

Analisis Prediktif Pemeliharaan Minyak Transformator Menggunakan Metode *Markov*

I.G. Surya Subaga¹, I.B.G. Manuaba², I.W. Sukerayasa³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Bali
email: subaga46@gmail.com¹, ibgmanuaba@unud.ac.id², sukerayasa@unud.ac.id³

Abstrak

Sebagai salah satu aset utama yang berperan dalam pendistribusian kelistrikan, kinerja transformator harus dipertahankan dalam kondisi prima. Kerusakan pada minyak isolasi transformator seringkali menjadi penyebab kegagalan transformator. Kerusakan minyak transformator sangat sulit diprediksi, oleh karena itu pemantauan kondisi minyak transformator sangat penting untuk dilakukan. Salah satu metode untuk mengetahui kondisi minyak transformator adalah *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dimana metode ini dapat menganalisis kondisi transformator berdasarkan konsentrasi gas yang terlarut dalam minyak. Pemeliharaan pada minyak transformator secara berkala dapat mencegah minyak transformator mengalami kerusakan atau kegagalan isolasi. Namun terkadang pemeliharaan dilakukan dalam waktu yang kurang tepat sehingga berakibat pada penurunan usia transformator. Dalam analisis ini dilakukan perhitungan nilai keandalan dan ketersediaan berdasarkan nilai *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) yang kemudian diolah dengan metode *Markov* untuk mengetahui kemungkinan-kemungkinan waktu pemeliharaan yang tepat. Dari hasil perhitungan pada analisis ini diperoleh nilai keandalan transformator dalam 30 hari adalah 0,886, maka peluang penurunan nilai keandalan setiap bulannya adalah sebesar 11,4%. Serta nilai ketersediaan pada transformator adalah sebesar 0,803 atau sama dengan 293 hari. Berdasarkan analisis tersebut dalam satu tahun transformator beroperasi dengan baik selama 293 hari sedangkan 72 hari transformator berada pada kondisi yang kurang baik. Sehingga pemeliharaan sebaiknya dilakukan dalam 293 hari agar kondisi transformator tetap terjaga dengan baik.

Kata Kunci: *Dissolved Gas Analysis, Markov, Pemeliharaan, TDCG*

Abstract

As one of the main assets that play an important role in the distribution of electricity, the performance of the transformer must be maintained in prime condition. Damage to the transformer insulation oil often causes failure of the transformer. Damage to transformer oil is very difficult to predict, therefore monitoring its condition is very important to do. Dissolved Gas Analysis (DGA) is one of the methods to determine the condition of transformer oil, where this method can analyze the condition of the transformer based on the concentration of gas dissolved in oil. A regular maintenance of transformer oil can prevent the transformer oil from damage or failure of insulation. However, sometimes maintenance is carried out not in a right time that results in a decrease in transformer's lifetime. In this analysis the value of Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) was used to calculate transformer's reliability and availability value. Those value then processed using the Markov method to determine the possibilities of proper maintenance time. From the calculation results in this analysis the transformer reliability value in 30 days is 0.886, then the probability of decreasing the reliability value every month is 11.4%. And the value of the availability of the transformer is 0.803 or equal to 293 days. Based on this analysis, in one year the transformer operated properly for 293 days while 72 days the transformer was in an unfavorable condition. So that maintenance should be carried out in 293 days transformer's condition can be maintained properly.

Keywords: *Dissolved Gas Analysis, Markov, Maintenance, TDCG*

I. PENDAHULUAN

Transformator daya adalah aset terpenting dalam sistem ketenagalistrikan. Dalam mempertahankan kinerja agar tetap baik, nilai keandalan dari transformator itu sendiri harus dijaga [1]. Selain perannya yang penting, transformator dapat dikatakan sebagai aset yang paling mahal dalam penyaluran tenaga listrik, sehingga pemeliharaan transformator secara berkala dinilai lebih efektif dan efisien dari segi ekonomis dibandingkan dengan penggantian transformator [2].

Transformator yang dioperasikan melebihi batas suhu yang diperbolehkan dapat berakibat pada kegagalan isolasi pada minyak transformator, dimana minyak transformator

berperan penting dalam isolasi dan pendinginan transformator daya [3]. Pembebanan yang terlalu tinggi akan menyebabkan minyak transformator memuai dan menghasilkan gas-gas yang larut dalam minyak. Gas-gas ini kemudian dapat mengendap dan terkontaminasi dengan minyak sehingga menyebabkan berkurangnya kemampuan isolasi minyak [3,4].

Kondisi transformator dapat dipertahankan atau dijaga dengan mengetahui kualitas minyak transformator [4]. *Dissolved Gas Analysis* (DGA) atau analisis gas terlarut merupakan salah satu uji yang saat ini banyak digunakan untuk menilai kondisi dari minyak transformator. Hasil dari uji DGA kemudian dapat diinterpretasikan menggunakan

beberapa metode salah satunya adalah *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) [1,5].

Keandalan dari transformator dalam transmisi dan distribusi tenaga listrik dipengaruhi oleh teknik pengoperasian yang tepat serta pemeliharaan transformator daya yang rutin [1]. Strategi pemeliharaan untuk mempertahankan aset gardu induk saat ini adalah menggunakan pemeliharaan prediktif. Meski waktu operasi yang tersisa atau umur transformator secara tepat tidak dapat ditentukan, akan tetapi peluang penyusutan umur transformator di masa mendatang dapat diprediksi [1,6].

Metode *markov* merupakan sebuah proses stokastik yang menggunakan konsep dari probabilitas untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem berubah dari suatu keadaan ke keadaan lain [7]. Pada analisis ini, dilakukan perhitungan nilai keandalan dan nilai ketersediaan berdasarkan hasil uji DGA yang kemudian akan diproses dengan metode *markov* untuk memprediksi penjadwalan pemeliharaan yang tepat sebagai acuan pemeliharaan selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator

Transformator berfungsi mentransformasikan tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya dan terdiri dari dua koil atau lebih, yang dikopel melalui rangkaian magnetic. Pertukaran energi yang terjadi pada transformator diakibatkan oleh induksi medan magnetik. Transformator merupakan suatu komponen yang terpenting dari bermacam rangkaian elektrik dengan rentang daya rendah, arus rendah dan rangkaian kontrol hingga sistem daya dengan tegangan ultra tinggi [8].

B. Minyak Transformator

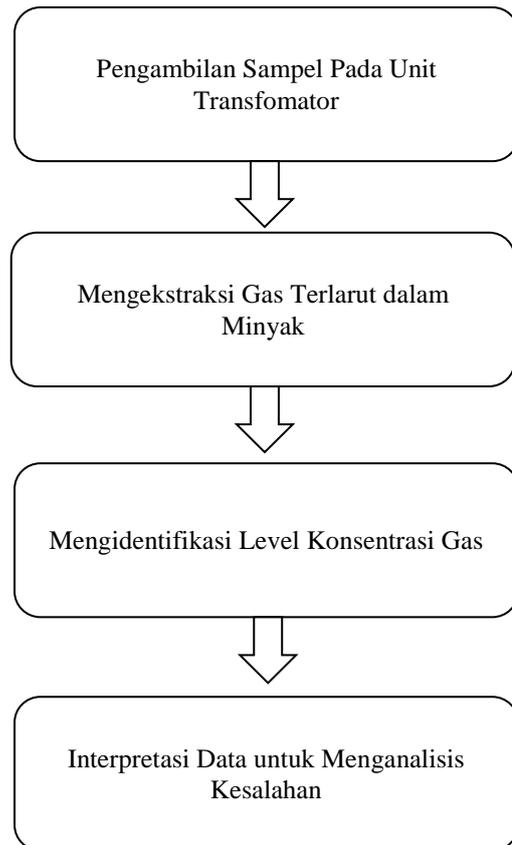
Minyak transformator merupakan komponen dari transformator yang menerima beban kerja paling besar dalam pengoperasian transformator. Sehingga kondisi minyak transformator harus dipantau secara berkala untuk memastikan transformator bekerja secara optimal. Peran yang dilakukan oleh minyak transformator adalah isolasi atau memisahkan bagian yang memiliki tegangan berbeda-beda serta berperan dalam pendinginan transformator [9].

C. Dissolved Gas Analysis (DGA)

Saat ini, metode analisis gas terlarut (DGA) sedang dikembangkan dan diketahui sebagai metode yang paling akurat untuk mendiagnosis kondisi transformator [1,2]. Beberapa penelitian dilakukan untuk melihat keakuratan penggunaan metode DGA ini. Metode DGA dapat mendeteksi terjadinya kegagalan pada transformator dengan cara mengukur konsentrasi gas dalam minyak yang dibentuk oleh proses dekomposisi akibat dari suhu atau beban yang berlebihan pada transformator [2]. Tegangan dan panas yang berlebih selama transformator beroperasi dapat menyebabkan terjadinya dekomposisi kertas dan minyak yang menghasilkan gas yang larut dalam minyak yang kemudian mengakibatkan

berkurangnya kekuatan dielektrik dari minyak. Gas yang dihasilkan meliputi hidrogen (H_2), etilena (C_2H_4), asetilena (C_2H_2), metana (CH_4) etana (C_2H_6), karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO_2) [1,4,10].

Proses uji DGA diawali dengan pengambilan sampel minyak transformator yang dipindahkan ke kromatografi gas untuk mengekstraksi gas terlarut minyak yang kemudian dipisahkan menurut individual gas dan dihitung jumlahnya dalam satuan ppm (*part per million*). Langkah selanjutnya uji DGA adalah mendeteksi kadar konsentrasi gas dan menganalisis kesalahan dengan menggunakan metode diagnostik yang sesuai untuk menemukan penyebabnya. Gambar 1 menunjukkan keseluruhan proses uji DGA [5,11].



Gambar 1. Diagram Alur Proses *Dissolved Gas Analysis* (DGA)

Hasil uji DGA kemudian diinterpretasikan setelah jumlah dari masing-masing gas terlarut diperoleh dari sampel minyak. Sesuai dengan standar internasional IEC 60599 dan IEEE C57.104 terdapat beberapa metode interpretasi untuk hasil DGA, salah satunya adalah *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) [10,12-13].

D. Total Dissolved Combustible Gas (TDCG)

Dengan menggunakan metode TDCG, hasil DGA yang konsentrasi gas terlarut akan diinterpretasikan menjadi total gas terlarut yang mudah terbakar. Penggunaan metode TDCG ini mampu menunjukkan indikasi kerusakan pada isolasi minyak melalui level kandungan TDCG pada gas [14].

Terdapat empat kondisi konsentrasi gas terlarut berdasarkan standar IEEE C57 104-2008 seperti pada Tabel I [10].

TABEL I.
BATASAN KONSENTRASI GAS TERLARUT DALAM SATUAN PPM

Status	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
H ₂	100	101-700	701-1800	>1800
CH ₄	120	121-400	401-1000	>1000
C ₂ H ₂	35	36-50	51-80	>80
C ₂ H ₄	50	51-100	101-200	>200
C ₂ H ₆	65	65-100	101-150	>150
CO	350	351-570	571-1400	>1400
CO ₂	2500	2500-4000	4001-10000	>10000
TDCG	720	721-1920	1921-4630	>4630

Nilai TDCG diperoleh melalui hasil kromatografi gas yang akan menunjukkan indikasi kegagalan atau kerusakan pada minyak transformator. TDCG sendiri terbagi menjadi 4 level kondisi. Indikator gas pada TDCG sama dengan indikator gas pada metode *Key Gas*, hanya saja pada TDCG konsentrasi gas CO₂ diabaikan.

Dari tabel 1, terdapat empat kondisi berdasarkan nilai TDCG transformator yaitu [10]:

- Kondisi 1, minyak transformator dalam kondisi normal.
- Kondisi 2, mulai terjadi peningkatan pada kandungan TDCG.
- Kondisi 3, peningkatan pada TDCG semakin tinggi sehingga menyebabkan kerusakan pada isolasi kertas minyak transformator
- Pada kondisi 4, TDCG menunjukkan kerusakan pada minyak sudah terjadi dan sudah meluas.

E. Metode Markov

Metode *markov* merupakan sebuah metode yang menggunakan konsep probabilitas untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem berubah dari suatu keadaan ke keadaan lain. Metode ini digunakan dengan mengasumsikan bahwa masa lalu tidak memiliki pengaruh terhadap kejadian di masa yang akan datang [7]. Analisis metode *markov* akan menentukan peluang nilai keandalan dan ketersediaan dari transformator di masa yang akan datang.

- 1) *Keandalan (Reliability)*: Didefinisikan sebagai probabilitas atau peluang suatu komponen atau sistem untuk dapat memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu yang telah ditentukan dalam kondisi pengoperasian dan lingkungan tertentu [13].

Keandalan menggambarkan fungsi laju kegagalan (λ), yaitu laju perubahan kondisi yang terjadi dari kondisi baik ke kondisi buruk. Perubahan kondisi ini akan menggambarkan perubahan transformator dari kondisi

optimal hingga gagal. Berikut merupakan rumus fungsi untuk laju kegagalan [15]:

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} \tag{1}$$

$$= -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} R(t) \tag{2}$$

Selain itu, laju kegagalan juga dihitung menggunakan perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF), MTTF merupakan rata-rata waktu menuju kegagalan. Dengan perhitungan ini maka dapat ditentukan nilai keandalan dari transformator tersebut. Rumus fungsi untuk MTTF adalah sebagai berikut [15]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \tag{4}$$

- 2) *Ketersediaan (Availability)*: Didefinisikan sebagai peluang suatu komponen atau sistem berfungsi menurut kebutuhan pada waktu tertentu saat digunakan dalam kondisi beroperasi [13].

Sedangkan untuk mencari nilai ketersediaan yang perlu dihitung adalah laju kegagalan dan laju ketersediaan. Perhitungan laju kegagalan telah dijelaskan pada persamaan (4). Kemudian untuk menghitung laju ketersediaan, yang perlu diketahui adalah MTTR (*Mean Time to Repair*), yaitu rata-rata waktu untuk dilakukan perbaikan atau perawatan. MTTR untuk distribusi eksponensial dinyatakan dengan [15]:

$$MTTR = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\mu} \tag{5}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \tag{6}$$

Setelah memperoleh nilai laju kegagalan dan laju perbaikan, nilai tersebut akan ditransformasikan menjadi sebuah matriks transisi sebagai berikut [15]:

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_{1,2} & \lambda_{1,3} & \dots \\ \mu_{2,1} & -\lambda_2 & \lambda_{2,3} & \dots \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & -\lambda_3 & \dots \end{bmatrix} \tag{7}$$

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk (GI) Sanur yang berlokasi di Desa Sanur, Denpasar, Bali.

B. Objek Penelitian

Objek yang dianalisis merupakan hasil uji DGA pada minyak isolasi transformator 3 jaringan transmisi selama periode 2011 - 2019 yang berlokasi di Gardu Induk (GI) Sanur Sanur, Denpasar, Bali.

C. Sumber dan Jenis Data Penelitian

Data yang digunakan diperoleh dari data uji DGA (*Dissolved Gas Analysis*) yang telah dilakukan. Dalam analisis

ini pengambilan sampel minyak dan pengolahan sampel dilakukan oleh PT. PLN (Persero). Data data yang diperoleh tersebut sudah divalidasi oleh Gardu Induk Sanur.

D. Pengambilan Data

Data yang diperlukan merupakan hasil uji DGA pada unit transformator-3 GI Sanur. Data tersebut kemudian dijadikan acuan untuk penentuan kondisi transformator dan bahan analisis untuk menentukan periode pemeliharaan yang tepat pada transformator.

Data sekunder yang didapatkan meliputi data hasil pengujian minyak transformator dengan metode DGA (*Dissolved Gas Analysis*) selama masa operasi transformator yang dianalisis. Data hasil pengujian minyak transformator diambil dari tahun 2011 – 2019 yang dilakukan oleh PT. PLN (Persero).

E. Metode Analisis Data

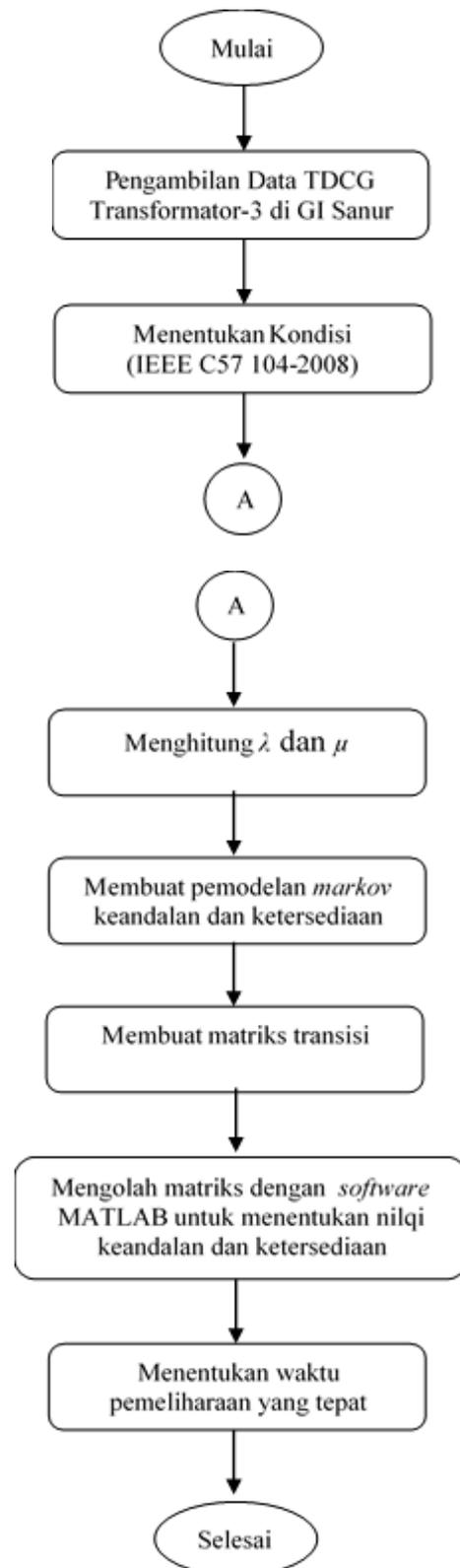
Analisis ini menyajikan prediksi kemungkinan waktu pemeliharaan yang tepat dengan mengolah hasil TDCG menggunakan metode *markov*. Setelah menentukan kondisi dari TDCG, dilakukan pembuatan pemodelan *markov* dengan simbol untuk masing-masing kondisi TDCG sesuai dengan standar IEEE C57 104-2008 sebagai berikut:

1. Kondisi 1 disimbolkan dengan K1
2. Kondisi 2 disimbolkan dengan K2
3. Kondisi 3 disimbolkan dengan K3
4. Kondisi 4 disimbolkan dengan K4

Pemodelan *markov* untuk kurva keandalan menggunakan data perubahan TDCG dari kondisi baik ke kondisi buruk. Dengan data masing-masing perubahan dikelompokkan dalam tabel dan digambarkan dalam diagram *markov*. Laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari kondisi baik ke kondisi buruk disimbolkan dengan (λ). Sedangkan laju yang digunakan untuk perubahan kondisi dari buruk ke kondisi baik adalah laju perbaikan yang disimbolkan dengan (μ).

F. Diagram Alur Penelitian

Pada tahapan ini dilakukan proses analisis pada data TDCG, dimulai dari pengambilan data TDCG hingga penentuan jadwal pemeliharaan yang tepat sesuai dengan standar. Gambar 2 berikut menunjukkan alur penelitian yang dilakukan.



Gambar 2. Diagram Alur Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

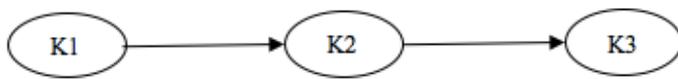
Data yang digunakan diambil dari transformator-3 Gardu Induk Sanur yang telah beroperasi sejak tahun 2004.

Pengujian minyak transformator di Gardu Induk Sanur dilakukan setiap satu tahun sekali. Tabel II menyajikan laju perubahan kondisi berdasarkan hasil pengujian TDCG minyak transformator selama masa operasi tahun 2011 hingga 2019 tepatnya selama 2719 hari.

TABEL II.
DATA LAJU KEGAGALAN DAN PERBAIKAN TDCG

Perubahan Kondisi	Laju Kegagalan(λ)	Perubahan Kondisi	Laju Perbaikan(μ)
1 – 2	0,0040	2 – 1	0,0035
2 – 3	0,0027	3 – 1	0,0029
		3 – 2	0,0021

Berdasarkan laju perubahan kondisi yang terjadi dapat di analogikan menjadi sebuah diagram pemodelan *markov* kurva keandalan menggunakan perhitungan laju kegagalan (λ) sebagai berikut:



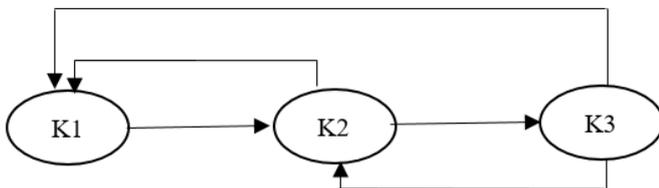
Gambar 3. Permodelan *Markov* untuk Kurva Keandalan

Berdasarkan pemodelan *markov* pada gambar 3, laju perubahan kondisi yang terjadi kemudian di transpose menjadi sebuah matriks sesuai dengan persamaan (7) yang kemudian diolah dengan metode *markov* menggunakan *software* MATLAB. Sehingga diperoleh nilai keandalan TDCG dalam kurun waktu 30 hari adalah senilai 0,886 maka peluang penurunan keandalan yang terjadi pada setiap bulan adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{\text{Nilai Keandalan (1 hari)} - \text{Nilai keandalan (30 hari)}}{\text{Nilai Keandalan (1 hari)}} \times 100\% \\ = \frac{1 - 0,886}{1} \times 100\% = 11,4\%$$

Sehingga peluang penurunan nilai keandalan transformator pada setiap bulan adalah sebesar 11,4%.

Berdasarkan laju perubahan kondisi pada Tabel II di transpose menjadi sebuah diagram pemodelan *markov* kurva ketersediaan yang menggunakan unsur perubahan kondisi laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ). Diagram pemodelan markov yang terbentuk adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Pemodelan *Markov* untuk Kurva Ketersediaan

Dengan menggunakan persamaan (7) akan membentuk sebuah matriks transisi. Matriks ini yang diolah menggunakan *software* MATLAB. diperoleh nilai peluang kondisi sebagai berikut.

TABEL III.
NILAI PELUANG KETERSEDIAAN TDCG

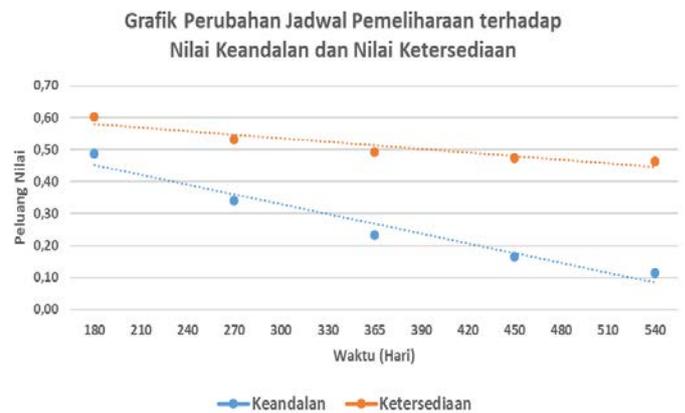
Kondisi	Peluang
K1	0,451
K2	0,352
K3	0,197

Tabel III menunjukkan bahwa semakin lama transformator tidak di pelihara akan menyebabkan penurunan pada nilai ketersediaan. Semakin buruk nilai ketersediaan maka semakin cepat transformator akan mengalami perubahan kondisi hingga menuju kegagalan.

TABEL IV.
PENGARUH WAKTU PERAWATAN TERHADAP NILAI KEANDALAN

Waktu Perawatan (Hari)	Nilai Keandalan	Nilai Ketersediaan
180	0,487	0,603
270	0,340	0,531
365	0,232	0,493
450	0,165	0,475
540	0,115	0,464

Tabel IV menunjukan semakin lama transformator tidak dilakukan pemeliharaan maka nilai keandalan dan ketersediaan dari transformator akan terus mengalami penurunan secara konstan yang ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut:



Gambar 5. Penurunan Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan

Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin lama pemeliharaan dilakukan maka nilai keandalan dan nilai ketersediaannya semakin mengalami penurunan. Maka dari itu perlu dilakukan pemeliharaan pada waktu yang tepat agar kinerja dari transformator dapat terjaga tetap optimal.

Kondisi K1 dan K2 merupakan kondisi baik dari transformator. Sehingga berdasarkan pada Tabel III, dalam

satu tahun kemungkinan minyak transformator tetap dalam kondisi baik dapat ditentukan menggunakan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned}(K1 + K2) \times 365 &= (0,451 + 0,352) \times 365 \\ &= 0,803 \times 365 \\ &= 293 \text{ Hari}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut maka minyak transformator berada dalam kondisi baik selama 293 hari dan 72 hari berikutnya transformator akan berada pada kondisi yang kurang baik. Sehingga waktu pemeliharaan yang tepat untuk transformator dimulai pada hari ke-294.

V. KESIMPULAN

1. Nilai keandalan pada Transformator-3 gardu induk Sanur selama 30 hari adalah sebesar 0,886 dan selama 365 hari sebesar 0,232. Peluang penurunan nilai keandalan transformator adalah sebesar 11,4% setiap bulan.
2. Nilai perubahan kondisi pada transformator-3 gardu induk Sanur menunjukkan transformator beroperasi dengan baik selama 293 hari, setelah itu harus dilakukan pemeliharaan (IEEE C57 104-2008).
3. Nilai keandalan transformator berdasarkan nilai TDCG untuk waktu penjadwalan 450 hari adalah sebesar 0,165 dan untuk 540 hari adalah sebesar 0,115. Hal ini menunjukkan penundaan pemeliharaan atau pemeliharaan yang tidak dilakukan sesuai dengan standar jadwal pemeliharaan akan berakibat ada penurunan nilai keandalan.

REFERENSI

- [1] Bustamante S, Mañana M, Arroyo A, Castro P, Laso A dan Martínez R. Dissolved Gas Analysis Equipment for Online Monitoring of Transformer Oil: A Review. *Sensors*. 2019; 19(2): 40-57.
- [2] Athira KA dan Archana R. A Review of Dissolved Gas Analysis and Transformer Health Condition. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*. 2017; 2(4): 189-195.
- [3] PT PLN. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus (CT). Jakarta: PT PLN (Persero). 2014
- [4] Adoghe A.U, Awosope C.O.A, dan Ekeh JC. A Markov Model for Estimating the Remaining Life of Electrical Insulation in Distribution Transformer. *American Journal of Scientific and Industrial Research*. 2010; 1(3): 539-548.
- [5] Reddy NV. Dissolved Gas Analysis—An Early Identification of Faults in High Voltage Power Equipment using MATLAB GUI: A Thesis. Odisha: Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela. 2014.
- [6] Liang Z dan Parlikadh A. A Markovian Model for Power Transformer Maintenance. Institute for Manufacturing on the University of Cambridge, United Kingdom. *Electrical Power and Energy Systems*. 2017; 9(2): 175–182.
- [7] Urban D dan Wallin D. An Introduction to Markov Models. Learning Landscape Ecology: Queensland. 2012. 35-48.
- [8] Soebagio. Transformator. Surabaya: ITS Press. 2012.
- [9] Uzair, Mar. Failure Analysis of Power Transformers by DGA, Oil Tests and Markov Approach. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2016;1(8): 250-255.
- [10] IEEE Std C57.104-2008. *Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc. 2008.
- [11] Yulisusianto G, Suyono H dan Nurhasanah R. Diagnosis Kondisi Transformator Berbasis Analisis Gas Terlarut menggunakan Metode Sistem Pakar Fuzzy. *Electrics Electronics Communications Controls Informatics Systems (EECCIS)*. 2015; 9(1): 1-6.
- [12] IEC. Std 60599-2015-09. *Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service – Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*. Geneva: International Electrotechnical Commission. 2015.
- [13] El-Shimy M, Abdelfatah M dan Ismail H. Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) Analysis of Utility Power Transformers in Egypt. Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia. *Elektrika*. 2012; 14(1): 1-5.
- [14] Abu Bakar N, Abu-Siada A and Islam S. A Review of Dissolved Gas Analysis Measurement and Interpretation Techniques. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014; 30 (3): 39-49.
- [15] Ansori, Nachnul dan Mustajib, M. Imron. Sistem Perawatan Terpadu. Yogyakarta: Graha Ilmu. 2013: 24-32.