

Analisis Pemeliharaan Prediktif Generator di PLTA Mendalan Menggunakan Metode Markov

Analysis of Predictive Maintenance Generator at Mendalan Hydro Power Plant Using the Markov Method

Achmad Syahrudin Fakhri^{*}, Arif Nur Afandi², Hari Putranto³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5 Malang, 65145

^{2,3}Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5 Malang, 65145
as2f0105@gmail.com^{1*}, an.afandi@um.ac.id², putranto.ft@um.ac.id³

Abstrak – pembangkit sebagai sumber utama pemasok listrik secara terus-menerus ke berbagai penjuru tempat. Untuk menjaga agar performa dan stabilitas generator terjaga, maka dibutuhkan strategi dalam melakukan pemeliharaan pada generator. Strategi dalam pemeliharaan generator bisa berupa pemeliharaan yang rutin dan pemeliharaan prediktif. Pemeliharaan prediktif merupakan pemeliharaan yang didasarkan pada data-data yang menunjukkan peringatan-peringatan yang disebut dengan kegagalan potensial (*potential failure*). Hasil dari pemeliharaan prediktif akan dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan pemeliharaan berikutnya. Dengan melakukan pemeliharaan prediktif diharapkan akan mencegah terjadinya kegagalan sistem yang dapat mengganggu pengoprasian generator sehingga pasokan listrik dapat terpenuhi. Untuk mengimplementasikan hal tersebut penulis menggunakan data dari PLTA Mendalan yang berada di kabupaten Malang. Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data dari tahun 2018 sampai dengan 2019. Data penelitian ini meliputi data tahanan isolasi generator, getaran bearing (vibrasi) pada titik generator dan suhu kumparan stator (*temperature winding stator*). Untuk metode yang digunakan untuk menganalisis data menggunakan metode Markov. Metode Markov merupakan suatu metode matematika untuk menaksir sifat-sifat variabel di masa yang akan datang berdasarkan sifat-sifat variabel tersebut di masa lalu (Subagyo, 2000)

Kata Kunci: pemeliharaan prediktif, generator, tahanan isolasi, getaran bearing, suhu kumparan stator dan metode markov.

Abstract - generators as the main source of continuous electricity supply to various places. To maintain generator performance and stability, a strategy is needed to maintain the generator. The strategy for generator maintenance can be routine maintenance and predictive maintenance. Predictive maintenance is maintenance that is based on data indicating warnings called potential failure. The results of predictive maintenance will be taken into consideration in carrying out subsequent maintenance. By carrying out predictive maintenance, it is hoped that it will prevent system failures that can interfere with generator operation so that the electricity supply can be fulfilled. To implement this, the authors use data from the Mendalan hydropower plant in Malang district. The data used in this study are data from 2018 to 2019. The data of this study include data on generator insulation resistance, bearing vibration (vibration) at the generator point and stator coil temperature (stator winding temperature). For the method used to analyze data using the Markov method. The Markov method is a mathematical method to estimate the properties of a variable in the future based on the characteristics of these variables in the past (Subagyo, 2000)

Keywords: predictive maintenance, generator, insulation resistance, bearing vibration, stator coil temperature and method markov.

1. Pendahuluan

Listrik merupakan kebutuhan penting dari setiap elemen masyarakat, mulai dari elemen bawah seperti perumahan hingga elemen atas seperti pabrik. Dalam setiap elemen tersebut listrik dibutuhkan secara terus-menerus, apabila aliran listrik terhenti maka kegiatan di setiap elemen akan terganggu. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan perhatian khusus dari pembangkit, transmisi dan distribusi. Perhatian yang dilakukan yaitu berupa pemeliharaan

secara berkala. Khususnya dalam sistem pembangkit maka dibutuhkan strategi dalam pemeliharaannya. Pemeliharaan secara berkala penting dilakukan agar unjuk kerja dari pembangkit dapat dipertahankan dan mengantisipasi kondisi-kondisi yang dapat menyebabkan kegagalan pada saat pembangkit beroperasi.

Untuk mempertahankan unjuk kerja dari pembangkit dan mengantisipasi kondisi-kondisi yang dapat menyebabkan kegagalan pada saat pembangkit beroperasi maka pemeliharaan yang dilakukan pada pembangkit mencakup semua komponen-komponen penyusun pembangkit salah satunya yaitu generator. Generator merupakan komponen paling penting dalam sebuah pembangkit sehingga membutuhkan pemeliharaan yang tepat. Pemeliharaan yang tepat pada generator yaitu berupa pemeliharaan yang intensif dan berkala berguna untuk menjaga performa dan stabilitas generator. Selain itu untuk menjaga performa dan stabilitas pada generator juga dilakukan analisis pada data hasil pemeliharaan yang bertujuan untuk menentukan strategi pemeliharaan yang tepat pada generator pembangkit.

Data hasil pemeliharaan dijadikan sebagai suatu analisis pemeliharaan yang bertujuan untuk menentukan strategi pemeliharaan atau biasanya disebut dengan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*). Pemeliharaan prediktif merupakan pemeliharaan yang didasarkan pada data-data yang menunjukkan peringatan-peringatan yang disebut dengan kegagalan potensial (*potential failure*). Kegagalan potensial (*potential failure*) didefinisikan sebagai kondisi fisik yang dapat diidentifikasi yang menunjukkan bahwa kegagalan fungsional akan terjadi atau terjadi selama berlangsungnya proses. Hasil dari analisis akan menentukan periode pemeliharaan yang harus dilakukan.

Dari penjelasan diatas pemeliharaan prediktif sangat penting dilakukan guna untuk menjaga performa dan stabilitas dari generator sehingga dapat mensupai pasokan listrik secara terus menerus. Untuk mengimplementasikan hal tersebut maka dibutuhkan data hasil pemeliharaan dari sebuah generator di pembangkit yang masih terus beroperasi, dalam hal ini penulis menjadikan data hasil pemeliharaan pada PLTA Mendalan khususnya pada unit 2 untuk merencanakan pemeliharaan prediktif. Kemudian untuk metode yang digunakan untuk melakukan analisis yaitu metode Markov. Metode Markov yaitu suatu metode matematika untuk menaksir sifat-sifat variabel di masa yang akan datang berdasarkan sifat-sifat variabel tersebut di masa lalu (Subagyo, 2000). Metode Markov digunakan karena mampu mengolah data yang menghasilkan informasi yang dapat digunakan untuk membantu pembuatan keputusan dalam pemeliharaan prediktif.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menjaga kelancaran pasokan listrik dengan melakukan pemeliharaan prediktif di PLTA Mendalan khususnya pada generator unit 2. Data pemeliharaan generator yang digunakan yaitu tahanan isolasi, getaran *bearing* (vibrasi) dan suhu kumparan stator (*temperature winding stator*). Data pengukuran tahanan isolasi yang digunakan yaitu pengukuran tahanan isolasi pada rotor ke *ground* dan stator ke *ground*. Kemudian untuk data getaran *bearing* yang digunakan yaitu getaran yang ada pada kedua sisi generator yang menggunakan titik vertikal, horizontal dan aksial. Metode yang digunakan untuk menganalisis data pemeliharaan yaitu menggunakan metode Markov. Langkah awal pada metode Markov yaitu pemodelan dari pada data pemeliharaan meliputi pengkondisian data, menghitung MTTF dan MTTR dan menghitung laju kegagalan dan laju perbaikan. Setelah di ketahui laju kegagalan dan laju perbaikan maka dapat dibuat kurva keandalan dan kurva ketersediaan. Kemudian dapat diketahui matriks transisi dan peluang *steady state*. Dari hasil analisis tersebut kemudian dapat ditarik kesimpulan untuk mendapatkan strategi pemeliharaan yang tepat untuk generator unit 2 PLTA Mendalan.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemodelan Markov

Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk pemodelan markov yaitu pengkondisian data, menghitung nilai MTTF dan MTTR, menghitung laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ), dan mencari kurva keandalan dan kurva ketersediaan.

3.3.1 Pengkondisian Data

Langkah pertama yang dilakukan untuk melakukan pemodelan markov yaitu mengumpulkan data pemeliharaan pada generator. Data hasil pemeliharaan kemudian dikelompokkan kedalam beberapa kondisi yang mengacu pada standar yang ada. Standar yang digunakan pada penelitian ini yaitu mengacu pada IEEE, NEMA dan IEC. Dengan mengelompokkan data Generator Unit 2 PLTA Mendalan, maka dapat diketahui perubahan-perubahan kondisi data yang terjadi. Kondisi-kondisi tersebut dapat disimbolkan sebagai berikut : Kondisi 1 (kondisi baik) disimbolkan dengan K1, Kondisi 2 (kondisi cukup) disimbolkan dengan K2, Kondisi 3 (kondisi buruk) disimbolkan dengan K3. Berikut perubahan pengkondisian data dari tahanan isolasi, getaran bearing dan suhu kumparan stator (*temperature winding stator*).

1. Data Tahanan Isolasi

Data hasil pemeliharaan untuk tahanan isolasi dikelompokkan kedalam beberapa kelompok kondisi. Berikut ini aturan pengelompokan kondisi daripada data tahanan isolasi yang mengacu pada IEEE.

Tabel 1. Aturan Pengelompokan Data Tahanan Isolasi

No	Kondisi	Ketentuan	Keterangan
1	K1	$IR1 \text{ menit} \geq 25 \text{ M}\Omega$	Kondisi baik
2	K2	$7 \text{ M}\Omega \leq IR1 \text{ menit} < 25 \text{ M}\Omega$	Kondisi cukup

3

K3

IR1 menit > 7 MΩ

Kondisi buruk

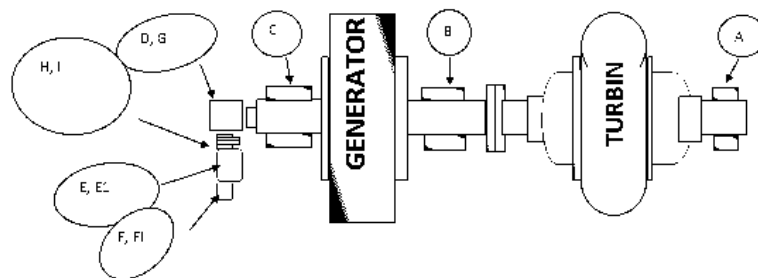
Dengan menggunakan aturan pengelompokan data pada tabel 1 maka data tahanan isolasi hasil pemeliharaan generator unit 2 PLTA Mendalan dapat dikelompokkan kedalam tiga kondisi. Berikut ini data beserta pengelompokan kondisi dari data tahanan isolasi.

Tabel 2. Data Tahanan Isolasi dan Pengkondisian

Tahun/ Bulan	Data Tahanan Isolasi Generator Unit 2												
	Jan	Feb	Mar	Apl	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	
2018	rotor	391 MΩ (K1)	117 MΩ (K1)	117 MΩ (K1)	27,1 MΩ (K1)	219 MΩ (K1)	219 MΩ (K1)	-	200 MΩ (K1)	100 MΩ (K1)	100 MΩ (K1)	207 MΩ (K1)	96,2 MΩ (K1)
	stator	21,6 MΩ (K2)	21 MΩ (K2)	21 MΩ (K2)	21 MΩ (K2)	67,7 MΩ (K1)	67,7 MΩ (K1)	-	30 MΩ (K1)	50 MΩ (K1)	50 GΩ (K1)	1,16 GΩ (K1)	55,6 MΩ (K1)
2019	rotor	62,9 MΩ (K1)	62,9 MΩ (K1)	68,9 MΩ (K1)	71 MΩ (K1)	71 MΩ (K1)	2,33 MΩ (K3)	2,33 MΩ (K3)	-	250 MΩ (K1)	250 MΩ (K1)	132 MΩ (K1)	79,5 MΩ (K1)
	stator	20,4 MΩ (K2)	20,4 MΩ (K2)	31,6 MΩ (K1)	97,6 MΩ (K1)	97,6 MΩ (K1)	73 MΩ (K1)	73 MΩ (K1)	-	65 MΩ (K1)	65 MΩ (K1)	82,7 MΩ (K1)	20 GΩ (K1)

2. Data Getaran Bearing (Vibrasi)

Berikut ini skema gambar generator unit 2 di PLTA Mendalan dengan titik pengambilan data di titik B dan titik C. Titik B dan titik C diambil karena titik tersebut berada pada poros perputaran generator pada bagian kanan dan kiri.



Gambar 2 Titik Pengukuran Getaran (Vibrasi) pada Generator Unit 2 (Sumber : Data PLTA Mendalan)

Keterangan :

- A : Turbine Bearing.
- B : Generator Bearing Kopling
- C : Generator Bearing Exciter
- D : Flender Kopling
- E : Exciter
- F : Pilot Exciter
- G : Flender Kopling Bearing 2
- H : Pinion Bearing 1
- I : Pinion Bearing 2
- E1 : Exciter Bearing 2
- F1 : Pilot Exciter Bearing 2

Data hasil pemeliharaan untuk getaran bearing dikelompokkan kedalam beberapa kelompok kondisi. Berikut ini aturan pengelompokan kondisi daripada data getaran bearing yang mengacu pada IEEE.

Tabel 3. Aturan Pengelompokan Data Getaran Bearing

No	Kondisi	Ketentuan	Keterangan
1	K1	$x < 1 \text{ mm/s}$	Kondisi baik
2	K2	$1 \text{ mm/s} \leq x \leq 3,8 \text{ mm/s}$	Kondisi cukup
3	K3	$x > 3,8 \text{ mm/s}$	Kondisi buruk

Dengan menggunakan aturan pengelompokan data pada tabel 3 maka data getaran *bearing* hasil pemeliharaan generator unit 2 PLTA Mendalan dapat dikelompokkan kedalam tiga kondisi. Berikut ini data beserta pengelompokan kondisi dari data getaran *bearing*.

Tabel 4. Data Getaran *Bearing* dan Pengkondisian

Tahun		Data Getaran Bearing Generator Unit 2 (mm/s)													
/Bulan		Jan	Feb	Mar	Apl	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des		
2018	B	H	0,75 (K1)	-	0,745 (K1)	0,745 (K1)	0,816 (K1)	0,760 (K1)	-	0,738 (K1)	1,380 (K2)	0,774 (K2)	0,748 (K1)	-	
		V	0,21 (K1)	-	0,286 (K1)	0,286 (K1)	0,225 (K1)	0,267 (K1)	-	0,227 (K1)	0,322 (K1)	0,244 (K1)	0,23 (K1)5	-	
		A	0,598 (K1)	-	0,572 (K1)	0,572 (K1)	0,572 (K1)	0,589 (K1)	-	0,584 (K1)	0,454 (K1)	0,606 (K1)	0,594 (K1)	-	
		Beban	4,4	-	4,7	4,7	3,0	4,5	-	4,1	4,5	4,5	4,6	-	
	C	H	0,924 (K1)	-	0,958 (K1)	0,958 (K1)	0,862 (K1)	0,963 (K1)	-	0,941 (K1)	1,078 (K2)	0,924 (K1)	0,915 (K1)	-	
		V	0,475 (K1)	-	0,405 (K1)	0,405 (K1)	0,329 (K1)	0,431 (K1)	-	0,358 (K1)	0,389 (K1)	0,501 (K1)	0,467 (K1)	-	
		A	0,83 (K1)	-	0,852 (K1)	0,852 (K1)	0,834 (K1)	0,905 (K1)	-	0,834 (K1)	0,807 (K1)	0,878 (K1)	0,855 (K1)	-	
		Beban	4,4	-	4,7	4,7	3,0	4,5	-	4,1	4,5	4,5	4,6	-	
	2019	B	H	0,74 (K1)	0,668 (K1)	0,746 (K1)	-	0,675 (K1)	0,759 (K1)	0,774 (K1)	0,662 (K1)	0,704 (K1)	0,724 (K1)	0,852 (K1)	0,727 (K1)
			V	0,231 (K1)	0,205 (K1)	0,176 (K1)	-	0,29 (K1)	0,44 (K1)	0,272 (K1)	0,188 (K1)	0,221 (K1)	0,288 (K1)	0,213 (K1)	0,234 (K1)
			A	0,599 (K1)	0,583 (K1)	0,56 (K1)	-	0,586 (K1)	0,632 (K1)	0,584 (K1)	0,558 (K1)	0,646 (K1)	0,707 (K1)	0,602 (K1)	0,619 (K1)
			Beban	4,5	5,2	5	-	5,5	3	3	4,2	4	4,5	3,5	4,8
C		H	0,924 (K1)	0,979 (K1)	1,025 (K2)	-	0,992 (K1)	0,921 (K1)	0,939 (K1)	1,013 (K2)	1,04 (K2)	1,038 (K2)	0,987 (K1)	1,101 (K2)	
		V	0,499 (K1)	0,519 (K1)	0,489 (K1)	-	0,509 (K1)	0,6 (K1)	0,47 (K1)	0,466 (K1)	0,557 (K1)	0,507 (K1)	0,554 (K1)	0,485 (K1)	
		A	0,834 (K1)	0,861 (K1)	0,917 (K1)	-	0,907 (K1)	1,071 (K2)	1,05 (K2)	0,923 (K1)	0,958 (K1)	1,011 (K2)	1,036 (K2)	0,993 (K1)	
		Beban	4,5	5,2	5	-	5,5	3	3	4,2	4	4,5	3,5	4,8	

3. Data Suhu Kumparan Stator (*Temperature Winding Stator*)

Data hasil pemeliharaan untuk suhu kumparan stator dikelompokkan kedalam beberapa kelompok kondisi. Berikut ini aturan pengelompokan kondisi daripada data suhu kumparan stator yang mengacu pada NEMA.

Tabel 5. Aturan Pengelompokan Data Suhu Kumparan Stator

No	Kondisi	Ketentuan	Keterangan
1	K1	$T < 61^{\circ} C$	Kondisi baik
2	K2	$61^{\circ} C \leq T \leq 80^{\circ} C$	Kondisi cukup
3	K3	$T > 80^{\circ} C$	Kondisi buruk

Dengan menggunakan aturan pengelompokan data pada tabel 1 maka data suhu kumparan stator hasil pemeliharaan generator unit 2 PLTA Mendalan dapat dikelompokkan kedalam tiga kondisi. Berikut ini data beserta pengelompokan kondisi dari data suhu kumparan stator.

Tabel 6. Data Perubahan Suhu Kumpanan Stator

Temperature Winding	Tanggal				
	1 Januari 2019	11 Juni 2018	31 Oktober 2018	11 April 2019	31 Agustus 2019
Stator	R=57	R=56	R=60	R=56	R=56
Pengukuran	S=60	S=58	S=58	S=58	S=58
	T=58	T=56	T=56	T=56	T=56
	(K2)	(K1)	(K2)	(K1)	(K2)

3.3.2 Menghitung MTTF dan MTTR untuk Laju Kegagalan (λ) dan Laju Perbaikan (μ)

Setelah data-data Generator Unit 2 PLTA Mendalan dilakukan pengkondisian, maka dapat dicari nilai dari MTTF (*Main Time To Failure*) dan MTTR (*Main Time To Repair*). MTTF (*Main Time To Failure*) yaitu waktu yang dibutuhkan dari perubahan kondisi baik ke kondisi buruk. MTTR (*Main Time To Repair*) yaitu waktu yang dibutuhkan dari perubahan kondisi baik ke kondisi buruk. Setelah nilai dari MTTF dan MTTR didapat kan maka langkah selanjutnya yaitu mencari nilai laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ). laju kegagalan (λ) merupakan perubahan data hasil pengujian dari kondisi baik ke kondisi buruk. laju perbaikan (μ) merupakan perubahan data hasil pengujian dari kondisi buruk ke kondisi baik. Untuk menghitung nilai dari laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ), maka dibutuhkan nilai MTTF dan MTTR yang didapat dari perubahan data t1 hingga tn. Berikut ini rumus-rumus yang digunakan.

$$MTTF = \frac{t1+t2+t3+\dots+tn}{n} \tag{1}$$

$$MTTR = \frac{l1+l2+l3+\dots+ln}{n} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \tag{3}$$

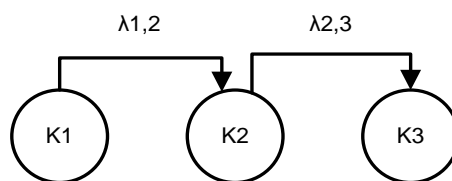
$$\mu = \frac{1}{MTTR} \tag{4}$$

3.3.3 Kurva Keandalan dan Kerva Ketersediaan

Untuk mendapatkan kurva keandalan dan ketersediaan maka beberapa hal yang harus dipenuhi laju kegagalan (λ) dan laju perbaikan (μ), rantai markov serta matriks transisi.

1) Rantai Markov untuk Kurva Keandalan

Setelah didapatkan laju kegagalan, maka dapat digambar diagram rantai Markov. Diagram rantai markov akan digunakan untuk mencari matriks transisi untuk masing-masing data. Berikut rantai Markov untuk kurva keandalan yang ditunjukkan oleh Gambar 3.

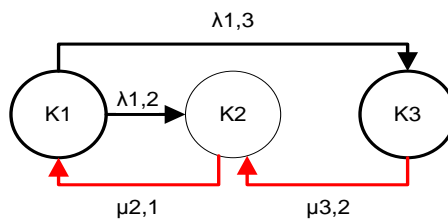


Gambar 3 Rantai Markov Untuk Kurva Keandalan

Pada Gambar 3 terjadi perpindahan kondisi dari K1 ke K2 dan K2 ke K3. Hal tersebut dapat dilihat dari arah panah. $\lambda_{1,2}$ merupakan perubahan kondisi dari K1 ke kondisi K2, sedangkan $\lambda_{2,3}$ merupakan perubahan kondisi dari K2 ke kondisi K3.

2) Rantai Markov untuk Kurva Ketersediaan

Setelah didapatkan laju kegagalan dan laju ketersediaan, maka dapat digambar diagram rantai Markov. Diagram rantai markov akan digunakan untuk mencari matriks transisi untuk masing-masing data. Berikut rantai Markov untuk kurva ketersediaan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4 Rantai Markov Untuk Kurva Ketersediaan

Pada Gambar 4 terjadi proses laju kegagalan dan laju perbaikan. Untuk laju kegagalan terdapat perubahan kondisi K1 ke kondisi K2 dan kondisi K2 ke kondisi K3. Pada diagram Markov ditunjukkan oleh $\lambda_{1,2}$ dan $\lambda_{2,3}$. Untuk laju perbaikan terdapat perubahan kondisi K3 ke kondisi K2 dan kondisi K2 ke kondisi K1. Pada diagram Markov ditunjukkan oleh $\mu_{3,2}$ dan $\mu_{2,1}$.

3) Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan

Keandalan atau *reliability* (R) merupakan peluang suatu sistem bisa menjalankan fungsinya dengan baik selama suatu periode waktu tertentu.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{5}$$

Ketersediaan atau *availability* (A) merupakan peluang suatu sistem mengembalikan fungsinya ke keadaan operasi. Untuk mengetahui ketersediaan dari suatu sistem maka bergantung pada kegagalan dan perbaikannya.

$$A = \frac{MTTR}{MTTR + MTTF} \tag{6}$$

4) Matriks Transisi

Matriks transisi merupakan suatu matriks yang memuat informasi untuk mengatur perpindahan suatu state ke state yang lain pada suatu sistem. Matriks transisi dapat dicari apabila telah diketahui laju kegagalan, laju ketersediaan dan rantai markovnya. Ukuran dari matriks transisi bergantung dari jumlah keadaan yang ada. Kemudian dapat dibuatlah matriks transisi sesuai dengan jumlah perubahan kondisi yang ada. Berikut ini matriks transisi sesuai dengan perubahan kondisi pada kurva keandalan dan kurva ketersediaan dibawah ini.

$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3}) & \lambda_{1,2} & \lambda_{1,3} \\ \mu_{2,1} & -(\mu_{2,1} + \lambda_{2,3}) & \lambda_{2,3} \\ \mu_{3,1} & \mu_{3,2} & -(\mu_{3,1} + \mu_{3,2}) \end{bmatrix} \tag{7}$$

3.2 Hasil Perhitungan

Berikut hasil perhitungan untuk mulai dari nilai MTTF dan MTTR, laju kegagalan dan laju perbaikan, matriks transisi dan kurva keandalan menggunakan perhitungan Markov sesuai dengan rumus-rumus yang telah dijelaskan diatas.

1. Tahanan Isolasi

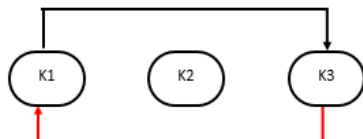
a. Rotor ke Ground

MTTF (*Main Time To Failure*) = 516

MTTR (*Main Time To Repair*) = 92

Laju kegagalan (λ) = 0,00194

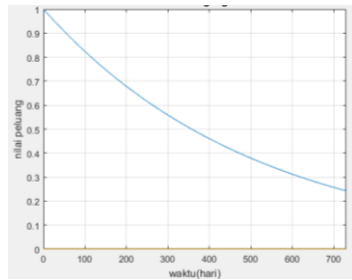
Laju perbaikan (μ) = 0,01087



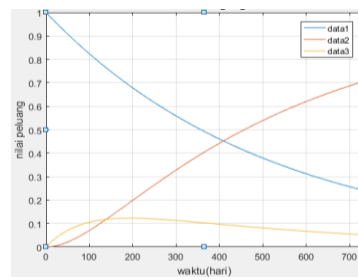
Gambar 5 Rantai Markov Tahanan Isolasi Rotor

$$A = \begin{bmatrix} -0,00194 & 0 & 0,00194 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,01087 & 0 & -0,01087 \end{bmatrix}$$

Gambar 6 Matriks transisi tahanan isolasi Rotor



Gambar 7 Kurva Keandalan Tahanan Isolasi Rotor

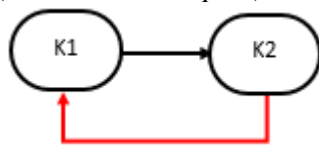


Gambar 8 Kurva Ketersediaan Tahanan Isolasi Rotor

b. Stator ke Ground

MTTF (Main Time To Failure) = 245
 MTTR (Main Time To Repair) = 89,5

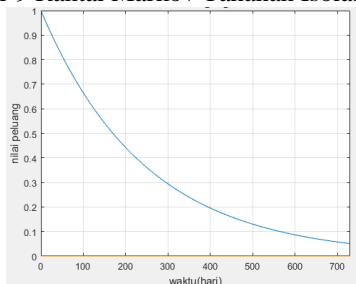
Laju kegagalan (λ) = 0,00408
 Laju perbaikan (μ) = 0,01117



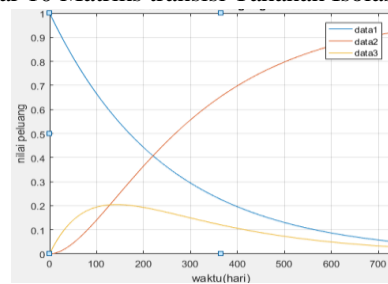
$$A = \begin{bmatrix} -0,00408 & 0,00408 & 0 \\ 0,01117 & -0,01117 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 9 Rantai Markov Tahanan Isolasi Stator

Gambar 10 Matriks transisi Tahanan Isolasi Stator



Gambar 11 Kurva Keandalan Tahanan Isolasi Stator



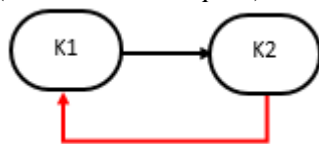
Gambar 12 Kurva Ketersediaan Tahanan Isolasi Stator

2. Getaran Bearing

a. Titik B di Horizontal

MTTF (Main Time To Failure) = 334,5
 MTTR (Main Time To Repair) = 61

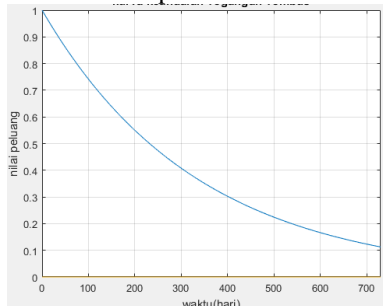
Laju kegagalan (λ) = 0,00299
 Laju perbaikan (μ) = 0,01639



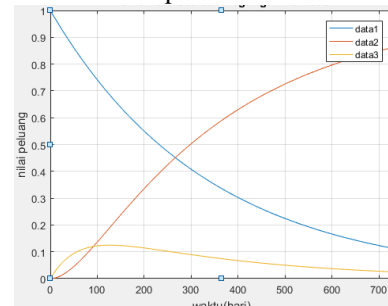
$$A = \begin{bmatrix} -0,00299 & 0,00299 & 0 \\ 0,01639 & -0,01639 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 13 Rantai Markov Vibrasi Titik B di Hprizontal

Gambar 14 Matriks transisi Vibrasi Titik B di Hprizontal



Gambar 15 Kurva Keandalan Vibrasi Titik B di Hprizontal



Gambar 16 Kurva Ketersediaan Vibrasi Titik B di Hprizontal

b. Titik B di Vertikal

MTTF (*Main Time To Failure*) = -
 MTTR (*Main Time To Repair*) = -

Laju kegagalan (λ) = 0
 Laju perbaikan (μ) = 0

c. Titik B di Aksial

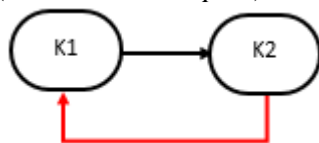
MTTF (*Main Time To Failure*) = -
 MTTR (*Main Time To Repair*) = -

Laju kegagalan (λ) = 0
 Laju perbaikan (μ) = 0

d. Titik C di Horizontal

MTTF (*Main Time To Failure*) = 182,33
 MTTR (*Main Time To Repair*) = 46

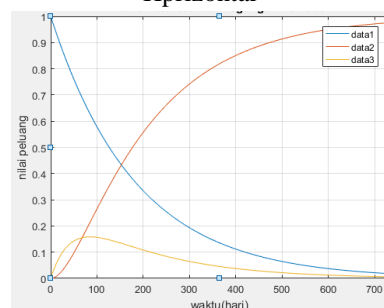
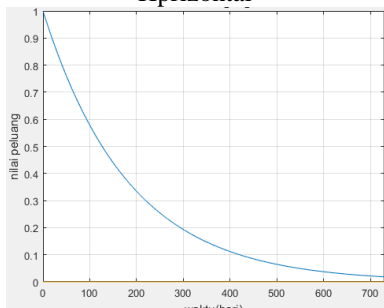
Laju kegagalan (λ) = 0,00548
 Laju perbaikan (μ) = 0,02174



$$A = \begin{bmatrix} -0,00548 & 0,00548 & 0 \\ 0,02174 & -0,02174 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 17 Rantai Markov Vibrasi Titik C di Horizontal

Gambar 18 Matriks Transisi Vibrasi Titik C di Horizontal



Gambar 19 Kurva Keandalan Vibrasi Titik C di Horizontal

Gambar 20 Kurva Ketersediaan Vibrasi Titik C di Horizontal

e. Titik C di Vertikal

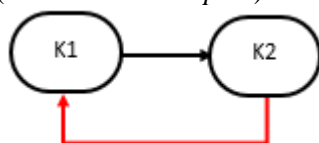
MTTF (*Main Time To Failure*) = -
 MTTR (*Main Time To Repair*) = -

Laju kegagalan (λ) = 0
 Laju perbaikan (μ) = 0

f. Titik C di Aksial

MTTF (*Main Time To Failure*) = 638
 MTTR (*Main Time To Repair*) = 61

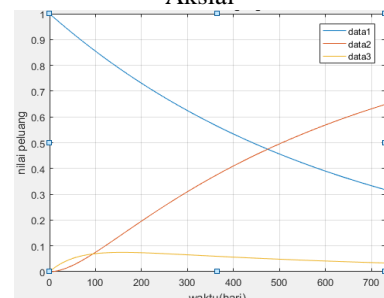
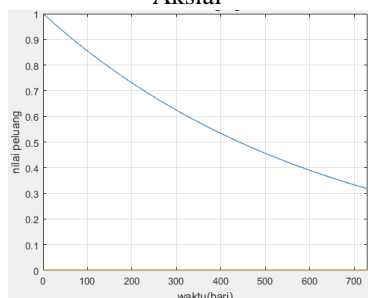
Laju kegagalan (λ) = 0,00157
 Laju perbaikan (μ) = 0,01639



$$A = \begin{bmatrix} -0,00157 & 0,00157 & 0 \\ 0,01639 & -0,01639 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 21 Rantai Markov Vibrasi Titik C di Aksial

Gambar 22 Matriks Transisi Vibrasi Titik C di Aksial



Gambar 23 Kurva Keandalan Vibrasi Titik C di Aksial

Gambar 24 Kurva Ketersediaan Vibrasi Titik C di Aksial

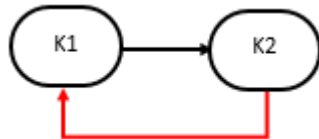
Aksial

Aksial

3. Suhu Kumparan Stator

MTTF (*Main Time To Failure*) = 142
 MTTR (*Main Time To Ripair*) = 161,5

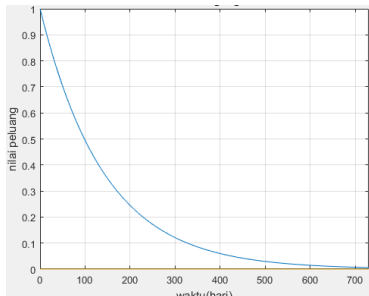
Laju kegagalan (λ) = 0,00704
 Laju perbaikan (μ) = 0,00619



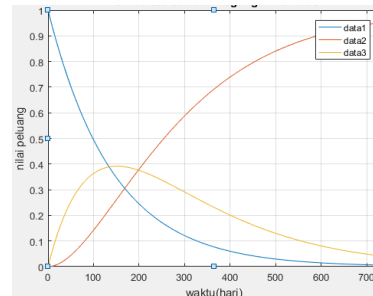
$$A = \begin{bmatrix} -0,00704 & 0,00704 & 0 \\ 0,00619 & -0,00619 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 25 Rantai Markov Suhu Kumparan Stator

Gambar 26 Matriks Transisi Suhu Kumparan Stator



Gambar 27 Kurva Keandalan Suhu Kumparan Stator



Gambar 28 Kurva Ketersediaan Suhu Kumparan Stator

3.3 Peluang *Steady State*

Peluang peralihan pada keadaan seimbang (peluang *steady state*) merupakan peluang transisi yang telah mencapai kondisi seimbang atau telah mencapai kondisi tetap, sehingga tidak akan berubah terhadap perubahan yang terjadi. Kondisi *steady state* dapat juga dikatakan sebagai peluang jangka panjang yang ditentukan melalui matriks transisi. Kondisi dari sistem pada suatu waktu pada dasarnya tidak dapat ditentukan dengan pasti, oleh sebab itu ditentukanlah peluang untuk semua keadaan yang mungkin terjadi. Pada peluang *steady state* jumlah total peluang seluruh keadaan harus memenuhi syarat sama dengan 1. Berikut data kondisi peluang *steady state* berdasarkan jenis datanya.

Tabel 7 Peluang *Steady State* Berdasarkan Jenis Data

Jenis Data	Kondisi	Peluang	Jumlah Hari
Tahanan isolasi pada rotor	K1	0,8740	368
	K3	0,1260	92
Tahanan isolasi pada stator	K1	0,7547	551
	K2	0,2452	179
Vibrasi horizontal di titik B	K1	0,9164	669
	K2	0,0836	61
Vibrasi vertikal di titik B	K1	1	730
Vibrasi aksial di titik B	K1	1	730
Vibrasi horizontal di titik C	K1	0,8740	638
	K2	0,1260	92
Vibrasi vertikal di titik C	K1	1	730
Vibrasi aksial di titik C	K1	0,9164	669
	K2	0,0836	61
Suhu kumparan stator	K1	0,1945	142
	K2	0,8055	588

Dari tabel 7 diatas dapat diketahui bahwa penjumlahan peluang kondisi pada setiap data sama dengan 1. Karena peluang kondisi pada K1 terbilang tinggi, maka sampai tahap ini sebenarnya dapat diketahui bahwa kondisi dari kegerator dalam keadaan baik. Akan tetapi untuk

menentukan waktu pemeliharaan dibutuhkan kondisi penurunan nilai keandalan dan ketersediaan melihat dari umur pemakaiannya.

3.4 Pengaruh Nilai keandalan dan Ketersediaan Terhadap Pemeliharaan Generator

Dengan diketahui semua variabel-variabel yang dibutuhkan meliputi nilai MTTF dan MTTR, laju kegagalan dan laju perbaikan, matriks transisi dan kurva keandalan kurva ketersediaan serta peluang *steady state*, maka dapat disusun tabel penurunan nilai keandalan dan nilai ketersediaan mengacu pada hari pemakaian generator. Berikut ini ditampilkan tabel penurunan nilai keandalan dan nilai ketersediaan.

Tabel 8 Penurunan Nilai Keandalan dan Nilai Ketersediaan

Hari	Parameter					
	Nilai Keandalan Tahanan Isolasi	Nilai Ketersediaan Tahanan Isolasi	Nilai Keandalan Vibrasi	Nilai Ketersediaan Vibrasi	Nilai Keandalan Suhu Kmparan Stator	Nilai Ketersediaan Suhu Kmparan Stator
0	1	1	1	1	1	1
5	0,9850627	0,9984512	0,9833895	0,9991305	0,9654123	0,9963616
10	0,9703485	0,9969048	0,9670549	0,9982618	0,9320209	0,9927365
15	0,9558541	0,9953608	0,9509916	0,9973938	0,8997845	0,9891246
20	0,9415762	0,9938192	0,9351952	0,9965266	0,8686663	0,9855258
25	0,9275116	0,99228	0,9196611	0,9956601	0,838618	0,9819401
30	0,913657	0,9907431	0,9043851	0,9947944	0,8096121	0,9783674
35	0,9000095	0,9892086	0,8893628	0,9939294	0,7816095	0,9748078
40	0,8865657	0,9876766	0,8745901	0,9930652	0,7545755	0,9712611
45	0,8733228	0,9861469	0,8600627	0,9922017	0,7284764	0,9677272
50	0,8602777	0,9846195	0,8457766	0,991339	0,7032801	0,9642063
55	0,8474275	0,9830945	0,8317278	0,990477	0,6789553	0,9606982
60	0,8347692	0,9815719	0,8179124	0,9896158	0,6554718	0,9572028
65	0,8223	0,9800517	0,8043265	0,9887554	0,6328005	0,9537201
70	0,810017	0,9785338	0,7909662	0,9878956	0,6109134	0,9502502
75	0,7979176	0,9770182	0,7778279	0,9870367	0,5897834	0,9467928
80	0,7859988	0,975505	0,7649078	0,9861784	0,5693841	0,943348
85	0,7742581	0,9739941	0,7522023	0,985321	0,5496904	0,9399158
90	0,7626928	0,9724856	0,7397078	0,9844642	0,5306779	0,936496
95	0,7513002	0,9709794	0,7274209	0,9836083	0,512323	0,9330887
100	0,7400778	0,9694756	0,7153381	0,982753	0,4946029	0,9296938
200	0,5477151	0,9398829	0,5117086	0,9658035	0,2446321	0,8643306
300	0,4053518	0,9111935	0,3660446	0,9491463	0,1209957	0,8035628
400	0,2999918	0,8833798	0,2618457	0,9327764	0,0598448	0,7470673
500	0,2220173	0,8564152	0,1873082	0,9166888	0,0295994	0,6945438
600	0,1643101	0,8302736	0,1339887	0,9008787	0,01464	0,6457131
700	0,1216022	0,80493	0,0958472	0,8853412	0,007241	0,6003155
730	0,1111027	0,7974788	0,0866828	0,8807325	0,0058624	0,5873291

Tabel 8 merupakan tabel penurunan nilai keandalan dan nilai ketersediaan dari generator unit 2 PLTA Mendalan selama 2 tahun atau 730 hari. Dari tabel tersebut diketahui bahwa pada 30 hari pertama kondisi penurunan nilai keandalan dan nilai ketersediaan dari masing-masing variabel masih sangat baik. Semua variabel pada 30 hari pertama masih memiliki nilai peluang diatas 0,8. Kemudian pada 30 hari berikutnya kondisi dari generator mulai turun. Hal tersebut diketahui pada hari ke 60 untuk variabel suhu kumparan stator nilai keandalannya yaitu sebesar 0,6554718. Melihat hal tersebut, maka sebelum hari ke 60 dianjurkan untuk melakukan pemeliharaan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan yaitu pemeliharaan prediktif pada generator unit 2 PLTA Mendalan maka didapatkan tujuan dari penelitian ini. Disimpulkan bahwa analisis prediktif ini berujuan sebagai bahan pertimbangan untuk didalam pelaksanaan pemeliharaan. Hasil analisis menggunakan metode Markov diketahui bahwa generator unit 2 PLTA Mendalan dalam kondisi yang baik. Hal tersebut mengacu pada tabel 8, bahwa sampai hari ke 60 penurunan nilai keandalan dan nilai ketersediaan masih cukup baik. Dengan mengacu pada tabel 8 pula maka rekomendasi pemeliharaan minimal dilakukan pemeliharaan dalam dua bulan sekali.

Referensi

- [1] Anshori, Nachnul, Mustajib, M. I. Sistem Perawatan Terpadu (Integrated Maintenance System). Pertama. Yogyakarta, Graha Ilmu, 2013.
- [2] Anshori, N. & M. I. . Sistem Perawatan Terpadu. Yogyakarta: Graha Ilmu. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [3] Hartono Dan Mas'udin. 'Perencanaan Perawatan Mesin Dengan Menggunakan Metode Markov Chain Guna Menurunkan Biaya Perawatan.', Jurnal Optimum., Vol. 3. No, P. Hal 173-184, 2002.
- [4] Kusuma, F. 'Penjadwalan Perawatan Mesin Di Industri Menggunakan Metode Markov Chain'. Available At: [Http://Repository.Unpas.Ac.Id/Id/Eprint/325](http://Repository.Unpas.Ac.Id/Id/Eprint/325) 11 (Accessed: 10 November 2020), 2018.
- [5] Kurniawan, F. (2013) Manajemen Perawatan Industri. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [6] Kusuma, F. 'Penjadwalan Perawatan Mesin Di Industri Menggunakan Metode Markov Chain'. Available At: [Http://Repository.Unpas.Ac.Id/Id/Eprint/325](http://Repository.Unpas.Ac.Id/Id/Eprint/325) 11 (Accessed: 10 November 2020), 2018.
- [7] Manzini, R. Et Al. Maintenance For Industrial Systems. London: Springe. 2010.
- [8] Clymer, John R. *Systems Analysis Using Simulation and Markov Models*. California State University, 1990.
- [9] Corder, Anthony. 1988. *Teknik Manajemen Pemeliharaan*. Jakarta : Erlangga.
- [10] Subagyo, Pangestu dkk. *Dasar-Dasar Operations Research: Model Rantai Markov*. Yogyakarta: PT BPFY-Yogyakarta, 2000.
- [11] IEEE Std 43-2000(R2006). IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. American National Standard (ANSI), 2000.
- [12] IEEE std 3004.8-2016. Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems. IEEE-SA Standard Board, 2016.
- [13] NEMA MG 1-2016. Motor and Generator. National Electrical Manufacturers Association. Virginia, 2016.
- [14] IEC 60034-14. Rotating Electrical Machines – Part 14: Mechanical Vibration of Machines With Shaft 56 Mm and Higher. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland, 2018.