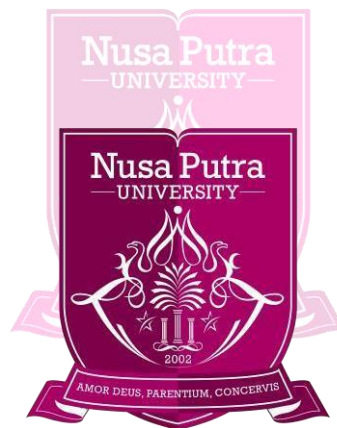


**ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT
UMUR TRANSFORMATOR TENAGA BAT UNIT 1 PLTP
GUNUNG SALAK**

SKRIPSI

RIZQI AHMAD GHOZALI

20210120002



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK, KOMPUTER DAN DESAIN
SUKABUMI
2025**

**ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT
UMUR TRANSFORMATOR TENAGA BAT UNIT 1 PLTP
GUNUNG SALAK**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Dalam Menempuh

Gelar Sarjana Teknik Elektro

RIZQI AHMAD GHOZALI



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK, KOMPUTER DAN DESAIN
SUKABUMI
2025**

PERNYATAAN PENULIS

JUDUL : ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP
SUSUT UMUR TRANSFORMATOR TENAGA BAT
UNIT 1 PLTP GUNUNG SALAK
NAMA : RIZQI AHMAD GHOZALI
NIM : 20210120002

Saya menyatakan dan bertanggungjawab dengan sebenarnya bahwa Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali cuplikan dan ringkasan yang masing-masing telah saya jelaskan sumbernya. Jika pada waktu selanjutnya ada pihak lain yang mengklaim bahwa Skripsi ini sebagai karyanya, yang disertai dengan bukti- bukti yang cukup, maka saya bersedia untuk dibatalkan gelar Sarjana Teknik Elektro saya beserta segala hak dan kewajiban yang melekat pada gelar tersebut.


Sukabumi, 22 Juli 2025
RIZQI AHMAD GHOZALI
Penulis

PENGESAHAN SKRIPSI

JUDUL : ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT
UMUR TRANSFORMATOR TENAGA BAT UNIT 1 PLTP
GUNUNG SALAK

NAMA : RIZQI AHMAD GHOZALI

NIM 20210120002

Skripsi ini telah diujikan dan dipertahankan di depan Dewan Penguji pada sidang skripsi tanggal Juli 2025. Menurut pandangan kami, skripsi ini memadai dari segi kualitas untuk tujuan penganugrahan gelar Sarjana Teknik Elektro.

Sukabumi, 22 Juli 2025

Pembimbing I

Pembimbing II

Panji Narputro, S.T., M.T
NIDN. 0427047803

Ir. Marina Artiyasa, S.T., M.T, IPM
NIDN. 0403127308



Ketua Penguji

Ketua Program Studi

Fikri Arif Wicaksana, S.Pd., M.T
NUPTK. 8735775676130202

Panji Narputro, S.T., M.T
NIDN. 0427047803

Dekan Fakultas Teknik, Komputer dan Desain

Ir. Paikun, S.T., M.T. IPM., ASEAN. Eng.
NIDN. 0402037401

ABSTRAK

Transformator tenaga merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan, berfungsi untuk mentransfer daya secara efisien dari pembangkit ke sistem distribusi. Umur operasional transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi termal yang timbul dari tingkat pembebanan dan suhu lingkungan. Pembebanan berlebih meningkatkan suhu *hot spot* pada belitan, yang mempercepat proses degradasi isolasi dan berdampak pada susut umur transformator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator BAT Unit 1 PLTP Gunung Salak berdasarkan standar IEC 60076. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan menganalisis data operasional berupa beban, suhu lilitan, suhu minyak, dan suhu lingkungan selama periode Januari–Desember 2024. Berdasarkan perhitungan termal, diperoleh bahwa transformator BAT Unit 1 dengan rata-rata beban 152,06 kVA (92,15% dari kapasitas 165 kVA) memiliki suhu *hot spot* sebesar 103,5°C dan laju susut umur 1,88 pu/hari, menghasilkan estimasi sisa umur sebesar 11,15 tahun. Sedangkan transformator BAT Unit 2 sebagai pembanding dengan beban 90% menunjukkan suhu *hot spot* 109,6°C dan susut umur 3,80 pu/hari. Penelitian ini menunjukkan bahwa pembebanan yang mendekati atau melebihi kapasitas nominal akan mempercepat susut umur transformator. Oleh karena itu, disarankan agar transformator dioperasikan di bawah 90% kapasitas secara kontinu serta menerapkan pemantauan beban dan sistem pendinginan yang optimal untuk menjaga keandalan dan memperpanjang usia pakai transformator.

Kata Kunci: Pembebanan, Susut Umur, Transformator Tenaga.



ABSTRACT

Power transformers are vital components in electrical systems, functioning to efficiently transfer power from generation units to the distribution network. The operational lifespan of a transformer is significantly influenced by thermal conditions arising from loading levels and ambient temperature. Excessive loading increases the hotspot temperature in windings, which accelerates insulation degradation and contributes to the transformer's aging process. This study aims to analyze the effect of loading on the aging of the BAT Unit 1 transformer at PLTP Gunung Salak based on the IEC 60076 standard. A quantitative approach was employed by analyzing operational data including load, winding temperature, oil temperature, and ambient temperature during the period of January–December 2024. Based on thermal calculations, it was found that BAT Unit 1, operating at an average load of 152.06 kVA (92.15% of its 165 kVA capacity), had a hotspot temperature of 103.5°C and an aging rate of 1.88 pu/day, resulting in an estimated remaining life of 11.15 years. In comparison, BAT Unit 2 operating at 90% load showed a hotspot temperature of 109.6°C and an aging rate of 3.80 pu/day. The results indicate that operating a transformer near or above its nominal capacity significantly accelerates its aging. Therefore, it is recommended that transformers be operated continuously below 90% of their rated capacity and supported with optimal load monitoring and cooling systems to maintain reliability and extend operational life.

Keywords: Loading, Aging Deterioration, Power Transformer.



KATA PENGANTAR

Segala Puji bagi kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga BAT Unit 1 PLTP Gunung Salak”.

Skripsi ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mata kuliah di Program Studi Teknik Elektro Universitas Nusa Putra Sukabumi.

Keberhasilan dalam menyusun dan melaksanakan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini izinkan penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan serta menyusun skripsi laporan ini dengan baik.
2. Kedua orang tua yang selalu memberikan semangat, bantuan dan dorongan, serta doa yang terbaik kepada penulis.
3. Bapak Dr. Kurniawan S.T., M.Si., MM selaku Rektor Universitas Nusa Putra Sukabumi.
4. Bapak Ir. Paikun, S.T., M.T. IPM., ASEAN. Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik, Komputer, dan Desain Universitas Nusa Putra Sukabumi.
5. Bapak Panji Narputro S.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Nusa Putra sekaligus Dosen Pembimbing I.
6. Ibu Ir. Marina Artiyasa, S.T., M.T. IPM selaku Dosen Pembimbing II.
7. Semua Bapak/Ibu Dosen Teknik Elektro yang selama ini membimbing penulis.
8. Bapak Mulyadi Kusumah selaku Manager Unit PT. PLN Indonesia Power Unit PLTP Gunung Salak yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan penelitian.
9. Semua pegawai PT. PLN Indonesia Power Unit PLTP Gunung Salak yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis selama penelitian berlangsung.
10. Semua mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2021 yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik serta saran dari berbagai pihak.

Akhir kata penulis berharap Tuhan YME berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Sukabumi, Juli 2025

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik UNIVERSITAS NUSA PUTRA, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rizqi Ahmad Ghozali
NIM : 20210120002
Program Studi : Teknik Elektro
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Nusa Putra **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR TENAGA BATU UNIT 1 PLTP GUNUNG SALAK”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Nusa Putra berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat : SUKABUMI

Pada Tanggal : 22 Juli 2025

Yang menyatakan

(Rizqi Ahmad Ghozali)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
PERNYATAAN PENULIS.....	iii
PENGESAHAN SKRIPSI	iv
ABSTRAK.....	v
<i>ABSTRACT</i>.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.4.1 Manfaat Teoritis	3
1.4.2 Manfaat Praktis.....	4
1.4.3 Manfaat bagi Peneliti.....	4
1.4.4 Manfaat bagi Institusi Akademik	4
1.4.5 Manfaat bagi Industri atau Masyarakat	4
1.4.6 Manfaat bagi Penelitian Lanjutan.....	5
1.5 Pembatasan Masalah.....	5
1.5.1 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.5.2 Batasan Teknis.....	5
1.5.3 Batasan Waktu.....	5
1.5.4 Batasan Lokasi.....	6
1.5.5 Asumsi-Asumsi	6
1.5.6 Batasan Data	6
1.5.7 Batasan Metode	6
1.5.8 Batasan Hasil	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Penelitian Terkait.....	8

2.2	Kesimpulan dan Peluang Kebaruan	11
2.3	Landasan Teori.....	12
2.3.1	Pengertian transformator	12
2.3.2	Inti besi	13
2.3.3	Kumparan transformator.....	13
2.3.4	Minyak transformator	14
2.3.5	Pendingin transformator	15
2.3.6	Bushing.....	16
2.3.7	Tangki konservator	17
2.3.8	<i>Tap changer</i>	17
2.3.9	Alat Pernafasan (<i>Dehydrating Breather</i>).....	18
2.3.10	Jenis-jenis transformator.....	18
2.4	Prinsip Kerja Transformator	19
2.5	Permasalahan Transformator Daya.....	20
2.6	Teori Degradasi dan Susut Umur Transformator.....	21
2.7	Model Matematis yang Digunakan.....	22
2.8	Standar atau Regulasi yang Digunakan	23
2.9	Hubungan Teori dengan Penelitian.....	23
BAB III METODE PENELITIAN.....		24
3.1	Instrumen Pengumpulan Data.....	24
3.1.1	Waktu dan tempat penelitian	24
3.1.2	Data penelitian.....	24
3.2	Perancangan Penelitian	25
3.2.1	Studi literatur	25
3.2.2	Pengumpulan data	25
3.2.3	Pengolahan data.....	25
3.2.4	Diagram alir penelitian	26
3.3	Teknik Analisis.....	27
3.3.1	Perhitungan rasio pembebanan transformator	28
3.3.2	Perhitungan sirkulasi minyak alami	28
3.3.3	Perhitungan kenaikan <i>temperature top oil</i> untuk beban konstan	29
3.3.4	Perhitungan kenaikan <i>temperature hot spot</i>	29
3.3.5	Perhitungan kenaikan <i>temperature hot spot</i> dengan memperhatikan <i>temperature</i> lingkungan.....	30

3.3.6	Perhitungan laju penuaan termal relatif.....	31
3.3.7	Perhitungan susut umur transformator	33
3.3.8.	Perhitungan Perkiraan Umur Transformator	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		35
4.1	Pengambilan Data.....	35
4.1.1	Data spesifikasi transformator	35
4.1.3	Data pembebanan dan <i>temperature</i>	36
4.2	Pengaruh Pembebanan dan <i>Temperature</i> Sekitar Terhadap Kinerja Transformator dengan Data Riil.....	39
4.2.1	Perhitungan susut umur dan perkiraan umur transformator BAT Unit 1.....	39
4.2.2	Perhitungan susut umur dan perkiraan umur transformator BAT Unit 2.....	41
4.3	Pembahasan Pembebanan Optimal.....	43
4.4	Hasil Tren Grafik Penelitian	44
4.5	Analisis Rumusan Masalah Berdasarkan Hasil Penelitian.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA.....		50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Transformator BAT Unit 1	13
Gambar 2. 2	Inti besi	13
Gambar 2. 3	Kumparan transformator	14
Gambar 2. 4	Minyak transformator	15
Gambar 2. 5	<i>Bushing</i>	17
Gambar 2. 6	Tangki konservator	17
Gambar 2. 7	<i>Tap changer</i>	18
Gambar 2. 8	<i>Silica gel</i>	18
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian	27
Gambar 3. 2	Kurva <i>temperature hot spot</i> terhadap laju penuaan termal	33
Gambar 4. 1	Grafik tren bulanan transformator BAT Unit 1	38
Gambar 4. 2	Grafik tren bulanan transformator BAT Unit 2	38
Gambar 4. 3	Hasil grafik tren penelitian	44



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Tabel penelitian terkait	9
Tabel 2. 2	Macam-macam sistem pendingin	15
Tabel 2. 3	Kelas isolasi dan suhu yang diizinkan	21
Tabel 3. 1	Nilai relatif dari umur pemakaian	32
Tabel 4. 1	Spesifikasi transformator	35
Tabel 4. 2	Data logsheet transformator BAT Unit 1 tahun 2024	36
Tabel 4. 3	Data logsheet transformator BAT Unit 2 tahun 2024	36
Tabel 4. 4	Tabel analisis transformator BAT Unit 1 dan Unit 2	37
Tabel 4. 5	Tabel keterkaitan rumusan masalah dan hasil penelitian	46



BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, pembatasan masalah dari penelitian Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga BAT Unit 1 PLTP Gunung Salak.

1.1 Latar Belakang

Transformator tenaga merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berperan dalam menyalurkan daya listrik dari pembangkit ke jaringan distribusi dengan efisiensi yang tinggi [1]. Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), transformator tenaga bekerja di bawah kondisi operasi yang bervariasi, termasuk perubahan beban yang dapat mempengaruhi umur isolasi dan keandalan transformator. Salah satu faktor utama yang menentukan masa pakai transformator adalah pembebanan yang berlebihan, yang dapat mempercepat degradasi isolasi kertas serta minyak transformator [2].

Di PLTP Gunung Salak, transformator tenaga mengalami fluktuasi beban yang signifikan. Kondisi ini berpotensi memengaruhi umur operasional transformator melalui mekanisme termal yang mempercepat proses penuaan isolasi. Dalam setiap pembangunan PLTP, harus diupayakan perencanaan dan penghitungan yang maksimal, agar setiap pembangkit yang dihasilkan dari tenaga panas bumi dapat berjalan dengan baik seefisien mungkin [3]. Oleh karena itu, analisis mengenai pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator tenaga di PLTP Gunung Salak menjadi penting untuk dilakukan guna memastikan keandalan operasional sistem tenaga listrik yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator tenaga dengan pendekatan kuantitatif berdasarkan data *logsheet* pembebanan, suhu operasi, serta metode perhitungan laju penuaan termal. Dengan memahami hubungan antara faktor-faktor ini, diharapkan dapat diperoleh strategi optimal dalam pengelolaan beban transformator guna memperpanjang masa

pakai peralatan serta meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan di PLTP Gunung Salak.

1.2 Perumusan Masalah

Transformator tenaga memiliki peran penting dalam sistem kelistrikan, terutama dalam mentransfer daya listrik dengan efisiensi tinggi. Pada PLTP, transformator tenaga beroperasi dalam kondisi yang dinamis akibat perubahan beban yang dapat memengaruhi masa pakainya. Salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap degradasi transformator adalah pembebanan [4]. Beban yang berlebihan dapat meningkatkan suhu belitan transformator, yang pada akhirnya mempercepat proses penuaan isolasi kertas dan minyak. Di PLTP Gunung Salak, khususnya pada transformator tenaga BAT Unit 1 dan Unit 2, fluktuasi beban terjadi secara signifikan karena variasi produksi energi dari sumber panas bumi. Kondisi ini dapat mempercepat proses penuaan isolasi akibat peningkatan suhu, sebagaimana dinyatakan dalam standar IEC 60076, yang menyebutkan bahwa kenaikan suhu pada titik *hot spot* belitan memiliki hubungan langsung dengan percepatan laju penuaan isolasi.

Meskipun telah dilakukan berbagai penelitian mengenai dampak pembebanan terhadap kinerja transformator tenaga, masih terdapat keterbatasan dalam memahami secara spesifik bagaimana fluktuasi beban memengaruhi transformator di lingkungan PLTP. Beberapa metode pengelolaan beban telah diterapkan, namun strategi yang paling efektif untuk mengurangi dampak termal terhadap susut umur transformator di PLTP Gunung Salak masih perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian lebih mendalam diperlukan untuk menganalisis hubungan antara pembebanan dan umur transformator serta mengembangkan strategi pengelolaan yang lebih optimal.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, penelitian ini berfokus pada pertanyaan:

1. Bagaimana hubungan pembebanan transformator dengan kenaikan suhu *hot spot* dan laju penuaan isolasi pada transformator di PLTP Gunung Salak?

2. Bagaimana cara menghitung laju susut umur transformator berdasarkan standar IEC 60076 menggunakan data pembebanan dan suhu lingkungan aktual?
3. Berapa batas optimal pembebanan transformator yang dapat menjaga laju degradasi isolasi dalam tingkat yang aman?
4. Strategi pengelolaan beban seperti apa yang dapat direkomendasikan untuk memperpanjang usia pakai transformator di PLTP Gunung Salak?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan terhadap penurunan umur transformator tenaga BAT Unit 1 di PLTP Gunung Salak. Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis bagi industri pembangkitan listrik dalam menjaga keandalan transformator tenaga serta mengurangi potensi kerusakan akibat penuaan termal. Untuk mencapai tujuan utama tersebut, penelitian ini memiliki beberapa tujuan spesifik sebagai berikut:

1. Menganalisis hubungan pembebanan transformator dengan kenaikan suhu *hot spot* dan dampaknya terhadap laju penuaan isolasi.
2. Menghitung laju susut umur transformator berdasarkan standar IEC 60076 dengan menggunakan data pembebanan dan suhu lingkungan.
3. Menentukan batas optimal pembebanan transformator yang dapat meminimalkan laju degradasi isolasi.
4. Memberikan rekomendasi strategis pengelolaan beban untuk memperpanjang usia pakai transformator.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam berbagai aspek, baik secara teoritis maupun praktis. Berikut adalah manfaat penelitian mengenai analisis pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator tenaga di PLTP Gunung Salak:

1.4.1 Manfaat Teoritis

Penelitian ini memperkaya literatur di bidang teknik elektro, khususnya dalam studi pemeliharaan preventif dan prediktif transformator tenaga berbasis

pendekatan termal. Dengan mengacu pada standar IEC 60076, penelitian ini juga memberi kontribusi dalam pengembangan metodologi analisis usia peralatan tenaga listrik.

1.4.2 Manfaat Praktis

Penelitian ini dapat digunakan oleh industri ketenagalistrikan, seperti PT PLN Indonesia Power, untuk mengoptimalkan strategi pembebanan dan pemeliharaan transformator. Hasilnya dapat dijadikan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan teknis untuk memperpanjang umur transformator dan menghindari kerusakan akibat pembebanan berlebih.

1.4.3 Manfaat bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan peluang bagi peneliti Sebagai bahan acuan dan pengembangan penelitian selanjutnya dalam penerapan standar IEC dan pendekatan analitik berbasis data operasional nyata di sektor pembangkitan listrik serta memperdalam wawasan dan keterampilan dalam analisis transformator tenaga, khususnya dalam perhitungan susut umur, evaluasi termal, dan optimasi pembebanan.

1.4.4 Manfaat bagi Institusi Akademik

Penelitian ini dapat menjadi referensi tambahan bagi institusi akademik, khususnya dalam bidang teknik elektro, untuk mendukung pembelajaran dalam mata kuliah yang berkaitan dengan sistem tenaga listrik dan transformator.

1.4.5 Manfaat bagi Industri atau Masyarakat

Penelitian ini membantu perusahaan penyedia energi seperti PT PLN Indonesia Power dalam meningkatkan efisiensi manajemen transformator tenaga. Pemahaman mengenai pengaruh pembebanan dan suhu lingkungan terhadap susut umur transformator memungkinkan pengelola untuk menerapkan kebijakan operasional yang lebih optimal guna menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Serta memberikan manfaat untuk masyarakat, karena transformator yang dikelola dengan baik dapat meningkatkan stabilitas pasokan listrik.

1.4.6 Manfaat bagi Penelitian Lanjutan

Penelitian ini dapat menjadi landasan bagi riset lebih lanjut dalam pengembangan sistem pemantauan prediktif berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kondisi transformator secara *real time*.

1.5 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam penelitian ini bertujuan untuk menetapkan batas ruang lingkup, aspek teknis, serta faktor lain yang tidak termasuk dalam pembahasan. Dengan adanya batasan ini, penelitian dapat lebih terfokus dan hasil yang diperoleh menjadi lebih relevan serta sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Berikut merupakan penjabaran dari setiap poin pembatasan penelitian ini:

1.5.1 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh pembebanan dan suhu lingkungan terhadap susut umur transformator utama BAT Unit 1 di PLTP Gunung Salak. Studi ini tidak mencakup analisis sistem tenaga secara keseluruhan, seperti evaluasi jaringan distribusi atau sistem proteksi kelistrikan.

1.5.2 Batasan Teknis

Penelitian ini mengkaji tentang transformator dengan sistem pendinginan tipe *Oil Natural Air Natural* (ONAN), yang mengandalkan sirkulasi alami minyak dan udara tanpa bantuan perangkat tambahan seperti kipas atau pompa. Analisis ini hanya mempertimbangkan kondisi operasi normal transformator tanpa memperhitungkan faktor eksternal lainnya, seperti perubahan kualitas minyak isolasi atau gangguan listrik pada sistem tenaga.

1.5.3 Batasan Waktu

Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari *logsheet* transformator utama BAT unit 1 pada Januari – Desember tahun 2024 dan *logsheet* transformator BAT unit 2 sebagai pembanding. Analisis dilakukan berdasarkan data tersebut.

1.5.4 Batasan Lokasi

Lokasi penelitian dibatasi di PT PLN Indonesia Power Unit PLTP Gunung Salak, khususnya transformator tenaga BAT Unit 1.

1.5.5 Asumsi-Asumsi

Beberapa asumsi digunakan dalam penelitian ini untuk menyederhanakan analisis. Salah satunya adalah asumsi bahwa kondisi operasi transformator sesuai dengan spesifikasi pabrikan serta bahwa karakteristik pendinginan tetap konstan selama masa penelitian.

1.5.6 Batasan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data riwayat pembebanan, dan suhu lingkungan yang mempengaruhi penuaan umur isolasi. Data terkait pembebanan ekstrem, gangguan listrik, atau variasi kualitas minyak isolasi tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.

1.5.7 Batasan Metode

Penelitian ini menggunakan metode analisis berbasis perhitungan matematis sesuai standar IEC 60076 tanpa melakukan simulasi atau pengujian langsung pada transformator. Analisis hanya mempertimbangkan pengaruh pembebanan dan suhu lingkungan terhadap susut umur transformator, tanpa memperhitungkan faktor lain seperti kondisi isolasi dan gangguan eksternal. Pengolahan data dilakukan dengan menghitung rasio pembebanan, suhu *hot spot*, serta laju penuaan termal relatif untuk menentukan susut umur dan beban optimal transformator. Seluruh tahapan penelitian dirangkum dalam diagram alir untuk memastikan proses berjalan secara sistematis dan terstruktur.

1.5.8 Batasan Hasil

Hasil penelitian ini hanya berlaku untuk transformator tenaga BAT Unit 1 di PLTP Gunung Salak dan tidak dapat digeneralisasi untuk transformator lain dengan spesifikasi atau kondisi operasi yang berbeda. Selain itu, hasil analisis hanya memberikan perkiraan mengenai susut umur transformator berdasarkan data yang tersedia.

Dengan adanya pembatasan yang jelas, penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis yang terfokus pada pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator tenaga BAT Unit 1 di PLTP Gunung Salak.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat rangkuman hasil analisis yang telah dilakukan serta memberikan kesimpulan berdasarkan tujuan dan rumusan masalah penelitian. Selain itu, disampaikan pula saran strategis yang dapat dijadikan rekomendasi teknis bagi pihak terkait, khususnya dalam pengelolaan transformator tenaga di PLTP Gunung Salak, serta sebagai acuan untuk penelitian lanjutan di bidang yang relevan.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dalam penelitian ini terkait "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga BAT Unit 1 PLTP Gunung Salak," dapat disimpulkan:

1. Hubungan antara pembebanan transformator dan suhu *hot spot* serta laju penuaan isolasi menunjukkan korelasi yang kuat, artinya semakin tinggi pembebanan, maka suhu *hot spot* pada transformator meningkat, yang berdampak langsung pada percepatan laju penuaan termal isolasi transformator, sehingga dapat mengurangi umur pakai transformator. Hal ini ditunjukkan melalui grafik yang memperlihatkan tren antara pembebanan dan suhu *hot spot*, serta antara suhu *hot spot* dan laju susut umur, memperjelas bahwa penuaan isolasi sangat sensitif terhadap peningkatan suhu.
2. Perhitungan laju susut umur transformator telah berhasil dilakukan berdasarkan standar IEC 60076 dengan menggunakan data aktual transformator ditahun 2024. Proses perhitungan menggunakan pendekatan model termal, dimulai dari rasio pembebanan, perhitungan kenaikan suhu minyak, suhu *hot spot*, hingga estimasi laju penuaan termal relatif (pu/hari). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa laju susut umur pada beban rata-rata 152,056 kVA mencapai 1,88 pu/hari pada pembebanan 92,15%, yang berdampak pada sisa umur transformator menjadi 11,15 tahun dari umur dasar 20,55 tahun.

3. Batas optimal pembebanan transformator yang dianjurkan agar laju penuaan tetap dalam batas aman adalah di bawah 90–92% dari kapasitas transformator. Meskipun nilai ini bersifat estimatif, analisis grafik menunjukkan bahwa setiap kenaikan beban di atas ambang ini akan memperpendek umur transformator secara signifikan. Oleh karena itu, menjaga beban operasional di bawah ambang tersebut menjadi strategi mitigasi utama terhadap percepatan laju penuaan isolasi.
4. Strategi pengelolaan beban yang direkomendasikan mencakup penerapan sistem pemantauan *real time* terhadap beban dan suhu *hot spot*, pengendalian beban agar tetap stabil di bawah 90%, serta penjadwalan perawatan preventif yang lebih terstruktur. Selain itu, integrasi teknologi prediktif berbasis IoT dan simulasi termal juga menjadi solusi potensial dalam upaya peningkatan keandalan operasi transformator.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan penulis, untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan umur transformator di PLTP Gunung Salak, beberapa rekomendasi teknis dan arah penelitian lanjutan sebagai berikut:

1. Pembatasan pembebanan: Disarankan agar transformator BAT Unit 1 dioperasikan pada tingkat pembebanan maksimal tidak melebihi 90% dari kapasitas nominalnya, guna menjaga suhu *hot spot* tetap di bawah ambang kritis 98°C dan menekan laju penuaan isolasi.
2. Peningkatan sistem pendinginan: Meskipun transformator menggunakan sistem pendingin ONAN, evaluasi tambahan terhadap kapasitas pendinginan, seperti penambahan *fan* eksternal (berbasis ONAF), dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan disipasi panas dan menjaga kestabilan suhu operasional.
3. Pemeliharaan prediktif dan rutin: Pelaksanaan perawatan berkala seperti analisis gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis*), pengujian kualitas minyak isolasi, serta pengukuran tahanan isolasi harus diperkuat dan dijadwalkan secara sistematis berdasarkan data penuaan termal.

4. Pengembangan model prediktif dan simulasi: disarankan untuk melakukan analisis dengan model simulasi berbasis perangkat lunak seperti MATLAB, ETAP, atau COMSOL guna memodelkan laju penuaan secara dinamis dan mengevaluasi dampak pembebanan dalam jangka panjang dengan skenario variatif.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. A. Y. Andika and A. Supardi, “Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Umur Transformator Daya #1 150/20 KV Pada Gardu Induk Teluk Lembu PT. PLN (Persero) UPT Pekanbaru,” *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, vol. 1, no.2, pp. 1–10, 2021.
- [2] S. A. Nugroho, A. J. Taufiq, and D. N. K. Hardani, “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Umur Transformator Daya (Studi Kasus Pada PT. Sumber Segara Primadaya, Cilacap),” *Seminar Nasional Teknologi Terapan*, pp. 54–58, 2018.
- [3] R. Fathoni, “Analisis Termal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi,” *Jurnal Teknologi Energi*, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2019.
- [4] F. Azhar, Y. Rahmawati, and I. Fadlika, “Estimasi Umur Transformator Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban dan Temperatur Lingkungan di Penyulang Bolo PLN Rayon Woha Kabupaten Bima,” *SENATI*, vol. 3 no. 2, pp. 43–49, 2019.
- [5] L. Saoqibillah and A. Malik, “Analisis Faktor yang Menyebabkan Penyimpangan Galvanometer dan Kondisi Lampu dengan Hukum Faraday Menggunakan Laboratorium Virtual PhET,” *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika Indonesia*, vol. 6, no. 1, 2024.
- [6] A. D. Rahmawati, D. A. Febrianti, Faturahman, and A. Malik, “Effect of Gap Width on the Distance between Bright Patterns in Yellow,” *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika Indonesia*, vol. 5, no. 2, 2023.
- [7] J. A. Pratama, “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator 20kV/150kV di PLTU Cilacap Unit 1&2 2x300 MW PT. Sumber Segara Primadaya Cilacap,” *Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 8, no. 2, pp. 50–59, 2020.
- [8] I. P. Setiawan, “Perkiraan Umur Transformator Berdasarkan Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Menggunakan Metode Trend Linear,” *Jurnal Teknik Energi*, vol. 9, no. 4, pp. 15–23, 2021.

- [9] D. Indirwan dan A. Azis, “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya 150 KV Di PLTGU Keramasan Palembang,” *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, vol. 9 no. 1, pp. 1–8, 2022.
- [10] A. Hermawan, R. Sutjipto, S. Irmadhani Hidayat, and F. Berlian Suryaningtyas, “Studi Pengaruh Pembebanan sebagai Dasar Scheduling Maintenance untuk Meminimalisir Susut Umur Transformator 1 GI Blimbing,” *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 7 no. 3, pp. 33–38, 2020.
- [11] P. Gultom, “Studi Susut Umur Transformator Distribusi 20 KV Akibat Pembebanan Lebih di PT. PLN (Persero) Kota Pontianak,” *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2017.
- [12] Y. Igrisa, Y. Mohamad, A. I. Tolago, K. Kunci, T. ; Pembebanan, and S. Umur, “Volume 3 Nomor 2 Juli 2021 Analisis Perkiraan Umur Trafo Tenaga 150kV Di GI Isimu”.
- [13] A. Maruf, Y. Primadiyono, K. Kunci, : Transformator, and S. Umur, “Analisis Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 MVA Unit 1 dan 2 Di GI 150 kV Kalisari,” 2021.
- [14] Tri Ongko Priyono and Valentina, “ANALISA SISA UMUR PEMAKAIAN TRANSFORMATOR TIPE RECTIFIER KAPASITAS 20 KV BERDASARKAN PERHITUNGAN PEMBEBANAN DI CHEMICAL PLANT KARAWANG ,” *Jurnal Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 63–72, 2022.
- [15] D. R. D. Saragih, U. Situmeang, and Zulfahri, “Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Umur Transformator Daya #1 150/20 KV Pada Gardu Induk Teluk Lembu PT. PLN (Persero) UPT Pekanbaru,” *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, vol. 4, no. 2, pp. 72–81, 2022.
- [16] Wahyudi U, “Mahir dan Terampil Belajar Elektronika Untuk Pemula,” *Yogyakarta: Deepublish.*, 2018.
- [17] E. Permata and I. Lestari, “MAINTENANCE PREVENTIVE PADA TRANSFORMATOR STEP-DOWN AV05 DENGAN KAPASITAS 150KV DI PT. KRAKATAU DAYA LISTRIK,” *Prosiding Seminar*

Nasional Pendidikan FKIP Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, vol. 3, no. 1, pp. 485–493, 2020.

- [18] Indra Roza, Agus Almi Nasution, and Heri Setiawan, “ANALISIS UMUR MINYAK TERHADAP TEMPERATUR TRANSFORMATOR 150KV AKIBAT PENURUNAN TEGANGAN TEMBUS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG) 2.1 PT PLN (PERSERO) UNIT PELAKSANA PEMBANGKITAN BELAWAN,” *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 2019.
- [19] Asfari Hariz Santoso, Ernanda Rizka, and Harrij Mukti K, “Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV Penyulang Lowokwaru di PT. PLN(PERSERO) UP3 Malang ,” *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan* , vol. 09 no. 3, 2022.
- [20] IEC 60076-7, “Pedoman Pembebanan untuk Transformator Tenaga yang Terendam Minyak,” 2009.
- [21] Yaved Pasereng Tondok, Lily Setyowaty Patras, and Fielman Lisi, “Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 8 no.2, 2019.
- [22] Puntoko, “Modul Trainning Transformator,” *Banten: Krakatau Daya Listrik*, 2008.
- [23] R. J. Smith and J. D. Brown, “Application of Faraday’s Law in Power Transformer Design,” *EEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36 no. 4, pp. 2205–2212, 2021.
- [24] M. H. Rashid, “Induction Phenomena in Electrical Machines: A Study Based on Faraday’s Law,” *International Journal of Electrical Machines & Drives*, vol. 42 no.3, pp. 789–798, 2022.
- [25] N. Nurdiana, “Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat pada Penyulang Nakula Gardu Induk Talang Kelapa,” *Jurnal Ampere*, vol. 1 no. 1, pp. 26–32, 2016.

- [26] A. S. S. Putra, “Analisis Pembebanan Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) Rayon Makassar Selatan,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6 no. 2, pp. 123–130, 2013.
- [27] D. Kurniawan, “Studi Analisis Proteksi Transformator Daya terhadap Gangguan Hubung Singkat di GI Cibinong,” *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 7 no. 1, pp. 45–52, 2019.
- [28] P. R. Hutagalung, “Analisis Sistem Isolasi Transformator Daya untuk Mencegah Kerusakan Akibat Tegangan Lebih,” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 8 no. 2, pp. 87–94, 2021.
- [29] T. Wicaksono, “Pengaruh Kualitas Isolasi terhadap Efisiensi Transformator Tenaga,” *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 9 no. 3, pp. 33–41, 2017.
- [30] R. Prasetyo, “Kajian Faktor-faktor yang Mempengaruhi Ketahanan Isolasi Transformator,” *Jurnal Keteknikan Listrik*, vol. 5 no. 4, pp. 77–84, 2020.
- [31] S. Hidayat, “Optimalisasi Material Isolasi dalam Transformator Tegangan Tinggi,” *Jurnal Riset Teknologi Energi*, vol. 10 no. 1, pp. 55–62, 2022.
- [32] IEC 60076-7, “Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers,” *International Electrotechnical Commission*, 2018.
- [33] A. Kasiram, “Metodologi Penelitian Kualitatif dan Kuantitatif,” p. 149, 2006.