TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

Analisis Kondisi Generator Transformer 685 MVA PLTU Berbasis Multi-Parameter Health Index

Deny Priya Adityawan*, I Made Indradjaja M. Brunner

Sekolah Pascasarjana, Program Studi S2 Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, DKI Jakarta, Indonesia
Email: [1,*]deny2410012@itpln.ac.id, [2]imade.brunner@itpln.ac.id
Email Penulis Korespondensi: deny2410012@itpln.ac.id

Abstrak–Generator Transformer (GT) merupakan aset kritis pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena kegagalannya dapat menyebabkan *force outage*. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menerapkan kerangka *Health Index* (HI) multi-parameter untuk menilai kondisi generator transformer dengan mengombinasikan *fault factor*, *paper quality factor*, *electrical integrity factor*, dan *acoustic integrity factor*. Penelitian dilakukan pada tiga generator transformer berkapasitas 685 MVA di PLTU Suralaya menggunakan data pengujian periode 2020–2025. Pembobotan faktor dan sub-parameter dilakukan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berdasarkan penilaian lima responden ahli, dengan bobot masing-masing sebesar 29,79% untuk *fault factor*, 49,13% untuk *paper quality factor*, 13,94% untuk *electrical integrity factor*, dan 7,15% untuk *acoustic integrity factor*. Nilai HI kemudian dihitung menggunakan metode *weighted score sum*. Hasil menunjukkan bahwa Unit 5 memperoleh HI sebesar 87,67% (*very good*), Unit 6 sebesar 82,45% (*good*), dan Unit 7 sebesar 96,43% (*very good*). Meskipun Unit 5 berada dalam kategori *very good*, analisis per faktor menunjukkan kondisi kritis pada *electrical integrity factor* (skor 2) dan *acoustic integrity factor* (skor 1). Kondisi tersebut konsisten dengan validasi retrospektif yang menunjukkan penurunan skor *electrical integrity factor* dari 4 menjadi 2 kurang dari satu tahun sebelum kegagalan bushing pada 2024. Hasil ini menunjukkan bahwa HI agregat perlu dilengkapi evaluasi per faktor untuk menghindari tertutupnya kondisi kritis oleh nilai indeks keseluruhan. Kontribusi penelitian terletak pada penerapan HI multi-parameter berbobot AHP pada tiga generator transformer identik 685 MVA di satu lokasi pembangkit serta validasi retrospektif terhadap riwayat gangguan aktual, yang menghasilkan aturan *critical factor* bahwa faktor dengan skor ≤ 2 memerlukan investigasi lebih lanjut terlepas dari kategori HI agregat.

Kata Kunci: Health Index; Generator Transformer; Analytical Hierarchy Process; Faktor Kritis; Condition-Based Maintenance

Abstract–Generator Transformer (GT) is a critical asset in coal-fired power plants because its failure can result in a force outage. This study aims to develop and apply a multi-parameter Health Index (HI) framework for assessing generator transformer condition by integrating the fault factor, paper quality factor, electrical integrity factor, and acoustic integrity factor. The study was conducted on three identical 685 MVA generator transformers at the Suralaya coal-fired power plant using test data from 2020–2025. The weights of the factors and sub-parameters were determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP) based on assessments from five expert respondents, resulting in weights of 29.79% for the fault factor, 49.13% for the paper quality factor, 13.94% for the electrical integrity factor, and 7.15% for the acoustic integrity factor. The HI values were subsequently calculated using the weighted score sum method. The results showed that Unit 5 obtained an HI of 87.67% (very good), Unit 6 obtained 82.45% (good), and Unit 7 obtained 96.43% (very good). Although Unit 5 was classified as very good based on the aggregate HI, factor-level analysis revealed critical conditions in the electrical integrity factor and acoustic integrity factor, with scores of 2 and 1, respectively. Retrospective validation further showed that the electrical integrity factor of Unit 5 decreased from 4 to 2 less than one year before the bushing failure in 2024. These findings indicate that aggregate HI assessment should be complemented by factor-level evaluation to prevent critical conditions from being masked by the overall index value. The contribution of this study lies in the application of an AHP-weighted multi-parameter HI framework to three identical 685 MVA generator transformers at a single power plant and its retrospective validation against an actual failure event, leading to a proposed critical-factor rule in which any factor with a score ≤ 2 requires further investigation regardless of the aggregate HI category.

Keywords: Health Index; Generator Transformer; Analytical Hierarchy Process; Critical Factor; Condition-Based Maintenance

1. PENDAHULUAN

Generator Transformer (GT) merupakan aset kritis dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena berfungsi menaikkan tegangan keluaran generator menuju level transmisi. Kegagalan GT dapat menyebabkan penghentian paksa (force outage) unit pembangkit dan menimbulkan konsekuensi operasional serta finansial yang signifikan, terutama pada pembangkit yang beroperasi dalam kondisi cuaca dan beban ekstrem (Ali et al., 2022). Tingginya konsekuensi kegagalan dan nilai investasi GT menyebabkan penilaian kondisi secara berkala menjadi bagian penting dalam manajemen aset pembangkit. Namun, efektivitas penilaian tersebut sangat bergantung pada kemampuan metode yang digunakan dalam merepresentasikan berbagai mekanisme degradasi yang berlangsung secara simultan pada transformator. Health Index (HI) telah banyak digunakan sebagai pendekatan kuantitatif untuk menggabungkan sejumlah parameter kondisi transformator ke dalam suatu nilai indeks yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan (Azmi et al., 2017). Dalam penerapannya, HI konvensional masih banyak dibangun dengan dominasi parameter minyak isolasi, terutama dissolved gas analysis (DGA) dan kandungan furan (Bohatyrewicz et al., 2019). Ketergantungan tersebut menjadi keterbatasan ketika kondisi transformator mengalami degradasi pada aspek yang tidak secara langsung direpresentasikan oleh parameter minyak. (Anshar, 2023) menunjukkan bahwa evaluasi kondisi transformator memerlukan kombinasi berbagai metode diagnostik karena setiap pengujian memiliki kemampuan deteksi terhadap mekanisme kegagalan yang berbeda. (Foros & Istad, 2020) juga menegaskan bahwa nilai health index tidak dapat dipandang secara terpisah dari risiko dan estimasi umur transformator. Dengan demikian, nilai HI agregat yang tinggi

Copyright © 2026 the author, Page 1730
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

tidak selalu identik dengan kondisi seluruh komponen yang aman, karena degradasi pada subsistem tertentu dapat tertutupi oleh kontribusi parameter lain yang masih berada pada kondisi baik.

Keterbatasan tersebut semakin terlihat ketika mekanisme degradasi transformator berkembang secara tidak seragam. Degradasi kertas isolasi, misalnya, tidak selalu dapat direpresentasikan secara memadai hanya melalui satu indikator kimia seperti furan. (Y. Zhang et al., 2022) menunjukkan bahwa indikator kimiawi untuk pemantauan penuaan kertas isolasi memiliki karakteristik dan keterbatasan yang berbeda, sehingga interpretasi kondisi perlu mempertimbangkan lebih dari satu indikator. Di sisi lain, gangguan mekanik pada bagian aktif transformator dapat berkembang tanpa menghasilkan perubahan signifikan pada parameter minyak. Pemantauan berbasis getaran dan akustik telah dilaporkan mampu mengidentifikasi deformasi kumparan maupun anomali struktur yang tidak selalu tercermin pada indikator (Dang et al., 2020). (Prasojo et al., 2020) lebih lanjut menunjukkan bahwa karakteristik getaran dan kebisingan transformator dapat memberikan informasi mengenai kondisi mekanik bagian aktif. Fakta tersebut menunjukkan bahwa penggunaan parameter minyak sebagai representasi dominan dalam HI berpotensi menghasilkan penilaian yang terlalu optimistis ketika degradasi justru terjadi pada aspek elektrik atau mekanik. Permasalahan tidak hanya terletak pada jenis parameter yang digunakan, tetapi juga pada cara kontribusi masing-masing parameter diterjemahkan menjadi nilai HI. Bobot yang ditetapkan secara tetap menyebabkan kontribusi suatu parameter terhadap HI tidak berubah ketika tingkat keparahan kondisi transformator berubah. Padahal, kondisi transformator bersifat dinamis dan tingkat kepentingan suatu indikator dapat menjadi semakin dominan ketika parameter tersebut menunjukkan gejala degradasi. (E. Zhang et al., 2023) secara khusus mengembangkan model variable weight untuk mengatasi keterbatasan bobot statis dalam penilaian kondisi transformator. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bobot tetap dapat kurang sensitif terhadap kondisi sub-health karena perubahan kondisi aktual tidak secara otomatis diikuti perubahan kontribusi relatif parameter terhadap indeks. Dengan demikian, terdapat permasalahan metodologis yang perlu diperhatikan: HI memerlukan pembobotan yang mampu merepresentasikan kepentingan relatif parameter, tetapi bobot yang diperoleh dari expert judgment melalui AHP pada dasarnya bersifat statis dan tidak berubah mengikuti kondisi aktual transformator.

Analytical Hierarchy Process (AHP) memberikan mekanisme sistematis untuk menentukan bobot berdasarkan perbandingan berpasangan dan memungkinkan konsistensi penilaian ahli diuji secara matematis (Esmaeili Nezhad & Samimi, 2024). Pendekatan ini lebih transparan dibandingkan penetapan bobot secara arbitrer karena setiap bobot dapat ditelusuri dari preferensi responden dan dievaluasi menggunakan consistency ratio. Namun, konsistensi penilaian ahli tidak secara otomatis menghilangkan keterbatasan bobot statis. Bobot AHP merepresentasikan tingkat kepentingan relatif yang ditetapkan pada saat proses pembobotan, sedangkan kondisi transformator terus berubah akibat penuaan, beban operasi, degradasi isolasi, maupun perkembangan gangguan. Oleh karena itu, penggunaan AHP dalam HI perlu diposisikan sebagai mekanisme pembobotan dasar yang memberikan struktur dan interpretabilitas, bukan sebagai mekanisme adaptif terhadap perubahan kondisi. Berdasarkan permasalahan tersebut, masih terdapat kesenjangan antara kebutuhan penilaian kondisi transformator yang bersifat dinamis dan kerangka HI yang menggunakan bobot tetap. Penelitian sebelumnya telah mengembangkan HI berbasis berbagai parameter serta pendekatan pembobotan alternatif, tetapi integrasi parameter elektrik dan akustik secara eksplisit dengan pembobotan bertingkat berbasis AHP pada generator transformer berkapasitas besar masih terbatas, khususnya pada konteks pembangkit PLTU di Indonesia (Rediansyah et al., 2021a). Kesenjangan ini menjadi semakin penting pada transformator berkapasitas 685 MVA karena kegagalan satu komponen kritis dapat terjadi ketika indikator agregat masih menunjukkan kondisi yang baik. Oleh sebab itu, diperlukan kerangka yang tidak hanya menghasilkan satu nilai HI, tetapi juga mempertahankan informasi kondisi pada tingkat faktor sehingga perubahan atau kondisi kritis pada aspek tertentu tidak tertutupi oleh parameter lain yang memiliki bobot lebih besar.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini merancang kerangka HI multi-parameter untuk generator transformer 685 MVA yang mengintegrasikan empat faktor, yaitu fault factor, paper quality factor, electrical integrity factor, dan acoustic integrity factor. Pembobotan antarfaktor serta sub-parameter pada paper quality factor ditentukan menggunakan AHP berdasarkan penilaian lima responden ahli, sedangkan kondisi masing-masing unit dievaluasi menggunakan data pengujian periode 2020–2025. Karena AHP menghasilkan bobot yang bersifat statis, penelitian ini tidak mengklaim bahwa AHP secara langsung menyelesaikan persoalan dinamika kondisi transformator. Sebaliknya, keterbatasan tersebut ditangani secara operasional dengan mempertahankan evaluasi pada tingkat faktor dan mengusulkan aturan critical factor sebagai mekanisme pengaman terhadap kondisi yang berpotensi tertutupi oleh HI agregat. Faktor dengan skor ≤ 2 diperlakukan sebagai kondisi yang memerlukan investigasi lebih lanjut tanpa bergantung pada kategori HI Final. Penelitian ini mengambil studi kasus pada tiga unit generator transformer 685 MVA di PLTU Suralaya dengan riwayat pengujian dan operasi yang terdokumentasi sejak tahun 2020. Ketiga unit yang memiliki kapasitas dan karakteristik dasar yang identik memberikan kesempatan untuk membandingkan respons kerangka HI terhadap kondisi internal yang berbeda. Selain itu, validasi retrospektif terhadap riwayat gangguan aktual digunakan untuk mengevaluasi apakah perubahan skor faktor dapat memberikan indikasi sebelum terjadinya kegagalan. Pendekatan tersebut penting karena kemampuan suatu kerangka HI tidak cukup dinilai hanya berdasarkan perbedaan nilai indeks antarunit, tetapi juga berdasarkan kemampuannya mempertahankan informasi diagnostik ketika indikator tertentu mengalami degradasi. Dengan demikian, penelitian ini diarahkan tidak hanya untuk menghasilkan nilai HI agregat, tetapi juga untuk menguji apakah integrasi parameter elektrik dan akustik dapat meningkatkan sensitivitas penilaian kondisi serta mengurangi risiko tertutupnya kondisi kritis oleh dominasi parameter dengan bobot tinggi.

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerangka Dasar Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif berbasis studi kasus (case study) yang dilakukan di PT PLN Indonesia Power Unit Pembangkitan Suralaya, pada tiga unit generator transformer 685 MVA yaitu GT unit 5, 6, dan 7, menggunakan data pengujian periode 2020–2025. Hipotesis penelitian menyatakan bahwa kerangka HI multi parameter berbobot AHP lebih peka dalam mendeteksi degradasi elektrik dan mekanik dibandingkan kerangka HI konvensional yang hanya berbasis parameter minyak isolasi. Variabel penelitian terdiri atas empat faktor HI (fault factor, paper quality factor, electrical integrity factor, acoustic integrity factor) sebagai variabel penyusun indeks, serta bobot AHP dan skor kondisi (1–4) sebagai variabel antara. Penentuan bobot melibatkan lima responden ahli yang terdiri atas praktisi pemeliharaan transformator PT PLN Indonesia Power dan akademisi bidang peralatan tegangan tinggi, dipilih secara purposive berdasarkan pengalaman langsung menangani pengujian DGA, furan, tahanan isolasi, dan pengukuran akustik pada transformator daya.

2.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan melalui delapan langkah berurutan: (1) pengumpulan data pengujian DGA, furan, CO, CO_2, tahanan isolasi/indeks polarisasi, dan sound pressure level (SPL) untuk ketiga unit periode 2020–2025; (2) pemberian skor 1–4 pada setiap parameter berdasarkan kriteria ambang yang mengacu pada standar IEEE Std C57.104 (2019) untuk DGA dan IEC 60422 (2013) untuk parameter minyak; (3) penyusunan kuesioner AHP matriks 4×4 untuk pembobotan faktor utama dan matriks 5×5 untuk pembobotan sub-parameter paper quality factor; (4) pengisian kuesioner oleh lima responden ahli menggunakan skala intensitas Saaty 1–9; (5) perhitungan bobot melalui normalisasi kolom matriks dan uji rasio konsistensi (CR) tiap responden; (6) agregasi lima matriks responden menggunakan metode Aggregation of Individual Judgments (AIJ) melalui rata-rata geometrik; (7) integrasi skor faktor dan bobot AHP menggunakan metode weighted score sum menjadi nilai HI Final; serta (8) validasi retrospektif dengan membandingkan tren skor faktor terhadap riwayat gangguan aktual pada ketiga unit.

2.3 Kerangka Health Index Multi Parameter

Nilai HI Final dihitung dengan mengintegrasikan skor empat faktor (Si) dan bobotnya (Wi) menggunakan persamaan:

$$\mathrm{HI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Si \; x \; Wi}{\sum_{i=1}^{n} 4Kj} 100\% \qquad (1)$$

Dengan Skor Maks bernilai 4. Skor paper quality factor sendiri diperoleh dari integrasi lima sub-parameter (2-FAL, CO, CO_2, rasio CO_2/CO, dan usia operasi) menggunakan persamaan yang setara, dengan bobot sub-parameter (wi) hasil AHP tersendiri.

2.4 Pembobotan Kriteria dengan Analytical Hierarchy Process

Bobot antarfaktor dan antar sub-parameter ditentukan melalui perbandingan berpasangan menggunakan skala Saaty 1–9 (Saaty & Vargas, 2012). Bobot prioritas (w) diperoleh melalui normalisasi kolom matriks perbandingan berpasangan, kemudian dirata-ratakan pada tiap baris. Konsistensi penilaian diuji melalui rasio konsistensi:

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \qquad (2)$$

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda \max - n}{n-1}) \qquad (3)$$

Dengan RI = 0,89 untuk n = 4 dan RI = 1,11 untuk n = 5. Suatu matriks dinyatakan konsisten apabila CR ≤ 0,10. Penilaian kelima responden selanjutnya digabungkan menggunakan pendekatan Aggregation of Individual Judgments melalui rata-rata geometrik tiap elemen matriks, menghasilkan bobot kelompok sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Bobot Faktor Health Index Hasil AHP

Faktor Health Index	Bobot (%)	Consistency Ratio (CR)
Fault Factor (DGA)	29,79	
Paper Quality Factor (2-FAL, CO, CO_2, rasio CO_2/CO, usia)	49,13	
Electrical Integrity Factor (IR/PI)	13,94	
Acoustic Integrity Factor (SPL)	7,15	0,0132 (kelompok)
Total	100	

Copyright © 2026 the author, Page 1732
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

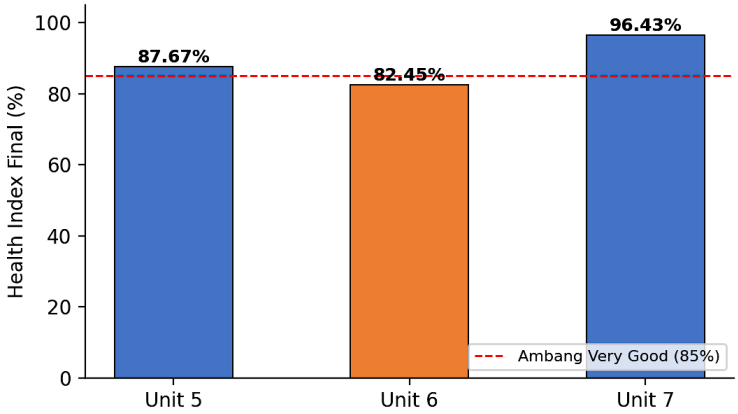
3.1. Hasil

Hasil pembobotan AHP menghasilkan bobot fault factor 29,79%, paper quality factor 49,13%, electrical integrity factor 13,94%, dan acoustic integrity factor 7,15% (Tabel 1), dengan rasio konsistensi kelompok CR = 0,0132 yang memenuhi syarat (CR ≤ 0,10). Bobot sub-parameter paper quality factor menghasilkan 2-FAL 59,47%, CO 10,95%, CO_2 10,50%, rasio CO_2/CO 11,20%, dan usia operasi 7,89%, dengan CR kelompok = 0,0048. Dominasi bobot paper quality factor dan 2-FAL mencerminkan penilaian responden ahli bahwa degradasi kertas isolasi, yang bersifat ireversibel, dipandang lebih menentukan kondisi jangka panjang transformator dibandingkan indikator lain.

Tabel 2. Rekapitulasi Skor Faktor dan HI Final Unit 5, 6, dan 7

Parameter	Unit 5	Unit 6	Unit 7
Fault Factor (skor)	4	4	4
Paper Quality Factor (skor)	4	3	4
Electrical Integrity Factor (skor)	2	3	4
Acoustic Integrity Factor (skor)	1	3	2
HI Final (%)	87,67	82,45	96,43
Kategori	Very Good	Good	Very Good
Estimasi sisa umur	> 15 tahun	10–15 tahun	> 15 tahun

Tabel 2 menunjukkan bahwa unit 5 memperoleh HI Final 87,67% dan unit 7 sebesar 96,43%, keduanya berkategori very good, sedangkan unit 6 memperoleh 82,45% berkategori good. Skor fault factor ketiga unit identik (skor 4), demikian pula paper quality factor relatif tinggi pada unit 5 dan unit 7 (skor 4) dibandingkan unit 6 (skor 3). Perbedaan paling mencolok terletak pada electrical integrity factor dan acoustic integrity factor: unit 5 memperoleh skor 2 dan 1, unit 7 memperoleh skor 4 dan 2, sedangkan unit 6 memperoleh skor 3 untuk keduanya.



Gambar 1. Perbandingan HI Final Unit 5, 6, dan 7 terhadap Ambang Kategori Very Good

Gambar 1 memperlihatkan bahwa unit 6 berada di bawah ambang 85% yang memisahkan kategori very good dari good, sementara unit 5 dan unit 7 berada tipis di atas ambang tersebut. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa fenomena ini bersumber dari struktur bobot AHP: kedua faktor berbasis minyak isolasi, yaitu fault factor dan paper quality factor, secara bersama menguasai 78,92% bobot total. Batas bawah HI untuk unit dengan kedua faktor minyak bernilai sempurna (skor 4) adalah 84,19%, hanya 0,81 poin di bawah ambang very good. Unit 5 dan unit 7 memiliki paper quality factor berskor sempurna sehingga bertahan tipis di atas ambang, sedangkan unit 6 memperoleh paper quality factor berskor 3 akibat kandungan 2-FAL yang baru menembus ambang normal (112 ppb), sehingga kontribusi minyaknya berada di bawah batas dan menempatkan kategorinya pada good.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa kategori HI agregat sensitif terhadap ambang nilai ketika skor faktor berada mendekati batas kategori. Nilai HI unit 5 yang tinggi (87,67%, very good) tetap menyamarkan dua faktor kritis, yaitu electrical integrity berskor 2 dan acoustic integrity berskor 1, yang tidak tercermin pada kategori agregatnya. Nilai HI unit 7 yang tertinggi (96,43%) juga menyamarkan acoustic integrity berskor 2. Sebaliknya, kategori good pada unit 6 justru muncul tanpa satu pun faktor berskor kritis (≤ 2), semata karena paper quality factor tidak mencapai skor sempurna. Dengan demikian, kategori agregat HI dapat menyembunyikan kondisi kritis pada satu sisi (unit 5 dan unit 7) sekaligus bereaksi berlebihan terhadap penuaan wajar pada sisi lain (unit 6).

Untuk memastikan bahwa perbedaan kondisi antar unit tidak disebabkan oleh perbedaan pola operasi, dilakukan analisis capacity factor (CF) periode 2020–2025 sebagai variabel kontrol. Rata-rata CF ketiga unit hampir identik, yaitu 69,90% (unit 5), 68,78% (unit 6), dan 70,49% (unit 7), dengan selisih maksimum hanya 1,71%. Kesetaraan beban operasi ini mengeliminasi pola pembebanan sebagai variabel penjelas, sehingga perbedaan kondisi antar unit dapat diatribusikan secara lebih meyakinkan kepada faktor internal masing-masing transformator.

Copyright © 2026 the author, Page 1733
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

Validasi retrospektif terhadap riwayat operasi unit 5 menunjukkan bahwa skor electrical integrity factor menurun dari 4 menjadi 2 kurang dari satu tahun sebelum kegagalan bushing LV fasa S pada Januari 2024, yang kemudian dikonfirmasi oleh pengukuran lapangan tahanan isolasi bushing fasa S yang jauh di bawah nilai bushing fasa lainnya. Faktor acoustic integrity turut menangkap anomali mekanik residual pascaperbaikan yang tidak terdeteksi oleh parameter DGA maupun furan, yang keduanya tetap bernilai sangat baik sepanjang periode tersebut. Kemampuan deteksi dini ini membuktikan bahwa integrasi dimensi elektrik dan akustik memberikan nilai tambah nyata dibandingkan kerangka HI konvensional yang hanya mengandalkan parameter minyak isolasi.

Perbedaan skor paper quality factor antar unit menarik untuk ditelaah lebih lanjut karena parameter ini memegang bobot AHP tertinggi (49,13%). Unit 5, meski beroperasi paling singkat (16 tahun), justru menunjukkan konsentrasi 2-FAL terendah (35 ppb) di antara ketiga unit, konsisten dengan usia operasinya. Unit 6 menunjukkan konsentrasi 2-FAL 112 ppb yang untuk pertama kalinya menembus ambang normal 100 ppb pada pengujian tahun 2025, mengindikasikan derajat polimerisasi kertas isolasi mulai memasuki fase penurunan sebagaimana dimodelkan oleh Chendong (1991). Unit 7, meskipun berusia sama dengan unit 6 (29 tahun), menunjukkan hasil 2-FAL tidak terdeteksi (ND), namun konsentrasi CO_2 telah memasuki zona waspada (2.550 ppm) dengan rasio CO_2/CO yang tinggi (50), mengindikasikan akumulasi karbon dioksida kemungkinan besar bersumber dari oksidasi minyak jangka panjang pada sistem konservator free breathing, bukan dari percepatan degradasi selulosa. Pola yang berbeda pada dua unit dengan usia identik ini menegaskan bahwa usia operasi semata tidak dapat dijadikan proksi tunggal kondisi kertas isolasi, sejalan dengan temuan (Prasojo et al., 2020)yang menunjukkan variasi laju degradasi kertas isolasi antar unit transformator meskipun berada pada populasi operasional yang serupa.

Pada dimensi elektrik, pengujian indeks polarisasi (PI) ketiga unit menunjukkan pola yang konsisten dengan skor electrical integrity factor masing-masing. Unit 5 memperoleh PI sebesar 1,11 yang tergolong questionable, unit 6 memperoleh PI 1,63, dan unit 7 memperoleh PI tertinggi sebesar 2,70. Nilai PI unit 5 yang rendah konsisten dengan riwayat kegagalan bushing yang telah terjadi, sedangkan nilai PI unit 7 yang tinggi turut mendukung kategori very good pada unit tersebut meskipun usianya telah mencapai 29 tahun. Pola ini memperkuat argumen bahwa parameter elektrik memberikan informasi yang saling melengkapi terhadap parameter kimiawi, bukan sekadar redundan, sehingga layak diberi bobot tersendiri dalam kerangka HI sebagaimana diusulkan oleh (Rediansyah et al., 2021a) dalam kerangka HI berbasis kecerdasan buatan yang mengakomodasi ketidakpastian data multi-sumber.

Pada dimensi akustik, pengukuran sound pressure level (SPL) menggunakan metode rata-rata energi sesuai IEC 60076-10 (2020) menghasilkan nilai rata-rata 91,00 dB(A) untuk unit 5, 79,09 dB(A) untuk unit 6, dan 82,42 dB(A) untuk unit 7. Nilai SPL unit 5 yang jauh melampaui baseline pabrikan (78,6 dB(A)) dan ambang batas manual book (85 dB(A)) pada hampir seluruh titik pengukuran menunjukkan anomali mekanik yang meluas, bukan bersifat lokal. Sebaliknya, unit 7 hanya melampaui ambang pada satu titik pengukuran lokal, sehingga skor acoustic integrity factor-nya (skor 2) mencerminkan anomali yang lebih terbatas cakupannya dibandingkan unit 5 (skor 1). Perbedaan cakupan spasial anomali akustik ini memberikan informasi diagnostik tambahan yang tidak dapat diperoleh hanya dari nilai HI agregat, sejalan dengan pendekatan pemantauan getaran multititik yang direkomendasikan oleh (Kornatowski et al., 2024) untuk menilai kondisi mekanik bagian aktif transformator secara lebih menyeluruh.

Implikasi praktis dari temuan ini relevan bagi manajemen aset pembangkit. Rekomendasi tindak lanjut dirumuskan berjenjang sesuai urgensi: unit 5 memperoleh prioritas tertinggi untuk investigasi menyeluruh melalui pengujian sweep frequency response analysis (SFRA) dan inspeksi struktur inti pada kesempatan shutdown terdekat, mengingat dua faktor kritisnya sekaligus; unit 7 memperoleh prioritas menengah untuk investigasi titik lokal anomali akustik serta pemantauan tren CO_2; sedangkan unit 6, meskipun kategorinya turun menjadi good, cukup memperoleh prioritas pemeliharaan rutin dengan penyesuaian interval pengujian furan dari tahunan menjadi semesteran untuk memantau laju penuaan selulosa yang mulai terukur. Pola prioritas berjenjang ini menunjukkan bahwa kerangka HI yang diusulkan tidak hanya menghasilkan nilai indeks, tetapi juga dapat diterjemahkan langsung menjadi strategi pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance) yang terdiferensiasi antar unit, konsisten dengan kerangka keputusan pemeliharaan berbasis HI yang diusulkan (Murugan & Raju, 2021)).

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian ini mendukung hipotesis bahwa kerangka HI multi parameter berbobot AHP lebih peka terhadap degradasi elektrik dan mekanik dibandingkan kerangka konvensional. Apabila kerangka HI hanya menggunakan parameter berbasis minyak sebagaimana banyak dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Tran et al., 2020), unit 5 akan memperoleh nilai HI yang lebih tinggi lagi dan anomali kondisi elektrik serta mekanik tidak akan terdeteksi hingga muncul sebagai kegagalan aktual. Temuan ini sejalan dengan argumen (Li et al., 2023a) bahwa nilai HI tunggal tanpa konteks risiko dapat menyesatkan pengambilan keputusan pemeliharaan, namun penelitian ini memperluas argumen tersebut dengan menunjukkan bahwa masalahnya bukan hanya pada penyembunyian risiko, melainkan juga pada reaksi berlebihan kategori agregat terhadap penuaan wajar, sebagaimana teramati pada unit 6.

(Kunicki et al., 2025) mengusulkan model pembobotan variabel (variable weight) sebagai solusi terhadap kelemahan bobot statis yang tidak sensitif terhadap kondisi sub-health. Penelitian ini menawarkan alternatif yang lebih sederhana untuk diterapkan secara operasional, yaitu aturan faktor kritis: setiap faktor dengan skor ≤ 2 memicu investigasi wajib terlepas dari nilai HI Final. Aturan ini tidak mengubah nilai HI agregat, namun menambahkan mekanisme pengaman yang memastikan kondisi kritis pada unit 5 dan unit 7 tetap ditindaklanjuti meskipun kategori agregatnya very

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

good. Pendekatan ini konsisten dengan rekomendasi (Aciu et al., 2024) bahwa kerangka HI perlu dilengkapi indikator tambahan di luar skor agregat untuk meningkatkan survivability assessment transformator.

Dari perspektif akustik, temuan penelitian ini memperkuat argumen (Thango, 2025) bahwa pemantauan getaran dan kebisingan mampu mendeteksi anomali mekanik yang luput dari metode kimiawi konvensional. Kasus unit 5 menjadi ilustrasi konkret: kedua faktor berbasis minyak bernilai sempurna, namun acoustic integrity factor berskor 1 berhasil menangkap residu anomali mekanik pascaperbaikan yang secara praktis relevan bagi tim pemeliharaan. Dengan demikian, penelitian ini menjawab kesenjangan yang diidentifikasi pada bagian pendahuluan, yaitu minimnya integrasi eksplisit dimensi elektrik dan akustik ke dalam kerangka HI kuantitatif untuk transformator generator kapasitas besar, sekaligus menunjukkan bahwa pembobotan berbasis AHP dapat diterapkan secara bertingkat, baik pada level faktor utama maupun pada level sub-parameter penyusunnya.

Dibandingkan dengan pendekatan berbasis kecerdasan buatan yang berkembang pesat pada literatur terkini, seperti convolutional neural network untuk klasifikasi HI (Zeinoddini-Meymand et al., 2024),kombinasi principal component analysis dengan model mass-spring-damper (Taha, 2023), maupun model machine learning untuk prediksi umur transformator (Rosyiddin & Baddarudin, 2023), kerangka berbasis AHP dan weighted score sum yang digunakan pada penelitian ini menawarkan keunggulan interpretabilitas: setiap kontribusi faktor terhadap nilai HI Final dapat ditelusuri secara eksplisit melalui persamaan (1), sehingga lebih mudah dipertanggungjawabkan dalam pengambilan keputusan pemeliharaan operasional dibandingkan model kotak hitam berbasis pembelajaran mesin. Namun demikian, pendekatan berbasis AHP tetap bergantung pada kualitas penilaian responden ahli, sehingga berpotensi mewarisi bias subjektif meskipun telah diuji konsistensinya secara matematis melalui rasio konsistensi.

Analisis terhadap Unit 6 memberikan pembanding penting dalam mengevaluasi perilaku kerangka Health Index yang diusulkan. Berbeda dengan Unit 5 yang memiliki riwayat kegagalan bushing dan Unit 7 yang menunjukkan anomali akustik lokal, Unit 6 tidak mengalami kejadian kegagalan mayor selama periode pengamatan 2020–2025. Oleh karena itu, validasi retrospektif pada Unit 6 tidak dapat dilakukan menggunakan pendekatan berbasis *failure event* sebagaimana diterapkan pada Unit 5. Sebagai gantinya, Unit 6 dianalisis sebagai representasi kondisi degradasi bertahap (*incipient ageing*), yaitu kondisi ketika indikator penuaan mulai berubah tetapi belum berkembang menjadi kegagalan operasional. Meskipun hanya memperoleh kategori good (82,45%), seluruh faktor pada Unit 6 masih berada pada skor ≥3. Penurunan nilai HI terutama disebabkan oleh paper quality factor yang memperoleh skor 3 akibat konsentrasi 2-FAL sebesar 112 ppb yang mulai melewati ambang kondisi normal. Sebaliknya, fault factor, electrical integrity factor, dan acoustic integrity factor tidak menunjukkan kondisi kritis sehingga tidak terdapat indikasi degradasi elektrik maupun mekanik yang memerlukan investigasi segera. Temuan ini menunjukkan bahwa kategori good pada Unit 6 lebih mencerminkan proses penuaan isolasi yang berlangsung secara bertahap daripada adanya indikasi kegagalan yang bersifat mendesak (Murugan & Raju, 2021)).

Perbandingan ketiga unit menunjukkan karakteristik yang berbeda. Unit 5 dan Unit 7 tetap memperoleh kategori very good karena kedua faktor berbasis minyak memberikan kontribusi bobot yang sangat dominan terhadap nilai HI agregat, sementara kondisi kritis justru muncul pada faktor elektrik dan akustik. Sebaliknya, Unit 6 memperoleh kategori yang lebih rendah walaupun tidak memiliki faktor dengan skor ≤2. Pola ini mengindikasikan bahwa kerangka HI berbobot AHP masih memiliki kecenderungan memberikan penilaian yang relatif optimistik ketika parameter kimia minyak berada pada kondisi baik, karena kedua faktor tersebut menyumbang 78,92% dari total bobot Health Index. Dengan demikian, nilai HI agregat tidak selalu proporsional terhadap tingkat risiko operasional pada setiap faktor penyusun. Temuan tersebut memperkuat alasan diusulkannya aturan critical factor dalam penelitian ini. Nilai HI agregat tetap dipertahankan sebagai indikator kondisi keseluruhan, tetapi keputusan pemeliharaan tidak boleh hanya didasarkan pada kategori HI. Faktor dengan skor ≤2 diperlakukan sebagai indikator risiko yang memerlukan investigasi lanjutan meskipun transformator masih berada pada kategori very good, sedangkan Unit 6 menunjukkan bahwa kategori good tanpa faktor kritis lebih tepat diprioritaskan untuk pemantauan tren penuaan dan penyesuaian interval pengujian daripada tindakan korektif segera (Nezami et al., 2026).

Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasilnya. Pertama, jumlah unit yang diteliti terbatas pada tiga unit generator transformer identik pada satu lokasi pembangkit, sehingga generalisasi terhadap populasi transformator yang lebih luas memerlukan pengujian lanjutan. Kedua, bobot AHP yang dihasilkan bersifat statis dan tidak menyesuaikan diri secara otomatis terhadap kondisi faktor yang berubah signifikan, sehingga aturan faktor kritis yang diusulkan berperan sebagai mekanisme pelengkap, bukan pengganti penyempurnaan model pembobotan itu sendiri (Li et al., 2023b). Ketiga, validasi retrospektif pada penelitian ini terbatas pada satu kejadian kegagalan aktual (bushing unit 5), sehingga kekuatan statistik korelasi antara skor HI dan kejadian kegagalan masih memerlukan pengujian pada populasi data yang lebih besar untuk membangun hubungan prediktif yang lebih kuat, sebagaimana disarankan oleh (Rediansyah et al., 2021b) dalam kajian estimasi sisa umur transformator.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan kerangka *Health Index* (HI) multi-parameter untuk *generator transformer* 685 MVA dengan mengintegrasikan *fault factor*, *paper quality factor*, *electrical integrity factor*, dan *acoustic integrity factor*. Pembobotan antarfaktor dan sub-parameter *paper quality factor* dilakukan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berdasarkan penilaian lima responden ahli, dengan seluruh matriks memenuhi persyaratan konsistensi (CR ≤ 0,10).

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License


TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

Penerapan kerangka tersebut pada tiga *generator transformer* di PLTU Suralaya menghasilkan nilai HI sebesar 87,67% pada Unit 5, 82,45% pada Unit 6, dan 96,43% pada Unit 7, yang masing-masing termasuk kategori *very good*, *good*, dan *very good*. Kesamaan *capacity factor* ketiga unit menunjukkan bahwa perbedaan kondisi lebih berkaitan dengan kondisi internal masing-masing transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Health Index konvensional yang hanya mengandalkan parameter berbasis minyak, khususnya DGA dan furan, tidak seharusnya digunakan sebagai satu-satunya dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan transformator. Pada Unit 5, nilai HI agregat sebesar 87,67% masih berada dalam kategori *very good*, sementara *electrical integrity factor* dan *acoustic integrity factor* masing-masing hanya memperoleh skor 2 dan 1 yang menunjukkan kondisi kritis. Bahkan, penurunan skor *electrical integrity factor* dari 4 menjadi 2 telah terekam kurang dari satu tahun sebelum terjadinya kegagalan *bushing* pada tahun 2024. Temuan tersebut menunjukkan bahwa ketergantungan hanya pada DGA dan furan berpotensi menghasilkan penilaian kondisi yang terlalu optimistis dan tidak mampu mengidentifikasi degradasi pada aspek elektrik maupun akustik. Berdasarkan temuan tersebut, penerapan HI multi-parameter memberikan penilaian kondisi yang lebih komprehensif dengan tetap mempertahankan informasi pada tingkat faktor selain nilai HI agregat. Penelitian ini juga mengusulkan aturan *critical factor*, yaitu setiap faktor dengan skor ≤ 2 wajib ditindaklanjuti melalui investigasi lebih lanjut tanpa mempertimbangkan kategori HI agregat. Meskipun demikian, hasil penelitian masih memiliki keterbatasan berupa jumlah transformator yang terbatas pada satu lokasi pembangkit, bobot AHP yang bersifat statis, serta validasi retrospektif yang baru mencakup satu kejadian kegagalan aktual. Penelitian selanjutnya perlu memperluas populasi transformator, mengembangkan pembobotan yang dinamis, dan mengintegrasikan sistem pemantauan daring secara berkelanjutan untuk meningkatkan kemampuan prediktif dan generalisasi kerangka HI yang dikembangkan

REFERENCES

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

Ali, R., Khosa, I., Armghan, A., Arshad, J., Rabbani, S., Alsharabi, N., & Hamam, H. (2022). Financial Hazard Prediction Due to Power Outages Associated with Severe Weather-Related Natural Disaster Categories. *Energies*, *15*(24), 9292. https://doi.org/10.3390/en15249292

Anshar, C. N. (2023). Studi Analisa Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 KV Akibat Pembebanan. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, *1*(2), 247–253. https://doi.org/10.56248/marostek.v1i2.26

Azmi, A., Jasni, J., Azis, N., & Kadir, M. Z. A. Ab. (2017). Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 687–700. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.094

Bohatyrewicz, P., Płowucha, J., & Subocz, J. (2019). Condition Assessment of Power Transformers Based on Health Index Value. *Applied Sciences*, *9*(22), 4877. https://doi.org/10.3390/app9224877

Dang, X. J., Wang, F. H., & Ma, W. J. (2020). Fault Diagnosis of Power Transformer by Acoustic Signals with Deep Learning. *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9279751

Esmaeili Nezhad, A., & Samimi, M. H. (2024). A review of the applications of machine learning in the condition monitoring of transformers. *Energy Systems*, *15*(1), 463–493. https://doi.org/10.1007/s12667-022-00532-5

Foros, J., & Istad, M. (2020). Health Index, Risk and Remaining Lifetime Estimation of Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *35*(6), 2612–2620. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2972976

Kornatowski, E., Banaszak, S., & Molenda, P. (2024). Quality Index for Assessment of the Mechanical Condition of Transformers' Active Part with Frequency Response and Vibroacoustic Measurements. *Energies*, *17*(6), 1431. https://doi.org/10.3390/en17061431

Kunicki, M., Wotzka, D., Koziol, M., Nagi, L., Borucki, S., & Urbaniec, I. (2025). Field Experience in Application of Vibroacoustics for Power Transformers Diagnostics. *2025 25th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/EPE67256.2025.11127140

Li, S., Li, X., Cui, Y., & Li, H. (2023a). Review of Transformer Health Index from the Perspective of Survivability and Condition Assessment. *Electronics*, *12*(11), 2407. https://doi.org/10.3390/electronics12112407

Li, S., Li, X., Cui, Y., & Li, H. (2023b). Review of Transformer Health Index from the Perspective of Survivability and Condition Assessment. *Electronics*, *12*(11), 2407. https://doi.org/10.3390/electronics12112407

Murugan, R., & Raju, R. (2021). Evaluation of in-service power transformer health condition for Inspection, Repair, and Replacement (IRR) maintenance planning in electric utilities. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *12*(2), 318–336. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01083-1

Nezami, M. M., Ahmad, S., Salamat, A., Ansari, M. F., Alsubait, T., Taha, I. B. M., Ghatasheh, M., Mohamed Abdelwahab, S. A., & Flah, A. (2026). An intelligent life prediction approach employing machine learning models for the power transformers. *Scientific Reports*, *16*(1), 4016. https://doi.org/10.1038/s41598-025-34033-z

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License


TIN: Terapan Informatika Nusantara
Vol 7, No 3, August 2026, page 1730-1737
ISSN 2722-7987 (Media Online)
Website https://ejurnal.seminar-id.com/index.php/tin
DOI 10.47065/tin.v7i3.10888

Prasojo, R. A., Gumilang, H., Suwarno, Maulidevi, N. U., & Soedjarno, B. A. (2020). A Fuzzy Logic Model for Power Transformer Faults' Severity Determination Based on Gas Level, Gas Rate, and Dissolved Gas Analysis Interpretation. *Energies*, *13*(4), 1009. https://doi.org/10.3390/en13041009

Rediansyah, D., Prasojo, R. A., Suwarno, & Abu-Siada, A. (2021a). Artificial Intelligence-Based Power Transformer Health Index for Handling Data Uncertainty. *IEEE Access*, *9*, 150637–150648. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125379

Rediansyah, D., Prasojo, R. A., Suwarno, & Abu-Siada, A. (2021b). Artificial Intelligence-Based Power Transformer Health Index for Handling Data Uncertainty. *IEEE Access*, *9*, 150637–150648. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125379

Rosyiddin, A., & Baddarudin, B. (2023). Analisis Prediksi Dan Kondisi Umur Transformator pada BAT GT 2.1 PLTGU Priok Menggunakan Metode Health Index. *Jurnal Teknologi Elektro*, *14*(2), 90. https://doi.org/10.22441/jte.2023.v14i2.006

Taha, I. B. M. (2023). Power Transformers Health Index Enhancement Based on Convolutional Neural Network after Applying Imbalanced-Data Oversampling. *Electronics*, *12*(11), 2405. https://doi.org/10.3390/electronics12112405

Thango, B. A. (2025). Six Sigma-Based Frequency Response Analysis for Power Transformer Winding Deformation. *Applied Sciences*, *15*(7), 3951. https://doi.org/10.3390/app15073951

Tran, Q. T., Davies, K., Roose, L., Wiriyakitikun, P., Janjampop, J., Riva Sanseverino, E., & Zizzo, G. (2020). A Review of Health Assessment Techniques for Distribution Transformers in Smart Distribution Grids. *Applied Sciences*, *10*(22), 8115. https://doi.org/10.3390/app10228115

Zeinoddini-Meymand, H., Saeid, M., & Vahidi, B. (2024). Calculation of power transformer health index using the combination of principal component analysis and mass-spring-damper model. *Electrical Engineering*, *106*(6), 7399–7409. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02459-9

Zhang, E., Liu, J., Zhang, C., Zheng, P., Nakanishi, Y., & Wu, T. (2023). State-of-Art Review on Chemical Indicators for Monitoring the Aging Status of Oil-Immersed Transformer Paper Insulation. *Energies*, *16*(3), 1396. https://doi.org/10.3390/en16031396

Zhang, Y., Tang, Y., Liu, Y., & Liang, Z. (2022). Research on Variable Weight Synthesizing Model for Transformer Condition Assessment. *Frontiers in Energy Research*, *10*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.941985

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License