PENGEMBANGAN MODEL *HEALTH INDEX* TRANSFORMATOR *MEDIUM VOLTAGE* BERBASIS *DYNAMIC NON-LINEAR PENALTY SYSTEM* DAN *MULTI-TIER TRIGGERING PROTOCOL* UNTUK MITIGASI RISIKO ISO 55001

TESIS

Diajukan untuk memenuhi
Persyaratan gelar Magister Teknik

WISNU UMBARAN

092024090205

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS GLOBAL JAKARTA

2026

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Depok, 8 Agustus 2026

Mahasiswa,



Wisnu Umbaran

NPM. 092024090205

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Tesis ini diajukan oleh:

Nama	: Wisnu Umbaran
NIM	: 092024090205
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	: Pengembangan Model *Health Index Transformator Medium Voltage* Berbasis *Dynamic Non-Linear Penalty System* dan *Multi-Tier Triggering Protocol* untuk Mitigasi Risiko ISO 55001

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta.

DEWAN PEMBIMBING

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.	Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S09201911003	NIK.S092023080003

Ketua Program Studi
Magister Teknik Elektro

Hamzah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK.S092023080003

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Agustus 2026

Dipindai dengan CamScanner

HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh:

Nama	: Wisnu Umbaran
NIM	092024090205
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Judul Tesis	: Pengembangan Model *Health Index Transformator Medium Voltage* Berbasis *Dynamic Non-Linear Penalty System* dan *Multi-Tier Triggering Protocol* untuk Mitigasi Risiko ISO 55001

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Global Jakarta.

DEWAN PENGUJI

Penguji	: Dr. Antonius Darma Setiawan, S.Si., M.T.	( )
Penguji	: Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si.	( )
Penguji	: Prof. Dr. I Nyoman Jujur, M.Eng.	( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 8 Agustus 2026

Dipindai dengan CamScanner

FM-JGU-L-004

JGU Jakarta Global University

Form I2 - Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : WISNU UMBARAN

NIM : 092024090205

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisa Penurunan Kualitas Isolasi Transformator Menggunakan Metode Breakdown Voltage (BDV), Disolved Gas Analysis (DGA) dan Dielectric Response Analysis (DIRANA) Untuk Menentukan Health Indeks Pada Transformator Tenaga**

Dosen Penguji II : Dr. Herwanto, S.Kom., M.Si.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Abstrak perlu di ringkas dg baik, mencakup latar belakang, tujuan, metode, hasil dan kesimpulan	abstrak sudah diringkas dan mencakup latar belakang, tujuan, hasil dan kesimpulan hal vii	
2	Gunakan metode pembobotan untuk menggabungkan hasil BDV, DGA dan DIRANA	Metode pembobotan menggunakan AHP hal 23	
3	Validasi model HI dengan data ke tegangan transformator metode lain Analisa perbedaan dan kesamaan hasil	karena keterbatasan metode AHP maka di tambahkan metode Dynamic Non-Linear Penalty Factor System hal 24	

Depok, _____ 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

(_____)

NIP.

Dipindai dengan CamScanner

Dipindai dengan CamScanner

FM/JGUL/004

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SKRIPSI

Nama Mahasiswa : WISNU UMBARAN

NIM : 092024090205

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisa Penurunan Kualitas Isolasi Transformator Menggunakan Metode Breakdown Voltage (BDV), Disolved Gas Analysis (DGA) dan Dielectric Response Analysis (DIRANA) Untuk Menentukan Health Indeks Pada Transformator Tenaga**

Dosen Penguji III : Dr. Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Analisis dipertajam dengan penambahan analisis penelitian la	1. Ditambahkan Subbab 4.6 "Perbandingan Hasil dengan Penelitian Terdahulu" beserta Tabel 4.13 "Perbandingan Kuantitatif Hasil Penelitian dengan Studi Terdahulu". Hasil penelitian (fenomena blind spot model linier, disosiasi BDV–DIRANA, rentang TDCG, dan bobot AHP) dibandingkan secara kuantitatif dengan data riil dari Zaldivar & Romero (2022), Prasojo et al. (2019), dan Li et al. (2023). hal 40-42	
2	Penjelasan pembobotan 3 alat		
3	Bagian akhir abstrak disesuaikan dengan kesimpulan		
	2. Ditambahkan paragraf justifikasi teknis pada Subbab 3.4 "Metode Penentuan Bobot AHP" yang menjelaskan alasan urutan bobot DGA (40%) > DIRANA (35%) > BDV (25%): hal 24-25		
	3. Keempat poin inti Abstrak telah selaras dengan keempat poin Kesimpulan Bab V, yaitu: 1) Karakteristik kondisi fisik-kimia isolasi trafo (TP1 & TB1);		
	2) Resolusi konflik data melalui Dynamic Penalty Factor System 3) Efisiensi pemeliharaan melalui Multi-Tier Conditional Triggering Protocol; 4) Keselarasan manajemen risiko finansial dengan ISO 55001 hal vii		

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

NIP.

Dipindai dengan CamScanner

FM/JGU/ 004

JGU Jakarta Global University

Form I2 – Lembar Monitoring Revisi Sidang Skripsi	Revisi ke: 1 Tanggal revisi: 13 Agustus 2020

LEMBAR MONITORING REVISI SIDANG SKRIPSI

Nama Mahasiswa : WISNU UMBARAN

NIM : 092024090205

Prodi : S2 - Teknik Elektro

Judul Skripsi : **Analisa Penurunan Kualitas Isolasi Transformator Menggunakan Metode Breakdown Voltage (BDV), Disolved Gas Analysis (DGA) dan Dielectric Response Analysis (DIRANA) Untuk Menentukan Health Indeks Pada Transformator Tenaga**

Dosen Penguji I : Dr. Antonius Darma Setiawan. S.Si., M.T.

No	Isi Komentar/ Saran	Revisi/jawaban penulis	Paraf Penguji /Tanggal Persetujuan
1	Tambakan kontribusi #1: konfigurasi kapan metode	Sudah di jelaskan di sub-bab 3.3 multy tier conditional tingkatan protocol (hal 23-25)	
	DGA, BDV, dan DIRANA dilakukan		
2	kontribusi #2: Metode apa yang digunakan untuk menentukan bobot DGA, BDV, dan DIRANA	Sudah di jelaskan di sub bab 3.4 metode penentuan AHP hal 25	
	pada perhitungan HI		

Depok, 6 Agustus 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi

( )

Dipindai dengan CamScanner

Form 6 – Lembar Konsultasi Proposal	Revisi ke: 3 Tanggal revisi: 01 Oktober 2024

LEMBAR KONSULTASI SKRIPSI

Nama mahasiswa : Wisnu Umbaran

NIM : 092024090205

Judul : Analisia Penurunan Kualitas Isolasi Transformator Menggunakan Metode Breakdown Voltage (BDV), Disolved Gas Analisys (DGA) Dan Dielectric Response Analysis (DIRANA) Untuk Menentukan Health Indeks Pada Transformator Tenaga

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Yanuar Zulardiansyah Arief, S.T., M.T.

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	21-5-2026	Pengarahan terkait evaluasi Progress tesis tahap 1	yza
2	24-5-2025	Pengiriman dan review Revisi sempro (By Email)	yza
3	5-6-2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Faisal & Bp Muhid	yza
4	9-6-2026	Pengiriman dan review Revisi BAB 1-3 dan draft BAB 4 (By Email)	yza
5	10-6-2026	Presentasi dan review bab 1-4	yza
6	13-6-2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Pauji	yza
7	26-6-2026	Pengiriman revisi bab 1-4 (by Email)	yza
8			

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, 26 Juni 2026
Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Tekik Elektro.

Hamzah, S.T, M.T, Ph.d

Form B – Lembar Konsultasi Proposal	Revisi ke: 3 Tanggal revisi: 01 Oktober 2024

LEMBAR KONSULTASI SKRIPSI

Nama mahasiswa : Wisnu Umbaran

NIM : 092024090205

Judul : Analisia Penurunan Kualitas Isolasi Transformator Menggunakan Metode Breakdown Voltage (BDV), Disolved Gas Analisys (DGA) Dan Dielectric Response Analysis (DIRANA) Untuk Menentukan Health Indeks Pada Transformator Tenaga

Dosen Pembimbing II : Hamzah, S.T, M.T, P.hd

No.	Tanggal	Uraian Kegiatan yang Dilakukan	Paraf Dosen
1	21-5-2026	Pengarahan terkait evaluasi Progress tesis tahap 1	
2	24-5-2025	Pengiriman dan review Revisi sempro (By Email)	
3	5-6-2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Faisal & Bp Muhid	
4	9-6-2026	Pengiriman dan review Revisi BAB 1-3 dan draft BAB 4 (By Email)	
5	10-6-2026	Presentasi dan review bab 1-4	
6	13-6-2026	Evaluasi tahap 1 bimbingan Dr Yanuar & Dr Hamzah , Bp Pauji	
7			
8			

* Minimal 4 kali pertemuan

Depok, 26 Juni 2026
Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Elektro.

Hamzah, S.T, M.T, Ph.d

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Global Jakarta. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

(1) Allah سُبْحَانَهُ وَتَعَالَى, atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang diberikan sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik;

(2) Dr. Yanuar Zulardiansyah Arief, CEng. selaku Dosen Pembimbing 1 dan Hamzah, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 2, yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;

(3) PT Air Bersih Jakarta, yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data pengujian BDV, DGA, dan DIRANA yang diperlukan;

(4) orang tua dan istri saya, yang telah memberikan bantuan, dukungan material dan moral, serta doa yang tiada henti; dan

(5) rekan-rekan Departemen Planning dan Maintenance, yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang manajemen aset kelistrikan.

Depok, 8 Agustus 2026

Penulis

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Global Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Wisnu Umbaran
NIM	: 092024090205
Program Studi	: Magister Teknik Elektro
Jenis Karya Ilmiah	: Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Global Jakarta Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (Non-exclusive Royalty Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengembangan Model *Health Index Transformator Medium Voltage* Berbasis *Dynamic Non-Linear Penalty System* dan *Multi-Tier Triggering Protocol* untuk Mitigasi Risiko ISO 55001

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Non-eksklusif ini Universitas Global Jakarta berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 8 Agustus 2026

Yang menyatakan,



Wisnu Umbaran

Dipindai dengan CamScanner

ABSTRAK

Transformator distribusi tegangan menengah pada instalasi pengolahan air (IPA Pejompongan 2 dan IPA Buaran) menghadapi risiko kegagalan operasional yang berdampak pada kontinuitas produksi air bersih. Model *Health Index* (HI) konvensional berbasis *Weighted Sum Model* (WSM) rentan terhadap bias kompensasi semu (*cancellation effect*), yaitu kondisi ketika satu parameter yang sangat baik menutupi risiko parameter lain yang kritis. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model *Dynamic Penalty Factor System* yang mengoreksi HI Linear melalui faktor penalti berbasis skor kondisi kritis *Dissolved Gas Analysis* /DGA (deteksi asetilena) dan *Dielectric Response Analysis*/DIRANA (kadar air isolasi kertas), serta merancang *Multi-Tier Conditional Triggering Protocol* untuk efisiensi jadwal pemeliharaan. Empat unit transformator (TB1, TB2, TP1, TP2) diuji menggunakan *Breakdown Voltage* (BDV), DGA, dan DIRANA. Bobot parameter ditentukan melalui *Analytic Hierarchy Process* (AHP): DGA 40%, DIRANA 35%, BDV 25%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model linier konvensional mengklasifikasikan TP1 sebagai kategori Sangat Baik (HI Linear = 86%), namun model *Dynamic Penalty Factor System* mengoreksinya menjadi 77,4% (kategori Baik) setelah terdeteksi kadar air kertas isolasi 3,2% (kategori Moist). Koreksi serupa terjadi pada TB1, dari 80% menjadi 72%, akibat terdeteksinya gas asetilena (1,43 ppm) yang mengindikasikan awal *arc discharge*. Simulasi Monte Carlo (20.000 iterasi) memvalidasi kestabilan model terhadap ketidakpastian pengukuran, dengan tingkat validasi komputasional mencapai 100% terhadap 24 parameter yang diuji. Model ini memberikan justifikasi teknis-ekonomis bagi manajemen aset, dengan estimasi potensi kerugian finansial akibat pemadaman liar sebesar Rp206.496.000,00 per jam di IPA Pejompongan 2 dan Rp295.920.000,00 per jam di IPA Buaran. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan kerangka manajemen risiko aset transformator yang selaras dengan standar ISO 55001, memberikan peringatan dini (*early warning*) yang lebih akurat dibandingkan model konvensional.

Kata kunci: Health Index, transformator, Dynamic Penalty Factor, Dissolved Gas Analysis, ISO 55001

ABSTRACT

Medium-voltage distribution transformers at water treatment installations (IPA Pejompongan 2 and IPA Buaran) face operational failure risks that impact clean water production continuity. Conventional Health Index (HI) models based on the Weighted Sum Model (WSM) are prone to a cancellation effect bias, where one excellent parameter masks the risk posed by another critical parameter. This study aims to develop a Dynamic Penalty Factor System that corrects the Linear HI through a penalty factor based on critical condition scores from Dissolved Gas Analysis/DGA (acetylene detection) and Dielectric Response Analysis/DIRANA (paper insulation moisture content), and to design a Multi-Tier Conditional Triggering Protocol for maintenance scheduling efficiency. Four transformer units (TB1, TB2, TP1, TP2) were tested using Breakdown Voltage (BDV), DGA, and DIRANA. Parameter weights were determined through the Analytic Hierarchy Process (AHP): DGA 40%, DIRANA 35%, BDV 25%. The results show that the conventional linear model classified TP1 as Very Good (Linear HI = 86%), but the Dynamic Penalty Factor System corrected this to 77.4% (Good category) after detecting a paper insulation moisture content of 3.2% (Moist category). A similar correction occurred for TB1, from 80% to 72%, due to detected acetylene gas (1.43 ppm) indicating early arc discharge. Monte Carlo simulation (20,000 iterations) validated the model's stability against measurement uncertainty, with computational validation reaching 100% agreement across 24 tested parameters. This model provides technical-economic justification for asset management, with estimated financial loss potential from unplanned outages of Rp206,496,000 per hour at IPA Pejompongan 2 and Rp295,920,000 per hour at IPA Buaran. This research contributes to the development of a transformer asset risk management framework aligned with ISO 55001, providing more accurate early warning than conventional models.

Keywords: Health Index, transformer, Dynamic Penalty Factor, Dissolved Gas Analysis, ISO 55001

Daftar Isi

HALAMAN JUDUL ..... **i**
PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS ..... **ii**
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING ..... **iii**
HALAMAN PENGESAHAN DEWAN PENGUJI ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH ..... **vi**
ABSTRAK (BAHASA INDONESIA) ..... **vii**
ABSTRACT (BAHASA INGGRIS) ..... **viii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Kontribusi Penelitian 5
1.6 Batasan Penelitian 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **8**
2.1 Penelitian Terdahulu (*State-of-the-Art*) 8
2.2 Sistem Isolasi Komposit Minyak-Kertas Transformator 11
2.3 Prinsip Dasar Metode Diagnostik Transformator 12
2.3.1 Uji Breakdown Voltage (BDV) 12
2.3.2 Uji Dissolved Gas Analysis (DGA) 13
2.3.3 Uji Dielectric Response Analysis (DIRANA / FDS-PDC) 14
2.4 Teori Pembobotan dan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) 15
2.5 Formulasi Dynamic Non-Linear Penalty Factor System 17
2.6 Kerangka Pemeliharaan ISO 55001 dan Dampak Risiko Ekonomi 18
2.7 Kerangka Pemikiran Penelitian 20
2.8 Hipotesis Penelitian 20
2.8.1 Hipotesis Mayor 20
2.8.2 Hipotesis Minor 20
BAB III METODE PENELITIAN **22**

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian 22
3.2 Tempat dan Objek Penelitian 22
3.3 Alur Pelaksanaan Pengujian: Multi-Tier Conditional Triggering Protocol. 23
3.3.1 Tier 1: Pemantauan Kontinu (*Online & Real-Time Monitoring*) 23
3.3.2 Tier 2: Pemeliharaan Rutin Terjadwal (*Triggered Offline-Routine*) 23
3.4 Metode Penentuan Bobot AHP (*Analytic Hierarchy Process*)..... 25
3.5 Formulasi Matematika Dynamic Non-Linear Penalty Factor System 26
3.5.1 Tahap A: Perhitungan *Health Index* Dasar (***HIbase***) 26
3.5.2 Tahap B: Kuantifikasi Faktor Penalti Dinamis (***Pkritis***)..... 26
3.5.3 Tahap C: Perhitungan Akhir Indeks Kesehatan Terkoreksi (***HIfinal***)27
3.6 Klasifikasi Kesehatan dan Evaluasi Risiko ISO 55001 27
3.7 Diagram Alir Penelitian..... 28
3.8 Prosedur Validasi Output Penelitian (*Multi-Method Validation*) 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 32
4.1 Rekapitulasi Data Empiris Lapangan..... 32
4.2 Pembentukan Skor Kondisi (Si) dan Health Index per Parameter..... 33
4.2.1 Skor dan *Health Index* Berdasarkan BDV 33
4.2.2 Skor dan *Health Index* Berdasarkan DGA 34
4.2.3 Skor dan *Health Index* Berdasarkan DIRANA 34
4.3 Evaluasi *Multi-Tier Conditional Triggering Protocol* 35
4.4 Analisis Komparasi *Health Index*: Linier Konvensional vs. Penalti Non-Linier..... 36
4.5 Pembahasan Spesifik Resolusi Konflik Data Trafo TP1 dan TB1..... 39
4.6 Perbandingan Hasil dengan Penelitian Terdahulu..... 40
4.7 Peta Keputusan Strategis dan Mitigasi Risiko ISO 55001..... 43
4.8 Validasi Komputasional dan Simulasi Monte Carlo 44
4.8.1 Metodologi Validasi 45
4.8.2 Simulasi Monte Carlo: Kepekaan terhadap Ketidakpastian Pengukuran 45
BAB V PENUTUP..... 48
5.1 Kesimpulan 48
5.2 Saran..... 49

DAFTAR PUSTAKA..... 51
LAMPIRAN..... 57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Klasifikasi Health Index Terkoreksi dan Tindakan Manajemen Risiko ISO 55001 28
Tabel 4.1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Empiris Lapangan 32
Tabel 4.2 Klasifikasi Skor (Si) Berdasarkan BDV (IEC 60156:2018) 33
Tabel 4.3 Hasil Skor dan *Health Index* BDV 33
Tabel 4.4 Klasifikasi Kondisi Berdasarkan TDCG (IEEE Std C57.104-2019) 34
Tabel 4.5 Rekapitulasi DGA *Fault Index* (DGAF) dan *Health Index* DGA 34
Tabel 4.6 Klasifikasi Skor (Si) Berdasarkan *Moisture in Cellulose* (DIRANA) .. 34
Tabel 4.7 Hasil Skor dan *Health Index* DIRANA 35
Tabel 4.8 Evaluasi Logika Pemicuan Pemeliharaan Berjenjang 35
Tabel 4.9 Rekapitulasi *Health Index* Final per Parameter (Model Linier) 36
Tabel 4.10 Perhitungan *Dynamic Penalty Factor* (PF) per Transformator 37
Tabel 4.11 Rekapitulasi *Health Index* Final Setelah Penerapan *Dynamic Penalty Factor System* 38
Tabel 4.12 Perbandingan Kuantitatif Hasil Penelitian dengan Studi Terdahulu ... 42
Tabel 4.13 Matriks Keputusan Pemeliharaan dan Alokasi Anggaran ISO 55001. 43
Tabel 4.14 Ringkasan Hasil Validasi Komputasional (24 Parameter) 45
Tabel 4.15 Hasil Simulasi Monte Carlo (n = 20.000 iterasi per unit) 46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peralatan Uji Breakdown Voltage (BDV) Megger OTS 13
Gambar 2.2 Perangkat Uji Dielectric Response Analysis (DIRANA) beserta Kelengkapan Aksesorisnya..... 144
Gambar 3.1 Diagram Alir Multi-Tier Conditional Triggering Protocol..... 29

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator daya merupakan salah satu aset paling vital dan bernilai tinggi dalam infrastruktur sistem penyediaan tenaga listrik maupun instalasi industri strategis. Pada Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPA) Pejompongan 2 dan IPA Buaran, transformator Tegangan Menengah (TM/MV) berkapasitas 1250 kVA dan 1600 kVA memikul peran krusial untuk menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 400 V. Tegangan sekunder ini digunakan secara kontinu untuk mengoperasikan motor-motor pompa air baku, sistem aerasi, penambahan bahan kimia, hingga proses filtrasi utama. Keandalan operasional transformator ini berbanding lurus dengan kontinuitas pasokan air bersih bagi masyarakat perkotaan, kawasan niaga, hingga zona vital negara seperti Istana Negara.

Sebagai aset kritis, kegagalan operasional (*forced outage*) pada transformator daya membawa dampak kerugian ekonomi yang sangat masif. Pada IPA Pejompongan 2 yang memiliki kapasitas produksi mencapai 4.780 liter per detik (l/s) dengan tarif air rata-rata konsumen sebesar Rp12.000,00 per m^3, terhentinya aliran listrik yang menyebabkan kegagalan proses pengolahan air menimbulkan potensi kerugian finansial langsung sebesar **Rp206.496.000,00 per jam**. Risiko serupa turut membayangi IPA Buaran yang memiliki kapasitas produksi lebih besar, yaitu **6.850 l/s**, sehingga potensi kerugian finansial akibat pemadaman liar pada instalasi ini diperkirakan mencapai **Rp295.920.000,00 per jam**. Besarnya risiko finansial ini menuntut adanya strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance* / CBM) yang presisi, objektif, dan mampu memprediksi degradasi isolasi sebelum terjadi kegagalan katastrofik, sejalan dengan standar manajemen aset internasional ISO 55001.

Sistem isolasi transformator daya merupakan sistem komposit yang terdiri dari kombinasi isolasi cair (minyak mineral) dan isolasi padat (kertas selulosa/*pressboard*). Selama masa operasinya, isolasi komposit ini terus

mengalami penuaan dan degradasi akibat stres termal, elektrik, mekanis, serta kontaminasi kelembapan dan oksigen. Secara konvensional, uji *Breakdown Voltage* (BDV) berbasis standar IEC 60156 telah menjadi metode standar industri yang paling sering digunakan karena kemudahan pelaksanaannya di lapangan. Namun, berbagai studi terbaru menegaskan bahwa pengujian BDV memiliki keterbatasan diagnostik yang mendasar. Uji BDV hanya sensitif terhadap kontaminasi makro fisis pada minyak (seperti air bebas dan partikel konduktif), tetapi **tidak mampu mendeteksi akumulasi kelembapan (*moisture content*) yang terperangkap di dalam isolasi padat kertas selulosa**.

Keterbatasan ini sering kali menimbulkan fenomena *blind spot* atau konflik data diagnostik yang berbahaya bagi manajemen aset. Sebagai contoh konkret pada data empiris lapangan unit **TP1** (Trafo Pejompongan 1), pengujian BDV menunjukkan nilai kekuatan dielektrik yang sangat prima yaitu sebesar 77,0 kV (kategori Sangat Baik). Namun, ketika dilakukan pengujian *Dielectric Response Analysis* (DIRANA) menggunakan teknik *Frequency Domain Spectroscopy* (FDS), terungkap bahwa isolasi kertas selulosa pada TP1 berada dalam kondisi lembap (*Moist*) dengan kadar air mencapai 3,2%. Tingginya kadar air pada kertas ini menyebabkan penurunan drastis pada parameter *Bubbling Inception Temperature* (BIT) hingga mencapai 137°C. Jika transformator TP1 dibebani secara penuh pada temperatur tinggi, gelembung uap air dapat terbentuk dan memicu kegagalan dielektrik mendadak, meskipun nilai BDV minyaknya terukur sangat tinggi.

Masalah ini diperparah oleh metode kalkulasi *Health Index* (HI) konvensional yang beredar di literatur maupun praktik industri saat ini. Sebagian besar formula HI masih mengandalkan penjumlahan rata-rata tertimbang linier (*Weighted Sum Model* / WSM). Dalam model linier, nilai parameter yang buruk (seperti skor DIRANA pada TP1) akan **terkompensasi secara semu** oleh nilai parameter lain yang sangat baik (seperti skor BDV dan DGA). Akibatnya, kalkulasi linier pada TP1 masih menghasilkan nilai HI sebesar 86% (kategori Sangat Baik), yang memberikan bias optimisme palsu kepada pengelola aset.

Di sisi lain, penerapan pengujian diagnostik canggih seperti DIRANA membutuhkan kondisi transformator dalam keadaan padam total (*offline &*

isolated) serta durasi eksekusi yang lama. Memadamkan transformator secara acak atau berkala tanpa indikasi awal yang jelas akan meningkatkan durasi *downtime* dan mengganggu stabilitas operasional WTP. Oleh karena itu, diperlukan sebuah arsitektur pemeliharaan berjenjang (*Multi-Tier Conditional Triggering Protocol*) yang memanfaatkan pemantauan *Dissolved Gas Analysis* (DGA) secara *online* dan uji BDV rutin sebagai pemicu (*trigger*) yang sah secara teknis dan ekonomis sebelum pengujian DIRANA dieksekusi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian tesis ini menawarkan sebuah kebaruan (*novelty*) melalui pengembangan model matematika *Health Index* berbasis **Dynamic Non-Linear Penalty Factor System** yang dikombinasikan dengan **Multi-Tier Conditional Triggering Protocol**. Pendekatan hibrida ini meruntuhkan bias kompensasi linier dengan menerapkan penalti eksponensial kuadratik saat parameter kritis berada di zona bahaya, sekaligus mengoptimalkan durasi pemadaman trafo demi melindungi keandalan pasokan air bersih Pejompongan sesuai koridor manajemen risiko finansial ISO 55001.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pengukuran kondisi isolasi cair dan padat pada sampel transformator MV di IPA Pejompongan 2 dan IPA Buaran berdasarkan metode *Breakdown Voltage* (BDV), *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dan *Dielectric Response Analysis* (DIRANA)?
2. Bagaimana merumuskan model matematika *Health Index* (HI) baru berbasis *Dynamic Non-Linear Penalty Factor System* untuk mengatasi bias kompensasi semu (*conflicting data resolution*) akibat kelemahan penjumlahan rata-rata tertimbang linier konvensional?
3. Bagaimana menyusun arsitektur pemeliharaan berjenjang (*Multi-Tier Conditional Triggering Protocol*) berbasis data DGA *online* dan BDV untuk memberikan justifikasi teknis-ekonomis sebelum pemadaman trafo saat uji DIRANA dieksekusi?

4. Bagaimana mengintegrasikan nilai kuantitatif *Health Index* terkoreksi dan parameter *Bubbling Inception Temperature* (BIT) ke dalam matriks keputusan manajemen risiko finansial ISO 55001 guna memitigasi potensi kerugian operasional sebesar Rp206.496.000,00 per jam?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik dan tingkat degradasi isolasi minyak-kertas pada empat unit transformator MV (TP1, TP2, TB1, TB2) melalui pengujian komparatif BDV, DGA, dan DIRANA.
2. Membangun dan memvalidasi model matematika *Health Index* terintegrasi yang menyuntikkan fungsi penalti eksponensial non-linier kuadratik ($\beta = 2$) untuk meruntuhkan nilai persentase kesehatan secara radikal ketika parameter kritis (DIRANA atau DGA) menyentuh kondisi anomali.
3. Merancang algoritma *Multi-Tier Conditional Triggering Protocol* berbasis Indeks Pemicu ($I_{trigger}$) untuk meningkatkan efisiensi pemeliharaan dan meminimalkan durasi pemadaman (*downtime*) trafo vital pada instalasi pengolahan air bersih.
4. Mentranslasikan hasil evaluasi teknik keinsinyuran menjadi rekomendasi kebijakan anggaran korporasi (OPEX untuk filtrasi minyak vs. CAPEX untuk perbaikan/pengadaan isolasi padat) yang akuntabel dan terjustifikasi sesuai standar ISO 55001.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat Teoritis (Akademis) :

1. **Pengembangan Metodologi CBM:** Memberikan kontribusi ilmiah berupa model matematika *Health Index* hibrida yang mampu menyelesaikan konflik data kontradiktif antara kekuatan dielektrik minyak makro dan kelembapan kertas selulosa mikro.

2. **Pengayaan Literatur Tegangan Tinggi:** Menyediakan landasan empiris dan formulasi komputasi numerik mengenai hubungan non-linier antara parameter gas terlarut (DGA), kekuatan tembus (BDV), dan respons dielektrik domain frekuensi (DIRANA/FDS) pada transformator distribusi Tegangan Menengah.

Manfaat Praktis (Industri)

1. **Peningkatan Keandalan Aset Vital:** Menyediakan panduan Standar Operasional Prosedur (SOP) pemeliharaan berjenjang bagi teknisi dan penyelia listrik di IPA Pejompongan dan Buaran untuk mendeteksi potensi kegagalan secara dini tanpa melakukan pemadaman trafo yang tidak perlu.
2. **Alat Pengambil Keputusan Finansial (ISO 55001):** Memberikan kerangka kerja kuantitatif bagi jajaran manajer aset dan direksi keuangan dalam mempertimbangkan alokasi anggaran operasional (OPEX) maupun anggaran modal (CAPEX) berbasis bukti teknis yang objektif guna menghindari *forced outage* senilai Rp206 Juta per jam.

1.5 Kontribusi Penelitian

Kebaruan ilmiah (*scientific contribution*) dari penelitian tesis ini meliputi tiga pilar utama:

1. **Kontribusi Metodologis (*Dynamic Non-Linear Penalty Factor System*):** Pengembangan formulasi matematika *Health Index* baru yang menggabungkan pembobotan AHP dengan fungsi penalti eksponensial kuadratik ($\beta = 2$). Berbeda dengan model linier terdahulu yang menyamarkan kondisi kritis kertas isolasi, model ini secara sistematis memotong nilai kesehatan trafo hingga $60\%(\alpha = 0{,}60)$ jika kadar air selulosa atau gas asetilen menyentuh zona bahaya, sehingga menghasilkan penilaian kondisi yang jauh lebih aman bagi industri.
2. **Kontribusi Praktis-Operasional (*Multi-Tier Conditional Triggering Protocol*):** Penyusunan arsitektur CBM sekuensial yang memanfaatkan pemantauan DGA *online* (Tier 1) dan BDV rutin (Tier 2) untuk menghitung

Triggering Index ($I_{trigger}$). Protokol ini memberikan kriteria pemicuan yang ketat kapan uji diagnostik mendalam DIRANA (Tier 3) wajib dieksekusi, sehingga mengoptimalkan durasi pemadaman trafo cadangan WTP.

3. **Kontribusi Manajerial-Ekonomi (Integrasi Risiko Finansial ISO 55001):** Integrasi metrik keinsinyuran kritis—khususnya persentase *Health Index* terkoreksi dan *Bubbling Inception Temperature* (BIT)—langsung ke dalam kalkulasi risiko bisnis kuantitatif. Penelitian ini berhasil menjembatani data fisik-kimia ketenagalistrikan murni dengan mitigasi risiko kerugian operasional produksi air bersih senilai Rp206.496.000,00 per jam.

1.6 Batasan Penelitian

Untuk menjaga fokus dan kedalaman pembahasan, penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Objek penelitian dibatasi pada empat unit transformator tenaga Tegangan Menengah ($20\,\text{kV}/400\,\text{V}$) dengan kapasitas 1250 kVA dan 1600 kVA berisolasi minyak mineral yang beroperasi di IPA Pejompongan 2 dan IPA Buaran.
2. Parameter pengujian dielektrik cair dibatasi pada nilai *Breakdown Voltage* (BDV) sesuai standar IEC 60156:2018.
3. Parameter gas terlarut dibatasi pada analisis tujuh gas utama (*Total Dissolved Combustible Gas* / TDCG) mengacu pada standar IEEE Std C57.104-2019.
4. Parameter dielektrik padat dibatasi pada evaluasi respons dielektrik menggunakan instrumen OMICRON DIRANA (rentang frekuensi $1\,\text{mHz} - 1\,\text{kHz}$) untuk mengestimasi kadar air selulosa ($\%H_2O$), konduktivitas minyak, dan *Bubbling Inception Temperature* (BIT).

5. Simulasi dan validasi matematika algoritma dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python (NumPy, SciPy, Matplotlib) pada lingkungan Jupyter Notebook berbasis data empiris lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, R., Ji, L., Mingze, Z., & Hammad, M. Z. (2025). A method for extracting characteristic parameters of frequency domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation using modified Cole–Cole model. *Electronics*, 14(13), Article 2656. https://doi.org/10.3390/electronics14132656

Akbari, A., et al. (2021). Advancements in dielectric response measurements for transformer diagnostics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(3), 915–923. https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009432

Che, J., Park, G., Oh, J., Pyo, S.-H., An, B., & Park, T. (2024). Power transformer health index using cost-sensitive learning to consider the impact of misclassification. *IEEE Access*, 12, 191790–191807. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3516785

Cheng, J., Cho, S., Tan, Y. P., & Hu, G. (2023). Survey of prognostics and health management for transformers: From statistical analysis to condition-based diagnostics. In *Proceedings of the PHM Society Asia–Pacific Conference* (Vol. 4).

CIGRÉ Working Group A2.45. (2019). *Moisture measurement and control in oil-filled transformers* (CIGRÉ Technical Brochure 771). CIGRÉ.

CIGRÉ Working Group A2.49. (2019). *Condition Assessment and Health Indexing of Power Transformers* (Technical Brochure No. 771). International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ).

Danikas, M. G., et al. (2020). A review of dielectric response methods for power transformer insulation diagnosis. *IEEE Access*, 8, 20202–20215. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969909

Esmaeili Nezhad, A., & Samimi, M. H. (2022). A review of the applications of machine learning in the condition monitoring of transformers. *Energy Systems*.

Ghasemi, S., Shayegani-Akmal, M., & Mohseni, H. (2018). Power transformer health index calculation using fuzzy logic and expert knowledge. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 176–183. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.026

Guo, H., & Guo, L. (2022). Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data. *Energy Reports*, 8, 9038–9045.

Hao, J., Xu, Z., Liao, R., & Yang, L. (2025). Frequency domain spectroscopy analysis for insulation moisture content estimation in power transformers using adaptive dielectric relaxation models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 32(1), 112–121.

Heryadi, T. (2025). Analisis health index transformator distribusi inti amorphous untuk penentuan skala prioritas pemeliharaan menggunakan metode AHP. 10(12), 12703–12711.

IEEE Standards Association. (2019). *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers* (IEEE Std C57.104-2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers.

International Electrotechnical Commission. (2018). *Fluids for Electrotechnical Applications – Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear* (IEC 60156:2018). IEC Geneva.

International Organization for Standardization. (2014). *Asset Management – Management Systems – Requirements* (ISO 55001:2014). ISO Geneva.

Islam, K. M., Lee, G., & Hettiwatte, S. N. (2018). A review of technical condition assessment and health index computation techniques for power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 34(3), 18–29.

Jahromi, A. N., Piercy, R., Cress, S., Service, J., & Fan, W. (2009). An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(2), 20–34.

Li, S., Zhang, Y., & Wang, X. (2023). Limitations of weighted sum models in transformer health indexing and fuzzy-based dynamic correction methods. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 17(8), 1745–1758.

Luo, D., Xi, R., Che, L., & He, H. (2022). Health condition assessment of transformers based on cross message passing graph neural networks. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 973736. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.973736

Luo, Y., Zou, X., Xiong, W., Yuan, X., Xu, K., Xin, Y., & Zhang, R. (2023). Dynamic state evaluation method of power transformer based on Mahalanobis–Taguchi system and health index. *Energies*, 16(6), Article 2765. https://doi.org/10.3390/en16062765

Maina, R., et al. (2021). Correlation between physicochemical properties and dielectric response of insulating oils. *Electric Power Systems Research*, 190, Article 106722. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106722

Moro, N., & Pukel, T. (2016). *Advanced techniques for insulation assessment of power transformers* [Technical paper]. OMICRON electronics GmbH.

Mustafa, M., Safitri, A., & Kurniawan, D. (2024). Multi-parameter assessment of in-service transformer insulating oil degradation and its diagnostic limitations. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19(2), 845–856.

Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., & Service, J. (2008). An approach to determine the health index of power transformers. *Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 192–196.

OMICRON electronics GmbH. (2021). *DIRANA – Dielectric Response Analyzer User Manual* (Version 2.40). OMICRON Electronics, Klaus, Austria.

Prasojo, R. A., Setiawan, A., Suwarno, Maulidevi, N. U., & Soedjarno, B. A. (2019). Development of analytic hierarchy process technique in determining weighting factor for power transformer health index. In *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*.

Prasojo, R. A., Suwarno, Maulidevi, N. U., & Soedjarno, B. A. (2020). A multiple expert consensus model for transformer assessment index weighting factor determination. In *Proceedings of the 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)* (pp. 234–237).

Purba, R., & Safriandi, E. (2024). Analisis efektivitas pemurnian minyak terisolasi terhadap peningkatkan breakdown voltage dan kelembaban selulosa pada transformator distribusi. *Jurnal Teknik Elektro dan Ketenagalistrikan*, 12(1), 45–53.

Qian, G., Dai, W., Zou, D., Sun, H., Zhang, H., & Hao, J. (2025). Risk assessment model for converter transformers based on entropy-weight analytic hierarchy process. *Energies*, 18(7), Article 1757. https://doi.org/10.3390/en18071757

Regatra, M., Gani, U. A., & Rajagukguk, M. (2018). Analisis pengaruh temperatur terhadap kekuatan dielektrik minyak transformator. *Jurnal Teknik Elektro*, Universitas Tanjungpura.

Rediansyah, D., Prasojo, R. A., Suwarno, & Abu-Siada, A. (2021). Artificial intelligence-based power transformer health index for handling data uncertainty. *IEEE Access*, 9, 150637–150648. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125934

Rombepajung, R. A., Patras, L. S., & Tumaliang, H. (2025). Analyzing the influence of the length of time between extracting and testing of insulating oil of a power transformer using dissolved gas analysis test. *Universitas Sam Ratulangi Repository*, 1–10.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.

Saha, T. K. (2003). Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(5), 903–917.

Saribu, D. H. D., & Firdaus. (2019). Analisis karakteristik breakdown voltage pada dielektrik minyak transformator 45 MVA dengan suhu operasi yang bervariasi di pusat listrik Kota Panjang.

SP Energy Networks. (2015). *Business Plan 2015–2023: Asset Risk and Health Index Methodology*. Scottish Power Ltd, UK.

Taha, I. B. M. (2023). Power transformers health index enhancement based on convolutional neural network after applying imbalanced-data oversampling. *Electronics*, 12(11), Article 2405. https://doi.org/10.3390/electronics12112405

Tamma, R., Murthy, C. S., & Rao, P. V. (2021). Health index calculation of power transformers using modified weighted sum approach. *Electric Power Systems Research*, 190, 106840.

Widyastuti, C., & Wisnuaji, A. (2019). Studi korelasi antara tegangan tembus minyak dengan kadar air pada minyak transformator tegangan menengah. *Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan*, 11(2), 101–108.

Xu, H., Zhang, Q., & Chen, M. (2024). Moisture dynamics in transformer oil-paper insulation systems evaluated by frequency domain spectroscopy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 39(2), 980–989.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Zaldivar, D. A., & Romero, A. A. (2022). Health index for power transformer condition assessment: A comparison of three different techniques. *Journal of Applied Research and Technology*, 20(5), 536–545. https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.5.1606

Zeinoddini-Meymand, H., & Vahidi, B. (2016). Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(7), 823–830. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0184

Zeinoddini-Meymand, H., Kamel, S., & Khan, B. (2021). An efficient approach with application of linear and nonlinear models for evaluation of power

transformer health index. *IEEE Access*, 9, 150172–150186. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124845

Zhang, D., Feng, X., Yang, Z., Xu, H., Jiang, J., Mu, H., & Zhang, G.-J. (2023). Study on water absorption and dielectric response of epoxy resin impregnated paper bushing. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 17(17), 3789–3800. https://doi.org/10.1049/gtd2.12931

Zhang, Y., Tang, Y., Liu, Y., & Liang, Z. (2022). Research on variable weight synthesizing model for transformer condition assessment. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 941985. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.941985