondisional yang lebih andal dibandingkan metode tunggal.[7] kasus lokal dan penelitian di PLTU menunjukkan bahwa kegagalan motor pompa berakar isu isolasi sekaligus masalah mekanis (impeler, poros) dan kelistrikan pada sistem MCC. Pendekatan FMEA atau *root cause analysis* membantu menentukan prioritas perbaikan.[8]

Studi kegagalan pada pompa sirkulasi (*circulating water pump*) menunjukkan bahwa selain masalah mekanis, kondisi lingkungan instalasi dan kualitas sambungan kabel atau terminal juga sering memicu degradasi isolasi motor. Inspeksi visual dan pengujian terminal penting dalam diagnosis.[9] Penelitian *circulating water pump* ini dapat mengurangi *overtime* dan memperpanjang umur motor jika parameter isolasi dipantau dan di analisis secara berkala.[10] akan di bandingkan hasilnya kondisi sebelum dan setelah *overhaul*.

II. METODE PENELITIAN

A. Pemantauan Online Partial Discharge (PD)

pemasangan sensor PD pada terminal dan/atau pada end-winding untuk deteksi dini aktivitas discharge; data PD dianalisis waktu-frekuensi untuk mengidentifikasi asal (antara-fase, groundwall, sambungan) dan tren peningkatan aktivitas. [1].

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

B. Pengujian Isolasi Listrik Tradisional (IR, PI, Hipot/Surge)

pengukuran periodik IR/PI untuk pantauan kondisi dielektrik dasar, disertai pengujian surge untuk mendeteksi kelemahan permukaan/sambungan; thermal imaging selama operasi mengungkap hotspot akibat resistansi sambungan atau overheat lilitan [2].

C. Pengukuran Arus Bocor (Leakage Current) & Estimasi Suhu Lilita

pengukuran arus bocor stator selama operasi untuk mendeteksi peningkatan arus leakage yang berkorelasi dengan kerusakan isolasi; kombinasi dengan sensor suhu lilitan/termokopel memberikan korelasi termal–elektrik .[11].

D. Uji Surge dan Analisis Gelombang Tegangan

pengujian surge pada stator saat offline untuk mendeteksi celah permukaan atau degenerasi isolasi dan pemetaan lokasi kelemahan berdasarkan respon gelombang [2].

E. Model Prediktif Berbasis Machine Learning untuk Deteksi Dini.

kumpulkan dataset multivariat (IR, PI, PD, leakage, suhu, getaran, beban) lalu latih model ML (e.g., random forest, SVM, atau neural networks) untuk memprediksi probabilitas kegagalan isolasi dan waktu sisa pakai (RUL) [15].

III. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisa pada Analisa *winding insulation* Analisis data pengukuran pemeliharaan preventif digunakan untuk mengevaluasi kondisi motor induksi tiga fasa *circulation water pump*, disesuaikan dengan standar spesifikasi yang ditetapkan oleh PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon. Berikut merupakan data spesifikasi

Tabel 1 Spesifikasi Motor CWP

Keterangan	Spesifikasi
<i>Output</i>	1750 KW
<i>Poles</i>	16
<i>Volt</i>	6000 V
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Current</i>	220A
<i>Speed</i>	370 RPM
<i>Standard</i>	IEC 60034-1
SF	1.0
<i>Bearing D-End</i>	NU244MCEE
<i>Bearing N-End</i>	-
<i>Type</i>	MUC4034d

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

<i>Rating</i>	C O N T
<i>Frame</i>	1000 L
<i>Thermal CL Stator</i>	F
<i>Thermal CL Rotor</i>	-
<i>Coolant</i>	40 °C
<i>Mass</i>	31000 KG
IP	55
IC	611
<i>Power Factor</i>	0.811
<i>Grease</i>	Shell Alvania 2
<i>Regreasing D-END</i>	250 g
<i>Regresing N-END</i>	-
<i>Interval</i>	12 Month
<i>Serial No</i>	0501y406N
M. NO	FA0067-2
MFD	2004

Motor induksi tiga fasa *Circulation Water Pump* (CWP) B di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon memiliki spesifikasi utama daya keluaran 1750 KW pada tegangan 6000 V dan frekuensi 50 Hz, dengan arus nominal 220 A dan kecepatan putar 370 RPM. Motor ini dirancang untuk operasi kontinu (CONT) dengan massa mencapai 31.000 KG. Perlindungan motor memiliki standar IP 55 dan insulasi termal statornya adalah Kelas F. Untuk pemeliharaan, motor menggunakan *grease* jenis Shell Alvania 2, dengan interval *regreasing* ditetapkan setiap 12 bulan.

Gambar tersebut merupakan motor *circulation water pump* yang berfungsi berfungsi memompa air dalam jumlah besar (seringkali air laut) secara terus-menerus ke kondensor untuk mendinginkan uap turbin kembali menjadi air, menjaga aliran pendingin stabil, dan mendukung efisiensi operasi pembangkit listrik secara keseluruhan pada PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon44.



Gambar 1 Motor CWP

A. *Insulation Resistance*

Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance* atau IR) adalah parameter kritis dalam pemeliharaan motor induksi tiga fasa, seperti yang digunakan pada *Circulation Water Pump* (CWP) B di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon. Pengukuran IR berfungsi untuk mengetahui adanya arus bocor yang terjadi pada motor.

Tabel 2 Standar Tahanan Isolasi IEEE

Minimum Tahanan Isolasi	Keterangan
$IR_{1 \min} = kV + 1$	Untuk sebagian besar lilitan yang dibuat sebelum sekitar tahun 1970, semua lilitan medan, dan lainnya yang tidak dijelaskan di bawah ini
$IR_{1 \min} = 100$	Untuk sebagian besar armature dc dan gulungan ac yang dibuat setelah sekitar tahun 1970 (kumparan yang dibentuk)
$IR_{1 \min} = 5$	Untuk sebagian besar mesin dengan kumparan stator lilitan acak dan kumparan berwujud dengan tegangan di bawah 1 kV

Tabel 2 memuat Standar Minimum Tahanan Isolasi dari standar IEEE untuk berbagai jenis lilitan motor dan mesin listrik. Tahanan Isolasi adalah parameter penting untuk menilai kondisi dielektrik dasar dan mendeteksi adanya arus bocor pada motor pada *circulation water pump*.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Nilai minimum yang direkomendasikan bergantung pada jenis dan usia lilitan, serta tegangan operasional.



Gambar 2 Alat Ukur *Insulation Resistance Test* (Megger)

Gambar 2 menampilkan sebuah Megger (sering disebut *Insulation Resistance Tester* atau Alat Uji Tahanan Isolasi). Fungsi Utama: Alat ini digunakan untuk mengukur Tahanan Isolasi (IR) lilitan motor terhadap tanah (ground) atau antar-fase.

Prinsip Kerja Megger menghasilkan dan menerapkan tegangan DC tinggi (seperti yang diatur dalam Tabel 3) melintasi isolasi lilitan. Kemudian, ia mengukur arus bocor yang sangat kecil yang melewatinya dan menghitung nilai tahanan isolasi dalam Megaohm (M Ω) atau Gigaohm (G Ω) Kepentingan dalam, Pengujian menggunakan Megger merupakan metode diagnostik non-destruktif yang penting untuk mendeteksi degradasi isolasi, kelembapan, atau kontaminasi yang dapat menyebabkan hubung singkat

Tabel 3 Pedoman untuk tegangan DC yang akan diterapkan selama pengujian tahanan isolasi

<i>Winding rated voltage (V)</i>	<i>Insulation resistance test direct voltage (V)</i>
<1000	500
1000–2500	500-1000
2501–5000	1000-2500
5001–12 000	2500-5000
>12 000	5000-10 000

Tujuan Panduan ini memastikan bahwa pengujian dilakukan pada tingkat tegangan yang memadai untuk menghasilkan stress pada isolasi tanpa merusaknya, sehingga dapat mengungkap kelemahan isolasi yang mungkin tidak terdeteksi pada tegangan operasi normal¹.

Gambar 3 menunjukkan proses Pengukuran Tahanan Isolasi (Insulation Resistance/IR) pada motor induksi di lokasi operasional. Prosedur Khas Dalam pengujian IR, Megger dihubungkan antara salah satu terminal lilitan motor (U, V, atau W) dan badan motor/ground. Pengukuran dilakukan untuk menilai tahanan isolasi antara lilitan dan ground (UVW-Ground). Pengujian

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

antar-fase (Phase-to-Phase) juga dapat dilakukan, meskipun Tabel 5 lebih menekankan nilai UVW-Ground.



Gambar 3 Pengukuran *Insulation Resistance*

Kondisi Pengujian: Pengujian IR dan PI (seperti yang diukur pada Tabel 5 dan 6) umumnya dilakukan saat motor dalam kondisi *offline* (tidak beroperasi) untuk mendapatkan hasil yang akurat

F. *Polarization Index*

Fungsi *polarization index* (PI) digunakan untuk menilai kondisi lilitan motor secara keseluruhan dan mendeteksi adanya kelembapan, kontaminasi, atau kerusakan parah yang tidak terdeteksi hanya dengan nilai IR 1 menit.

Tabel 4 Standar IEEE *Polarization Index*

Nilai PI	Keterangan
< 1.0	Berbahaya
1.0 – 1.5	Sangat Jelek
1.5 – 1.9	Dipertanyakan
2.0 – 2.9	Normal
3.0 – 4.0	Baik
> 4.0	Sangat Baik

Interpretasi nilai PI yang rendah menunjukkan bahwa arus bocor permukaan (arus kapasitif dan penyerapan) menurun terlalu cepat, mengindikasikan isolasi yang kotor, basah, atau mengalami penuaan signifikan. Nilai PI dalam kategori "Normal" atau lebih baik menunjukkan kondisi isolasi yang baik dan kering

$$PI = \frac{\text{Menit ke 10}}{\text{Menit Ke 1}}$$

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Dalam persamaan polarisasi indeks (PI) adalah pembacaan nilai dari pengukuran isolasi motor untuk pengukuran periode yang lama. Periode waktu tersebut memiliki standar IEEE dalam pengujian selama 10 menit.

G. Hasil Pengukuran

Bagian ini menyajikan dan menganalisis secara mendalam data hasil pengukuran yang diperoleh dari motor induksi tiga fasa *Circulation Water Pump* (CWP-B) di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon. Analisis ini difokuskan pada pengujian diagnostik non-destruktif, yaitu Tahanan Isolasi (IR) dan *Polarization Index* (PI), yang merupakan parameter kritis untuk menilai kondisi dielektrik dasar sistem isolasi lilitan stator.

Tabel 5 Sebelum Overhaul

UVW - Ground		Phase to Phase		Result
1 Menit	8.58 GΩ	U-V	221.9Ω	
5 menit	18.6 GΩ	U-W	221.6Ω	
10 menit	22.2 GΩ	V-W	221.8Ω	
PI				
2.59				

Tabel 5 menyajikan hasil pengujian diagnostik motor *Circulation Water Pump-B* (CWP-B) yang dilakukan sebelum perawatan besar (*overhaul*). Tujuan pengujian ini adalah untuk mendapatkan data awal tentang kondisi isolasi lilitan stator.

Tahanan Isolasi Terhadap Tanah (UVW-Ground) Bagian ini mengukur kemampuan isolasi lilitan untuk menahan kebocoran arus ke badan motor (tanah): Pengukuran 1 Menit: Tahanan isolasi tercatat 8,58 GΩ (sangat tinggi). Pengukuran 5 Menit: Tahanan isolasi meningkat menjadi 18,6 GΩ. Pengukuran 10 Menit: Tahanan isolasi mencapai 22,2 GΩ. Nilai tahanan isolasi yang sangat tinggi menunjukkan bahwa isolasi motor sangat bersih dan kering terhadap tanah pada kondisi awal.

Tahanan Lilitan Antar-Fase (Phase to Phase) Bagian ini mengukur tahanan arus listrik langsung (DC) dari kawat lilitan: U-V: Tahanan tercatat 221,92 Ω. U-W: Tahanan tercatat 221,62 Ω. V-W: Tahanan tercatat 221,82 Ω.

Nilai yang seimbang di antara ketiga fase menunjukkan bahwa lilitan kawat motor dalam kondisi baik dan tidak ada kerusakan serius seperti hubung singkat antar-belitan.

$$PI = \frac{22.2}{8.58} = 2.59$$

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Nilai ini dihitung dari perbandingan Tahanan Isolasi 10 menit dengan 1 menit. Berdasarkan standar industri, nilai 2,59 dikategorikan sebagai Normal.

Tabel 6 Setelah Overhaul

UVW - Ground		Phase to Phase		Result
1 Menit	8.46 GΩ	U-V	224.4Ω	
5 menit	23.1 GΩ	U-W	224.2Ω	
10 menit	30.0 GΩ	V-W	224.2Ω	
PI				
2.59				

Tabel 6 menyajikan hasil pengujian diagnostik yang sama pada motor CWP-B yang dilakukan setelah perawatan besar (*overhaul*). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi efektivitas perawatan. Tahanan Isolasi Terhadap Tanah (UVW-Ground) Pengukuran 1 Menit: Tahanan isolasi tercatat 8,46 GΩ, Pengukuran 5 Menit: Tahanan isolasi meningkat tajam menjadi 23,1 GΩ, Pengukuran 10 Menit: Tahanan isolasi mencapai 30,0 GΩ.

Meskipun nilai 1 menit sedikit menurun, nilai 10 menit menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan kondisi sebelum *overhaul* (dari 22,2 menjadi 30,0 GΩ), mengonfirmasi bahwa perawatan telah meningkatkan kualitas isolasi terhadap tanah.

Tahanan Lilitan Antar-Fase (Phase to Phase) U-V: Tahanan tercatat 224,4 Ω, U-W: Tahanan tercatat 224,2 Ω, V-W: Tahanan tercatat 224,2 Ω. Nilai tahanan lilitan antar-fase tetap konsisten dan seimbang, menunjukkan lilitan kawat motor tetap dalam kondisi baik.

$$PI = \frac{30.0}{8.46} = 3.55$$

Nilai ini meningkat dari 2,59 (sebelum *overhaul*) menjadi 3,55. Berdasarkan standar industri, nilai 3,55 dikategorikan sebagai Baik. Peningkatan PI menunjukkan isolasi motor menjadi lebih kering dan memiliki kualitas yang lebih baik setelah *overhaul*.

Secara keseluruhan, meskipun kondisi isolasi motor sebelum *overhaul* sudah tergolong "Normal" dengan nilai Tahanan Isolasi yang tinggi, proses *overhaul* (pemeliharaan) berhasil meningkatkan kualitas dielektrik motor, yang ditunjukkan oleh peningkatan substansial pada Indeks Polarisasi dari 2,59 menjadi 3,55. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa motor kini berada dalam kondisi lebih baik untuk operasi berkelanjutan, yang sejalan dengan tujuan pemeliharaan preventif di PT PLN Indonesia Power UBP Cilegon.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

H. Arus Bocor

Arus bocor isolasi adalah arus listrik yang sangat kecil yang mengalir melalui atau melintasi permukaan material isolasi lilitan motor ketika tegangan diterapkan. Pengukuran arus bocor adalah cara untuk memastikan dan mengukur adanya kebocoran arus yang terdeteksi melalui pengukuran Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance* atau IR).

Persamaan yang digunakan untuk mengukur tahanan isolasi dengan mengetahui adanya arus bocor yang terjadi pada motor induksi. Untuk memastikan apakah adanya arus bocor harus mengetahui nilai rata dari *Insulation resistance* :

$$IR \text{ rata - rata} = \frac{\Sigma IR}{n}$$

Keterangan :

- IR = Insulating Resistance ($G\Omega$)
- N = Jumlah data

$$I_{is} = \frac{V (LL)}{IR \text{ rata - rata}}$$

Untuk memastikan apakah adanya arus bocor pada motor induksi dengan adanya pengukuran *insulation resistance*. Rumus yang digunakan untuk mencari arus bocor dapat digunakan sebagai persamaan berikut:

Keterangan :

- I_{is} = Arus bocor isolasi (mA)
- $V(LL)$ = Tegangan line to line (V)

$$IR \text{ rata}2 = \frac{8.58 + 18.6 + 22.2}{3} = 16.46 \text{ G}\Omega$$

$$I_{is} = \frac{6000}{16.46 \times 10^6} = 0.364 \text{ mA}$$

Arus bocor isolasi motor CWP-B sebelum *overhaul* adalah 0,364mA. Karena arus bocor ini sangat kecil (jauh di bawah batas bahaya untuk motor besar), ini mengkonfirmasi bahwa isolasi motor berada dalam kondisi yang baik meskipun sebelum perawatan. Kemudian perhitungan setelah *overhaul*.

$$IR \text{ rata}2 = \frac{8.46 + 23.1 + 30.0}{3} = 20.52 \text{ G}\Omega$$

$$I_{is} = \frac{6000}{20.52 \times 10^6} = 0.00029 \text{ mA}$$

Arus bocor isolasi motor CWP-B setelah *overhaul* adalah 0,00029 mA. Terjadi penurunan arus bocor yang signifikandari sebelum dan sesudah. Penurunan ini disebabkan oleh kenaikan rata-rata Tahanan Isolasi setelah perawatan, yang menunjukkan bahwa kualitas isolasi telah meningkat dan kebocoran arus telah berkurang.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian hasil pengukuran yang diperoleh memberikan data kuantitatif yang andal mengenai status isolasi motor pada dua kondisi, yaitu sebelum dan sesudah *overhaul*.

1. Kondisi Awal Isolasi Sebelum *overhaul*, kondisi isolasi motor CWP-B tergolong Normal. Hal ini ditunjukkan oleh nilai Indeks Polarisasi (PI) sebesar 2,59 dan Tahanan Isolasi 1 Menit yang tinggi sebesar 8,58 GΩ. Arus bocor isolasi terhitung sebesar 0,364 mA.
2. Efektivitas *Overhaul* dalam proses *overhaul* terbukti meningkatkan kualitas isolasi secara signifikan. Setelah *overhaul*, nilai Indeks Polarisasi (PI) meningkat menjadi 3,55, yang dikategorikan sebagai Baik. Peningkatan ini mengindikasikan isolasi lilitan telah menjadi lebih kering dan bersih.
3. Dampak dan Data Perolehan dalam peningkatan kualitas isolasi tersebut berdampak pada penurunan drastis arus bocor isolasi motor, dari 0,364mA menjadi hanya 0,00029 mA. Data ini menunjukkan bahwa motor CWP-B kini berada dalam kondisi yang lebih baik dan lebih andal untuk operasi berkelanjutan, sejalan dengan tujuan pemeliharaan preventif.

V. REFERENSI

- [1] Z. Zou, S. Liu, and J. Kang, "Degradation Mechanism and Online Electrical Monitoring Techniques of Stator Winding Insulation in Inverter-Fed Machines: A Review," Oct. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/wevj15100444.
- [2] A. Decner, M. Baranski, T. Jarek, and S. Berhausen, "Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings," Nov. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15228465.
- [3] A. Y. Mirza, A. Bazzi, H. H. Nguyen, and Y. Cao, "Motor Stator Insulation Stress Due to Multilevel Inverter Voltage Output Levels and Power Quality†," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15114091.
- [4] M. Eckert, P. Mraz, C. Ballweg, and J. Pihera, "Partial discharge behavior and insulation failures detection in electrical devices subjected to impulse voltage excitation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 172, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.111078.
- [5] L. Szamel and J. Oloo, "Monitoring of Stator Winding Insulation Degradation through Estimation of Stator Winding Temperature and Leakage Current," *Machines*, vol. 12, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/machines12040220.
- [6] R. Hemmati, F. Wu, and A. El-Refaie, "Survey of Insulation Systems in Electrical Machines."

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

- [7] G. D. Haryadi, S. Pertiwanda, and D. R. Ismail, “Haryadi dkk. / Prosiding SNTTM XVI,” 2017.
- [8] F. Pujiyanto, “Analisis Winding Insulation Pada Performa Induksi Motor Tiga Phase Berbasis Logika Fuzzy,” *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, vol. 20, no. 2, pp. 118–134, Jul. 2022, doi: 10.33489/mibj.v20i2.296.
- [9] “P1743501d23f1d0eb1865b16d397865f29f”.
- [10] A. Abdulkareem, T. Anyim, O. Popoola, J. Abubakar, and A. Ayoade, “Prediction of induction motor faults using machine learning,” *Heliyon*, vol. 11, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41493.
- [11] K. Schiewaldt, G. Lucas, M. Rocha, C. Fraga, and A. Andreoli, “Identification of Stator Winding Insulation Faults in Three-Phase Induction Motors Using MEMS Accelerometers,” MDPI AG, Jan. 2020, p. 66. doi: 10.3390/ecsa-6-06630.
- [12] F. Pujiyanto, “Analisis Winding Insulation Pada Performa Induksi Motor Tiga Phase Berbasis Logika Fuzzy,” *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, vol. 20, no. 2, pp. 118–134, Jul. 2022, doi: 10.33489/mibj.v20i2.296.
- [13] R. S. Widagdo, P. Slamet, and A. H. Andriawan, “Estimated Life Loss of a 3-Phase Induction Motor Based on Insulation Resistance Test at PT. Delta Jaya Mas,” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 15, no. 3, p. 146, Jun. 2025, doi: 10.22441/jte.2024.v15i3.001.
- [14] N. B. Rao and S. J. Rajan, “Assessment of Stator Winding Insulation Part 1-Review of Deterioration Mechanisms and Condition Monitoring Techniques,” 2010.
- [15] D. B. Pratama and P. Surya, “Damage Analysis and Repair in Overhaul Motor Pump Water Treatment Plant (WTP) PT Petrokimia Gresik Sub Babat Lamongan Plant using FMEA Method.” [Online]. Available: <https://journal.trunojoyo.ac.id/triac>