

Pengembangan Model Indeks Kesehatan Transformator Dengan Pembobotan Komponen Dan Parameter Penilaian Menggunakan Analisis Proses Hirarki

^{1*}Fauzi Rachmat K A, ²Herry Nugraha, ³Agus Indarto

^{1,2,3} Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: fauzi2410732@itpln.ac.id

Received: June 2026; Revised: July 2026; Published: August 2026

Abstrak

Penilaian kondisi transformator di pembangkit sering dilakukan secara terpisah berdasarkan hasil inspeksi, pengujian elektrik, kondisi minyak, usia, dan riwayat pemeliharaan, sehingga prioritas tindakan belum selalu didasarkan pada satu ukuran kondisi yang terintegrasi. Penelitian ini mengembangkan model indeks kesehatan transformator berbasis Analytic Hierarchy Process (AHP) yang menggabungkan bobot sebelas komponen utama, enam parameter teknis, dan kualitas data. Model diterapkan pada enam transformator minyak, yaitu Generator Transformer (GT) 1 dan 2 serta Unit Auxiliary Transformer (UAT) 1A, 1B, 2A, dan 2B di PLTU Paiton Unit 1 dan 2 menggunakan data operasi dan pemeliharaan tahun 2023–2024. Bobot ditentukan melalui matriks perbandingan berpasangan berdasarkan konsensus empat ahli pemeliharaan, kemudian diuji menggunakan consistency ratio. Belitan high-voltage dan low-voltage memperoleh bobot komponen tertinggi, masing-masing 0,206, sedangkan pengujian spesifik menjadi parameter paling dominan dengan bobot 0,463. Nilai consistency ratio komponen dan parameter masing-masing 0,0518 dan 0,0455, sehingga penilaian memenuhi batas konsistensi AHP. Implementasi menghasilkan indeks kesehatan 7,82 (GT 1), 7,24 (UAT 1A), 7,22 (UAT 1B), 7,75 (GT 2), 5,81 (UAT 2A), dan 6,95 (UAT 2B). Empat unit diklasifikasikan baik dan dua unit cukup; klasifikasi tersebut searah dengan kondisi aktual, termasuk DGA Status 3 pada UAT 2A dan korosi radiator pada UAT 2B. Model ini menyediakan dasar kuantitatif untuk diagnosis kondisi dan prioritas pemeliharaan berbasis kondisi pada transformator pembangkit.

Kata kunci: Indeks Kesehatan Transformator; Analytic Hierarchy Process; Condition-Based Maintenance; Pembobotan Komponen; Kualitas Data

Transformer Health Index Model with Component and Parameter Weighting Based on the Analytic Hierarchy Process

Abstract

Transformer condition assessment in power plants is commonly performed separately using inspection results, electrical tests, oil condition, age, and maintenance history, which may limit the consistency of maintenance prioritization. This study develops a transformer health index model based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) by integrating the weights of eleven major components, six technical assessment parameters, and data quality. The model was applied to six oil-immersed transformers – Generator Transformers (GT) 1 and 2 and Unit Auxiliary Transformers (UAT) 1A, 1B, 2A, and 2B – at Paiton Coal-Fired Power Plant Units 1 and 2 using operation and maintenance data from 2023–2024. Weights were derived from pairwise comparison matrices based on the consensus of four maintenance experts and were validated using the consistency ratio. The high-voltage and low-voltage windings received the highest component weights, each at 0.206, while specific testing was the most influential parameter with a weight of 0.463. The consistency ratios were 0.0518 for components and 0.0455 for parameters, satisfying the acceptable AHP consistency threshold. The resulting health indices were 7.82 for GT 1, 7.24 for UAT 1A, 7.22 for UAT 1B, 7.75 for GT 2, 5.81 for UAT 2A, and 6.95 for UAT 2B. Four units were classified as good and two as fair, consistent with field conditions, including DGA Status 3 on UAT 2A and radiator corrosion on UAT 2B. The proposed model provides a quantitative basis for condition diagnosis and condition-based maintenance prioritization.

Keywords: transformer health index; Analytic Hierarchy Process; condition-based maintenance; component weighting; data quality

How to Cite: As'ar, F. R. K., Nugraha, H. ., & Indarto, A. . (2026). Pengembangan Model Indeks Kesehatan Transformator Dengan Pembobotan Komponen Dan Parameter Penilaian Menggunakan Analisis Proses Hirarki. *Journal of Authentic Research*, 5(3), 6477-6490. <https://doi.org/10.36312/j8ffg010>



<https://doi.org/10.36312/j8ffg010>

Copyright© 2026, As'ar et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan aset kritis pada sistem pembangkitan karena menghubungkan keluaran generator dengan jaringan serta menyediakan suplai daya bagi peralatan bantu unit. Gangguan pada transformator tidak hanya menurunkan keandalan penyaluran energi, tetapi juga dapat memicu pembatasan operasi, forced outage, dan biaya pemulihan yang tinggi. Konteks tersebut semakin penting pada sistem kelistrikan Indonesia yang memiliki kapasitas pembangkit terpasang lebih dari 100 GW dan ribuan unit pembangkit, sehingga strategi pengelolaan aset perlu bergeser dari pemeliharaan berbasis interval menuju pengambilan keputusan berbasis kondisi (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2026). Health index (HI) berkembang sebagai pendekatan yang merangkum berbagai informasi kondisi menjadi satu indikator untuk membantu perbandingan antar-aset dan prioritas pemeliharaan. Penelitian pada transformator tegangan tinggi menunjukkan bahwa nilai HI dapat digunakan bersama tren penurunannya untuk memperkuat penilaian risiko dan kebutuhan tindakan pemeliharaan (Tamma et al., 2021). Model lain menggabungkan riwayat operasi, proses penuaan, beban, lingkungan, dan hasil pengujian untuk memperoleh gambaran kondisi yang lebih komprehensif (Guo & Guo, 2022). Kajian mutakhir juga menegaskan bahwa HI tidak lagi dipandang hanya sebagai agregasi hasil uji minyak, tetapi sebagai kerangka integrasi informasi kondisi yang dapat mendukung asset management, diagnosis, dan estimasi umur sisa (Li et al., 2023; Zahra et al., 2025). Dengan demikian, kualitas model HI sangat ditentukan oleh keluasan indikator, mekanisme pembobotan, dan keterlacakan data yang digunakan.

Dalam praktik pemeliharaan transformator pembangkit, informasi kondisi berasal dari sumber yang heterogen, antara lain inspeksi visual, usia, teknologi pemantauan, pembatasan operasi, hasil pengujian elektrik dan minyak, serta riwayat kebutuhan pemeliharaan. Masalahnya, informasi tersebut sering dianalisis per parameter atau per komponen sehingga keputusan akhir sangat bergantung pada interpretasi teknisi dan belum selalu menghasilkan prioritas yang konsisten. Literatur menunjukkan bahwa pendekatan HI yang berbeda dapat menghasilkan klasifikasi berbeda untuk transformator yang sama karena perbedaan struktur indikator dan bobot (Zaldivar & Romero, 2022). Penelitian berbasis data operasi dan pengujian menekankan perlunya menggabungkan kondisi aktual dengan karakteristik penuaan (Guo & Guo, 2022), sedangkan pendekatan berbasis kecerdasan buatan berupaya mengatasi kompleksitas hubungan antardata dan ketidakpastian diagnosis (Rediansyah et al., 2021; Islam et al., 2023). Di sisi lain, ketersediaan data tetap menjadi kendala utama. Ketidaklengkapan hasil pengujian dapat menurunkan kepercayaan terhadap nilai HI sehingga model perlu menyatakan kualitas atau tingkat kepastian data secara eksplisit (Prasojo et al., 2021; Arsyah et al., 2024). Dalam konteks pemeliharaan berbasis kondisi, kebutuhan utamanya bukan hanya memperoleh skor akhir, tetapi juga memastikan bahwa skor tersebut dapat ditelusuri ke komponen, parameter, dan kualitas data yang membentuknya. Oleh sebab itu, diperlukan model yang mampu mengintegrasikan struktur fisik transformator dan bukti kondisi secara serentak, namun tetap cukup sederhana untuk diterapkan oleh organisasi pemeliharaan pembangkit.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan objektivitas penilaian kesehatan transformator. Weighted-sum model, fuzzy inference system, statistical distribution model, dan machine-learning model telah digunakan untuk mengubah data diagnostik menjadi kelas kondisi (Mohd Selva et al., 2021; Zaldivar &

Romero, 2022; Islam et al., 2023). Penilaian yang memanfaatkan DGA, kualitas minyak, dan kondisi isolasi memberikan informasi kuat mengenai degradasi internal, sedangkan penelitian berbasis beberapa kategori informasi menunjukkan bahwa data operasi, electrical test, dan riwayat gangguan dapat menambah konteks yang tidak tertangkap oleh parameter isolasi saja (Luo et al., 2022; Rangel Bessa et al., 2023). Pendekatan AHP dan fuzzy terbaru juga memperlihatkan bahwa prioritas relatif antarindikator dapat digunakan untuk meningkatkan transparansi proses penilaian (Manoj et al., 2024). Namun, tinjauan literatur menunjukkan bahwa banyak model tetap berfokus pada indikator diagnostik sebagai kelompok data, belum secara eksplisit memetakan kontribusi komponen fisik utama transformator bersamaan dengan parameter penilaian dan kualitas data pada satu kerangka dua-dimensi (Li et al., 2023; Zahra et al., 2025). Celah tersebut penting pada transformator pembangkit karena kegagalan belitan, bushing, tap changer, minyak isolasi, sistem pendingin, inti, maupun proteksi mekanik memiliki konsekuensi operasional yang berbeda. Kebaruan penelitian ini adalah pengembangan HI yang menggabungkan sebelas bobot komponen dan enam bobot parameter menggunakan AHP, kemudian menormalisasi data yang tidak tersedia dan memasukkan indikator kualitas data sebelum menghasilkan nilai akhir. Struktur tersebut ditujukan agar diagnosis dapat ditelusuri hingga sumber kondisi sekaligus mendukung penentuan prioritas pemeliharaan.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengimplementasikan model indeks kesehatan transformator berbasis Analytic Hierarchy Process untuk memperoleh penilaian kondisi yang terukur pada aset transformator pembangkit. Secara khusus, penelitian menentukan tingkat kepentingan relatif sebelas komponen—belitan high-voltage (HV), belitan low-voltage (LV), bushing HV, bushing LV, tap changer, insulating oil, sistem cooling, breather, main tank, core, dan proteksi mekanik—serta enam parameter penilaian, yaitu kondisi visual, usia peralatan, teknologi peralatan, pengujian spesifik, batasan operasi, dan kebutuhan pemeliharaan. Bobot diperoleh dari perbandingan berpasangan oleh empat ahli pemeliharaan dan hanya diterima apabila consistency ratio berada di bawah 0,10 sesuai prinsip AHP. Model kemudian diterapkan pada enam oil-immersed transformer di PLTU Paiton Unit 1 dan 2 menggunakan data operasi dan pemeliharaan 2023–2024. Skor kondisi dihitung hanya pada kombinasi komponen-parameter yang relevan; sel Not Available tidak dimasukkan ke penyebut agar tidak menurunkan nilai secara artifisial. Selain itu, indikator kualitas data digunakan untuk mengoreksi nilai kondisi sehingga tingkat keandalan bukti turut tercermin dalam HI final. Kinerja aplikatif model dievaluasi secara deskriptif dengan membandingkan kategori HI terhadap catatan kondisi aktual masing-masing transformator. Ruang lingkup penelitian tidak mencakup estimasi probability of failure, remaining useful life, maupun validasi statistik pada populasi transformator yang besar; fokusnya adalah pengembangan kerangka diagnosis dan prioritas pemeliharaan yang transparan serta dapat diterapkan pada konteks pembangkit.

METODE

Desain Penelitian dan Objek Studi

Penelitian ini menggunakan desain pengembangan model kuantitatif yang diikuti studi kasus implementasi pada aset transformator pembangkit. Model dirancang untuk mengintegrasikan skor kondisi, bobot komponen, bobot parameter, dan kualitas data menjadi satu nilai indeks kesehatan pada skala 0–10. Objek

penelitian terdiri atas enam oil-immersed transformer di PLTU Paiton Unit 1 dan Unit 2, yaitu Generator Transformer (GT) 1, Unit Auxiliary Transformer (UAT) 1A, UAT 1B, GT 2, UAT 2A, dan UAT 2B. Transformator jenis ini menggunakan minyak sebagai media isolasi dan pendinginan sehingga kondisi bagian aktif, minyak, dan sistem pendingin perlu dinilai secara terpadu (Zahra et al., 2025). Karakteristik aset yang dianalisis mencakup manufaktur, kapasitas, tegangan, arus nominal, tahun pembuatan, dan kelompok hubungan belitan sebagaimana dirangkum pada Table 1. Seluruh unit merupakan transformator tiga fasa 50 Hz. Data penelitian berasal dari periode operasi dan pemeliharaan 2023–2024. Penilaian akhir menggunakan data kondisi yang tersedia untuk tahun asesmen masing-masing unit, yaitu 2024 untuk GT 1, UAT 1A, dan UAT 1B serta 2023 untuk GT 2, UAT 2A, dan UAT 2B, sesuai rekaman yang tersedia dalam naskah sumber. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan dan pengelompokan data, penyusunan struktur indeks, pembentukan matriks AHP, pengujian konsistensi, penetapan kriteria skor, perhitungan HI, dan validasi deskriptif terhadap kondisi aktual. Desain ini dipilih karena tujuan penelitian bukan menguji hubungan kausal, melainkan mengembangkan alat evaluasi multikriteria yang dapat digunakan dalam pemeliharaan berbasis kondisi.

Table 1. Karakteristik transformator yang dianalisis

Peralatan	Manufaktur	MVA	Tegangan (kV)	Arus nominal (A)	Tahun	Connection
GT 1	Alstom	470	525/18	517/15075	2016	YNd1
UAT 1A	ABB ESAS	60	18/10.76	288.4/3299.2	1992	YNyn0
UAT 1B	ABB ESAS	60	18/10.76	288.4/3299.2	1992	YNyn0
GT 2	TBEA	470	525/18	544.1/15075	2013	YNd1
UAT 2A	B&D	33.4	18.9/10.7	1792/1127	2019	YNyn0
UAT 2B	ABB ESAS	60	18/10.76	288.4/3299.2	1992	YNyn0

Sumber Data, Panel Ahli, dan Instrumen Penilaian

Data primer teknis yang digunakan meliputi spesifikasi transformator, hasil inspeksi visual, riwayat operasi, catatan pemeliharaan, hasil electrical assessment, dan hasil evaluasi minyak isolasi yang tersedia pada unit penelitian. Data tersebut dipetakan ke sebelas komponen utama dan enam parameter kondisi. Instrumen penilaian dikembangkan dengan mengadaptasi kerangka condition assessment dari Smith et al. (2021), prinsip asset health index CIGRE (2021), panduan diagnostic field testing IEEE C57.152-2013, serta interpretasi DGA IEEE C57.104-2019. Parameter pengujian spesifik mencakup, sesuai ketersediaan data, insulation resistance, polarization index, winding resistance, tan delta, capacitance bushing, frequency response analysis, dielectric response analysis, transformer ratio, DGA, breakdown voltage, dan water content. Penetapan bobot AHP melibatkan empat ahli pemeliharaan listrik dari PT PLN Nusantara Power dengan pengalaman kerja 9–22 tahun; profilnya ditampilkan pada Table 2. Penilaian perbandingan berpasangan dilakukan melalui diskusi terarah hingga dicapai konsensus untuk setiap pasangan komponen dan parameter. Mekanisme konsensus digunakan untuk memperoleh satu matriks keputusan bersama dan mengurangi variasi antarpenilai yang tidak terdokumentasi. Validitas isi instrumen diperkuat melalui keterkaitan kriteria dengan manual, standar, dan pengalaman lapangan, sedangkan konsistensi logis keputusan ahli dievaluasi dengan consistency ratio AHP. Penelitian tidak melakukan uji inter-rater reliability secara terpisah karena nilai masukan akhir merupakan hasil

konsensus, sehingga keterbatasan tersebut dipertimbangkan dalam interpretasi dan rekomendasi penelitian.

Table 2. Profil panel ahli

Ahli	Jabatan	Pengalaman	Kompetensi	Instansi
Expert 1	Technician Listrik	10 tahun	Pemeliharaan listrik	PT PLN Nusantara Power
Expert 2	Technician Listrik	12 tahun	Pemeliharaan listrik	PT PLN Nusantara Power
Expert 3	Technician Listrik	9 tahun	Pemeliharaan listrik	PT PLN Nusantara Power
Expert 4	Senior Technician Listrik	22 tahun	Pemeliharaan listrik	PT PLN Nusantara Power

Table 3. Ringkasan kriteria skor parameter kondisi

Parameter	Kriteria dan rentang skor
Usia peralatan	<30 tahun: 9-10; 30-35: 7-8; 35-40: 5-6; 40-45: 3-4; >45: 1-2
Kondisi visual	Normal: 8-10; minor: 5-7; degradasi sedang: 3-4; degradasi serius: 0-2
Teknologi peralatan	Monitoring komprehensif: 8-10; parsial: 5-7; terbatas/manual: 1-4; tidak tersedia: 0
Pengujian spesifik	Seluruh kriteria normal: 10; satu abnormal: 8-9; beberapa menurun: 5-7; signifikan: 3-4; hanya satu normal: 1-2; tidak ada normal: 0
Batasan operasi	Tanpa pembatasan: 8-10; sementara/hingga sekitar 75%: 5-7; sedang/sekitar 50%: 3-4; berat/tidak dapat dioperasikan: 0-2
Kebutuhan pemeliharaan	Rutin: 9-10; korektif rendah: 7-8; sedang: 5-6; signifikan: 3-4; berat/forced atau scheduled outage: 0-2

Pembobotan AHP dan Formulasi Indeks Kesehatan

Struktur AHP menempatkan indeks kesehatan transformator sebagai tujuan utama, sedangkan komponen dan parameter penilaian diperlakukan sebagai dua kelompok bobot yang dikombinasikan pada matriks kondisi. Perbandingan berpasangan menggunakan skala fundamental 1-9, dari equal importance hingga extreme importance, beserta nilai resiprokalnya (Saaty, 2008). Untuk setiap matriks, elemen dibandingkan antarbaris dan antarkolom, kemudian setiap kolom dinormalisasi dan nilai prioritas masing-masing elemen diperoleh dari rerata baris matriks normalisasi. Bobot komponen dinyatakan sebagai $F(K)$, sedangkan bobot parameter dinyatakan sebagai $F(J)$. Skor kondisi $Sc(K,J)$ berada pada skala 0-10 sesuai kriteria usia, visual, teknologi, pengujian spesifik, batasan operasi, dan kebutuhan pemeliharaan. Kombinasi yang tidak relevan diberi status Not Available (NA) dan dikeluarkan dari pembilang serta penyebut. Nilai kondisi teragregasi dihitung hanya untuk sel yang tersedia. Kualitas data setiap komponen dinyatakan sebagai $SD(K)$, kemudian indikator kualitas data dihitung sebagai rerata tertimbang komponen. Karena indikator kualitas data menggunakan skala 0-10, indeks kesehatan akhir mengalikan nilai kondisi dengan proporsi kualitas data. Formulasi ini mempertahankan pengaruh relatif bobot tetapi mencegah sel NA diperlakukan sebagai skor nol, sekaligus memberikan penalti proporsional apabila kualitas data lebih rendah. Bobot yang dihasilkan digunakan tanpa pembulatan pada proses kalkulasi, sedangkan nilai yang ditampilkan dalam tabel dibulatkan untuk memudahkan pembacaan dan pelaporan hasil.

$$CI = [\sum K \sum J Sc(K,J) \times F(K) \times F(J)] / [\sum K \sum J F(K) \times F(J)] \quad (1)$$

$$DI = [\sum K SD(K) \times F(K)] / [\sum K F(K)] \quad (2)$$

$$HI = CI \times DI / 10 \quad (3)$$

Pada Persamaan (1)–(3), CI adalah indikator kondisi teragregasi, $Sc(K,J)$ merupakan skor kondisi komponen ke-K pada parameter ke-J, $F(K)$ dan $F(J)$ masing-masing adalah bobot komponen dan parameter, $SD(K)$ adalah skor kualitas data komponen, DI adalah indikator kualitas data, sedangkan HI adalah indeks kesehatan akhir. Penjumlahan pada Persamaan (1) hanya mencakup kombinasi komponen-parameter yang memiliki data relevan.

Analisis Konsistensi, Klasifikasi, dan Validasi

Konsistensi penilaian AHP diuji menggunakan nilai eigen maksimum (λ_{max}), consistency index (CI_{AHP}), dan consistency ratio (CR). Consistency index dihitung menggunakan selisih λ_{max} dan ordo matriks, kemudian CR diperoleh dengan membagi CI_{AHP} dengan random index yang sesuai. Matriks dianggap memenuhi konsistensi yang dapat diterima apabila $CR < 0,10$ (Saaty, 2008). Setelah bobot dinyatakan konsisten, setiap kombinasi komponen-parameter diberi skor berdasarkan bukti teknis yang tersedia. Kriteria interpretasi disederhanakan menjadi tiga kelas HI sesuai model sumber: $7 \leq HI \leq 10$ dikategorikan baik dan operasi serta pemeliharaan dapat dilanjutkan tanpa pembatasan khusus; $3 \leq HI < 7$ dikategorikan cukup dan memerlukan evaluasi ulang serta perhatian teknis; $0 \leq HI < 3$ dikategorikan buruk dan membutuhkan evaluasi segera serta penyesuaian strategi operasi dan pemeliharaan. Analisis hasil dilakukan secara deskriptif dengan menelusuri kontribusi bobot komponen dan parameter terhadap nilai akhir setiap transformator. Validasi aplikatif dilakukan dengan membandingkan kategori HI terhadap catatan kondisi aktual: operasi normal untuk GT 1, UAT 1A, UAT 1B, dan GT 2; DGA Status 3 pada UAT 2A; serta korosi radiator pada UAT 2B. Pendekatan validasi ini menilai kesesuaian arah diagnosis, bukan akurasi prediktif statistik, karena jumlah kasus hanya enam transformator dan tidak tersedia label kegagalan populasi yang independen.

$$CI_{AHP} = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

$$CR = CI_{AHP} / RI \quad (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bobot Komponen sebagai Struktur Prioritas Kondisi

Hasil AHP menunjukkan bahwa bobot komponen tidak terdistribusi merata. Belitan HV dan belitan LV masing-masing memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,206, diikuti bushing HV 0,153, bushing LV 0,118, core 0,092, tap changer 0,067, insulating oil 0,048, sistem cooling 0,035, serta breather, main tank, dan proteksi mekanik yang masing-masing bernilai 0,025. Empat komponen dengan bobot tertinggi – dua belitan dan dua bushing – secara kumulatif menyumbang 0,683 dari total bobot komponen. Pola ini menunjukkan bahwa konsensus ahli menempatkan jalur utama transfer energi dan sistem isolasi terminal sebagai bagian yang paling menentukan kondisi keseluruhan aset. Secara teknis, pembobotan tersebut rasional karena anomali pada belitan dan bushing dapat berhubungan langsung dengan kemampuan transformasi, integritas isolasi, dan risiko gangguan listrik, sedangkan komponen pendukung cenderung memengaruhi kondisi melalui mekanisme tidak langsung atau dapat

ditangani tanpa selalu mengganti bagian aktif utama. Bobot core yang lebih tinggi daripada tap changer, minyak, dan sistem pendingin juga menunjukkan bahwa panel ahli memandang integritas bagian aktif sebagai indikator struktural penting. Hasil ini tidak berarti komponen berbobot rendah dapat diabaikan; bobot hanya menyatakan kontribusi relatif dalam agregasi HI, sementara skor buruk pada komponen tertentu tetap dapat menurunkan nilai akhir melalui parameter yang relevan. Jumlah seluruh bobot komponen sama dengan satu setelah pembulatan, sehingga nilai tersebut dapat diperlakukan sebagai proporsi kontribusi relatif dalam model. Struktur ini juga memudahkan penelusuran keputusan karena perubahan skor pada komponen berbobot tinggi akan terlihat lebih jelas pada nilai agregat dibanding perubahan yang sama pada komponen berbobot rendah.

Table 4. Bobot komponen dan parameter hasil AHP

Komponen	Bobot	Parameter	Bobot
Belitan HV	0,206	Kondisi visual	0,140
Belitan LV	0,206	Usia peralatan	0,074
Bushing HV	0,153	Teknologi peralatan	0,034
Bushing LV	0,118	Pengujian spesifik	0,463
Tap changer	0,067	Batasan operasi	0,034
Insulating oil	0,048	Kebutuhan pemeliharaan	0,255

Temuan tersebut memperjelas posisi model ini dibandingkan sebagian pendekatan HI yang lebih banyak mengelompokkan data berdasarkan jenis pengujian daripada berdasarkan struktur fisik aset. Tinjauan Li et al. (2023) menunjukkan bahwa model HI modern memanfaatkan weighted-score-sum, information fusion, dan artificial intelligence dengan beragam kombinasi indikator, sedangkan Islam et al. (2023) menggunakan 31 atribut diagnostik untuk menilai kondisi transformator secara cerdas. Model AHP-grey relational-fuzzy yang dikembangkan Manoj et al. (2024) juga menunjukkan nilai pendekatan multikriteria untuk membentuk prioritas atribut secara transparan. Model multilevel Gao et al. (2021) menegaskan pentingnya pemetaan layer komponen-indikator, sedangkan Luo et al. (2023) dan Padmanaban et al. (2023) menunjukkan alternatif untuk mengurangi subjektivitas bobot serta memasukkan faktor kondisi dan umur. Pendekatan kombinasi rough set-G1 juga menegaskan bahwa struktur indikator dan mekanisme pembobotan merupakan bagian penting dalam evaluasi kesehatan transformator (Yuan et al., 2022).

Dalam penelitian ini, bobot komponen dipertahankan sebagai lapisan eksplisit sehingga pengguna dapat menelusuri apakah perubahan HI berasal dari bagian aktif, bushing, minyak, sistem pendingin, atau komponen pendukung lain. Transparansi tersebut relevan untuk pemeliharaan pembangkit karena tindakan korektif ditetapkan pada komponen fisik, bukan hanya pada kategori data. Namun, bobot tetap merepresentasikan judgement panel ahli yang seluruhnya berlatar belakang pemeliharaan listrik pada organisasi yang sama. Dengan demikian, nilai 0,206 atau 0,153 tidak dapat diperlakukan sebagai bobot universal untuk seluruh jenis transformator. Replikasi pada panel ahli yang lebih beragam dan analisis sensitivitas bobot diperlukan sebelum struktur prioritas ini digeneralisasi ke populasi aset dengan desain, tegangan, kapasitas, dan pola operasi berbeda. Dalam konteks pembangkit, pemisahan bobot komponen juga memudahkan hubungan antara hasil asesmen dan work order karena rekomendasi dapat diarahkan ke bagian fisik yang spesifik, bukan hanya ke jenis pengujian yang menghasilkan anomali.

Bobot Parameter dan Konsistensi Penilaian AHP

Pada tingkat parameter, pengujian spesifik memiliki bobot paling besar, yaitu 0,463, diikuti kebutuhan pemeliharaan 0,255, kondisi visual 0,140, usia peralatan 0,074, serta teknologi peralatan dan batasan operasi masing-masing 0,034. Dua parameter teratas secara bersama-sama menyumbang 0,718 dari total bobot, sehingga nilai HI sangat responsif terhadap bukti diagnostik dan kebutuhan tindakan korektif. Dominasi pengujian spesifik mencerminkan perannya dalam mendeteksi kondisi internal yang tidak selalu terlihat melalui inspeksi visual, misalnya perubahan isolasi, tahanan belitan, karakteristik bushing, respons frekuensi, maupun kondisi minyak. Kebutuhan pemeliharaan menempati urutan kedua karena frekuensi dan tingkat intervensi korektif memberikan informasi mengenai degradasi yang telah teridentifikasi selama operasi. Validitas konsistensi judgement didukung oleh CR komponen 0,0518 dan CR parameter 0,0455; keduanya berada di bawah batas 0,10 yang lazim digunakan pada AHP (Saaty, 2008). Nilai tersebut menunjukkan bahwa perbandingan berpasangan tidak mengandung inkonsistensi logis yang berlebihan. Dengan demikian, bobot dapat digunakan pada tahap agregasi HI, meskipun consistency ratio tidak menggantikan kebutuhan validasi eksternal terhadap hasil kondisi aktual. Bobot usia yang lebih rendah tidak menunjukkan bahwa penuaan diabaikan, melainkan bahwa panel ahli menilai bukti kondisi aktual lebih informatif daripada umur kalender ketika menentukan kondisi saat asesmen. Demikian pula, bobot teknologi dan batasan operasi yang kecil tetap berfungsi sebagai faktor pembeda ketika kondisi monitoring atau kemampuan operasi menurun. Seluruh bobot parameter berjumlah satu setelah pembulatan.

Table 5. Consistency ratio matriks perbandingan berpasangan

Matriks	n	RI	CR	Status
Komponen	11	1,51	0,0518	Konsisten
Parameter	6	1,24	0,0455	Konsisten

Besarnya bobot pengujian spesifik sejalan dengan literatur yang menempatkan hasil diagnostik sebagai sumber informasi utama kondisi transformator. Mohd Selva et al. (2021) menunjukkan bahwa DGA, oil quality analysis, dan furanic compound analysis dapat digunakan untuk memodelkan perkembangan HI, sedangkan Bohatyrewicz dan Banaszak (2022) menemukan bahwa perubahan gas terlarut dapat memberikan pengaruh kuat terhadap perubahan nilai HI pada populasi transformator. Kajian DGA modern juga menegaskan pentingnya menginterpretasikan beberapa gas dan metode secara terpadu karena setiap teknik memiliki batas diagnosis (Rangel Bessa et al., 2023; Aciu et al., 2024). Pada sisi metode, Manoj dan Ranga (2025) memperlihatkan bahwa penggabungan beberapa parameter diagnostik melalui fuzzy logic menghasilkan evaluasi kondisi yang konsisten dengan model ahli. Temuan-temuan tersebut mendukung keputusan penelitian ini untuk memberikan bobot dominan pada pengujian spesifik, tetapi model tetap memasukkan usia, kondisi visual, teknologi, batasan operasi, dan pemeliharaan agar hasil tidak semata-mata bergantung pada satu jenis pengujian. Penambahan kualitas data juga penting karena HI berbasis multi-parameter dapat kehilangan reliabilitas ketika data tidak tersedia atau tidak pasti (Prasojo et al., 2021; Arsyah et al., 2024). Oleh karena itu, kombinasi bobot parameter dan koreksi kualitas data menjadi elemen kunci dalam menjaga interpretabilitas hasil. Keseimbangan ini mengurangi risiko bahwa satu data abnormal langsung mendominasi keputusan tanpa konteks kondisi komponen dan rekam pemeliharaan.

Implementasi Indeks Kesehatan pada Enam Transformator

Penerapan model pada enam transformator menghasilkan empat unit berkategori baik dan dua unit berkategori cukup. GT 1 memperoleh HI 7,82; UAT 1A 7,24; UAT 1B 7,22; dan GT 2 7,75, sehingga keempatnya berada di atas ambang 7,00. UAT 2A memperoleh HI 5,81, sedangkan UAT 2B memperoleh 6,95 dan tetap diklasifikasikan cukup karena nilai yang digunakan berada di bawah batas 7,00 sebelum pembulatan kategori. Table 6 memperlihatkan peran indikator kualitas data dalam pembentukan nilai akhir. UAT 2A memiliki nilai kondisi teragregasi sebelum koreksi sekitar 7,26, tetapi kualitas data 8/10 menghasilkan HI akhir sekitar 5,81. Lima unit lain memiliki kualitas data 9/10, sehingga faktor koreksi lebih kecil. Perbedaan antara UAT 1A dan UAT 1B hanya 0,02, konsisten dengan pola skor yang hampir identik; penurunan kecil pada UAT 1B terutama terlihat pada pengujian insulating oil. Sementara itu, GT 1 dan GT 2 memperoleh nilai tertinggi karena sebagian besar skor komponen berada pada rentang 8–9 dengan kebutuhan pemeliharaan dan batasan operasi yang relatif baik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model mampu membedakan kondisi aset meskipun seluruh unit masih dapat dioperasikan. Skala klasifikasi yang digunakan mempertahankan rentang 7–10 sebagai baik, 3–<7 sebagai cukup, dan <3 sebagai buruk. Karena itu, interpretasi kategori selalu menggunakan nilai numerik sebelum pembulatan tampilan agar unit yang berada dekat ambang tidak berpindah kelas hanya akibat format desimal.

Table 6. Hasil implementasi indeks kesehatan transformator

Peralatan	Tahun	CI sebelum koreksi	DI	HI final	Kategori
GT 1	2024	8,688	9,00	7,82	Baik
UAT 1A	2024	8,047	9,00	7,24	Baik
UAT 1B	2024	8,022	9,00	7,22	Baik
GT 2	2023	8,617	9,00	7,75	Baik
UAT 2A	2023	7,261	8,00	5,81	Cukup
UAT 2B	2023	7,724	9,00	6,95	Cukup

Nilai UAT 2A yang paling rendah dapat ditelusuri ke kombinasi skor pengujian dan pemeliharaan, bukan semata-mata usia aset. Pada unit ini, pengujian spesifik insulating oil diberi skor 3, sementara beberapa komponen utama memperoleh skor kebutuhan pemeliharaan 6 dan kualitas data 8. Karena pengujian spesifik dan kebutuhan pemeliharaan memiliki bobot gabungan 0,718, penurunan pada kedua parameter tersebut memberikan dampak besar terhadap HI. UAT 2B memperlihatkan pola berbeda: kualitas data tetap 9, tetapi teknologi pemantauan bushing dan breather diberi skor 4, sistem cooling 6, pengujian insulating oil 6, serta beberapa skor visual dan pemeliharaan berada pada rentang 6–7. Perbedaan pola ini penting secara praktis karena dua unit dengan kategori sama tidak selalu memerlukan tindakan yang sama. Literatur mendukung penggunaan HI sebagai alat pemeringkatan aset dan bukan sebagai diagnosis tunggal; Tamma et al. (2021) menekankan nilai HI dan laju perubahannya untuk menilai risiko, sedangkan Al-Romaimi et al. (2024) menempatkan HI sebagai komponen dalam strategic asset management dan perencanaan investasi. Hasil studi ini konsisten dengan prinsip tersebut karena skor akhir dapat ditelusuri kembali ke bukti teknis yang memicu prioritas pemeliharaan. Menariknya, seluruh unit memperoleh skor usia 9 pada komponen yang relevan, sehingga usia tidak menjadi sumber utama variasi antartransformator pada sampel

ini. Variasi HI terutama muncul dari pengujian spesifik, teknologi, kebutuhan pemeliharaan, kondisi visual, dan kualitas data.

Validasi terhadap Kondisi Aktual dan Implikasi Pemeliharaan

Validasi deskriptif menunjukkan kesesuaian arah antara kategori model dan catatan kondisi lapangan. GT 1, UAT 1A, UAT 1B, dan GT 2 dikategorikan baik dan pada catatan aktual berada dalam operasi normal tanpa gangguan signifikan yang dicantumkan. Sebaliknya, UAT 2A dan UAT 2B dikategorikan cukup dan keduanya memiliki catatan teknis yang membutuhkan perhatian. UAT 2A tercatat memiliki DGA Status 3 dengan indikasi thermal fault di bawah 300 °C dalam data pemeliharaan. IEEE C57.104-2019 menjelaskan bahwa DGA Status 3 merupakan kondisi yang patut dicurigai dan memerlukan peningkatan pengawasan serta pengujian tambahan, sehingga kategori cukup pada model searah dengan kebutuhan tindak lanjut teknis. UAT 2B memiliki catatan korosi pada radiator, yang berpotensi menurunkan efektivitas sistem pendinginan apabila berkembang lebih lanjut. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa integrasi komponen, parameter, dan kualitas data mampu merepresentasikan kondisi aktual secara masuk akal pada enam kasus yang diuji. Akan tetapi, hasil ini harus disebut sebagai validasi aplikatif atau face validity, bukan ukuran akurasi statistik, karena tidak tersedia populasi pembanding yang cukup besar maupun label kegagalan independen untuk menghitung sensitivitas, spesifisitas, atau tingkat salah klasifikasi. Dengan kata lain, model tidak mengklasifikasikan kedua unit yang memiliki catatan anomali sebagai kondisi baik, sementara empat unit tanpa catatan gangguan signifikan tetap berada pada kategori baik.

Table 7. Perbandingan kategori HI dengan kondisi aktual

Peralatan	Kategori HI	Kondisi aktual	Catatan
GT 1	Baik	Normal operasi	-
UAT 1A	Baik	Normal operasi	-
UAT 1B	Baik	Normal operasi	-
GT 2	Baik	Normal operasi	-
UAT 2A	Cukup	Operasi	DGA Status 3
UAT 2B	Cukup	Operasi	Korosi pada radiator

Dari perspektif pemeliharaan berbasis kondisi, hasil model memberikan urutan tindakan yang lebih jelas. UAT 2A menjadi prioritas evaluasi pertama karena memiliki HI terendah, kualitas data lebih rendah dibanding unit lain, dan catatan DGA Status 3; tindak lanjut seharusnya berfokus pada verifikasi DGA, evaluasi sumber thermal fault, pemeriksaan sambungan dan sistem pendingin, serta peningkatan kelengkapan data sebelum keputusan intervensi besar dibuat. UAT 2B menjadi prioritas berikutnya karena HI 6,95 berada sangat dekat dengan ambang kategori baik dan masalah radiator dapat ditangani melalui inspeksi serta koreksi sistem cooling sebelum degradasi berkembang. Empat unit berkategori baik dapat tetap mengikuti program operasi dan pemeliharaan rutin dengan pemantauan tren. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip bahwa HI digunakan untuk mendukung prioritas tindakan, bukan menggantikan diagnosis teknik individual (CIGRE, 2021; Che et al., 2024). Penelitian mengenai ketidakpastian data juga menunjukkan bahwa keputusan asset management perlu mempertimbangkan confidence pada data, bukan hanya skor kondisi (Prasojo et al., 2021; Arsyah et al., 2024). Keterbatasan utama studi ini adalah jumlah transformator yang kecil, panel ahli yang homogen, penggunaan

data lintas dua tahun yang tidak seragam antarunit, dan belum adanya analisis sensitivitas bobot. Keterbatasan tersebut membatasi generalisasi tetapi tidak mengurangi fungsi model sebagai kerangka evaluasi awal yang transparan. Karena itu, hasil sebaiknya dibaca sebagai prioritas relatif untuk pengelolaan aset.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan model indeks kesehatan transformator berbasis Analytic Hierarchy Process yang mengintegrasikan sebelas komponen fisik, enam parameter kondisi, dan kualitas data dalam satu kerangka penilaian kuantitatif. Pembobotan menunjukkan bahwa belitan HV dan LV merupakan komponen paling dominan, sedangkan pengujian spesifik menjadi parameter dengan pengaruh terbesar. Consistency ratio untuk matriks komponen dan parameter berada di bawah 0,10, sehingga judgement ahli memenuhi konsistensi AHP. Penerapan pada enam transformator PLTU Paiton menghasilkan empat unit berkategori baik dan dua unit berkategori cukup. Kategori cukup pada UAT 2A dan UAT 2B searah dengan catatan kondisi aktual berupa DGA Status 3 dan korosi radiator, sedangkan empat unit berkategori baik beroperasi normal tanpa catatan gangguan signifikan pada data yang dianalisis. Temuan tersebut menunjukkan bahwa model tidak hanya menghasilkan skor agregat, tetapi juga memungkinkan penelusuran faktor yang membentuk skor sehingga prioritas pemeliharaan dapat diarahkan pada komponen dan parameter yang paling relevan. Kontribusi utama penelitian adalah pemisahan eksplisit bobot komponen dan bobot parameter sekaligus koreksi kualitas data, yang meningkatkan transparansi dibanding penilaian yang hanya menggabungkan parameter diagnostik. Model ini layak digunakan sebagai alat bantu condition-based maintenance pada konteks studi, tetapi belum dapat dianggap sebagai model universal atau prediktor kegagalan. Generalisasi memerlukan validasi pada populasi transformator yang lebih besar, panel ahli yang lebih beragam, data longitudinal yang seragam, dan pengujian sensitivitas terhadap perubahan bobot.

REKOMENDASI

Penelitian lanjutan disarankan memperluas jumlah dan keragaman expert judgement, termasuk ahli operasi, proteksi, pengujian diagnostik, dan asset management, kemudian mengukur kesepakatan antarpenilai sebelum konsensus. Model juga perlu diuji pada transformator dengan fungsi, kapasitas, umur, tingkat tegangan, pola pembebanan, dan lingkungan operasi yang berbeda serta menggunakan data longitudinal dengan tahun asesmen yang seragam. Analisis sensitivitas perlu dilakukan untuk menguji kestabilan kategori terhadap perubahan bobot komponen, bobot parameter, dan kualitas data. Untuk pengembangan berikutnya, HI dapat dikombinasikan dengan tren DGA, laju perubahan indeks, probability of failure, serta metode machine learning, namun model prediktif harus divalidasi pada dataset yang cukup besar dan menghindari ketidakseimbangan kelas (Putra et al., 2025; El-Rashidy et al., 2025). Pada tingkat implementasi, UAT 2A perlu diprioritaskan untuk verifikasi DGA dan pengujian tambahan, sedangkan UAT 2B perlu difokuskan pada inspeksi dan koreksi sistem radiator/pendingin. Empat unit lain dapat mempertahankan pemeliharaan rutin dengan pemantauan tren agar perubahan HI dapat dideteksi lebih dini.

REFERENSI

- Aciu, A.-M., Enache, S., & Nițu, M.-C. (2024). A reviewed turn at of methods for determining the type of fault in power transformers based on dissolved gas analysis. *Energies*, 17(10), 2331. <https://doi.org/10.3390/en17102331>
- Al-Romaimi, K. S., Baglee, D., & Dixon, D. (2024). Health index assessment for power transformer strategic asset management in electrical utilities. *International Journal of Strategic Engineering Asset Management*, 4(1), 81–99. <https://doi.org/10.1504/IJSEAM.2023.136222>
- Arsya, N. R., Suwarno, Prasajo, R. A., Sudrajad, G. A., & Abu-Siada, A. (2024). A holistic integration of conventional and machine learning techniques to enhance the analysis of power transformer health index considering data unavailability. *IEEE Access*, 12, 124549–124561. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3450110>
- Bohatyrewicz, P., & Banaszak, S. (2022). Assessment criteria of changes in health index values over time – A transformer population study. *Energies*, 15(16), 6078. <https://doi.org/10.3390/en15166078>
- 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>
- CIGRE. (2021). Asset health indices for equipment in existing substations (Technical Brochure 858). CIGRE.
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2026). Buku statistik ketenagalistrikan 2024.
- El-Rashidy, N., Sultan, Y. A., & Ali, Z. H. (2025). Predecting power transformer health index and life expectation based on digital twins and multitask LSTM-GRU model. *Scientific Reports*, 15, 1359. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83220-x>
- Gao, S., Zhao, J., Liu, Y., Xu, Z., Li, Z., Sun, L., & Tian, Y. (2021). Research into power transformer health assessment technology based on uncertainty of information and deep architecture design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 8831872. <https://doi.org/10.1155/2021/8831872>
- Guo, H., & Guo, L. (2022). Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data. *Energy Reports*, 8, 9038–9045. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.041>
- IEEE. (2013). IEEE guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors (IEEE Std C57.152-2013). IEEE Standards Association.
- IEEE. (2019). IEEE guide for the interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers (IEEE Std C57.104-2019). IEEE Standards Association.
- Islam, N., Khan, R., Das, S. K., Sarker, S. K., Islam, M. M., Akter, M., & Mueen, S. M. (2023). Power transformer health condition evaluation: A deep generative model aided intelligent framework. *Electric Power Systems Research*, 218, 109201. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109201>
- Li, S., Li, X., Cui, Y., & Li, H. (2023). Review of transformer health index from the perspective of survivability and condition assessment. *Electronics*, 12(11), 2407. <https://doi.org/10.3390/electronics12112407>
- 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, 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), 2765. <https://doi.org/10.3390/en16062765>
- Manoj, T., & Ranga, C. (2025). Multi-parameter-based fuzzy logic diagnostic system for health assessment of power transformer. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 22(2), 182–192. <https://doi.org/10.1080/1448837X.2024.2356436>
- Manoj, T., Ranga, C., Abu-Siada, A., & Ghoneim, S. S. M. (2024). Analytic hierarchy processed grey relational fuzzy approach for health assessment of power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31(3), 1480–1489. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3382076>
- Mohd Selva, A., Azis, N., Shariffudin, N. S., Ab Kadir, M. Z. A., Jasni, J., Yahaya, M. S., & Talib, M. A. (2021). Application of statistical distribution models to predict health index for condition-based management of transformers. *Applied Sciences*, 11(6), 2728. <https://doi.org/10.3390/app11062728>
- Padmanaban, S., Khalili, M., Nasab, M. A., Zand, M., Shamim, A. G., & Khan, B. (2023). Determination of power transformers health index using parameters affecting the transformer's life. *IETE Journal of Research*, 69(11), 8467–8488. <https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2048714>
- Prasojo, R. A., Suwarno, & Abu-Siada, A. (2021). Dealing with data uncertainty for transformer insulation system health index. *IEEE Access*, 9, 74703–74715. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081699>
- Putra, M. A. A., Suwarno, & Prasojo, R. A. (2025). Improving transformer health index prediction performance using machine learning algorithms with a synthetic minority oversampling technique. *Energies*, 18(9), 2364. <https://doi.org/10.3390/en18092364>
- Rangel Bessa, A., Farias Fardin, J., Marques Ciarelli, P., & Frizera Encarnação, L. (2023). Conventional dissolved gases analysis in power transformers: Review. *Energies*, 16(21), 7219. <https://doi.org/10.3390/en16217219>
- 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.2021.3125379>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Smith, J., Petrovic, P., Rose, M., De Souza, C., Muller, L., Nowak, B., & Martinez, J. (2021). HAP Condition Assessment Manual Revision 1.1.
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314–327. <https://doi.org/10.1049/hve2.12074>
- Yuan, W., Cui, Z., Yu, H., Zou, X., Xiong, W., & Yuan, X. (2022). Transformer health status evaluation based on rough set G1 combined weighting. *Electric Power Construction*, 43(3), 50–57. <https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2022.03.006>
- Zahra, S. T., Imdad, S. K., Khan, S., Khalid, S., & Baig, N. A. (2025). Power transformer health index and life span assessment: A comprehensive review of conventional and machine learning based approaches. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 139, 109474. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109474>

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>