



Prediction of Remaining Service Life and Risk Analysis on Power Transformers Using The Weibull Distribution and Risk Priority Number Approach

Prediksi Sisa Umur Layan dan Analisa Resiko pada Power Transformer Menggunakan pendekatan Distribusi Weibull dan Risk Priority Number

Krisnandha Rahardian^{1*}, Rini Riastuti², Ahmad Zakiyuddin³

^{1,2,3}Department Metallurgy and Material, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Indonesia

E-Mail: ¹krisnandha.rahardian@pln.co.id,

²riastuti@metal.ui.ac.id, ³ahmadzakiyuddin@ui.ac.id

Received Oct 26th 2023; Revised Dec 14th 2023; Accepted Jan 25th 2024

Corresponding Author: Krisnandha Rahardian

Abstract

Transformers are expensive and crucial equipment in the electrical power transmission and distribution system. Playing a vital role in maintaining the reliability and efficiency of power supply, transformers continuously endure thermal, electrical, mechanical, and chemical stresses during operation. Therefore, assessing the aging of transformers requires comprehensive parameters, especially as heat dissipation becomes a limiting factor for maximum load. The operational continuity of transformers is a crucial issue, and routine monitoring, inspection, and maintenance activities are necessary to prevent undesired outages. In this study, an approach is taken by decomposing the transformer into its components and conducting quantitative risk analysis along with priority evaluation. The Lowest Replacable Unit (LRU) is assessed using Weibull++, Life Data Analysis, and reliasoft software. The analysis results indicate that the Power Transformer (TR-01) owned by PT ABC in the Integrated Terminal Area is in good condition and suitable for operation. Weibull++ simulation shows a remaining life of 275 months (22.9 years), with a reliability of 86% for the next 4 years and a risk priority number of Medium High (3D). The conclusion drawn from this analysis provides confidence that the transformer functions well and is reliable in its operations.

Keyword: *Distribusi Weibull, Power Transformer, Remaining Life, Risk Priority Number.*

Abstrak

Transformator adalah peralatan mahal dan krusial dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Berperan penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi pasokan listrik, transformator terus menerima tekanan termal, listrik, mekanik, dan kimia selama operasinya. Oleh karena itu, penilaian penuaan transformator memerlukan parameter komprehensif, terutama karena panas terbuang menjadi faktor pembatas untuk beban maksimum. Kelangsungan operasional transformator menjadi isu penting, dan kegiatan pemantauan, inspeksi, dan pemeliharaan rutin diperlukan untuk mencegah pemadaman yang tidak diinginkan. Dalam penelitian ini, pendekatan dilakukan dengan mendekomposisi transformator menjadi bagian-bagian dan melakukan analisis risiko kuantitatif serta evaluasi prioritas. Lowest Replacable Unit (LRU) dievaluasi menggunakan Weibull++, Life Data Analisis, dan software reliasoft. Hasil analisis menunjukkan bahwa Power Transformer (TR-01) milik PT ABC di Area Integrated Terminal berada dalam kondisi baik dan layak beroperasi. Simulasi Weibull++ menunjukkan umur sisa 275 bulan (22.9 tahun), dengan reliabilitas 86% untuk 4 tahun ke depan dan nilai risk priority number Medium High (3D). Kesimpulan dari analisis ini memberikan keyakinan bahwa transformator berfungsi dengan baik dan dapat diandalkan dalam operasionalnya.

Kata Kunci: Distribusi Weibull, Power Transformer, Remaining Life, Risk Priority Number

1. PENDAHULUAN

Transformator daya mengubah tingkat tegangan dari pasokan ke gulungan primer, tergantung pada jumlah lilitan pada gulungan. Jika lilitan pada kedua gulungan sama, dan kerugian diabaikan, tegangan pada keduanya juga sama. Transformator digunakan untuk mengisolasi dua rangkaian, umumnya untuk mengurangi

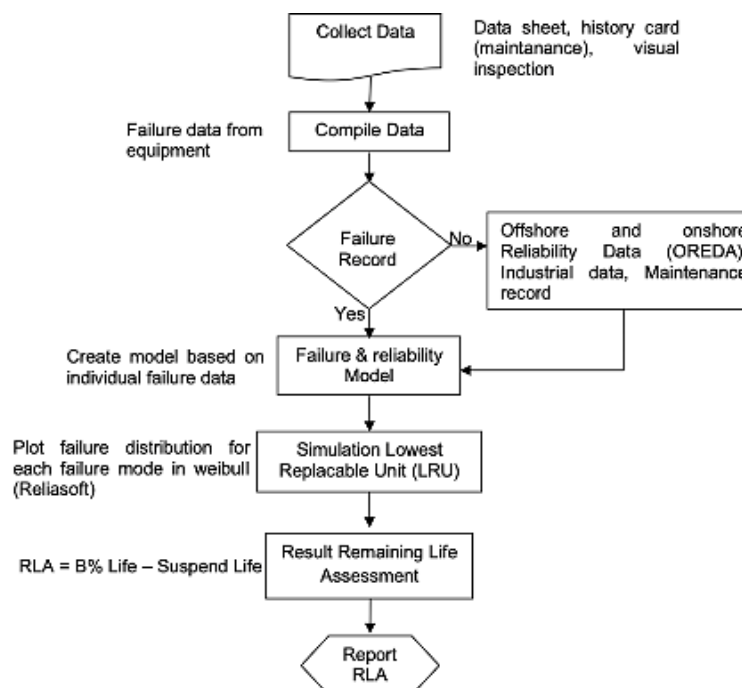
kerugian transmisi. Peran krusialnya dalam menjaga pasokan listrik yang efisien memerlukan evaluasi menyeluruh terhadap tekanan termal, listrik, mekanik, dan kimia selama operasi [1].

Komponen-komponen ini beroperasi dalam lingkungan tegangan tinggi, arus tinggi, dan karenanya daya tinggi. Meskipun transformator sangat efisien secara energi, panas yang terbuang menjadi faktor pembatas untuk beban maksimum transformator daya. Media isolasi harus mampu menangani tegangan listrik besar, gaya elektromekanis yang kuat, dan suhu tinggi [2]. Menjamin kelangsungan operasional transformator daya menjadi isu krusial bagi perusahaan, karena setiap gangguan pada kinerja transformator dapat menyebabkan kerugian secara ekonomi. Oleh karena itu, kegiatan pemantauan, inspeksi, dan pemeliharaan rutin pada transformator sangat penting untuk mencegah pemadaman yang tidak diinginkan dari layanan transformator. Sebagian besar masalah yang mungkin timbul pada transformator dapat dikaitkan dengan kegagalan atau kerusakan pada sistem isolasi [3,4,5,6].

Risiko kegagalan operasional pada transformator daya sangat erat kaitannya dengan risiko yang terkait dengan bagian-bagian transformator daya. Dengan mendekomposisi transformator daya menjadi beberapa bagian dan melakukan penilaian risiko kuantitatif serta evaluasi prioritas untuk setiap bagian, seseorang dapat mengidentifikasi titik lemah dalam sistem dan menentukan faktor risiko yang secara signifikan memengaruhi kehandalan peralatan. [7] *Risk Priority Number* pada komponen-komponen transformator daya secara signifikan meningkatkan relevansi dalam upaya perbaikan dan pemeliharaan transformator, sekaligus mencegah serta mengurangi risiko kegagalan dalam sistem manajemen listrik. Agar kegagalan pada transformator tidak terjadi dan menimbulkan kerugian maka perlu dilakukan asesmen pada transformator. Ini selaras dengan Permen No. 32 tahun 2021 tentang Inspeksi Teknis dan Pemeriksaan Keselamatan Instalasi dan Peralatan Pada Kegiatan Usaha Minyak dan Gas Bumi. Peraturan ini mengatur berbagai aspek terkait dengan instalasi dan peralatan yang digunakan dalam kegiatan usaha migas.[8]. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Barkas, dkk, pada penelitian tersebut menggunakan metode DGA (*Dissolved Gas Analysis*) untuk mengetahui umur sisa dari peralatan transformator dan tanpa memperhitungkan factor risiko.[9]

Oleh karena itu, penelitian mengenai penilaian prioritas risiko pada komponen-komponen transformator daya memiliki pentingnya baik dalam teori maupun praktik [10]. FMEA merupakan suatu cara untuk menganalisa penyebab/model kegagalan (*failure modes*) yang dapat terjadi pada suatu sistem yang selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan komponen-komponen yang akan diperiksa dan dipelihara [11] juga telah diterapkan untuk memajukan pengembangan penelitian teoretis mengenai FMEA. Pada penelitian kali ini Pendekatan yang digunakan Mode kegagalan ini dilakukan analisa *Lowest Replacable Unit* (LRU) menggunakan Weibull++. Untuk perhitungan sisa hasil layan untuk peralatan menggunakan Life Data Analisis serta di bantu dengan software reliasoft dan untuk analisa risiko menggunakan *risk priority number*.

2. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 1. Skema Penelitian

Asumsi yang digunakan untuk melakukan analisa sisa umur pada peralatan Transformator adalah sebagai berikut:

1. Awal perhitungan umur dari peralatan mengacu pada tahun pembuatan
2. Peralatan diasumsikan telah sukses dioperasikan
3. Data kegagalan mengacu pada laporan perawatan pada peralatan.
4. Jika data teknis peralatan tidak tersedia, maka diasumsikan berdasarkan data manufaktur untuk tipe peralatan yang sejenis
5. Jika data kegagalan tidak disediakan, maka diasumsikan menggunakan OREDA dengan jenis peralatan.
6. Hanya *critical failure* dan *Breakdown failure* (sebagaimana didefinisikan oleh OREDA) yang dimodelkan.
7. *Abnormal Instrument Reading* dan *Unknown Failure* akan diperbaiki bersamaan dengan *critical failure* dan *Breakdown failure* sehingga tidak menyebabkan downtime tambahan atau hilangnya produksi.

Salah satu distribusi paling sederhana dan paling umum digunakan adalah distribusi eksponensial. Fungsi distribusi eksponensial secara matematis didefinisikan sebagai:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Dalam definisi ini, perhatikan bahwa t adalah variabel acak, yang mewakili waktu, dan (λ) mewakili sebagai parameter distribusi. Tergantung pada nilai λ , $f(t)$ akan diskalakan secara berbeda. Fungsi tingkat kegagalan eksponensial adalah:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (2)$$

MTTF (*mean-time-to-failure*) μ eksponensial dirumuskan:

$$\mu = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Distribusi Weibull adalah distribusi reliabilitas tujuan umum yang digunakan untuk memodelkan kekuatan material, kegagalan komponen elektronik dan mekanik, peralatan atau sistem. Dalam kasus yang paling umum, Weibull 3-parameter didefinisikan oleh [10]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (4)$$

Dimana β = parameter bentuk, η = parameter skala dan γ = parameter lokasi. Fungsi laju kegagalan $\lambda(t)$ menurut fungsi Weibull yaitu:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

MTTF $\bar{T}$ dari Weibull yaitu:

$$\bar{T} = \eta \cdot \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (6)$$

2.1 Risk Priority Number

RPN adalah peringkat numerik dari risiko masing-masing mode / penyebab kegagalan potensial dengan mengalikan peringkat numerik dari tingkat keparahan (S), probabilitas terjadinya (O) dan probabilitas deteksi (efektivitas kontrol deteksi) ($RPN = S \times O \times D$). Secara umum, mode kegagalan yang memiliki RPN terbesar menerima prioritas untuk tindakan korektif. RPN seharusnya tidak secara tegas mendikte mode kegagalan prioritas dapat menjamin tindakan segera meskipun RPN mereka mungkin tidak termasuk yang tertinggi. Severity (S).

Keparahan adalah angka rangking yang terkait dengan efek paling serius untuk mode kegagalan yang diberikan berdasarkan kriteria dari skala. Ini menilai dampak dari mode kegagalan. Di bawah ini menunjukkan contoh kisaran keparahan.

Tabel 1. Severity Range

Category	Consequence Type		
	People	Environment	Property
1. Insignificant	Minor Injury, annoyance, disturbance	Minor environmental damage	Minor property damage
2. Minor Damage	Medical treatment and lost-time injury	Local environmental damage of short duration (≤ 1 month)	Minor system damage; minor production influence
3. Major Damage	Permanent disability prolonged hospital treatment	Time for restitution of ecological resources ≤ 2 years	Considerable system damage; production interrupted for weeks
4. Critical	One fatality	Time for restitution of ecological resources 2-5 years	Loss of main part of system; production interrupted for months
5. Catastrophic	Several fatalities	Time for restitution of ecological resources ≥ 5 years	Total loss of system and major damage outside system area

2.2 Occurance (O)

Occurance adalah fakta atau frekuensi kegagalan yang terjadi. Ini menilai kemungkinan kegagalan terjadi untuk peralatan. Di bawah ini menunjukkan contoh rentang kejadian.

Tabel 2. Occurance Range

Category	Frequency (Per Year)	Description
1. Improbable	$0 - 10^{-5}$	Extremely rare event
2. Remote	$10^{-3} - 10^{-5}$	Very rare event that will not necessarily be experienced in any similar plant
3. Possible	$10^{-1} - 10^{-3}$	Rare event, but will possibly experienced by the personnel
4. Occasional	$10^{-1} - 1$	Event that happens now and then and will normally be experienced by the personnel
5. Fairly Normal	$1 - 10$	Event that is expected to occur frequently

2.3 Detection (D)

Deteksi menilai kemungkinan kegagalan terdeteksi. Hal ini didasarkan pada peluang kegagalan akan terdeteksi sebelum pelanggan menemukannya. Di bawah ini menunjukkan contoh rentang deteksi.

Tabel 3. Detection Range

Category	Description
1. Very High	Current controls almost always will detect the failure
2. High	Good likelihood current controls will detect the failure
3. Moderate	Possible current controls will detect the failure
4. Low	Unlikely to detect the failure
5. Very Low	Cannot be detect the failure

2.3 Risk Matrik

Risiko merupakan kombinasi dari kemungkinan suatu kegagalan dalam suatu waktu tertentu dan konsekuensi yang berkaitan dengan kegagalan tersebut. Dibawah ini menunjukkan contoh matrik resiko.

Gambar 1. Risk Matrik

CoF Category	CoF (Severity) Category			PoF (Occurrence & Detection) Category				
	People	Environment	Property	Extremely rare event	Very rare event that will not necessary be experienced in any similar plant	Rare event, but will possibly experienced by the personnel	Event that happens now and then and will normally be experienced by the personnel	Event that is expected to occur frequently
	Several fatalities	Time for restitution of ecological resources ≥ 5 years	Total loss of system and major damage	Medium High	Medium High	Medium High	High	High

			outside system area					
	One fatality	Time for restitution of ecological resources 2-5 years	Loss of main part of system; production interrupted for months	Medium	Medium	Medium High	Medium High	High
	Permanent disability prolonged hospital treatment	Time for restitution of ecological resources ≤ 2 years	Considerable system damage; production interrupted for weeks	Low	Low	Medium	Medium High	High
	Medical treatment and lost-time injury	Local environmental damage of short duration (≤ 1 month)	Minor system damage; minor production influence	Low	Low	Medium	Medium	Medium High
	Minor Injury, annoyance, disturbance	Minor environmental damage	Minor property damage	Low	Low	Medium	Medium	Medium High

3. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini adalah data teknis transformator pada PT ABC, yang telah beroperasi selama lebih dari 20 tahun dijelaskan pada tabel 4.

Tabel 4. Data Teknis Transformator

Item	Unit	Value
Tag No.	-	TR-01
Serial No.	-	R01202230
Equipment Type of Oil	-	Mineral
Manufacture	-	Centrado Prima
Year Built	-	2003
Year Used	-	2003
Type	-	Transformator Step Down
Capacity	kVA	315
Rated Voltage Primary	V	440
Rated Voltage Secondary	V	380
Rated Current Primary	A	413.3
Rated Current Secondary	A	478.5
Frequency	Hz	50
Power Factor	-	0.8
Phase	-	3
Vector Group	-	Y0
Cooling System	-	ONAN

Setelah didapatkan data teknis peralatan, lalu dilakukan pengecekan inspeksi untuk memastikan visual pada peralatan. Langkah awal dan krusial adalah menetapkan definisi kegagalan. Untuk setiap elemen dalam sistem, berbagai mode kegagalan perlu diidentifikasi. Mode kegagalan dapat dijelaskan melalui evaluasi konsekuensi kesalahan dalam sistem atau dengan menetapkan tingkat kesalahan tertentu yang memicu langkah-langkah tindakan dalam sistem, seperti perbaikan, sebagai contoh. Oleh karena itu, mode kegagalan bergantung pada tingkat keparahan kesalahan. Akibatnya, setiap jenis kesalahan dapat menghasilkan mode kegagalan yang berbeda, sesuai dengan tingkat keparahannya. Selain itu, perpaduan berbagai kesalahan dapat mengakibatkan mode kegagalan yang berbeda. Beberapa kemungkinan jenis mode kegagalan pada peralatan adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Skrining Mode Kegagalan pada Transformator

State F or S	State end Time (Month)	Description
F	103	Fail Start on Demand
F	112	Structural Deficiency
F	165	Faulty Signal/Indication Alarm

State F or S	State end Time (Month)	Description
F	176	Internal Power Supply
F	178	Breakdown Trafo
S	240	Suspended
F	244	Noise
F	287	No Power/Voltage
F	322	Monitoring
F	388	Low Output
F	411	Earth/Isolation Fault
F	471	Short Circulating
F	507	Breakage
F	507	Open Circuit
F	540	Insulation Electric
F	602	Vibration

Jenis kegagalan pada tabel diatas berdasarkan hasil identifikasi jenis peralatan Transformator (TR-01), F (*Failure*) merupakan jenis kegagalan yang kemungkinan terjadi selama waktu S (*Suspended*) operasi peralatan. Kriteria berdasarkan gabungan antara nilai kegagalan di OREDA dan jenis perawatan yang dilakukan pada peralatan selama masa beroperasi.

Estimasi umur operasi dari peralatan berdasarkan software reliasoft anlisis Weibull bervariasi sesuai dengan karakteristik keandalan dan kemungkinan kegagalan pada peralatan. Berikut hasil perhitungan estimasi sisa umur peralatan, dan tingkat kegagalan pada peralatan untuk beroperasi empat (4) tahun kedepan. Berikut adalah hasil hitungan *remaining life*.

Tabel 6. Perhitungan *remaining life* menggunakan software Reliasoft

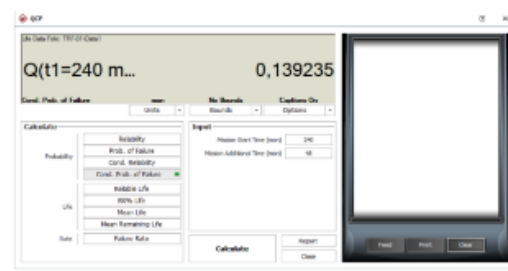
Quick Result Report	
Report Type	Diagram QCP
User Info	
User Input	
Mission End Time (Mon) =	288
Diagram Output	
R(t=288)	62.6 %
User Input	
Mission Start Time (Mon) =	240
Mission Additional Time (Mon) =	48
Diagram Output	
R(t1=240 t2=48) =	86 %
User Input	
Mission Start Time (Mon) =	240
Mission Additional Time (Mon) =	48
Diagram Output	
Q(t1=240 t2=48) =	14 %
Diagram Output	
MTTF =	365 (Month)
BX Life at (80 %) =	515 (Month)

Note:

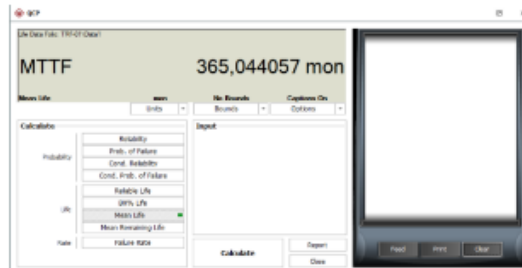
1. Mission End Time (month) is the addition of Successfully Operating Period and next inspection period (4 years)
2. Mission Start Time – t1 (month) is Successfully Operating Period
3. Mission Additional Time – t2 (month) is next interval inspection period
4. R (t1|t2) is reliability for equipment to successfully operated at next inspection period
5. Q (t1|t2) is probability of failure for equipment to unsuccessfully operated at next inspection period
6. MTTF (Mean Time to Failure) is expected period for for equipment to successfully operated
7. Bx Life at 80% is expected period for equipment to successfully operated at 80% capacity.



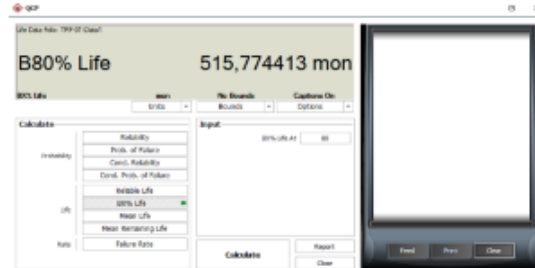
a. Conditional Reliability of TR-01



b. Cond. Prob. Of Failure at TR-01



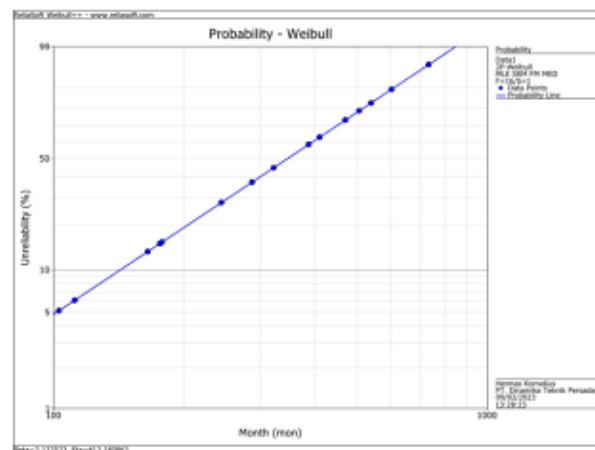
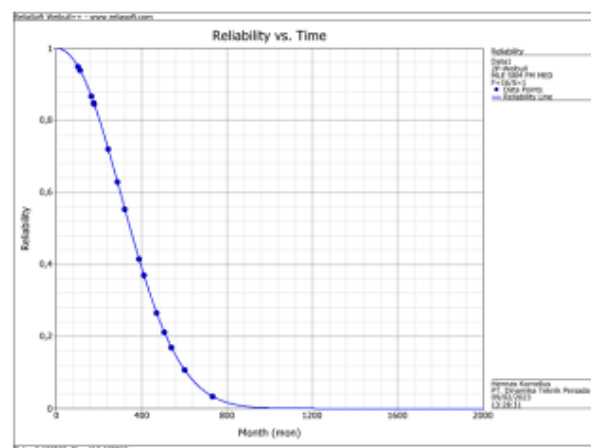
c. Mean Life of TR-01



d. Reliability Life 80% of TR-01

Gambar 2. Hasil dari running software

Di dapatkan dari hasil perhitungan simulasi Weibull++ dengan keandalan 80%, dimana dengan perhitungan 80% umur kegagalan dikurangi umur yang sudah berjalan (515 bulan – 240 bulan) maka di dapatkan 275 bulan (22.9 tahun). Gambar 3 dan 4 merupakan grafik distribusi weibull pada peralatan Power Transformer (TR-01).

**Gambar 3.** Grafik perbandingan antara *Reliability* vs *time***Gambar 4.** Grafik perbandingan antara *Unreliability* vs *probability*

Pada grafik perbandingan probability dan waktu (time) menggambarkan tingkat probability failure meningkat dengan bertambahnya umur pakai dari Transformator TR-01. Begitu juga dengan nilai reliability akan turun dengan bertambahnya umur pakai dari transformator TR-01. Pada penelitian ini sisa umur ditentukan dengan reliability 80 % atau 0.8 dan didapat nilai remaining life nya adalah 515 bulan.

Hasil perhitungan resiko pada peralatan *Power Transformer* (TR-01) berdasarkan nilai PoF dan CoF ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. *Power Transformer* (TR-01) berdasarkan nilai PoF dan CoF

Fuction Failure	Effect	Cause	Failure Mode	PoF		CoF Severity (S)	Risk Category
				Occurrence (O)	Detection (D)		
Trip	Lamination core can burned-out	Power Transformer High Temperature	Critical	3. Possible	3. Moderate	D. Critical	Medium High (3D)
Trip	Winding can burned-out	Power Transformer Stuck		3. Possible	3. Moderate	D. Critical	Medium High (3D)
Breakdown	Breakdown voltage in oil insulation	Oxidation, high acidity, moisture of winding paper	Degraded	3. Possible	3. Moderate	C. Major Damage	Medium (3C)
The Output voltage of the transformer does not match the operating voltage	There is a decrease in voltage so that quality gradually decreases	Tap Changer Failure	Low Output	3. Possible	3. Moderate	B. Minor Damage	Medium (3A)
External	Corrosive Body	Peeling Paint	Structural Deficiency	3. Possible	3. Moderate	A. Insignificant	Medium (3A)
Fluid no flow	Oil Seal	Less fluid consumption	Internal Leakage	3. Possible	3. Moderate	A. Insignificant	Medium (3A)

4. KESIMPULAN

Dari analisa yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa peralatan *Power Transformer* (TR-01) milik PT ABC yang berada di Area Integrated Terminal dalam keadaan baik dan layak beroperasi. Dari perhitungan di dapatkan dari hasil perhitungan simulasi Weibull++ dengan keandalan 80%, dimana dengan perhitungan 80% umur kegagalan dikurangi umur yang sudah berjalan (515 bulan – 240 bulan) maka di dapatkan 275 bulan (22.9 tahun), sedangkan untuk reliability untuk 4 tahun kedepan adalah 86 % dengan nilai risk priority number Medium High (3D). Secara keseluruhan, hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa tidak ada anomali signifikan pada *Power Transformer* (TR-01) milik PT ABC yang dapat berdampak pada keselamatan operasionalnya. Meskipun demikian, disarankan untuk tetap menjaga dan menjalankan preventive maintenance.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami dengan tulus ingin menyampaikan rasa terimakasih kepada semua pihak yang telah berpartisipasi dan memberikan kontribusi berharga dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh individu dan lembaga yang telah memberikan bantuan serta dukungan yang luar biasa dalam memperlancar jalannya penelitian ini. Adapun kepada semua yang telah memberikan dukungan, nasihat, dan bantuan teknis selama proses penelitian, kami ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas kontribusi yang berarti bagi kelancaran penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- [1] P.Pooja, Y.Sudha, "Power Transformer For Residual Life Assessment", International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, Vol. 8, Issue 6, June 2020
- [2] Van Schijndel, "Power Transformer Reliability Modelling", PhD.Dissertation, Department of Electrical Engineering, Vol. 8, Issue 6, June 2020
- [3] Prasojo, R.A.; Maulidevi, N.U.; Soedjarno, B.A.; Suwarno, S. Health Index Analysis of Power Transformer with Incomplete Paper Condition Data. In Proceedings of the 4th International Conference

- on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Chennai, India, 21–23 November 2019; pp. 1–4.
- [4] Meissner, M.; Darmann, M.; Schober, S.; Mittelbach, M.; Sumereder, C. Reliability Study of Furan Level Analysis for Trans-former Health Prediction. In Proceedings of the 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Roma, Italy, 23–27 June 2019.
 - [5] El-Aal, R.A.A.; Helal, K.; Hassan, A.M.M.; Dessouky, S.S. Prediction of transformers conditions and lifetime using furan compounds analysis. *IEEE Access* 2019, 7, 102264–102273.
 - [6] Gouda, O.E.; El Dein, A.Z. Prediction of aged transformer oil and paper insulation. *Electr. Power Compon. Syst.* 2019, 47, 406–419.
 - [7] Wang, L., Yan, F., Wang, F., Li, Z., 2021, FMEA-CM based quantitative risk assessment for process industries—case study of coal-to-methanol plant in China, *Process Safety and Environmental Protection*, 149, pp.299–311
 - [8] Qin, J., Xi, Y., Pedrycz, W., 2020, Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method, *Applied Soft Computing*, 89, 106134.
 - [9] Barkas, Dimitrios & KAMINARIS, S.D. & Kalkanis, Konstantinos & Ioannidis, G.C. & Psomopoulos, Constantinos. (2022). Condition Assessment of Power Transformers through DGA Measurements Evaluation Using Adaptive Algorithms and Deep Learning. *Energies*. 16. 54. 10.3390/en16010054.
 - [10] Widjajanto, S., Rimawan, E., 2021, Modified failure mode and effect analysis approaching to improve organization performance based on Baldrige criteria-A case study of an electro-medic industry, *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 4, pp. 39-58.
 - [11] Miqdarurridlo, Miqdarurridlo. (2020). Analisa Kegagalan Transformator Tenaga Berdasarkan Fmea (Failure Mode And Effect Analysis) Sebagai Dasar Perhitungan Penilaian Kondisi (Scoring) Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo Gi Segoromadu Gresik). *E-Link : Jurnal Teknik Elektro dan Informatika*. 15. 26. 10.30587/e-link.v15i1.1607.