

## PEMILIHAN STRATEGI PEMELIHARAAN MESIN DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MARKOV CHAIN*

Radhinka Mahsa Aziza<sup>1</sup>, Beverly Jessa Surentu<sup>2</sup>, Moh. Bachtiar Amir<sup>3</sup>, Andhieta Aurellyya Salsabilla<sup>4</sup>, Didit Damur Rochman<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>Teknik Industri, Universitas Widyatama, Jl Cikutra No. 204A, Sukapada, Kota Bandung

E-mail: <sup>1</sup>\*Radhinka.mahsa@widyatama.ac.id

---

**Keywords:** *Markov Chain, Machine Maintenance, Maintenance, Maintenance Strategy, Expected Cost.*

### Abstract

*PT. XYZ is a company engaged in precast concrete manufacturing that operates several key machines such as MCC, Boiler, and BFS. The main problem faced is the high frequency of machine breakdowns and maintenance costs due to the suboptimal maintenance strategy applied. Data showed that the total downtime over a period of 9 months reached 1015 hours, with actual maintenance costs amounting to Rp 3,985,815,409,762. This study utilizes the Markov Chain method to model the transition of machine failure states and calculate the expected maintenance cost based on four different maintenance strategies: P1 (preventive for status 2 and 3), P2 (preventive only for status 3), P3 (fully preventive), and P4 (fully corrective). The results show that strategy P3 produces the lowest expected maintenance cost at Rp 5.738.503.615, significantly more efficient compared to other strategies. Strategy P1 resulted in Rp 8.73 billion, P2 in Rp 11.05 billion, and P4 in Rp 12.25 billion. This indicates that maintenance strategy using a probabilistic approach with Markov Chain can optimally support decision-making to reduce maintenance costs and improve maintenance scheduling efficiency.*

---

**Kata kunci:** *Pemeliharaan Mesin, Markov Chain, Pemeliharaan, Strategi Perawatan, Ekspektasi Biaya.*

### Abstrak

PT. XYZ merupakan perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur beton pracetak (*precast*) yang memiliki beberapa mesin utama dalam operasionalnya, antara lain MCC, Boiler, dan BFS. Permasalahan yang dihadapi adalah tingginya frekuensi kerusakan mesin dan biaya pemeliharaan akibat belum optimalnya strategi perawatan yang digunakan. Data menunjukkan bahwa total *downtime* selama 9 bulan mencapai 1015 jam, dengan biaya aktual pemeliharaan mencapai Rp 3.985.815.409.762. Penelitian ini menggunakan metode *Markov Chain* untuk memodelkan transisi kondisi kerusakan mesin dan menghitung ekspektasi biaya berdasarkan strategi pemeliharaan berbeda, yaitu P1 (*preventive* status 2–3), P2 (*preventive* hanya status 3), P3 (semua *preventive*), dan P4 (semua *corrective*). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa strategi P3 menghasilkan total biaya ekspektasi terendah sebesar Rp 5.738.503.615, jauh lebih efisien dibanding strategi lainnya. Strategi P1 memberikan total biaya Rp 8.73 miliar, P2 sebesar Rp 11.5 miliar, dan P4 sebesar Rp 12.25 miliar. Hal ini menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan dengan pendekatan probabilistik melalui *Markov Chain* mampu memberikan keputusan optimal untuk menurunkan biaya pemeliharaan secara signifikan dan meningkatkan efisiensi waktu pemeliharaan mesin.

## PENDAHULUAN

Pemeliharaan (*maintenance*) merupakan suatu kegiatan yang dirancang untuk mempertahankan atau mengembalikan fungsi optimal peralatan industri, dengan tujuan utama menekan frekuensi kegagalan, meminimalkan waktu henti (*downtime*), serta menurunkan biaya operasional. Secara klasik, pemeliharaan dibagi menjadi beberapa jenis yaitu *preventive maintenance* yang dilakukan secara berkala untuk mencegah kegagalan, *corrective maintenance* yang dilakukan setelah kerusakan terjadi, *predictive maintenance* yang memanfaatkan monitoring dan analisis data untuk memperkirakan kebutuhan perbaikan serta, *no maintenance* yang dipilih ketika biaya perbaikan lebih rendah daripada biaya pemeliharaan aktif (Opocenska & Hammer, 2016).

Metode pemeliharaan semakin berkembang menjadi lebih sistematis. Salah satu pendekatan awal adalah *Run to Failure* (RTF) yaitu membiarkan aset bekerja hingga rusak untuk kemudian diperbaiki sering digunakan pada komponen non-kritis. Pendekatan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) menekankan penentuan strategi pemeliharaan berdasarkan fungsi tugas suatu peralatan dan dampak kegagalan terhadap sistem keseluruhan. Sedangkan *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) secara sistematis mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab, dan dampaknya untuk menetapkan prioritas risiko berdasarkan keparahan dan kemungkinan terjadinya.

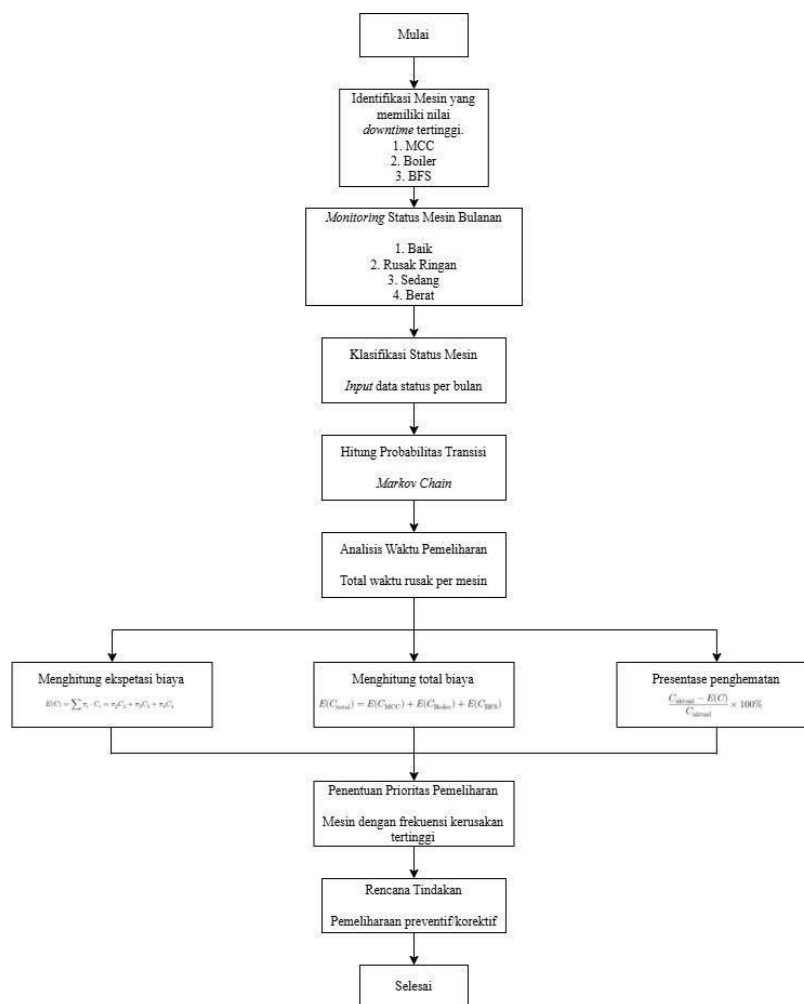
Pendekatan kuantitatif modern yang banyak digunakan dalam perencanaan pemeliharaan adalah model *Markov Chain*. Menurut (Taha, 2017), Proses Markov adalah suatu proses stokastik di mana probabilitas bersyarat dari hasil di masa depan hanya bergantung pada keadaan saat ini, dan tidak dipengaruhi oleh peristiwa-peristiwa yang terjadi sebelumnya. Sifat ini dikenal sebagai sifat *Markov* atau sifat tanpa ingatan (*memoryless*). Model Rantai *Markov* ditemukan oleh seorang ahli Rusia yang bernama A.A. Markov pada tahun 1906, yaitu “Untuk setiap waktu  $t$ , ketika kejadian adalah  $K_t$  dan seluruh kejadian sebelumnya adalah  $K_{t(j)}, \dots, K_{t(j-n)}$  yang terjadi dari proses yang diketahui, probabilitas seluruh kejadian yang akan datang  $K_{t(j)}$  hanya bergantung pada kejadian  $K_{t(j-1)}$  dan tidak bergantung pada kejadian-kejadian sebelumnya yaitu  $K_{t(j-2)}, K_{t(j-3)}, \dots, K_{t(j-n)}$ .” Menurut (Winston, 2004) Rantai *Markov* adalah suatu sistem matematis yang mengalami transisi dari satu keadaan ke keadaan lainnya. Transisi ini bersifat probabilistik dan hanya bergantung pada keadaan saat ini. Hal ini memungkinkan untuk melakukan prediksi terhadap perilaku di masa depan. Metode ini memodelkan transisi stokastik mesin antar status termasuk baik, rusak ringan, rusak sedang, dan rusak berat dengan menghitung probabilitas transisi dan mengestimasi probabilitas keadaan stabil (*steady state*). Berdasarkan distribusi probabilitas tersebut, ekspektasi biaya dan waktu pemeliharaan dapat dihitung untuk berbagai strategi, sehingga memungkinkan perusahaan membuat keputusan secara data-driven dan berbasis probabilitas, bukan hanya berdasar frekuensi historis.

PT. XYZ merupakan perusahaan manufaktur beton pracetak yang sangat bergantung pada keandalan mesin utama seperti MCC, Boiler, dan BFS *Universal*. Berdasarkan catatan operasi periode Januari–September, ketiga mesin ini mengalami *downtime* total sebesar 1015 jam, dengan biaya pemeliharaan aktual mencapai Rp 3.985.815.409.762. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan pemeliharaan yang selama ini dipakai masih bersifat reaktif dan belum didukung oleh metode matematis atau probabilistik yang memadai.

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung ekspektasi biaya pemeliharaan menggunakan metode *Markov Chain* berdasarkan probabilitas *steady state* dan biaya waktu per status kerusakan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh dasar pemilihan strategi pemeliharaan yang paling efisien dan ekonomis, sehingga PT XYZ mampu menurunkan *downtime*, merencanakan pemeliharaan secara terukur, dan meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan.

**METODE**

Gambaran berikut merupakan uraian mengenai metode penelitian yang digunakan dalam menganalisis dan menentukan strategi perawatan mesin berbasis pendekatan kuantitatif.



**Gambar 1** Metodologi Penelitian

1. Identifikasi Mesin yang Memiliki Nilai *Downtime* Tertinggi

Identifikasi dilakukan terhadap mesin-mesin yang memiliki total waktu berhenti operasional (*downtime*) tertinggi. Dari hasil identifikasi tersebut, diperoleh tiga mesin utama yang menjadi fokus penelitian, yaitu mesin MCC, mesin Boiler, dan mesin BFS, ketiga mesin ini dipilih karena memiliki tingkat kerusakan yang paling signifikan dan memberikan dampak besar terhadap penurunan produktivitas operasional. Ketiga mesin tersebut dijadikan prioritas dalam analisis dan penentuan strategi perawatan yang optimal.

2. Monitoring Status Mesin Bulanan

Status kondisi mesin dipantau setiap bulan dan diklasifikasikan ke dalam empat kondisi ditunjukkan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Status Kondisi Mesin

STATUS	KONDISI MESIN	KETERANGAN
1	Baik	Mesin bekerja normal tanpa gangguan
2	Rusak Ringan	Terdapat gangguan ringan yang masih bisa ditangani tanpa menghentikan produksi
3	Rusak Sedang	Gangguan yang memerlukan waktu dan tenaga untuk perbaikan
4	Rusak Berat	Mesin mengalami kerusakan parah dan memerlukan waktu lama untuk perbaikan

Setelah dilakukan klasifikasi terhadap kondisi mesin menjadi beberapa status ditetapkan kebijakan strategi perawatan yang berbeda-beda untuk setiap kombinasi status dan strategi. Empat strategi perawatan yang digunakan, yaitu P1, P2, P3, dan P4, masing-masing mewakili pendekatan kebijakan yang berbeda. Rincian strategi perawatan untuk setiap status kondisi mesin ditunjukkan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Strategi Perbaikan

Strategi	Status 2	Status 3	Status 4
P1	<i>Preventive</i>	<i>Preventive</i>	<i>Corrective</i>
P2	<i>Corrective</i>	<i>Preventive</i>	<i>Corrective</i>
P3	<i>Preventive</i>	<i>Preventive</i>	<i>Preventive</i>
P4	<i>Corrective</i>	<i>Corrective</i>	<i>Corrective</i>

3. Klasifikasi Status Mesin

Data status kondisi setiap mesin dikumpulkan secara bulanan dan diinput ke dalam sistem sebagai data historis operasional. Data ini menjadi dasar dalam perhitungan probabilitas transisi antar status mesin, yang selanjutnya digunakan dalam pemodelan *Markov Chain*.

4. Perhitungan Probabilitas Transisi (*Markov Chain*)

Menurut (Trivedi, 1982) matriks transisi menggambarkan peluang berpindah dari satu kondisi ke kondisi lain pada sistem stokastik diskrit dihitung dengan persamaan:

$$T = [P_{ij}] \quad (1)$$

T= matriks transisi

$P_{ij}$  = probabilitas transisi dari status  $i$  ke status  $j$   
 Menurut (Thompson et al., 1985), matriks probabilitas transisi bersifat stasioner dalam periode tertentu dan menjadi dasar dalam analisis *Markov Chain*. Nilai probabilitas antar status yang diperoleh dari data historis kemudian disusun ke dalam bentuk matriks sebagai representasi perilaku sistem.

$$T = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

$T$  = matriks transisi  
 $P_{ij}$  = probabilitas transisi dari status  $i$  ke status  $j$   
 Sifat penting yang harus dipenuhi

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij} = 1 \quad (3)$$

Menurut (Amster, 1965) untuk mendapatkan *steady state*, digunakan proses iterasi sebagai berikut:

$$\pi^{(k+1)} = \pi^{(k)} \times T \quad (4)$$

$\pi^{(k)}$  = Distribusi Probabilitas pada iterasi ke- $k$

Proses diulang hingga  $\pi^{(k+1)} \approx \pi^{(k)}$  (konvergen/*steady*)

#### 5. Menghitung Ekspektasi Biaya (*Expected Cost*)

Menurut (Trivedi, 1982) Ekspektasi Biaya dihitung dengan persamaan:

$$E(C) = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i \cdot C_i \quad (5)$$

$\pi_i$  = Probabilitas *steady state* mesin berada pada status ke  $i$

$C_i$  = Biaya pemeliharaan pada status ke- $i$

Perhitungan ini memberikan estimasi rata-rata biaya yang mungkin terjadi berdasarkan pola kerusakan mesin.

#### 6. Menghitung Total Biaya

Model matematika yang digunakan untuk menghitung estimasi total biaya kerusakan mesin ditunjukkan melalui persamaan (6). Persamaan ini disusun berdasarkan pendekatan ekspektasi biaya, yang menggambarkan nilai biaya kerusakan rata-rata yang diperkirakan akan terjadi berdasarkan data transisi status mesin yang diperoleh dari model *Markov Chain*.

$$E(C_{total}) = E(C_i) + E(C_i) + E(C_i) \quad (6)$$

#### 7. Persentase Penghematan

Presentasi penghematan digunakan untuk membandingkan biaya aktual setelah perbaikan dengan biaya estimasi sebelum perbaikan, Menurut (Trivedi, 1982) presentase penghematan di hitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Penghematan (\%)} = \frac{C_{\text{actual}} - E(C)}{C_{\text{actual}}} \times 100\% \quad (7)$$

Jika hasilnya positif, berarti tindakan pemeliharaan berhasil menghemat biaya.

#### 8. Penentuan Prioritas Pemeliharaan

Penentuan prioritas pemeliharaan dilakukan berdasarkan hasil analisis terhadap frekuensi kerusakan dan nilai ekspektasi biaya dari masing-masing mesin. Mesin dengan frekuensi kerusakan yang tinggi dan estimasi biaya kerusakan terbesar dianggap memiliki dampak signifikan terhadap kinerja operasional dan biaya produksi. Dengan pendekatan ini, proses pemeliharaan menjadi lebih terarah dan efektif karena sumber daya difokuskan pada aset yang paling kritis. Analisis ini juga menjadi bagian penting dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam sistem pemeliharaan berbasis *Markov Chain*.

#### 9. Rencana Tindakan (Preventif/Korektif)

Sebagai bagian dari strategi pemeliharaan mesin, disusun dua jenis rencana tindakan, yaitu perawatan preventif dan perawatan korektif, yang diterapkan sesuai dengan kondisi dan tingkat keandalan masing-masing mesin:

##### a) Perawatan Preventif (*Preventive Maintenance*)

Tindakan perawatan yang dilakukan sebelum kerusakan terjadi, dengan tujuan mencegah terjadinya gangguan.

##### b) Perawatan Korektif (*Corrective Maintenance*)

Tindakan perawatan yang dilakukan setelah mesin mengalami kerusakan atau gangguan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data yang dilakukan untuk menganalisis transisi kondisi mesin menggunakan pendekatan *Markov Chain* dimulai dengan menghitung probabilitas transisi antar status mesin berdasarkan frekuensi perubahan kondisi dari hasil observasi. Selanjutnya, dibentuk matriks transisi awal untuk masing-masing mesin guna menggambarkan pola perpindahan status dari waktu ke waktu. Matriks ini menjadi dasar dalam menentukan probabilitas *steady state* serta menghitung ekspektasi biaya pemeliharaan secara rata-rata.

#### 1. Menghitung Probabilitas transisi

Setelah dilakukan rekapitulasi data kondisi mesin berdasarkan hasil observasi selama periode Januari sampai September 2024, langkah selanjutnya adalah menghitung probabilitas transisi antar kondisi mesin. Probabilitas transisi ini dihitung berdasarkan frekuensi perubahan kondisi mesin dari satu keadaan ke keadaan lainnya. Berikut ini ditunjukkan pada **Tabel 3** data status mesin pada periode Januari sampai September 2024.

**Tabel 3.** Data Probabilitas Transisi Mesin

**Data Status Mesin**

Bulan	MCC	Boiler	BFS
Januari	1	1	1
Februari	2	1	2
Maret	2	2	1
April	3	2	1
Mei	2	3	2
Juni	3	3	2
Juli	4	3	3
Agustus	4	4	4
September	1	4	4

Pembentukan matriks transisi ini bertujuan untuk menggambarkan pola perpindahan kondisi mesin dari status Baik, Rusak Ringan, dan Rusak Berat, yang nantinya akan digunakan sebagai dasar dalam menghitung probabilitas transisi dan analisis *steady state*. Persamaan yang digunakan dalam matriks transisi terdapat pada persamaan (1).

a) Mesin MCC

Pembentukan matriks transisi awal untuk mesin MCC dapat dilihat pada **Tabel 4.**

**Tabel 4.** Transisi Awal Mesin MCC

**MESIN MCC**

Dari ke	1	2	3	4	Total
1	0	1	0	0	1
2	0	1	2	0	3
3	0	1	0	1	2
4	1	0	0	1	2

Nilai Probabilitas transisi mesin MCC disusun dalam bentuk matriks 4 x 4 pada persamaan (2) yang terdiri dari 4 status kondisi mesin ditunjukkan sebagai berikut:

$$T = \begin{bmatrix} 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,33 & 0,67 & 0,00 \\ 0,00 & 0,50 & 0,00 & 0,50 \\ 0,50 & 0,00 & 0,00 & 0,50 \end{bmatrix}$$

b) Mesin Boiler

Pembentukan matriks transisi awal untuk mesin Boiler dapat dilihat pada **Tabel 5.**

**Tabel 5.** Matriks Transisi awal Mesin Boiler

**MESIN BOILER**

Dari ke	1	2	3	4	Total
1	1	1	0	0	2
2	0	1	1	0	2
3	0	0	2	1	3
4	0	0	0	1	1

Nilai Probabilitas transisi mesin Boiler disusun dalam bentuk matriks 4 x 4 pada persamaan (2) yang terdiri dari 4 status kondisi mesin ditunjukkan sebagai berikut:

$$T = \begin{bmatrix} 0,50 & 0,50 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,67 & 0,33 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$$

c) Mesin BFS *Markov Chain*

Pembentukan matriks transisi awal untuk mesin BFS dapat dilihat pada **Tabel 5.6**.

**Tabel 6.** Matriks Transisi awal Mesin BFS

MESIN BFS					
Dari ke	1	2	3	4	Total
1	1	2	0	0	3
2	1	1	1	0	3
3	0	0	0	1	1
4	0	0	0	1	1

Nilai Probabilitas transisi mesin BFS disusun dalam bentuk matriks 4 x 4 pada persamaan (2) yang terdiri dari 4 status kondisi mesin ditunjukkan sebagai berikut:

$$T = \begin{bmatrix} 0,33 & 0,67 & 0,00 & 0,00 \\ 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$$

2. Menentukan Probabilitas status mesin dalam keadaan *Steady state*

Pada tahap ini, dilakukan perhitungan probabilitas status mesin dalam kondisi *steady state*, yaitu kondisi jangka panjang di mana distribusi status mesin stabil meskipun proses transisi terus berlangsung. Perhitungan dilakukan dengan menyelesaikan sistem persamaan linier dari matriks transisi probabilitas. Hasil *steady state* ini digunakan untuk memperkirakan proporsi waktu mesin berada dalam kondisi Baik, Rusak Ringan, atau Rusak Berat, yang akan menjadi dasar dalam perhitungan ekspektasi biaya pemeliharaan. Perhitungan *steady state* terdapat pada persamaan

(4). Proses diulang hingga  $\pi^{(k+1)} \approx \pi^{(k)}$  (konvergen/*steady*).

a) Mesin MCC

Perhitungan *steady state* mesin MCC dihitung menggunakan persamaan (2) yang dilakukan iterasi samapai kondisi mesin berada pada *steady state*.

$$\pi = \pi^{(0)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times T = \begin{bmatrix} 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,33 & 0,67 & 0,00 \\ 0,50 & 0,00 & 0,00 & 0,50 \end{bmatrix}$$

**Tabel 7.** Matriks Mesin MCC

Matriks Mesin MCC				
Iterasi $\pi \times T$ (pakai $\pi_0 = [1, 0, 0, 0]$ )				
Iterasi	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$
0	1,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	1,00	0,00	0,00
2	0,00	0,33	0,67	0,00
3	0,00	0,44	0,22	0,33
4	0,17	0,26	0,30	0,28
5	0,14	0,40	0,17	0,29
6	0,14	0,36	0,27	0,23
7	0,11	0,40	0,24	0,25
8	0,12	0,37	0,26	0,24
9	0,12	0,38	0,24	0,25
10	0,13	0,37	0,25	0,25
11	0,12	0,38	0,25	0,25
12	0,13	0,37	0,25	0,25
13	0,12	0,38	0,25	0,25
14	0,13	0,37	0,25	0,25
15	0,12	0,38	0,25	0,25

Berdasarkan hasil iterasi pada **Tabel 7**, diperoleh bahwa nilai probabilitas *steady state* tercapai pada iterasi ke 13, yaitu:

$$\pi_1 = 0,12 \quad \pi_2 = 0,38 \quad \pi_3 = 0,25 \quad \pi_4 = 0,25$$

Distribusi probabilitas *steady state* yang diperoleh menunjukkan bahwa dalam jangka panjang,

kondisi mesin MCC memiliki kemungkinan sebesar  $\pi_1 = 12\%$  untuk berada dalam kondisi Baik,  $\pi_2 = 38\%$  berada dalam kondisi Rusak Ringan,  $\pi_3 = 25\%$  dalam kondisi Rusak Berat, dan  $\pi_4 = 25\%$  dalam kondisi lainnya. Kondisi lainnya ini dapat diartikan sebagai keadaan di mana mesin tidak dapat digunakan lagi atau memerlukan penggantian unit secara menyeluruh.

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa mesin MCC lebih sering berada dalam kondisi tidak *ideal* (Rusak Ringan dan Rusak Berat) dibandingkan dalam kondisi Baik. Total peluang akumulatif berada dalam kondisi rusak adalah 63%, yang menandakan bahwa strategi pemeliharaan perlu difokuskan pada pengendalian kerusakan dan efisiensi perawatan untuk mencegah eskalasi kerusakan lebih lanjut. Nilai *steady state* ini akan digunakan sebagai dasar perhitungan ekspektasi biaya pemeliharaan, karena mencerminkan distribusi probabilitas mesin dalam berbagai kondisi yang akan mempengaruhi frekuensi dan jenis tindakan perawatan yang dibutuhkan.

b) Mesin Boiler

Perhitungan *steady state* mesin Boiler dihitung menggunakan persamaan (2) yang dilakukan iterasi sampai kondisi mesin berada pada *steady state*.

$$\pi = \pi^{(0)} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \times T \begin{bmatrix} 0,50 & 0,50 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$$

**Tabel 8.** Matriks Mesin Boiler

<b>MATRIKS MESIN BOILER</b>				
Iterasi $\pi \times T$ (pakai $\pi_0 = [1, 0, 0, 0]$ )				
Iterasi	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$
0	1,00	0,00	0,00	0,00
1	0,50	0,50	0,00	0,00
2	0,25	0,50	0,25	0,00
3	0,13	0,38	0,42	0,08
4	0,06	0,25	0,47	0,22
5	0,03	0,16	0,44	0,38
6	0,02	0,09	0,37	0,52
7	0,01	0,05	0,29	0,65
8	0,00	0,03	0,22	0,74
9	0,00	0,02	0,16	0,82
10	0,00	0,01	0,12	0,87
11	0,00	0,01	0,08	0,91
12	0,00	0,00	0,06	0,94
13	0,00	0,00	0,04	0,96
14	0,00	0,00	0,03	0,97
15	0,00	0,00	0,02	0,98
16	0,00	0,00	0,01	0,99
17	0,00	0,00	0,01	0,99
18	0,00	0,00	0,01	0,99
19	0,00	0,00	0,00	1,00
20	0,00	0,00	0,00	1,00
21	0,00	0,00	0,00	1,00
22	0,00	0,00	0,00	1,00
23	0,00	0,00	0,00	1,00
24	0,00	0,00	0,00	1,00
25	0,00	0,00	0,00	1,00

Berdasarkan hasil iterasi pada **Tabel 8**, diperoleh bahwa nilai probabilitas *steady state* tercapai pada iterasi ke 19 yaitu:

$$\pi_1 = 0,00 \quad \pi_2 = 0,00 \quad \pi_3 = 0,00 \quad \pi_4 = 1,00$$

Distribusi ini menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, mesin Boiler memiliki kemungkinan 100% berada pada status keempat ( $\pi_4$ ). Status ini diartikan sebagai kondisi tidak dapat diperbaiki, rusak total, atau memerlukan penggantian unit secara permanen. Dengan tidak adanya probabilitas untuk kembali ke kondisi Baik, Rusak Ringan, atau Rusak Berat, maka kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem transisi bersifat absorbing, yaitu mesin akan masuk ke kondisi akhir dan tidak dapat keluar lagi dari kondisi tersebut. Diperlukan evaluasi menyeluruh terhadap kebijakan dan frekuensi pemeliharaan, serta perlu dipertimbangkan penerapan program perawatan preventif dan prediktif yang lebih intensif untuk menghindari kerugian jangka panjang akibat kerusakan permanen pada mesin.

c) Mesin BFS

Perhitungan *steady state* mesin BFS dihitung menggunakan persamaan (2) yang dilakukan iterasi samapai kondisi mesin berada pada *steady state*.

$$\pi = \pi^{(0)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \times T = \begin{bmatrix} 0,33 & 0,67 & 0,00 & 0,00 \\ 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{bmatrix}$$

Tabel 9. Matriks Mesin BFS

Matriks Mesin BFS				
Iterasi $\pi \times T$ (pakai $\pi_0 = [1, 0, 0, 0]$ )				
Iterasi	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$
0	1,00	0,00	0,00	0,00
1	0,33	0,67	0,00	0,00
2	0,33	0,44	0,22	0,00
3	0,26	0,37	0,15	0,22
4	0,21	0,30	0,12	0,37
5	0,17	0,24	0,10	0,49
6	0,14	0,19	0,08	0,59
7	0,11	0,15	0,06	0,67
8	0,09	0,12	0,05	0,74
9	0,07	0,10	0,04	0,79
10	0,06	0,08	0,03	0,83
11	0,05	0,06	0,03	0,86
12	0,04	0,05	0,02	0,89
13	0,03	0,04	0,02	0,91
14	0,02	0,03	0,01	0,93
15	0,02	0,03	0,01	0,94
16	0,02	0,02	0,01	0,95
17	0,01	0,02	0,01	0,96
18	0,01	0,01	0,01	0,97
19	0,01	0,01	0,00	0,98
20	0,01	0,01	0,00	0,98
21	0,01	0,01	0,00	0,98
22	0,00	0,01	0,00	0,99
23	0,00	0,00	0,00	0,99
24	0,00	0,00	0,00	0,99
25	0,00	0,00	0,00	0,99
26	0,00	0,00	0,00	0,99
27	0,00	0,00	0,00	1,00
28	0,00	0,00	0,00	1,00

Berdasarkan hasil iterasi pada Tabel 9, diperoleh bahwa nilai probabilitas *steady state* untuk mesin BFS tercapai pada iterasi ke 27, dengan hasil sebagai berikut:

$$\pi_1 = 0,00 \quad \pi_2 = 0,00 \quad \pi_3 = 0,00 \quad \pi_4 = 1,00$$

Distribusi ini menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, mesin BFS memiliki kemungkinan 100% berada pada status keempat ( $\pi_4$ ). Status ini umumnya mengacu pada kondisi Rusak Berat permanen atau kondisi tidak dapat diperbaiki, yang artinya seluruh siklus mesin akan berujung pada kerusakan total tanpa ada peluang untuk kembali ke kondisi fungsional lainnya. Hasil ini menjadi tanda bahwa kinerja sistem pemeliharaan mesin BFS sangat tidak optimal, karena tidak ada transisi yang memungkinkan mesin kembali ke kondisi baik atau rusak ringan. Perlu diterapkan strategi pemeliharaan yang lebih intensif dan proaktif.

### 3. Menghitung Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan pencegahan dihitung untuk mengetahui estimasi beban biaya yang dikeluarkan perusahaan dalam upaya menjaga mesin tetap dalam kondisi optimal sebelum mengalami kerusakan yang lebih serius. Ditunjukkan waktu *downtime* mesin pada **Tabel 10** dan Biaya Pemeliharaan pada **Tabel 11**.

**Tabel 10. Waktu Downtime Mesin**

Waktu Downtime Mesin		
Waktu Preventive	Status 2	12
	Status 3	24
Waktu Corrective	Status 4	102
<b>Biaya Downtime /Jam</b>		<b>38.455.236,00</b>

**Tabel 11. Biaya Pemeliharaan**

Biaya Pemeliharaan	
C1	0
C2	461.462.832,00
C3	922.925.664,00
C4	3.922.434.072,00

Tabel biaya pemeliharaan menunjukkan bahwa tidak terdapat biaya pada kondisi mesin yang masih baik (C1), sementara pada kondisi Rusak Ringan (C2), biaya yang dibutuhkan sebesar Rp461.462.832. Biaya meningkat tajam pada kondisi Rusak Berat (C3) menjadi Rp922.925.664, dan mencapai angka tertinggi pada kondisi kerusakan total atau tidak dapat digunakan (C4), yaitu sebesar Rp3.922.434.072. Temuan ini menunjukkan bahwa semakin parah kerusakan mesin, semakin besar pula biaya pemeliharaan yang harus dikeluarkan, oleh karena itu menjaga mesin agar tetap berada dalam kondisi ringan atau baik menjadi strategi yang jauh lebih ekonomis dibandingkan menunggu hingga terjadi kerusakan berat atau total.

### 4. Menghitung Biaya Rata-rata ekspektasi pemeliharaan

Setelah diperoleh nilai *steady state* untuk masing-masing mesin, dilakukan perhitungan biaya rata-rata ekspektasi pemeliharaan sebagai dasar evaluasi efektivitas strategi pemeliharaan usulan. Perhitungan ini mempertimbangkan probabilitas mesin berada dalam masing-masing kondisi dan dikalikan dengan biaya pemeliharaan yang sesuai pada setiap kondisi. Persamaan Ekspektasi Biaya Pemeliharaan terdapat pada persamaan (5).

Contoh perhitungan Ekspetasi Biaya mesin pada strategi P1, **Tabel 12** menunjukkan perhitungan Ekspetasi Biaya mesin MCC.

**Tabel 12.** Ekspetasi Biaya Mesin MCC

Mesin MCC		
$\pi$	Biaya Pemeliharaan	Ekspektasi Biaya
0,00	-	-
0,67	461.462.832,00	309.180.097,44
0,40	922.925.664,00	369.170.265,60
0,00	3.922.434.072,00	-
<b>Total Ekspektasi Biaya</b>		<b>678.350.363,04</b>

$$E(C) = 0,00 \times (0) + 0,67 \times (461462832) + 0,40 \times (922925664) + 0,00 \times (3922434072)$$

$$E(C) = Rp. 678.350.363.$$

**Tabel 13** menunjukkan perhitungan Ekspetasi Biaya mesin Boiler dengan cara perhitungan yang sama.

**Tabel 13.** Ekspetasi Biaya Mesin Boiler

Mesin Boiler		
$\pi$	Biaya Pemeliharaan	Ekspektasi Biaya
0,00	-	-
0,00	461.462.832,00	-
0,00	922.925.664,00	-
1,00	3.922.434.072,00	3.922.434.072,00
<b>Total Ekspektasi Biaya</b>		<b>3.922.434.072,00</b>

**Tabel 14** menunjukkan perhitungan Ekspetasi Biaya mesin BFS dengan cara perhitungan yang sama.

**Tabel 14.** Ekspetasi Biaya Mesin BFS

Mesin BFS		
$\pi$	Biaya Pemeliharaan	Ekspektasi Biaya
0,00	-	-
0,00	461.462.832,00	-
0,00	922.925.664,00	-
0,50	3.922.434.072,00	4.137.227.588,42
<b>Total Ekspektasi Biaya</b>		<b>4.137.227.588,42</b>

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, diperoleh hasil ekspektasi biaya pemeliharaan untuk masing-masing mesin berdasarkan strategi alternatif yang diterapkan. Rincian hasil tersebut disajikan pada **Tabel 15**, yang memberikan gambaran perbandingan efektivitas biaya dari setiap strategi yang diuji. Informasi ini menjadi dasar penting dalam mengevaluasi strategi pemeliharaan yang paling efisien dan berkelanjutan bagi operasional mesin.

**Tabel 15.** Ekspetasi Biaya Mesin

Ekspetasi Biaya Mesin			
Strategi	Mesin MCC	Mesin Boiler	Mesin BFS
P2	2.997.201.093,84	3.922.434.072,00	4.137.227.588,42
P3	678.350.363,04	922.925.664,00	4.137.227.588,42
P4	4.197.004.457,04	3.922.434.072,00	4.137.227.588,42

Setelah dilakukan perhitungan total biaya pemeliharaan menggunakan persamaan (6) dan perhitungan penghematan menggunakan persamaan (7) untuk masing-masing strategi pemeliharaan mesin, diperoleh hasil rekapitulasi yang ditunjukkan pada **Tabel 16**. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa strategi P3 menghasilkan total biaya pemeliharaan paling rendah dibandingkan strategi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa strategi P3 merupakan opsi paling efisien secara finansial dalam pengelolaan pemeliharaan mesin.

**Tabel 16. Rekapitulasi Biaya Pemeliharaan**

Strategi	Total Biaya Pemeliharaan	Penghematan
P1	Rp 8.738.012.023	78%
P2	Rp 11.056.862.754	72%
P3	Rp 5.738.503.615	86%
P4	Rp 12.256.666.117	69%

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap empat alternatif skenario penjadwalan pemeliharaan mesin yaitu P1, P2, P3, dan P4 untuk tiga jenis mesin, yaitu MCC, Boiler, dan BFS. Setiap skenario dihitung berdasarkan waktu pemeliharaan rata-rata dan dievaluasi terhadap total biaya pemeliharaan ekspektasi yang ditimbulkan selama periode 9 bulan. Perbandingan dilakukan terhadap biaya pemeliharaan aktual perusahaan, yaitu sebesar Rp 39.815.409.762.

Pada skenario P1, pemeliharaan dijadwalkan setiap 32 jam untuk mesin MCC dan 96 jam untuk Boiler dan BFS, menghasilkan penghematan sebesar 78% dengan frekuensi pemeliharaan yang tergolong sedang. Skenario P2 memiliki interval lebih longgar, yaitu 41 jam untuk MCC dan 121 jam untuk Boiler & BFS, dan tetap mampu memberikan penghematan sebesar 72%. Sementara itu, P3 untuk Boiler & BFS. Strategi ini memberikan hasil penghematan tertinggi sebesar 86%, menjadikannya alternatif paling optimal. Terakhir, P4 memiliki frekuensi pemeliharaan paling jarang, yaitu 45 jam untuk MCC dan 134 jam untuk Boiler & BFS, namun tetap memberikan penghematan signifikan sebesar 69%. Dari seluruh skenario, alternatif P3 memberikan kinerja terbaik dengan total biaya ekspektasi pemeliharaan sebesar Rp 5.738.503.615, menghasilkan penghematan hingga Rp 34.076.906.147 dibandingkan dengan biaya aktual perusahaan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Darmawan, 2020) di PT Dewi Ratih Putera menunjukkan bahwa penerapan metode *Markov Chain* dalam perencanaan pemeliharaan mesin dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan. Dalam penelitian tersebut, empat kebijakan pemeliharaan dibandingkan, yaitu kombinasi antara *corrective* dan *preventive maintenance* pada status kerusakan tertentu. Hasilnya, strategi P3 yang melakukan *corrective maintenance* pada status kerusakan berat (status 4) dan *preventive maintenance* pada status kerusakan ringan dan sedang (status 2 dan 3) memberikan hasil paling efisien dengan total biaya sebesar Rp 9.080.664 dan penghematan sebesar 89,97% dibandingkan biaya aktual sebesar Rp 90.530.000.

Pendekatan yang digunakan dalam jurnal tersebut sejalan dengan penelitian ini, di mana analisis menggunakan matriks probabilitas transisi untuk memodelkan perubahan status mesin secara stokastik, lalu dihitung nilai *steady state* dan ekspektasi biaya pada masing-masing strategi. Selain itu, penelitian tersebut juga membuktikan bahwa dengan strategi yang tepat, waktu pemeliharaan dapat ditekan secara signifikan (dari 265 jam menjadi 27 jam dalam setahun).

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Markov Chain* sangat relevan digunakan untuk perencanaan pemeliharaan mesin, khususnya dalam industri manufaktur dan konstruksi, karena mampu mengidentifikasi pola kerusakan, memprediksi transisi status, dan mengarahkan keputusan strategi yang paling efisien secara biaya dan waktu.

## KESIMPULAN

Hasil analisis per mesin menunjukkan bahwa karakteristik kerusakan dan kebutuhan strategi pemeliharaan berbeda pada masing-masing unit. Untuk mesin MCC, nilai *steady state* menunjukkan bahwa mayoritas waktu mesin berada pada kondisi rusak ringan dan sedang, sehingga strategi berbasis *preventive maintenance* terbukti mampu menurunkan biaya ekspektasi secara signifikan hingga mencapai Rp 678.350.363, dibandingkan skenario korektif penuh (P4) yang mencapai lebih dari Rp 4,1 miliar. Mesin Boiler, berdasarkan hasil iterasi, cenderung masuk ke kondisi rusak berat secara permanen, dengan *steady state* yang menunjukkan nilai 100% pada status keempat. Hal ini membuat strategi pemeliharaan korektif tidak lagi efektif, dan perawatan intensif atau bahkan penggantian unit menjadi lebih relevan. Sementara pada mesin BFS, pola transisi menunjukkan kecenderungan mirip dengan Boiler, di mana pada jangka panjang mesin akan berakhir dalam kondisi tidak dapat diperbaiki. Oleh karena itu, baik mesin Boiler maupun BFS membutuhkan strategi pemeliharaan yang berbasis prediktif untuk mencegah kondisi terminal tersebut.

Temuan ini konsisten dengan penelitian (Darmawan, 2020) di PT Dewi Ratih Putera yang juga menggunakan metode *Markov Chain* untuk menentukan strategi optimal. Dalam penelitiannya, strategi pemeliharaan kombinatorial (*preventive* untuk kerusakan ringan dan sedang, korektif untuk berat) menghasilkan penghematan hingga hampir 90% dibanding strategi reaktif. Hal ini memperkuat hasil bahwa pendekatan probabilistik berbasis *Markov Chain* dapat menjadi landasan kuat dalam mengoptimalkan biaya dan efisiensi pemeliharaan mesin secara sistematis dan terukur.

**REFERENSI**

- Amster, S. J. (1965). Mathematical Theory of Reliability. *Technometrics*.  
<https://doi.org/10.1080/00401706.1965.10490311>
- Darmawan, R. F. A. (2020). Perancangan Pemeliharaan Mesin Dengan Menggunakan Metode Markov Chain Untuk Mengurangi Biaya Pemeliharaan. *Doctoral Dissertation*, Universitas Islam Sultan Agung Semarang,
- Opcenska, H., & Hammer, M. (2016). Reliability centred maintenance. *MM Science Journal*, 2016(NOVEMBER), 1451–1455. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016\\_11\\_2016161](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_11_2016161)
- Taha, H. A. (2017). Operations Research An Introduction tenth edition. In *pearson Education*.
- Thompson, W. A., Taylor, H. M., & Karlin, S. (1985). An Introduction to Stochastic Modeling. *Journal of the American Statistical Association*. <https://doi.org/10.2307/2287941>
- Trivedi, K. S. (1982). Probability & Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications. In *IEEE Transactions on Reliability*. <https://doi.org/10.1109/TR.1982.5221442>
- Winston, W. L. (2004). Operations Research Applications and Algorithms 4th Edition. In *Thomson Learning, Inc.*