



JASEE

Journal of Application and Science on Electrical Engineering

<https://jurnal.widyagama.ac.id/index.php/jasee/index>



PENGARUH KEBOCORAN RADIATOR PADA MAIN TRANSFORMER TERHADAP KINERJA OPERASI PEMBANGKITAN LISTRIK: STUDI KASUS PLTA AMPELGADING MALANG

Thaariq Affansyah¹, Sabar Setiawidayat^{2*}, Diky Siswanto², Mohamad Mukhsim²

¹PT. PLN (PERSERO), Unit Pembangkitan Ampelgading

²Jurusan Teknik Elektro Universitas Widya Gama Malang

Corresponding author, email: *sabarset@widyagama.ac.id

Abstract

This study aims to analyze the impact of radiator leakage in the main transformer on the power generation performance at the Ampelgading Hydroelectric Power Plant, Malang. Radiator leakage reduces the volume of insulating oil, leading to increased operating temperatures and degradation of insulation quality. A quantitative descriptive method with a case study approach was employed by analyzing temperature data, Breakdown Voltage (BDV), Dissolved Gas Analysis (DGA), and energy production data before and after the disturbance. The results indicate that radiator leakage caused a significant increase in winding and oil temperatures, along with a decline in insulation oil quality marked by elevated dissolved gas levels. Operationally, the disturbance resulted in a power output reduction of 18.27%. Corrective actions, including cold welding, load reduction, and oil purification, were effective in restoring transformer performance, as evidenced by an average BDV value of 68.1 kV categorized as very good, and improved energy production after maintenance. This study concludes that the reliability of the transformer cooling system, particularly the radiator, plays a crucial role in maintaining operational stability and efficiency in hydroelectric power generation.

Keywords: transformer; radiator leakage; breakdown voltage; cooling system; hydroelectric power plant.



p-ISSN : 2721-3625

e-ISSN : 2721-320X

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu sistem pembangkitan energi listrik yang andal dan ramah lingkungan karena memanfaatkan energi potensial air sebagai sumber energi primer. Dalam sistem pembangkitan ini, transformator daya (main transformer) memiliki peran vital dalam menaikkan tegangan keluaran generator agar dapat ditransmisikan secara efisien ke jaringan listrik. Kinerja transformator sangat bergantung pada kehandalan sistem pendinginan, mengingat rugi-rugi energi pada inti dan lilitan menghasilkan panas yang dapat menurunkan kualitas isolasi serta mempercepat degradasi peralatan apabila tidak dikendalikan dengan baik [1], [2], [3].

Salah satu komponen utama dalam sistem pendinginan transformator adalah radiator, yang berfungsi sebagai media pelepasan panas dari minyak isolasi ke lingkungan. Efektivitas radiator sangat menentukan kestabilan temperatur minyak dan lilitan (winding temperature). Apabila sistem pendinginan tidak bekerja optimal, maka akan terjadi peningkatan temperatur operasi yang berdampak pada penurunan tegangan tembus (Breakdown Voltage/BDV), peningkatan kandungan gas terlarut dalam minyak, serta percepatan penuaan isolasi [4], [5]. Dalam kondisi ekstrem, hal ini dapat memicu gangguan operasional seperti derating transformator maupun trip sistem proteksi.

<https://doi.org/10.31328/jasee.v6i2.02>

Received: 07-Jul-2025

Revised: 12-Agt-2025

Accepted: 23-Sep-2025, published by ©UWG Press 2025

Dalam praktik operasional di lapangan, salah satu gangguan yang sering terjadi adalah kebocoran pada radiator transformator. Kebocoran ini menyebabkan penurunan volume dan tekanan minyak isolasi, sehingga mengurangi efektivitas perpindahan panas. Dampak lanjutan dari kondisi tersebut adalah meningkatnya temperatur transformator, menurunnya kualitas minyak isolasi, serta meningkatnya risiko kegagalan isolasi. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kenaikan temperatur memiliki korelasi langsung dengan penurunan kualitas minyak dan kehandalan transformator, namun kajian yang menghubungkan secara kuantitatif antara kerusakan sistem pendingin dan performa pembangkitan listrik masih terbatas [1], [6].

Kasus kebocoran radiator pada main transformer Unit 1 di PLTA Ampelgading, Malang pada Desember 2024 memberikan contoh nyata bagaimana gangguan pada sistem pendingin dapat berdampak pada performa pembangkitan. Kebocoran tersebut menyebabkan gangguan sirkulasi minyak, peningkatan suhu operasi, serta penurunan kualitas minyak yang ditandai dengan meningkatnya kandungan gas terlarut. Selain berdampak secara teknis pada transformator, kondisi ini juga mempengaruhi kinerja operasional pembangkit, khususnya pada penurunan daya output dan efisiensi produksi energi listrik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara komprehensif dampak kebocoran radiator terhadap kinerja transformator dan sistem pembangkitan listrik. Analisis dilakukan dengan pendekatan kuantitatif-deskriptif melalui evaluasi parameter temperatur, kualitas minyak isolasi (Breakdown Voltage dan Dissolved Gas Analysis), serta data produksi energi listrik sebelum dan sesudah gangguan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara kehandalan sistem pendingin transformator dan performa pembangkitan listrik, serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance).

Penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) pada integrasi analisis teknis dan operasional dalam mengevaluasi dampak kebocoran radiator transformator terhadap sistem pembangkitan listrik. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada parameter internal transformator seperti temperatur atau kualitas minyak isolasi, penelitian ini mengkaji keterkaitan langsung antara gangguan sistem pendingin dengan performa pembangkitan energi listrik secara kuantitatif.

Kontribusi utama penelitian ini meliputi:

1. **Pendekatan multi-parameter**, yaitu integrasi analisis temperatur transformator, Breakdown Voltage (BDV), dan Dissolved Gas Analysis (DGA) dalam satu kerangka evaluasi kinerja.
2. **Analisis berbasis data operasional nyata (real case industrial data)** pada pembangkit listrik tenaga air, sehingga memberikan validitas praktis yang tinggi.
3. **Kuantifikasi dampak gangguan terhadap produksi energi**, yang ditunjukkan melalui perhitungan penurunan daya output pembangkit akibat kebocoran radiator.
4. **Evaluasi efektivitas tindakan perbaikan**, meliputi cold welding, penurunan beban, dan purifikasi minyak dalam memulihkan kinerja transformator.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada aspek analisis teknis transformator, tetapi juga pada pengambilan keputusan operasional dan strategi pemeliharaan pada sistem pembangkitan listrik.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan penting dalam sistem pembangkitan dan transmisi listrik. Fungsinya adalah untuk menaikkan tegangan (step-up) dari generator agar dapat ditransmisikan ke jaringan dengan rugi-rugi daya seminimal mungkin [7]. Transformator daya memiliki beberapa bagian penting, seperti lilitan primer dan sekunder, inti besi, tangki minyak isolasi, radiator, serta sistem proteksi [6].



Gambar 1. Transformator

Pada main transformator unit 1 PLTA Ampelgading mengalami penurunan hasil produksi saat terjadi kebocoran radiator hasil produksi tertinggi dalam rentang waktu bulan Januari hingga April 2025 sebesar 2.721.078 kWh dengan rata-rata produksi harian sebesar 87.777 kWh.

2.2 Radiator Transformator

Radiator adalah komponen eksternal pada transformator yang memungkinkan minyak yang telah menyerap panas dari inti transformator untuk melepaskan panasnya ke udara. Minyak bersirkulasi secara alami (konveksi) atau dibantu dengan pompa/kipas. Kebocoran pada radiator menyebabkan berkurangnya volume minyak, penurunan tekanan sistem, dan menurunnya efektivitas pendinginan.



Gambar 2. Radiator

2.3 Sistem Pendingin Transformator

Transformator daya menghasilkan panas selama proses konversi energi akibat rugi-rugi dalam lilitan dan inti besi. Untuk menjaga kinerja transformator tetap optimal, dibutuhkan sistem pendingin. Salah satu sistem yang umum digunakan adalah ONAN (Oil Natural Air Natural) dan ONAF (Oil Natural Air Forced) [2]. Sistem pendingin terdiri atas:

- Minyak isolasi (insulating oil): berfungsi sebagai media isolasi dan penghantar panas.
- Radiator: berfungsi membuang panas dari minyak ke udara bebas.
- Kipas pendingin (pada sistem ONAF): mempercepat proses pelepasan panas.

2.4 Tegangan Tembus (BDV)

BDV adalah tegangan minimum yang menyebabkan bahan isolasi seperti minyak isolasi transformator kehilangan sifat isolatifnya dan mulai menghantarkan arus secara signifikan. BDV menjadi indikator utama kualitas minyak isolasi [2].

Tabel 1. Standar IEC 60422 tentang kualitas minyak isolasi transformator [8]

Kategori Tegangan	Tegangan Tembus		
	Bagus	Cukup	Buruk
500 kV	>60	50-60	<50
150 kV	>50	40-50	<40
70 kV	>40	30-40	<30

Nilai BDV yang rendah dapat menyebabkan flashover dan potensi kerusakan peralatan. Faktor yang memengaruhi BDV:

- Kandungan air dan partikel dalam minyak,
- Suhu operasi,
- Umur minyak dan tingkat oksidasi.

2.5 Dampak Kenaikan Suhu Terhadap Transformator

Suhu kerja yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi isolasi, menurunkan efisiensi transformator, serta memperpendek umur operasi transformator. Suhu maksimum pada winding biasanya dibatasi sekitar 105–110°C [9]. Jika pendinginan tidak efektif akibat kebocoran radiator, maka suhu dapat meningkat, dan transformator bisa mengalami derating atau bahkan trip sistem proteksi [2]. Berikut dampak-dampak yang terjadi jika suhu pada transformator meningkat:

2.5.1. Penurunan Kualitas Minyak Isolasi

Kualitas minyak isolasi transformator sangat berpengaruh pada kinerja transformator. Penurunan kualitas minyak bisa saja berakibat fatal pada kinerja transformator. Berikut dampaknya :

- Minyak isolasi transformator berfungsi sebagai media isolasi dan pendingin.
- Suhu tinggi menyebabkan oksidasi minyak dan membentuk gas degradasi seperti H_2 , CO, dan C_2H_2 .
- BDV menurun drastis sehingga potensi flashover (loncatan listrik) meningkat.

2.5.2. Degradasi Isolasi Kertas (Solid Insulation)

Sifat mekanis kertas isolasi dapat ditentukan dengan pengukuran langsung kekuatan tarik atau derajat polimerisasi (DP). Sifat-sifat ini digunakan untuk mengevaluasi akhir masa pakai isolasi kertas

- Suhu tinggi mempercepat penuaan termal pada isolasi kertas di belitan.
- Menyebabkan penurunan ketahanan dielektrik, hingga isolasi menjadi rapuh.
- Jika dibiarkan, bisa menimbulkan short circuit antar lilitan

2.6 Purifikasi minyak isolasi transformator

Purifikasi minyak isolasi merupakan proses pemurnian untuk menghilangkan kontaminan seperti air, gas terlarut, dan partikel padat yang dapat menurunkan kualitas isolasi dan pendinginan transformator. Proses ini bertujuan mengembalikan nilai BDV, menstabilkan performa pendinginan, serta mencegah potensi kegagalan operasi akibat degradasi minyak [10].

3. METODE

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang ada maka untuk memperoleh hasil maksimal pada hasil penelitian, berikut metode penelitian yang dilakukan :

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode studi kasus. Data yang dikumpulkan akan dianalisis untuk menggambarkan hubungan antara kebocoran radiator dengan perubahan suhu transformator, efisiensi kinerja, dan dampaknya terhadap operasi pembangkitan. Studi ini juga didukung oleh dokumentasi lapangan dan analisis teknis dari data historis PLTA Ampelgading.

3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PLTA Ampelgading, Kabupaten Malang, Jawa Timur, dengan rentang waktu pengambilan data dan analisis dari bulan Januari 2025 – Juni 2025.



Gambar 3. Lokasi Penelitian

3.3. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah main transformer (transformator daya utama) yang digunakan pada sistem pembangkitan PLTA Ampelgading, khususnya unit transformator yang mengalami kebocoran radiator selama periode tertentu.

3.4 Teknik Pengumpulan Data

3.4.1. Observasi Langsung

Observasi langsung adalah proses pemeriksaan dengan pengamatan mata secara kasatmata terhadap kondisi peralatan (misalnya radiator transformator) untuk mendeteksi adanya tanda-tanda kerusakan seperti kebocoran, karat, perubahan warna, atau bau menyengat.

3.4.2. Dokumentasi Teknis

Dalam konteks peralatan pembangkit seperti transformator di PLTA, dokumentasi teknis adalah kumpulan data, catatan, dan bukti visual yang berisi informasi detail mengenai kondisi, pengujian, pemeliharaan, dan perbaikan suatu sistem. Dokumentasi ini sangat penting untuk audit, analisis performa, pelacakan kerusakan, dan kepatuhan terhadap standar teknis.

3.4.3. Wawancara

Pada tahap ini dilakukan wawancara kepada teknisi/operator untuk mengetahui kronologi dan tindakan penanganan. Tujuan Wawancara kepada Pihak Teknisi atau Engineer dalam konteks

penelitian atau proyek pada transformator di PLTA, khususnya mengenai radiator transformator, adalah sebagai berikut;

- a. Menggali Informasi Teknis yang Tidak Terdokumentasi
- b. Memverifikasi Data dan Temuan Lapangan
- c. Memahami Prosedur Pemeliharaan dan Tindakan Korektif
- d. Mengidentifikasi Penyebab Potensial Masalah
- e. Mengetahui Kendala di Lapangan
- f. Mendukung Validitas Penelitian

3.4.4. Studi Literatur

Untuk mendukung analisis dampak secara teknis dan mengumpulkan beberapa analisis terdahulu terkait kerusakan radiator. Studi literatur bertujuan untuk mengkaji prinsip kerja radiator transformator, memahami mekanisme kebocoran dan degradasi minyak isolasi, serta mengidentifikasi metode deteksi kebocoran dan purifikasi minyak yang umum digunakan dalam sistem pembangkit tenaga listrik, khususnya PLTA.

3.5 Teknik Analisis Data

Teknik Analisis Data dalam penelitian kasus kebocoran radiator pada transformator pembangkit di PLTA dapat melibatkan gabungan analisis kuantitatif dan kualitatif, tergantung pada jenis data yang dikumpulkan. Berikut teknik analisis yang digunakan pada penelitian ini :

3.5.1. Analisis Temperatur

Membandingkan suhu winding dan suhu minyak saat kondisi normal dan saat terjadi kebocoran. Dalam membandingkan kenaikan suhu temperatur pada transformator maka bisa disebut juga sebagai Delta Temperatur (ΔT).

Berikut rumus untuk mengetahui kenaikan suhu atau Delta Temperatur [4]:

$$\Delta T = T_w - T_o \dots \dots \dots (1)$$

Dimana,

T_w = Temperatur winding ($^{\circ}\text{C}$)

T_o = Temperatur minyak ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT = menunjukkan beda suhu antara belitan dan minyak — indikator performa pendinginan.

Jika kenaikan suhu tersebut terdapat beban maka dapat dihitung dengan rumus [2]:

$$\Delta T_L = \Delta T_R \left(\frac{L}{L_R} \right)^n \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

ΔT_L = Kenaikan suhu pada kondisi beban aktual

ΔT_R = Kenaikan suhu pada beban referensi (1.0 atau 100%)

L = Beban aktual (dalam p.u. atau %)

L_R = Beban referensi (biasanya 1.0)

n = eksponen beban (umumnya antara 1.6–2.0)

Menghitung selisih kenaikan suhu dan korelasinya dengan performa pendinginan.

3.5.2. Analisis BDV

Menilai apakah penurunan kualitas minyak akibat overheating berpengaruh terhadap BDV. Hasil akan dibandingkan dengan standar minimum (misalnya ≥ 30 kV). Semakin tinggi nilai BDV maka

semakin baik kemampuan isolasi minyak. Semakin rendah BDV maka minyak terkontaminasi (oleh air, partikel, atau gas), dan tidak layak pakai.

3.5.3. Analisis Dampak Operasional

a. Menghitung perubahan daya output pembangkit (% penurunan).

$$\text{Penurunan Daya (\%)} = \left(\frac{P_{\text{normal}} - P_{\text{terganggu}}}{P_{\text{normal}}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (4)$$

dimana,

- P_{normal} = Daya output pembangkit saat kondisi normal (dalam MW atau kW)
 $P_{\text{terganggu}}$ = Daya output saat terjadi gangguan (misalnya radiator transformator bocor)

- b. Menghitung potensi kerugian energi (kWh) selama periode gangguan.
 c. Menilai derating transformator dan potensi risiko trip sistem proteksi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

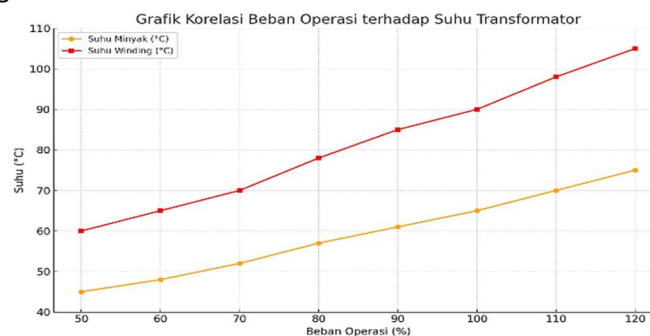
4.1. Analisis Temperatur Transformator

Korelasi antara suhu transformator dengan beban operasi sangat penting untuk dipahami, khususnya dalam konteks pembangkit listrik di PLTA). Suhu yang berlebihan bisa menurunkan efisiensi, mempercepat degradasi isolasi, bahkan menyebabkan kegagalan peralatan. Jika beban operasi naik maka suhu transformator juga naik. Saat transformator menanggung beban listrik lebih tinggi, arus yang mengalir melalui kumparan primer dan sekunder juga meningkat, akibatnya rugi-rugi tembaga (I^2R losses) bertambah besar. hal ini akan menghasilkan panas. Begitu juga pada Suhu winding (gulungan) dan suhu minyak isolasi transformator juga meningkat. Peningkatan suhu dapat menjadi indikasi bahwa transformator sedang bekerja mendekati atau melebihi kapasitasnya. Berikut parameter yang dapat digunakan untuk acuan data :

Tabel 2. Standar IEC 60156-95

Beban (%)	Suhu Minyak (°C)	Suhu Winding (°C)
50%	~45°C	~60°C
75%	~55°C	~75°C
100%	~65°C	~90°C
>100% (overload)	>75°C	>105°C

Dampak Jika Suhu Terlalu Tinggi adalah degradasi isolasi lebih cepat maka umur transformator lebih pendek, BDV minyak menurun sehingga kemampuan isolasi melemah, overpressure di dalam tangki transformator sehingga rawan kebocoran atau ledakan, Thermal aging mengalami kerusakan permanen pada gulungan dan inti.



Gambar 1. Korelasi Beban Operasi terhadap Suhu Transformator

Dari gambar 1, maka semakin tinggi beban operasi, maka, suhu minyak (warna oranye) meningkat secara bertahap. Suhu winding (warna merah) meningkat lebih cepat, karena langsung terpengaruh oleh arus beban. Pada beban >100%, suhu winding bisa mencapai >98–105°C, yang berisiko mempercepat degradasi isolasi. Maka dari itu, pemantauan suhu yang rutin sangat penting untuk menjaga kehandalan transformator, terutama pada kondisi beban puncak.

4.2. Analisis Tegangan Tembus (BDV)

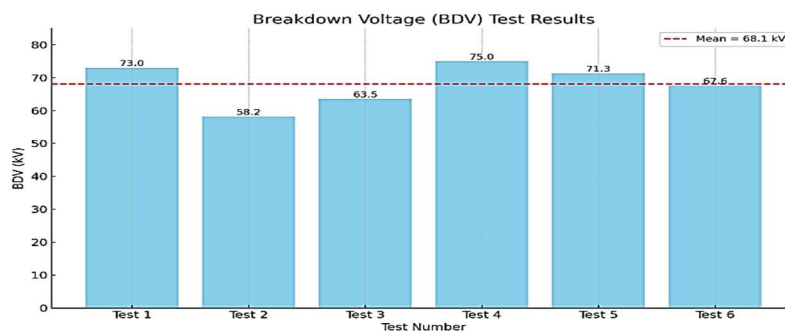
Uji tegangan tembus sesuai pada gambar menunjukkan sebuah alat uji tegangan tembus minyak isolasi transformator (BDV Test Set) buatan Megger Instruments Ltd. Alat ini digunakan untuk mengukur kekuatan dielektrik (tegangan tembus) dari minyak isolasi pada transformator, sesuai dengan standar internasional. Hasil uji BDV di bawah ini sesuai pada Gambar tampilan hasil pengujian BDV minyak isolasi transformator menggunakan alat dari Megger Instruments Ltd.

Tabel 3. Hasil uji tegangan tembus

Percobaan	Hasil Tegangan (kV)
Test 1	73.0 kV
Test 2	58.2 kV
Test 3	63.5 kV
Test 4	75.0 kV
Test 5	71.3 kV
Test 6	67.6 kV

Berdasarkan hasil uji di atas maka rata-rata dari BDV Adalah:

$$\text{Mean} = \frac{73,0+58,2+63,5+75,0+71,3+67,6}{6} = 68.1 \text{ kV}$$



Gambar 2. Breakdown Voltage Test

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian tegangan tembus (BDV) dari minyak isolasi transformator sebanyak 6 kali pengujian (Test 1 sampai Test 6). Sumbu X merepresentasikan nomor pengujian. Sumbu Y menunjukkan nilai tegangan tembus dalam satuan kilovolt (kV). Setiap batang biru menunjukkan nilai individual BDV dari satu kali pengujian, sedangkan garis putus-putus merah horizontal menunjukkan nilai rata-rata BDV.

Dari hasil uji BDV yang dilakukan setelah perbaikan pada radiator yang bocor diatas maka sesuai Standar IEC 60422 maka diperoleh hasil sebagaimana Tabel 4.

Tabel 4. Analisis Tegangan Tembus

Kriteria	Penilaian	Keterangan
Rata-rata BDV	68.1 kV	Kategori sangat baik
Standar deviasi	Cukup kecil	Menandakan homogenitas minyak baik
Nilai terendah	58.2 kV	Masih di atas batas minimal 40–50 kV (untuk layak operasi menurut IEC 60156)
Rekomendasi	Tidak perlu purifikasi.	Hasil ini menunjukkan kualitas minyak sangat layak operasi

4.3 Analisis Dampak Operasional pada Pembangkit

Perbandingan dilakukan pada basis rata-rata bulanan untuk menghindari bias jumlah periode pengamatan.

Tabel 5. Hasil Produksi Sisi Main Transformator Sebelum Perbaikan

Rekap Hasil Produksi Sisi Main Transformator (Netto) 2024			
No	Bulan	Unit 1 (kWh)	Rata-Rata Produksi Harian (kWh)
1	Januari	359,564	55,656
2	Februari	893,840	30,822
3	Maret	1,732,700	55,894
4	April	2,221,549	74,052
5	Mei	1,797,778	57,993
6	Juni	1,695,379	56,513
7	Juli	0	0
8	Agustus	2,008,366	64,786
9	September	1,343,689	44,790
10	Oktober	2,040,264	65,815
11	November	1,462,704	48,757
12	Desember	1,725,345	55,656
	Total	17,281,178	
	Rata-Rata Bulanan	1,440,098	

Tabel 6. Hasil Produksi Sisi Main Transformator Sesudah Perbaikan

Rekap Hasil Produksi Sisi Main Transformator (Netto) 2025			
No	Bulan	Unit 1 (KWh)	Rata-Rata Produksi Harian (Kwh)
1	Januari	2,721,078	87,777
2	Februari	1,922,196	68,650
3	Maret	2,221,549	71,663
4	April	1,013,843	33,795
5	Mei	3,204,104	103,358
6	Juni	3,040,395	101,347
	Total	14,123,165	
	Rata-Rata Bulanan	1,176,930	

Berdasarkan tabel 5 (sebelum perbaikan), produksi unit 1 dari bulan Januari hingga Juni adalah 8.700.810 kWh, sedangkan berdasarkan tabel 6 (setelah perbaikan) adalah 14.123.165 kWh, sehingga terdapat kenaikan sebesar $14.123.165 - 8.700.810 = 5,422,355$ kWh.

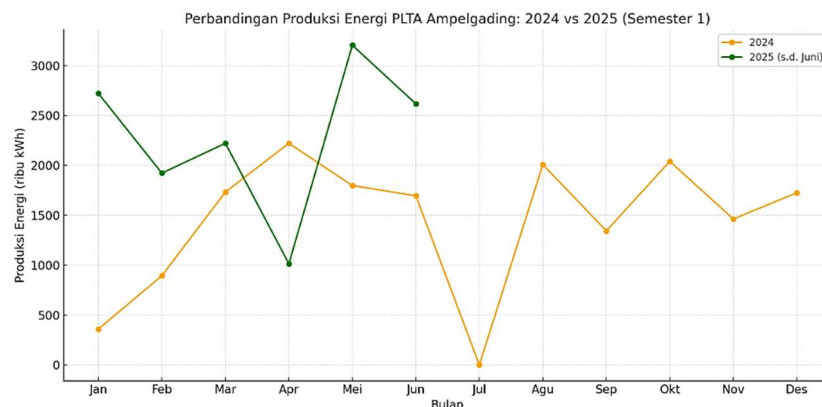
Tabel 7 Rekapitulasi Produksi

Tahun	Total Produksi (kWh)	Rata-Rata Bulanan (kWh)
2024	17.281.178	1.440.098
2025 (s.d. Juni)	14.123.165	1.176.930

Penurunan daya output pembangkit adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Penurunan Daya (\%)} &= \left(\frac{1.440.098 - 1.176.930}{1.440.098} \right) \times 100\% \\
 &= \left(\frac{263.168}{1.440.098} \right) \times 100\% \\
 &= 18,27 \%
 \end{aligned}$$

Terdapat penurunan daya output pembangkit sebesar $\pm 18,27\%$ pada semester pertama tahun 2025 dibandingkan rata-rata bulanan tahun 2024. Hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya gangguan atau degradasi performa sistem yang disebabkan karena kebocoran radiator pada bulan Desember 2024 sebelum dilakukan perbaikan. Berikut grafik perbandingan produksi energi listrik Unit 1 PLTA Ampelgading dari Januari hingga Juni antara tahun 2024 (garis oranye) dan 2025 (garis hijau).



Gambar 3. Perbandingan produksi sebelum dan sesudah perbaikan

Semester 1 tahun 2025 secara umum memiliki produksi lebih tinggi dibandingkan periode yang sama di 2024, kecuali pada bulan April yang mengalami penurunan. April 2025 kemungkinan besar menjadi indikasi gangguan (seperti kebocoran radiator atau masalah pada transformator),

karena produksinya turun drastis dibanding Maret dan Mei. Mei & Juni 2025 menunjukkan pemulihan signifikan, bahkan melebihi bulan tertinggi di 2024. Efektivitas perbaikan terlihat jelas di bulan Mei–Juni 2025. Produksi di Januari–Maret 2025 jauh di atas 2024, mengindikasikan peningkatan efisiensi atau kinerja awal tahun. Grafik ini bisa mendukung argumentasi bahwa penurunan daya akibat gangguan bersifat sementara dan dapat dipulihkan dengan perbaikan teknis.

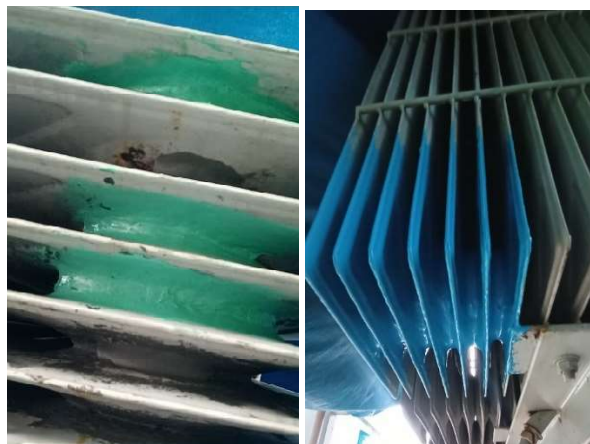
4.4. Solusi Penanganan Kebocoran Radiator

4.4.1. Solusi jangka pendek

a. Cold Welding

Perbaikan kebocoran radiator transformator menggunakan metode cold welding dengan Prolong Fastpatch pada bulan Februari 2025 terbukti cepat, aman, dan efektif tanpa perlu shutdown total sistem. Metode ini sangat cocok digunakan dalam kondisi darurat dengan risiko minimal terhadap operasional pembangkitan. Prolong Fastpatch adalah bahan epoxy logam dua komponen. Jenis ini juga Tahan terhadap tekanan, suhu, dan minyak. Didesain untuk perbaikan darurat permukaan logam tanpa pemanasan. Berikut langkah-langkah perbaikan dengan metode cold welding :

1. Pembersihan area bocor:
 - Pembersihan minyak dengan *degreaser* (non-residu).
2. Aplikasi Fastpatch:
 - Campur resin dan pengeras sesuai instruksi.
 - Oleskan pada area bocor, bentuk merata dengan ketebalan $\pm 3\text{--}5$ mm.
3. Curing:
 - Diamkan ± 4 jam (tergantung suhu lingkungan).
 - Tidak ada kontak langsung dengan minyak saat curing



Gambar 4. Sirip Radiator setelah Cold Welding

Saat 6 jam setelah proses cold welding dikerjakan , dilakukan pengisian minyak & uji tekanan internal. Tidak ditemukan rembesan ulang dalam 24–48 jam monitoring. Suhu winding transformator kembali normal, menandakan sistem pendinginan kembali efektif.

b. Penurunan Beban

Penurunan beban Setelah dilakukan cold welding pada radiator transformator, beban transformator diturunkan untuk tujuan pengamanan dan stabilisasi sistem selama masa pemulihan. Besar daya yang diturunkan sebesar ± 3 MW dari daya awal sebesar 5 MW. Berikut penjelasan teknisnya;

1. Memberi Waktu Curing Sempurna pada Material Cold Welding

- Prolong Fastpatch atau bahan epoxy lainnya memerlukan waktu curing (pengeringan dan pengerasan penuh) sekitar 4–24 jam tergantung suhu.

- Menurunkan beban:
 - Menjaga suhu transformator tetap rendah selama proses curing.
 - Mencegah getaran atau tekanan berlebih pada patch epoxy yang masih dalam tahap mengeras.
- 2. Mengurangi Tekanan Termal pada Radiator & Sambungan
 - Jika Beban tinggi maka suhu minyak naik lalu tekanan internal radiator bertambah.
 - Setelah perbaikan cold welding, radiator belum sepenuhnya stabil.
 - Penurunan beban sama dengan menghindari overpressure yang bisa mendorong ulang titik bocor.
- 3. Menurunkan Risiko Kebocoran Ulang
 - Prolong Fastpatch menempel kuat, tapi pada permukaan yang baru diperbaiki, vibrasi dan tekanan tinggi bisa menyebabkan:
 - Mikro-retak
 - Lepasnya patch sebelum kering total
- 4. Monitoring Stabilitas Sistem
 - Selama 24–72 jam awal setelah perbaikan, penting untuk:
 - Mengukur suhu winding & minyak
 - Memastikan tekanan sistem tetap normal
 - Memastikan tidak ada rembesan ulang di area cold weld
- c. Purifikasi Minyak

Akibat kebocoran pada radiator maka berdampak pada kondisi minyak pada transformator. Hal dasar yang menjadi acuan purifikasi harus dilakukan adalah adanya indikator tingginya nilai CarbonDioxide (CO) dan CarbonMonoxide (CO₂) pada bulan Desember 2024. Tingginya nilai tersebut dapat diketahui setelah melakukan DGA test . Dissolved Gas Analysis (DGA) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mendeteksi kondisi abnormal pada transformator terendam minyak dengan menganalisis gas-gas terlarut dalam minyak isolasi transformator. Analisis ini membantu mengidentifikasi potensi masalah atau kegagalan pada transformator, seperti panas berlebih, korona, atau hubungan pendek.

Nilai CO pada bulan Desember sebesar 11.802 ppm, sesuai standar IEC 60567 bahwa nilai CO >1400 sudah masuk dalam kategori “Danger”. Sedangkan nilai CO₂ pada bulan Desember sebesar 1.407 ppm, berdasarkan standar IEC 60567 batas normal sebesar 2500 ppm sehingga kondisi CO₂ masih dalam kondisi normal, namun tetap harus diperhatikan untuk tujuan kehandalan sistem produksi. Selain nilai CO dan CO₂ yang menjadi dasar untuk dilakukan purifikasi, ada juga nilai *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG), yang merupakan jumlah total gas mudah terbakar yang terlarut dalam minyak isolasi transformator. Analisis TDCG digunakan untuk memantau kondisi transformator dan mendeteksi potensi gangguan atau kegagalan. Pada bulan Desember nilai TDCG menyentuh angka 1.438 ppm. Pada standar IEC 60567 nilai TDCG <720 sudah masuk dalam kategori “Caution” yang artinya perlu perhatian khusus. Sehingga berdasarkan nilai CO, CO₂, dan TDCG main transformator 1 pada PLTA Ampel gading harus dilakukan purifikasi minyak isolasi transformator untuk mencegah kegagalan operasi transformator. Setelah dilakukan proses cold welding untuk peningkatan perbaikan selanjutnya dilakukan purifikasi minyak isolasi transformator. Kegiatan ini bertujuan untuk mengembalikan kualitas transformator yang sudah mengalami penurunan akibat kebocoran radiator.



Gambar 5. Proses dari purifikasi minyak isolasi transformator



Gambar 6. BDV tester

Ketika radiator bocor yang terjadi Adalah:

- Minyak isolasi transformator kehilangan tekanan dan volume.
- Terpapar udara dan kelembapan dari luar.
- Terjadi kontaminasi air dan partikel logam.
- BDV minyak bisa turun drastis.
- Performa isolasi dan pendinginan jadi tidak optimal.

Setelah melalui proses purifikasi minyak isolasi transformator, berikut hasil dari purifikasi minyak isolasi transformator terhadap nilai CO , CO_2 , dan TDCG:

Tabel 8. Hasil Purifikasi Minyak Isolasi Transformator

Besaran	Sebelum (ppm)	Sesudah (ppm)
CO	11.802	112
CO ₂	1.407	3
TDCG	1.438	22

Berdasarkan standar IEC 60567 terkait Dissolved Gas Analysis (DGA test) untuk mendapatkan nilai besaran yang terkandung pada minyak isolasi transformator sesuai pada tabel 9 tentang standar normal angka dari besaran tersebut yaitu,

Tabel 9. Limit /Status Concentration for each gas

Gas Parameters	Status Normal	Caution	Abnormal	Danger
H ₂	100	101 - 700	701 - 1800	> 1800
CH ₄	120	121 - 400	401 - 1000	> 1000
C ₂ H ₂	1	2 - 9	10 - 35	> 35
C ₂ H ₄	50	51 - 100	101 - 200	> 200
C ₂ H ₆	65	66 - 100	101 - 150	> 150
CO	350	351 - 570	571 - 1400	> 1400
CO ₂	2500	2501 - 4000	4001 - 10,000	> 10,000
TDCG	720	721 - 1920	1921 - 4630	> 4630

Berdasarkan pada Tabel 8, maka hasil purifikasi minyak isolasi transformator masuk dalam kategori normal, sehingga bisa dilakukan pembebanan penuh terhadap kinerja transformator.



(a)

(b)

Gambar 7. Minyak Isolasi transformator (a) sebelum purifikasi (b) sesudah purifikasi

Pada Gambar 7 (a) minyak isolasi transformator berwarna kuning kecoklatan. Dari warna itu terdeteksi adanya kontaminasi dari air, debu maupun karbon, hal ini biasanya ditandai dengan hasil uji Breakdown Volatge yang turun. Sehingga perlu dilakukan purifikasi minyak isolasi transformator. Sedangkan pada Gambar 7 (b) merupakan minyak isolasi transformator yang telah dilakukan purifikasi dan pengujian BDV. Minyak isolasi transformator yang baik biasanya jernih atau bening kekuningan sangat muda. Perubahan warna yang jelas (kuning pekat atau kecoklatan) adalah indikasi awal masalah yang harus segera ditangani untuk mencegah kerusakan lebih lanjut pada transformator.

4.4.2. Solusi jangka panjang

Penggantian radiator pada transformator pembangkit (seperti di PLTA) merupakan tindakan strategis yang harus mempertimbangkan aspek material, desain mekanis, serta potensi peningkatan efisiensi sistem pendingin. Babel 10 memperlihatkan bahan alternatif radiator.

Tabel 10. Bahan-Bahan Rekomendasi Radiator

Material	Keunggulan	Kekurangan
Steel (Baja Karbon)	Kuat, tahan tekanan tinggi, harga terjangkau	Rentan terhadap korosi, perlu pelapisan
Stainless Steel	Tahan korosi, umur panjang	Lebih mahal
Copper (Tembaga)	Konduktivitas termal sangat baik	Mahal, berat
Aluminium	Ringan, konduktivitas baik, tahan korosi	Kurang tahan tekanan mekanis dibanding baja

Untuk melakukan pergantian radiator diperlukan pengadaan yang lama, karena masih dalam tahap pengajuan kepada pusat, sehingga pendekatan dengan langkah-langkah teknis dapat dilakukan terlebih dahulu sembari menunggu persetujuan untuk pergantian radiator lebih lanjut.

5. SIMPULAN

Kebocoran radiator pada main transformer menyebabkan penurunan performa pendinginan yang berdampak pada kenaikan suhu, penurunan kualitas minyak isolasi, serta penurunan daya output pembangkit sebesar 18,27%. Penanganan melalui cold welding, penurunan beban, dan purifikasi minyak terbukti efektif dalam memulihkan kinerja transformator dan meningkatkan produksi energi. Hasil ini menegaskan pentingnya keandalan sistem pendingin dalam menjaga stabilitas operasi pembangkitan listrik.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] M. Tohari, B. Sukoco, and M. Haddin, "Analisis Kondisi Transformator Daya 20kV/150kV dengan Metode Uji Dissolved Gas Analysis (DGA) di PT.PJB PLTU Rembang," in *KONFERENSI ILMIAH MAHASISWA UNISSULA (KIMU) 4*, Universitas Islam Sultan Agung, 2020.
- [2] R. Farista Dewira, "Analisis Pengujian Breakdown Voltage Minyak Trafo berdasarkan Hasil Uji Dissolved Gas Analysis menggunakan Metode Statistik," Bachelor Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2018. [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/52317/1/07111645000032-Undergraduate_Theses.pdf
- [3] G. B. Nurcahya, F. Hunaini, and D. Siswanto, "Monitoring dan Controlling Sinkronisasi Mixer Beton Poros Ganda berbasis WiFi," *JASEE*, vol. 5, no. 2, pp. 26–39, Nov. 2024, doi: 10.31328/jasee.v5i2.586.
- [4] I. G. Surya Subaga, I. B. G. Manuaba, and I. W. Sukerayasa, "Analisis Prediktif Pemeliharaan Minyak Transformator Menggunakan Metode Markov," *SPEKTRUM*, vol. 6, no. 4, p. 96, Dec. 2019, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2019.v06.i04.p14.
- [5] I. B. Tiasmoro and P. A. Topan, "Analisis Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi dan Susut Umur Transformator Step Up 6kV / 70kV di PLTU Sumbawa Barat Unit 1 dan 2 2x7 MW PT.PLN (PERSERO) UPK Tambora," *Tambora*, vol. 5, no. 2, Jul. 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.uts.ac.id/>
- [6] A. N. R. Fauzy, "Evaluasi gangguan jaringan distribusi listrik dengan metode Failure Mode Effect Analysis di PT PLN (Persero) Area Surabaya Selatan," Master Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2019. [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/id/eprint/12345>
- [7] R. F. Turnip, "Analisis Susut Umur Transformator PLTA Tulis Akibat Pola Pembebanan dan Suhu Lingkungan," Bachelor Thesis, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah, 2025. [Online]. Available: <https://repository.unsoed.ac.id/33961/>
- [8] C. Maharani, I. M. Nrartha, S. Nugroho, and A. Hasibuan, "Pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo pada Bay Trafo 1 di GI 150 kV Tanjung," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4347.
- [9] M. F. Akbar, "Analisa Karakteristik Minyak Isolasi Transformator Daya 11 kVA menggunakan Metode DGA dan Breakdown Voltage pada Gardu Kilang Pertamina RU-II Dumai," Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2018. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115515437>
- [10] R. Desfian, "Evaluasi Setting Sistem Proteksi Rele Differensial pada Transformator di PLTA Koto Panjang," Bachelor Thesis, Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru, Riau, 2024. [Online]. Available: <https://repository.unilak.ac.id/5270/>