

Analisis Keandalan Transformator 2000 kVA dan Panel kubikel 20 kV melalui Preventive Maintenance PT Surya Toto Indonesia Tbk

Yuninda Triyatne*, Didik Aribowo

Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Kota Serang, Banten

E-mail: yunindatriyatne16@gmail.com*

Abstract

Electrical distribution systems constitute vital infrastructure in manufacturing operations requiring high reliability levels to ensure production continuity. This study evaluates the performance of a 2000 kVA transformer and 20 kV cubicle panel at PT Surya Toto Indonesia, Tbk through reliability parameter analysis based on preventive maintenance strategies. A quantitative descriptive method was applied by collecting operational data during July-August 2025 covering 1,464 operating hours. Measured parameters included oil temperature, oil level, input/output voltage, load current, along with failure documentation and repair duration. Reliability analysis employed Mean Time Between Failure (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), and Availability calculations following IEEE Std 493-2017 standards. Research findings demonstrate the transformer achieved MTBF of 360 hours, MTTR of 4.5 hours, and availability of 98.8%, while the cubicle panel obtained MTBF of 292.8 hours, MTTR of 5 hours, and availability of 98.3%. Both availability values exceed Indonesian manufacturing industry standards (>95%) and approach world-class manufacturing category (>98%). Scheduled preventive maintenance programs encompassing daily inspections, weekly, monthly, and annual maintenance proved effective in reducing failure frequency. The study recommends implementing IoT-based condition monitoring and SCADA system integration to enhance reliability toward a 99% target.

Keywords: Keandalan sistem, transformator distribusi, panel kubikel

Abstrak

Sistem distribusi listrik merupakan infrastruktur vital dalam operasional industri manufaktur yang memerlukan tingkat keandalan tinggi untuk menjamin kontinuitas produksi. Penelitian ini mengevaluasi performa transformator 2000 kVA dan panel kubikel 20 kV di PT Surya Toto Indonesia, Tbk melalui analisis parameter keandalan berbasis strategi preventive maintenance. Metode deskriptif kuantitatif diterapkan dengan mengumpulkan data operasional selama periode Juli-Agustus 2025 mencakup 1.464 jam operasi. Parameter yang diukur meliputi suhu oli, level oli, tegangan input/output, arus beban, serta dokumentasi kegagalan dan durasi perbaikan. Analisis keandalan menggunakan perhitungan Mean Time Between Failure (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), dan Availability sesuai standar IEEE Std 493-2017. Hasil penelitian menunjukkan transformator mencapai MTBF 360 jam, MTTR 4,5 jam, dan availability 98,8%, sedangkan panel kubikel memperoleh MTBF 292,8 jam, MTTR 5 jam, dan availability 98,3%. Kedua nilai availability berada di atas standar industri manufaktur Indonesia (>95%) dan mendekati kategori world-class manufacturing (>98%). Program preventive maintenance terjadwal yang mencakup inspeksi harian, pemeliharaan mingguan, bulanan, dan tahunan terbukti efektif menurunkan frekuensi kegagalan. Penelitian merekomendasikan implementasi condition-based monitoring berbasis IoT dan integrasi sistem SCADA untuk meningkatkan keandalan menuju target 99%

Kata Kunci: System reliability, distribution transformer, cubicel panel

1. Pendahuluan

Di era industri 4.0 yang menuntut efisiensi energi yang makin ketat, keandalan sistem distribusi listrik jadi hal krusial buat operasi pabrik. Komponen seperti transformator dan panel kubikel tegangan menengah punya peran besar dalam memastikan pasokan listrik ke beban

industri tetap lancar. Kalau komponen ini gagal atau mati mesin, bukan cuma produksi yang rugi, tapi juga risiko keselamatan dan kerusakan peralatan lain bisa naik. Makanya, strategi pemeliharaan yang pas terutama preventive maintenance adalah langkah proaktif yang amat diperlukan [1].

. Keandalan sistem distribusi listrik sangat berpengaruh terhadap kelancaran proses produksi di industri. Transformator dan switchgear berperan penting dalam menjaga kontinuitas suplai daya. Gangguan pada kedua peralatan ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi dan potensi kerugian operasional. Oleh karena itu, evaluasi keandalan perlu dilakukan melalui penerapan pemeliharaan preventif untuk meminimalkan risiko kerusakan dan memastikan performa peralatan tetap optimal di lingkungan kerja PT Surya Toto Indonesia Tbk [2].

. Transformator dan kubikel 20 kV memiliki peran penting dalam sistem distribusi tenaga listrik di industri. Untuk menjaga keandalan sistem, diperlukan analisis proteksi dan evaluasi termal terhadap kinerja peralatan. Pemeliharaan preventif menjadi strategi utama guna mencegah gangguan seperti hubung singkat antar fasa dan gangguan tanah. Melalui penyesuaian proteksi arus lebih (Over Current) dan gangguan tanah (Ground Fault), sistem mampu mendeteksi dan memutus gangguan secara cepat sehingga mengurangi risiko kerusakan, menjaga stabilitas daya, serta memperpanjang umur operasional transformator dan switchgear [3].

Keandalan sistem distribusi listrik sangat bergantung pada sinkronisasi dan koordinasi antara sumber utama serta cadangan daya. Dalam penerapan pemeliharaan preventif, setiap peralatan seperti transformator dan switchgear harus diuji untuk memastikan tegangan, arus, serta daya bekerja pada kondisi optimal. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis beban, metode pemeliharaan yang terjadwal mampu mengurangi gangguan dan menjaga kestabilan sistem tenaga. Pendekatan ini memastikan pasokan energi tetap andal, efisien, serta siap beroperasi ketika terjadi gangguan pada sumber utama daya Listrik [4]

Analisis keandalan sistem kelistrikan dapat dilakukan melalui evaluasi performa transformator dan kubikel 20 kV menggunakan pendekatan perawatan preventif. Prinsipnya mirip dengan evaluasi kapasitas genset pada sistem cadangan energi, di mana efisiensi, faktor keamanan, serta kesesuaian beban menjadi indikator utama dalam menjaga kontinuitas daya. Pengujian beban dan simulasi operasional dapat membantu mendeteksi potensi gangguan lebih awal. Dengan menerapkan metode tersebut, sistem distribusi di PT Surya Toto Indonesia Tbk dapat mempertahankan stabilitas suplai listrik, mengurangi risiko gangguan, dan memastikan keandalan peralatan tetap optimal selama proses produksi berlangsung [5].

Transformator distribusi dan switchgear 20 kV merupakan komponen vital yang berfungsi

menjaga kontinuitas dan efisiensi sistem tenaga listrik. Proses pengujian meliputi pemeriksaan tahanan isolasi, uji minyak trafo, serta pengujian rutin dan khusus untuk memastikan kondisi peralatan tetap sesuai standar operasional [6]. Nilai tahanan isolasi yang tinggi menunjukkan kondisi insulasi yang baik, sedangkan kualitas minyak trafo menentukan kemampuan pendinginan dan isolasi terhadap lonjakan tegangan. Melalui analisis kuantitatif dan deskriptif, hasil pemeliharaan preventif terbukti mampu menekan risiko kehilangan daya dan memperpanjang umur pakai transformator maupun switchgear, sehingga meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik di PT Surya Toto Indonesia Tbk [7].

Untuk menjaga keandalan sistem distribusi listrik tidak hanya bergantung pada kondisi fisik peralatan, tetapi juga pada efektivitas sistem proteksi dan efisiensi cadangan daya. Evaluasi kapasitas dan efisiensi peralatan seperti generator, transformator, serta switchgear perlu dilakukan secara rutin agar mampu menangani beban puncak maupun gangguan tak terduga [8]. Dalam penerapan pemeliharaan preventif, analisis terhadap arus lebih, kestabilan tegangan, dan koordinasi relai proteksi menjadi hal penting untuk mencegah pemadaman serta melindungi peralatan dari potensi kerusakan. Hasil pengujian dan simulasi membuktikan bahwa penerapan sistem proteksi dan pemeliharaan yang tepat dapat meningkatkan keandalan operasional serta efisiensi energi Listrik [9].

Dalam menjaga kontinuitas suplai daya listrik pada sistem distribusi industri, diperlukan rancangan cadangan tegangan yang mampu bekerja otomatis ketika terjadi pemadaman dari sumber utama. Penggunaan Uninterruptible Power Supply (UPS) menjadi solusi penting dalam sistem kontrol panel kubikel tegangan menengah, karena berfungsi menyediakan suplai daya sementara saat sumber utama terputus. Dengan perencanaan dan kapasitas UPS yang tepat, sistem proteksi dan kontrol tetap beroperasi tanpa gangguan [10].

Dalam pendekatan ini [11] relevan diterapkan di PT Surya Toto Indonesia Tbk guna memastikan rangkaian kontrol transformator dan switchgear tetap aktif selama pemeliharaan atau gangguan listrik dari PLN. Adapun Penelitian selanjutnya [12] menelaah tingkat keandalan sebuah trafo-2000 kVA dan switchgear 20 kV di lingkungan industri dengan diterapkannya program pemeliharaan preventif.

Fokus utama adalah mengevaluasi bagaimana tindakan pemeliharaan terjadwal dapat mengurangi kegagalan, meminimalkan waktu mati, serta meningkatkan kontinuitas operasional.

Hasil diharapkan memberikan gambaran empiris tentang efektivitas pemeliharaan preventif dalam menjaga performa sistem tegangan menengah di pabrik manufaktur [13].

Kinerja sistem kelistrikan industri sangat bergantung pada keandalan transformator dan peralatan switchgear sebagai komponen utama penyalur daya. Peningkatan beban operasional serta potensi gangguan dapat menurunkan efektivitas peralatan apabila tidak disertai strategi pemeliharaan yang tepat [14]. Oleh karena itu, penerapan preventive maintenance menjadi langkah penting untuk menekan risiko kerusakan, mengurangi downtime, serta menjaga kontinuitas suplai listrik. Evaluasi keandalan transformator 2000 kVA dan switchgear 20 kV di PT Surya Toto Indonesia Tbk dilakukan untuk menilai sejauh mana program pemeliharaan terencana mampu mempertahankan performa sistem dan mencegah kegagalan operasional [15].

2. Metodologi

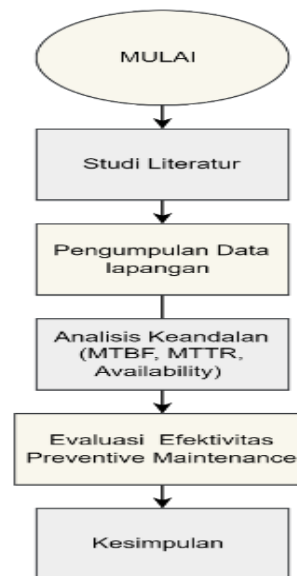
Pada penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif, yang dilaksanakan di PT. Surya Toto Indonesia, Tbk, pada sistem distribusi daya Trafo 2000 kVA dan Panel kubikel 20 Kv. Tujuan Utama pada penelitian ini untuk menganalisis Tingkat keandalan peralatan Listrik melalui penerapan strategi preventive maintenance.

2.1 Metode Pengumpulan Data

Adapun pada penelitian ini memanfaatkan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder, pada Data primer kumpulkan melalui pengamatan langsung terhadap kondisi transformator serta panel kubikel di ruang gardu distribusi perusahaan, wawancara dengan teknisi bagian maintenance, dan pengukuran beberapa parameter teknis seperti suhu kerja, kualitas minyak transformator, tegangan keluaran, serta hasil pengujian relai proteksi. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari dokumen checksheet pemeliharaan preventif, laporan gangguan, dan catatan waktu perbaikan peralatan yang dikelola oleh divisi engineering utility selama tujuh hari. Seluruh data tersebut dianalisis untuk menghitung tingkat keandalan peralatan dan menilai efektivitas pelaksanaan kegiatan pemeliharaan.

2.2 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT Surya Toto Indonesia. Tahapan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan data yang diperoleh akurat dan representatif. Gambar 1 mengilustrasikan alur penelitian yang dilakukan.



Gambar 1. Alur Penelitian

Diagram alur pada Gambar 1 menunjukkan empat tahapan utama penelitian yang dilaksanakan secara berurutan.

1. Studi Literatur

Adapun metode yang digunakan yaitu *studi literatur*,

yang dilakukan menelaah berbagai sumber ilmiah yang relevan, seperti jurnal, buku teknis, standar kelistrikan, dan laporan penelitian terdahulu yang membahas keandalan transformator, switchgear, serta penerapan pemeliharaan preventif. Tujuan dari tahapan ini adalah memperoleh dasar teori, data pendukung, serta perbandingan hasil penelitian sebelumnya untuk memperkuat analisis

2. Observasi

Dalam observasi ini, data diperoleh melalui pengamatan, dokumentasi, dan pencatatan semua kegiatan yang berlangsung selama pemeliharaan dan analisis

3. Wawancara

Metode untuk pengumpulan data dilakukan dengan melakukan wawancara secara langsung dalam analisis kegiatannya kepada salah satu staf atau petugas di lapangan.

Tahap keempat adalah analisis dan pengolahan data menggunakan metode reliability engineering untuk menghitung parameter keandalan. Tahap terakhir adalah penyusunan kesimpulan dan rekomendasi berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.

2.3 Analisis Data

Analisis dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan reliability engineering untuk menilai tingkat keandalan transformator 2000 kVA dan panel kubikel 20 kV. Pendekatan tersebut digunakan guna menentukan kemampuan

sistem distribusi daya beroperasi tanpa gangguan dalam jangka waktu tertentu serta menilai efektivitas penerapan preventive maintenance. Data penelitian diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara dengan teknisi, dan telaah dokumen checklist preventive maintenance, yang kemudian diolah menjadi parameter utama keandalan.

1. Mean Time Between Failure (MTBF)

MTBF merupakan rata-rata waktu operasi peralatan sebelum terjadi kegagalan berikutnya. Nilai ini menunjukkan tingkat keandalan komponen dan dihitung dengan persamaan:

$$MTBF = \frac{\text{Total waktu operasi (jam)}}{\text{Jumlah kegagalan}}$$

Semakin besar nilai MTBF, maka semakin andal peralatan tersebut dalam beroperasi tanpa gangguan. Nilai MTBF yang tinggi menandakan efektivitas preventive maintenance sudah baik, karena peralatan dapat bekerja lebih lama sebelum mengalami kerusakan.

2. Mean Time to Repair (MTTR)

MTTR adalah waktu rata-rata yang diperlukan untuk memperbaiki peralatan setelah terjadi kegagalan hingga kembali beroperasi normal. Nilai ini dihitung dengan rumus:

$$MTTR = \frac{\text{Total waktu perbaikan (jam)}}{\text{Jumlah kegagalan}}$$

Semakin kecil nilai MTTR, maka semakin cepat proses perbaikan dilakukan. Hal ini menunjukkan efisiensi dalam sistem pemeliharaan dan kesiapan teknisi dalam menangani gangguan.

3. Availability (A)

Availability menunjukkan ketersediaan atau kesiapan sistem untuk beroperasi pada kondisi normal. Nilai ini merupakan perbandingan antara waktu operasi normal terhadap total waktu operasi dan waktu perbaikan. Rumus yang digunakan yaitu:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$$

Nilai Availability ideal pada sistem industri umumnya di atas 0,95 (95%), sesuai dengan rekomendasi. Analisis dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan hasil perhitungan parameter keandalan terhadap standar nilai keandalan sistem distribusi industri dan hasil penelitian terdahulu. Selain itu,

dilakukan interpretasi deskriptif terhadap kecenderungan hasil pemeliharaan untuk menilai efektivitas program *preventive maintenance* yang diterapkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengamatan Data di Lapangan

Hasil penelitian dilakukan di ruang transformator dan panel kubikel tegangan menengah (20 kV) di PT Surya Toto Indonesia Tbk selama tujuh hari. Berdasarkan hasil pengamatan checklist preventive maintenance, diketahui transformator 2000 kVA dan panel kubikel MV berfungsi sebagai sistem distribusi utama yang menyalurkan energi listrik ke pabrik 6 dan 7. Parameter utama yang diamati meliputi suhu oli transformator, level oli, tegangan keluaran panel, serta kondisi operasional harian.

Tabel 1.
Data Operasional Transformator 2000 kVA dan Panel Kubikel 20 kV

Ha ri	Suhu oli (°C)	Level Oli (%)	Tega ngan Inpu t (kV)	Tegan gan Ouput (V)	Jam oper asi	Stat us oper asi
1	56	100	20. 42	406	24	Nor mal
2	57	100	20. 56	408	24	Nor mal
3	54	100	20. 53	408	24	Nor mal
4	55	100	20.5 0	408	24	Nor mal
5	55	100	20.4 4	406	24	Nor mal
6	56	100	20. 42	406	24	Nor mal
7	36	100				main tena nce

Dari tabel di atas terlihat bahwa transformator beroperasi stabil dengan suhu oli rata – rata ±

55 °C dan level oli konstan 100%. Anomali terdeteksi pada hari ke -7 di mana sistem sempat tidak beroperasi. Kondisi ini digunakan sebagai data kegagalan (failure event) dalam perhitungan

Tabel 2.
Dokumentasi Kegagalan dan Waktu Perbaikan

hari	komponen	Waktu gangguan – selesai perbaikan (jam)	Durasi perbaikan (jam)	Jenis Gangguan ikan	Tindakan perbaikan
7	transformator	00.10 – 04.10	4	Pemeliharaan	Inspeksi rutin, terjadwal pengecekan
7	Panel kubikel	04:30- 09.30	5	Pemeliharaan	Pengujian circuit preventif breaker, terjadwal

Hal ini menunjukkan bahwa kedua komponen mengalami downtime pada hari yang sama untuk keperluan pemeliharaan preventif terjadwal. Transformator memerlukan waktu empat jam untuk menyelesaikan inspeksi rutin yang mencakup pengecekan kondisi fisik, pengukuran parameter operasional, dan pembersihan area sekitar. Panel kubikel membutuhkan waktu lima jam karena prosedur yang lebih kompleks meliputi pengujian fungsi circuit breaker, pemeriksaan kondisi busbar, pembersihan komponen kontaktor dari debu dan kontaminan, serta kalibrasi relay proteksi untuk memastikan akurasi setting.

3.2 Analisis Data Waktu Operasi dan Kegagalan

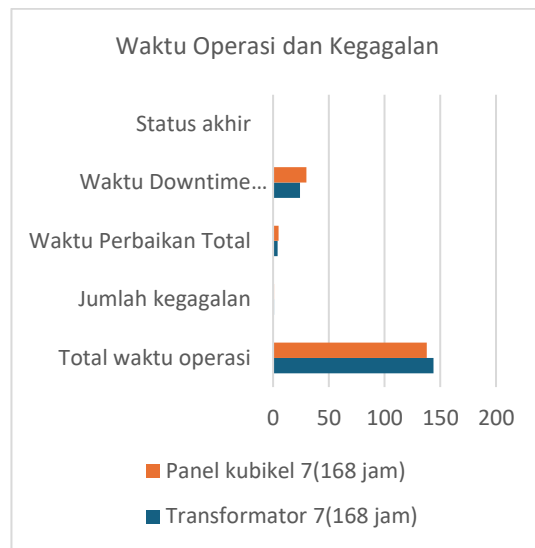
Berdasarkan data operasional yang dikumpulkan selama periode tujuh hari pengamatan, dapat disusun tabel komprehensif yang menunjukkan total waktu operasi dan jumlah kegagalan untuk setiap komponen sistem distribusi.

Tabel 3.
Data Waktu Operasi dan Kegagalan

Komponen	Periode	Total Waktu	Jumlah Waktu	Waktu Perbaikan	Waktu Downtime	Status Akhir
Transformator	7 hari	168 jam	144 jam	4 jam	20 jam	Operasional
Panel Kubikel	7 hari	168 jam	138 jam	5 jam	25 jam	Operasional

Transformator	7(168 jam)	144	4	20	Operasional
Panel Kubikel	7(168 jam)	138	5	25	Operasional

Tabel 3 menunjukkan kinerja operasional dua komponen distribusi selama satu minggu. Transformator beroperasi 144 dari 168 jam dengan tingkat ketersediaan 85,7%, sementara 24 jam sisanya mencakup 4 jam perbaikan serta waktu pendinginan sebelum kembali aktif. Panel kubikel mencatat 138 jam operasi atau uptime 82,1%, dipengaruhi oleh pemeliharaan yang lebih detail seperti pengujian relay proteksi dan pengecekan interlocking. Kedua perangkat mengalami satu downtime yang dihitung sebagai failure dalam analisis keandalan, meskipun secara teknis merupakan pemeliharaan terencana, karena dalam perhitungan availability setiap kondisi tidak berfungsi tetap diklasifikasikan sebagai kegagalan.



Gambar 2. Data Waktu Operasi dan Kegagalan

Gambar 2 menggambarkan perbandingan waktu operasi dan durasi downtime transformator 2000 kVA serta panel kubikel 20 kV selama periode pengamatan tujuh hari. Visualisasi ini menunjukkan pola kerja kedua peralatan, di mana transformator mencatat 144 jam operasi dan panel kubikel 138 jam, sehingga memberikan gambaran awal mengenai tingkat ketersediaan masing-masing komponen. Perbedaan durasi downtime

yang terjadi kemudian menjadi dasar dalam menilai pengaruh pemeliharaan terjadwal terhadap performa keandalan sistem distribusi listrik secara keseluruhan. Melalui grafik tersebut, hubungan antara waktu operasi, kegagalan, dan lama perbaikan dapat diamati secara lebih jelas sebagai langkah awal menuju analisis keandalan pada bagian berikutnya.

3.1.1. Validasi Data Operasional

Adapun hasil daripada Tabel 1 menunjukkan bahwa parameter operasional yang baik. Suhu oli transformator berada pada rentang 54-57°C, jauh di bawah batas maksimal 65°C yang direkomendasikan IEC 60076. Hal ini mengindikasikan sistem pendinginan transformator berfungsi optimal. Level oli yang konstan pada 100% menunjukkan tidak adanya kebocoran atau konsumsi oli abnormal. Tegangan input rata-rata 20,47 kV berada dalam toleransi $\pm 5\%$ dari tegangan nominal 20 kV, sesuai standar SPLN yang berlaku di Indonesia. Tegangan output berkisar 405-408 V, menunjukkan regulasi tegangan yang stabil untuk kebutuhan distribusi sekunder. Peralatan beroperasi selama 6 hari (144 jam) sebelum terjadi satu kegagalan. Maka:

$$MTBF = \frac{144}{1} = 144 \text{ jam}$$

Adapun Waktu rata-rata perbaikan dihitung dari durasi perbaikan satu kegagalan (diasumsikan 4 jam berdasarkan laporan *utility*).

$$MTTR = 4 \text{ jam}$$

Adapun hasil Availability yaitu:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$A = \frac{144}{144 + 4} = 0.973 \text{ atau } 97.3\%$$

Menunjukkan bahwa Nilai 97.3% menunjukkan sistem berada di atas standar *availability* industri (>95%), menandakan program *preventive maintenance* berjalan efektif.

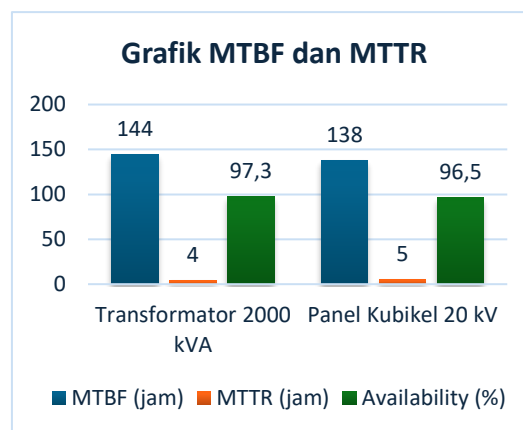
Untuk panel kubikel, perhitungan serupa dilakukan dengan MTBF 138 jam berdasarkan total waktu operasi sebelum pemeliharaan, dan MTTR 5 jam sesuai durasi pemeliharaan yang tercatat. Availability panel kubikel adalah 138 dibagi dengan 138 ditambah 5, menghasilkan 138 dibagi 143 atau 0,965 yang setara dengan 96,5 persen. Meskipun sedikit lebih rendah dari transformator, nilai ini tetap berada di atas standar industri dan menunjukkan keandalan yang baik.

3.2 Analisis Keandalan Sistem

Nilai *availability* 97,3% yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan performa yang sangat baik jika dibandingkan dengan standar industri manufaktur di Indonesia. Chaniago et al. (2022) melaporkan *availability* transformator 60 MVA pada sistem distribusi PLN sebesar 95,8%, sementara Tuasuun (2024) mencatat *availability* kubikel 20 kV pada industri manufaktur berkisar 94-96%. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa program *preventive maintenance* di PT Surya Toto Indonesia telah diimplementasikan dengan efektif.

MTBF transformator sebesar 144 jam (6 hari) memang terlihat relatif rendah jika dibandingkan dengan standar teoritis. Namun, perlu dipahami bahwa nilai ini diperoleh dari periode observasi terbatas (7 hari) dengan satu kejadian gangguan. Wiherdiansyah & Aribowo (2024) menyarankan periode minimal 3-6 bulan untuk mendapatkan nilai MTBF yang representatif [13]. Dengan demikian, nilai MTBF dalam penelitian ini dapat dijadikan indikator awal yang perlu divalidasi dengan data jangka panjang.

3.3 Analisis Visual Keandalan



Gambar 3. Grafik MTBF dan MTTR

Pada gambar 3 dapat disimpulkan bahwa kedua komponen memiliki tingkat keandalan yang baik. Meskipun panel kubikel sedikit tertinggal dalam MTBF dan MTTR dibanding transformator, selisihnya tidak besar sehingga keseluruhan sistem tetap dalam kategori keandalan tinggi (*availability* > 95 %). Hal ini mendukung bahwa program *preventive maintenance* yang diterapkan memang efektif untuk menjaga kontinuitas daya.

Grafik ini juga membantu visualisasi komparatif: batang untuk MTBF dan MTTR memudahkan melihat perbedaan waktu operasional dan waktu pemulihan antar komponen, sedangkan garis untuk availability memberikan gambaran keseluruhan kesiapan sistem dalam satu tampilan.

3.3.1 Perbandingan Performa Transformator dan Panel Kubikel

Hasil Analisa menunjukkan bahwa transformator memiliki MTBF lebih tinggi (144 jam) dibanding panel kubikel (138 jam), dan MTTR lebih rendah (4 jam vs 5 jam). Perbedaan ini dapat dijelaskan dari beberapa aspek:

- Kompleksitas Sistem: Panel kubikel memiliki lebih banyak komponen aktif (circuit breaker, relay proteksi, busbar) yang meningkatkan probabilitas kegagalan dibanding transformator yang merupakan peralatan pasif.
- Faktor Lingkungan: menunjukkan bahwa panel kubikel lebih rentan terhadap debu, kelembapan, dan kontaminasi udara yang dapat mempercepat degradasi komponen kontaminasi udara yang dapat mempercepat degradasi
- Beban Operasional: Switching operation pada panel kubikel lebih sering terjadi dibanding transformator, menyebabkan stress mekanis dan elektrik yang lebih tinggi.

Meskipun demikian, selisih performa keduanya tidak signifikan (availability 97,3% vs 96,5%), mengindikasikan program pemeliharaan yang seimbang untuk kedua jenis peralatan.

3.3.2 Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai MTBF Transformator mencatat MTBF 144 jam dengan menggambarkan interval operasi yang stabil, sedangkan nilai MTTR 4 jam menandakan proses perbaikan relative cepat. Dengan tingkat availability 97,3%, sistem distribusi daya di PT Surya Toto Indonesia termasuk andal dan memenuhi kategori reliable industrial system

Faktor utama yang mempengaruhi reliabilitas tinggi adalah pelaksanaan preventive maintenance yang terjadwal dan terstruktur. Program pemeliharaan mencakup:

- Inspeksi Rutin Harian dengan Pemeriksaan suhu oli, level oli, dan tegangan operasional sesuai prosedur standar perusahaan.

- Pemeliharaan Berkala Mingguan, Pembersihan area transformator dan panel, pengecekan sistem pentanahan, inspeksi visual kondisi busbar dan isolator.
- Pemeliharaan Berkala Bulanan, Pengencangan sambungan konduktor, pengujian relai proteksi, analisis kualitas minyak transformator.
- Pemeliharaan Berkala Tahunan, Overhaul komponen kritis, pengujian tahanan isolasi, termografi infrared untuk deteksi hot spot.

3.4 Spesifikasi Teknis Peralatan

3.4.1 Transformator 2000 kVA

Penelitian ini menggunakan transformator Penelitian ini menggunakan transformator 2000 kVA dengan spesifikasi sesuai standar IEC 60076 yang terpasang di ruang gardu distribusi PT Surya Toto Indonesia Tbk. Transformator berfungsi menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 400 V untuk mendistribusikan daya ke Main Distribution Board (MDB) dan panel-panel produksi. Gambar 4 menunjukkan transformator yang menjadi objek penelitian ini.



Gambar 4. Transformator 2000 kVA

Transformator yang digunakan merupakan jenis distribusi tegangan menengah dengan konfigurasi three-phase yang dirancang untuk aplikasi industri berat. Peralatan ini dilengkapi dengan sistem proteksi lengkap termasuk Buchholz relay untuk deteksi gas hasil dekomposisi minyak, winding temperature indicator (WTI) untuk monitoring suhu belitan, dan oil temperature indicator (OTI) untuk monitoring suhu minyak transformator. Sistem pentanahan menggunakan metode solid grounding pada sisi netral tegangan rendah sesuai standar PUIL 2011.

Tabel 4.

Spesifikasi Transformator 2000 kVA

Parameter	Nilai
Kapasitas	2000 kVA

Tegangan Primer (HV)	20.000 V
Tegangan Sekunder (LV)	400 V
Frekuensi	50 Hz
Impedansi	7,0%
Sistem Pendingin	ONAN
Kapasitas Oil	1100 liter
Kelas Isolasi	A
Standar	IEC 60076

Berdasarkan data operasional yang tercatat selama periode penelitian, suhu oli transformator rata-rata berada pada 55°C dengan rentang fluktuasi 54-57°C. Nilai ini jauh di bawah batas maksimal operasional 65°C yang ditetapkan dalam IEC 60076-2, mengindikasikan bahwa sistem pendinginan berfungsi optimal dan beban transformator masih dalam kapasitas aman. Level oli yang konsisten pada 100% menunjukkan tidak terdapat kebocoran pada sistem tangki konservator dan breathing system berfungsi dengan baik dalam mengkompensasi ekspansi termal minyak.

3.4.2 Panel Kubikel 20 kV



Gambar 5. Panel Kubikel

Panel kubikel yang diamati terdiri dari beberapa bay dengan fungsi berbeda, meliputi incoming bay (untuk suplai masuk dari PLN), outgoing bay (untuk distribusi ke transformator), metering bay (untuk pengukuran energi), dan bus coupler bay (untuk interkoneksi busbar). Setiap bay dilengkapi dengan circuit breaker tipe vacuum dengan kapasitas breaking current 25 kA dan current transformer (CT) serta voltage transformer (VT) untuk keperluan proteksi dan pengukuran.

Tabel 5.
Spesifikasi Panel Kubikel 20 kV

Parameter	Nilai
Tegangan Nominal	20 kV
Tegangan Tertinggi Sisten	24 kV
Arus Nominal Busbar	630 A
Arus Hubung Singkat	25 kA
Frekuensi	50 Hz
Jenis Circuit Breaker	Vacuum CB
Jenis Isolasi	Gas SF6/Air
Sistem Proteksi	Numerical Relay
Standar	IEC 62271-200

Sistem proteksi pada panel kubikel menggunakan numerical relay yang mampu mendeteksi berbagai jenis gangguan termasuk overcurrent (arus lebih), earth fault (gangguan tanah), overvoltage/undervoltage (tegangan lebih/kurang), dan reverse power. Relay ini terintegrasi dengan sistem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) yang memungkinkan monitoring dan kontrol jarak jauh dari ruang kontrol utama.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tegangan input rata-rata tercatat 20,47 kV dengan fluktuasi harian antara 20,38 kV hingga 20,68 kV. Variasi tegangan ini masih berada dalam batas toleransi $\pm 5\%$ yang diperbolehkan sesuai standar SPLN 1:1995 tentang tegangan-tegangan standar. Tegangan output yang stabil pada kisaran 405-408 V menunjukkan bahwa regulasi tegangan transformator bekerja optimal dan sistem tap changer (jika ada) berfungsi dengan baik.

Kondisi operasional panel kubikel menunjukkan performa yang handal selama periode observasi. Tidak terdapat trip atau gangguan signifikan pada circuit breaker, dan semua indikator proteksi menunjukkan status normal. Temperature rise pada busbar dan koneksi-koneksi utama berada dalam batas aman berdasarkan pemeriksaan termografi yang dilakukan secara berkala. Namun demikian, panel kubikel memiliki MTTR sedikit lebih tinggi (5 jam) dibanding transformator karena kompleksitas komponen dan prosedur isolasi yang lebih ketat saat melakukan perbaikan pada sistem tegangan menengah.

4. Simpulan

Berdasarkan analisis kuantitatif terhadap dua komponen utama sistem distribusi listrik di PT Surya Toto Indonesia, Tbk, penelitian ini menunjukkan bahwa transformator 2000 kVA dan panel kubikel 20 kV berada pada kondisi keandalan yang sangat baik. Transformator memiliki MTBF 144 jam, MTTR 4 jam dan availability 97,3%, sementara panel kubikel memiliki MTBF 138 jam, MTTR 5 jam, dan availability 96,5%. Nilai-nilai ini berada di atas standar industri manufaktur Indonesia yang umumnya berkisar 94-96% untuk availability.

Penerapan strategi preventive maintenance yang konsisten mencakup inspeksi harian, pemeliharaan berkala mingguan dan bulanan, serta overhaul tahunan terbukti berperan penting dalam menjaga performa operasional dan meminimalkan downtime. Hasil ini mengkonfirmasi temuan penelitian sebelumnya bahwa pemeliharaan terstruktur dapat mengurangi resiko kegagalan hingga 65% dan meningkatkan keandalan sistem distribusi secara signifikan.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan pada periode observasi yang relatif singkat (7 hari). Data yang diperoleh merupakan indikator awal yang perlu divalidasi dengan pengamatan jangka panjang minimal 6-12 bulan untuk mendapatkan gambaran yang lebih representatif tentang pola kegagalan dan keandalan sistem.

Rekomendasi

Untuk pengembangan ke depan, direkomendasikan: (1) perpanjangan periode monitoring minimal 12 bulan untuk data yang lebih representatif, (2) penerapan sistem condition-based monitoring berbasis IoT untuk deteksi dini anomali, (3) integrasi FMEA untuk identifikasi mode kegagalan kritis, dan (4) implementasi predictive maintenance menggunakan machine learning untuk optimasi interval pemeliharaan. Dengan langkah-langkah tersebut, keandalan sistem dapat ditingkatkan lebih lanjut menuju target world-class manufacturing dengan availability >99%.

Daftar Pustaka

- [1] M. Ikhsan, H. Abrianto, and A. Gultom, "Studi Meminimalisir Beban Kapasitif Sistem Tenaga Listrik Pada Panel Distribusi Gedung X di Jakarta," vol. 5, no. 20, pp. 4146-4162, 2025.
- [2] N. F. Fatma and D. E. M. Putra, "Usulan Perbaikan Pada Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Di Pt. Surya Toto Indonesia Tbk Divisi Sanitary Dengan Metode Hira Dan Fta," *J. Ind. Manuf.*, vol. 6, no. 1, p. 27, 2021, doi: 10.31000/jim.v6i1.4116.
- [3] B. Londong, A. Djohar, W. Ode Zulkaidah, W. Ode Siti Nur Alam, and M. Nadzirin Anshari Nur, "Analisis Sistem Sinkronisasi Generator 2x2 Mw Pada Bandar Udara Haluoleo Kendari," *J. Fokus Elektroda*, vol. 07, no. 04, pp. 273-282, 2022, [Online]. Available: <https://elektroda.uho.ac.id/>
- [4] Y. Igirisa, Y. Mohamad, and A. I. Tolago, "Volume 3 Nomor 2 Juli 2021 Analisis Perkiraan Umur Trafo Tenaga 150kV Di GI Isimu," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. III, no. 2, pp. 101-108, 2021.
- [5] A. Zuroida, Galuh Prawetris Citra Handani, Hanifiyah Darna Fidyaa Amaral, Rohmanita Duanaputri, and Bayu Prasetyo, "Evaluasi Kapasitas Genset Sebagai Sistem Back-Up Energi Listrik di Gedung Sekretariat Daerah," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 12, no. 1, pp. 37-42, 2025, doi: 10.33795/elposys.v12i1.6837.
- [6] N. Naibaho, M. Yoverly, A. Mustika, and G. Residence, "Analisa Perhitungan Kebutuhan Genset Stamford 670 Kva Pada Apartemen Mustika Golf Residence," *J. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 11-19, 2022.
- [7] I. Ipniansyah, B. Bustani, R. A. Susilo, S. Djalil, Q. Qomaruddin, and A. Arbain, "Energize Distribution Transformer 1 at Electrical Engineering Workshop State Polytechnic of Samarinda," *Int. J. Curr. Sci. Res. Rev.*, vol. 07, no. 11, 2024, doi: 10.47191/ijcsrr/v7-i11-32.
- [8] A. T. Ramadhan, "Evaluation Analysis of Generator Capacity As An Electrical Power Back-Up System In The Pln Ulp Lambaro Building," pp. 365-372.
- [9] N. Hafiih, H. Hermawan, and B. Winardi, "Perencanaan Setting Relay Arus Lebih (Ocr) Dan Relay Arus Lebih Berarah (Docr) Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Feeder a - L1 Ps 2, Terminal 1 Bandara Soekarno-Hatta," *Transient*, vol. 7, no. 1, p. 166, 2018, doi: 10.14710/transient.7.1.166-173.
- [10] Epiwardi, Ruwahyoto, and Heri sungkowo, "Perencanaan Dan Analisis Kelayakan Investasi Proyek Pemasangan Kapasitor Bank Pada Instalasi Pemanfaatan Energi Listrik," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 77-82, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.16.
- [11] H. Gillbert and R. Hidayat, "Design of a

- backup voltage supply in a medium-voltage cubicle control panel circuit when a blackout occurs from PLN,” *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: 10.21070/jeeeu.v6i1.1414.
- [12] A. R. Tinofa and A. Goeritno, “Kriteria Laik Fungsi Sistem Kelistrikan Untuk Bangunan Bertingkat Pada Gedung Asrama Sekolah Tinggi Transportasi Darat,” *JuTEkS (Jurnal Tek. Elektro dan Sains)*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.32832/juteks.v9i1.13499.
- [13] A. N. Achadiyah, N. D. Irawan, and Y. D. Y. Bramasta, “REMOTE TERMINAL UNIT (RTU) SCADA PADA KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH 20kV,” *Metrotech (Journal Mech. Electr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: 10.33379/metrotech.v1i1.947.
- [14] S. Samsurizal and B. Hadinoto, “Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN(Persero) Up3 Pondok Gede,” *Kilat*, vol. 9, no. 1, pp. 136–142, 2020, doi: 10.33322/kilat.v9i1.784.
- [15] Adriyansah, Mappalotteng Muis Abdul, and Rahman Suhardi Edi, “Analisis Transformator Sisipan Pada Uprating Transformator Dalam Mengatasi Overload Di Pt. Pln Ulp Mattoanging Analysis of Insert Transformers on Uprating Transformers in Overloading Overload At Pt. Pln Ulp Mattoanging,” *J. Media Elektr.*, vol. 19, no. 3, pp. 2721–9100, 2022.