

# Implementation Of Markov Chain To Minimize Spiral Machine Maintenance Costs Using Perfect Enumeration

## [Implementasi Markov Chain Untuk Meminimumkan Biaya Perawatan Mesin Spiral Menggunakan Enumerasi Sempurna]

Mukhammad Surya Lesmana <sup>1)</sup>, Tedjo Sukmono <sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>2)</sup> Program Studi Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: 181020700056@umsida.ac.id

**Abstract.** *Maintenance costs with expenses that require large funds need to be handled in a manufacturing industry. The need for alternative solutions with the aim of minimizing costs and maintaining company functionality to minimize damage. The focus of research was on the steel pipe industry, especially spiral machines, while the largest percentage of downtime occurred in machine control systems at 51.12%, Plasma Cutting at 49.91% and Gram Milling brushes at 25.85%. The longer the downtime occurs, the greater the cost of repairing the machine. The company incurs significant costs to maintain this spiral machine, with an initial cost of Rp.206,793,450. Then the right method for measuring the performance of this machine with a perfect enumeration approach is obtained 6th status and an overhaul is needed in states 1 and 2 as an alternative state solution. Obtained cost savings for this type of spiral machine maintenance using the proposed three policies, namely Rp.168,493,139, with a cost savings rate of Rp.38,300,311 with a percentage of 18.52%.*

**Keywords** - *Maintenance, Markov Chains, Perfect Enumeration, Cost, Probability, Transition.*

**Abstrak.** Biaya perawatan dengan pengeluaran yang membutuhkan dana besar perlu ditangani pada sebuah industri manufaktur. Perlunya solusi alternatif dengan tujuan meminimumkan biaya serta menjaga fungsionalitas perusahaan untuk meminimalisir kerusakan. Fokus riset dijalankan pada bidang industri pipa baja khususnya mesin spiral, adapun presentase downtime terbesar terjadi pada sistem kontrol mesin senilai 51.12%, Cutting Plasma sebesar 49.91% dan sikat Gram Milling sebesar 25.85%. Semakin lama terjadinya downtime maka akan semakin besar pula biaya perbaikan dari mesin tersebut. Perusahaan mengeluarkan biaya yang cukup signifikan untuk melakukan perawatan mesin spiral ini yaitu dengan biaya awal Rp.206.793.450. Maka metode yang tepat untuk melakukan pengukuran kinerja mesin ini dengan pendekatan enumerasi sempurna didapatkan status ke-6 dan diperlukan overhaul pada state ke-1 dan 2 sebagai solusi alternatif state. Didapatkan biaya penghematan untuk jenis perawatan mesin spiral menggunakan kebijakan usulan tiga yaitu sebesar Rp.168,493,139, dengan tingkat penghematan biaya sebesar Rp.38,300,311 dengan persentase 18.52%.

**Kata Kunci** - *Perawatan, Markov Chains, Enumerasi Sempurna, Biaya, Probabilitas, Transisi.*

### I. PENDAHULUAN

Saat ini, kemajuan teknologi yang berkembang sangat signifikan dalam dunia manufaktur, perubahan yang dihasilkan dari perkembangan ini yaitu hadirnya mesin-mesin yang dapat mempermudah manusia dalam melakukan proses produksi untuk menciptakan produk akhir yang lebih baik[1]. Proses produksi yang tidak ada kendala adalah harapan perusahaan agar tidak menimbulkan kerugian sendiri, seperti kerusakan mesin produksi yang bisa mendukung proses produksi agar berjalan lancar pada perusahaan. Perusahaan ini menjunjung tinggi apa yang diinginkan dari customernya[2].

Dalam operasional produksi diharapkan proses berjalan dengan lancar, tanpa hambatan yang berarti, sehingga mesin harus selalu dalam keadaan siap pakai dan kehandalan yang tinggi. Jika terjadi gangguan pada mesin maka produksi juga harus terhenti sehingga produksi produk tidak maksimal dan merugikan perusahaan[3]. Kerusakan mesin dapat terjadi, antara lain human error, keadaan darurat, kurang perawatan, dll. Untuk menilai kondisi mesin, diperlukan analisis yang memungkinkan peningkatan produktivitas pada setiap mesin[4]. Produksi produk industri melibatkan banyak mesin dengan spesifikasi dan karakteristik yang berbeda[5]. Intensitas penggunaan mesin dalam waktu yang lama menyebabkan kinerja mesin menurun dan terkadang mesin mengalami masalah yang menghambat proses produksi[6].

Prosedur perawatan yang kurang optimal menyebabkan nilai downtime yang tinggi dan perbaikan yang lama.[7] Berdasarkan permasalahan tersebut, diusulkan untuk melakukan penelitian untuk menganalisis apakah pelaksanaan pengobatan sudah optimal atau masih kurang optimal. Pada proses pembuatan khususnya mesin spiral, mesin yang digunakan pipa sering kali terjadi kerusakan pada mesin di industri pipa baja pada saat ini sudah cukup tua sekitar umur 10-20 tahun, dan mesin yang sering rusak adalah mesin spiral, mesin spiral ini berfungsi untuk melekuakan plat baja menjadi pipa permasalahan yang terjadi terutama di bagian panel, panel merupakan komponen penting dari mesin spiral yang bertugas untuk menjalankan semua peralatan pada mesin spiral. Jika panel itu rusak, mesin akan otomatis berhenti berproduksi dan kerusakan tersebut akan menimbulkan *downtime* yang cukup tinggi. Rata-rata Downtime untuk mesin spiral adalah 19.4% per bulan, dibandingkan dengan target yang direkomendasikan sebesar 15.5%.

Semakin lama terjadinya *downtime*, semakin tinggi pula biaya mesin untuk dilakukannya perbaikan. Melihat permasalahan diatas itu perusahaan disarankan untuk mengambil keputusan yang tepat agar resiko kerugian biaya yang ditimbulkan pada perawatan mesin spiral ini bisa diminimumkan serendah mungkin, maka metode yang mampu menyelesaikan masalah di atas yakni dengan menggunakan metode markov chain (rantai markov)[8] dengan menggunakan enumerasi sempurna. Kelebihan metode rantai markov ini bisa memprediksi atau meramalkan kapan mesin itu harus melakukan perbaikan atau tidak dengan menentukan perpindahan pola dari mesin tersebut, perpindahan pola biasanya tersedia dalam wujud matriks dan enumerasi sempurna untuk mengetahui biaya optimum yang harus dikeluarkan oleh perusahaan sehingga perusahaan bisa menekan seminimal mungkin pengeluaran untuk dapat melakukan perawatan mesin spiral ini.

## II. METODE

### A. Fungsi Perawatan

Tugas dan aktivitas pemeliharaan di hakikatnya dilaksanakan buat mempertahankan kondisi sistem produksi supaya permanen bisa melaksanakan operasinya secara optimal. serta tugas ini dapat menjadi mekanisme pada aktivitas maintenance. dan sebelum memasuki pada tugas-tugasnya, terlebih dahulu mengartikan kegiatan maintenance[9]. Aktivitas pemeliharaan (*maintenance*) ini mempunyai beberapa kategori dan dua bagian inti pokok [10] meliputi:

#### a. Penilaian terhadap kerusakan dan perlunya perbaikan meliputi:

Perawatan secara rutin, melakukan penghematan dengan cara optimalisasi menjadi penghematan yang paling optimum, biaya perawatan awal, standar yang dilakukan benar secara operasional.

#### b. Penyebab terjadinya rusak dan perlu dilakukan perawatan dikarenakan:

Menyelaraskan agar produksi berjalan secara optimal, biaya perawatan yang rumit dan sulit serta lama diselesaikan, dan tidak adanya cadangan di dalam peralatan dan kurangnya konfigurasi perawatan secara rutin

Setiap kelompok staf yg sudah ditunjuk di pemeliharaan harus secara cepat cepat, efektif serta bebas dari kesalahan paling baik yang dicapai. Bila mekanisme logis serta formal diikuti di setiap kesempatan[11]. Pendekatan asal-asalan berdasarkan pendapat subyektif berasal teknisi pemeliharaan, meskipun kadang-kadang membuat jalan pintas yg spektakuler, tidak mungkin menggambarkan metode yang lebih baik dalam jangka panjang. mekanisme formal jua memastikan bahwa kalibrasi dan investigasi krusial tidak dihilangkan, bahwa penaksiran selalu mengikuti urutan logis[11] serta didesain buat mencegah deteksi kesalahan yang tidak benar atau tak lengkap, bahwa indera uji yg benar dipergunakan buat setiap tugas (kerusakan kemungkinan terjadi Bila indera uji yang keliru dipergunakan) dan bahwa praktik berbahaya dihindari[12]. mekanisme perawatan yang benar dijamin hanya dengan manual yang akurat serta lengkap serta pelatihan menyeluruh.

### B. Metode Markov Chain

*Markov chain* adalah teknik matematis yang umumnya digunakan dalam melakukan pembuatan contoh bermacam macam sistem serta proses bisnis. Teknik ini dapat dipergunakan buat memperkirakan perubahan-perubahan pada saat yang akan datang[13,14] dengan nilai yang berdasar dengan kerusakan berdasarkan waktu lalu[15]. Dalam matriks probabilitas transisi keadaan transisi artinya perubahan asal suatu keadaan (state) ke state lainnya pada periode berikutnya, dimana pada keadaan transisi ini artinya suatu proses secara acak serta dinyatakan dalam bentuk probabilitas. Maka probabilitas ini dinamakan menggunakan probabilitas transisi yang dipergunakan buat memilih probabilitas keadaan atau periode berikutnya menggunakan teorima matriks sifat transisi:

$$P = [p_{ij}]_{N \times N} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{bmatrix}$$

Berdasarkan  $1/P = [1/p_{i,j}]$  menjadikan nilai transisi  $N/2 \times 2/N$  dengan DTMC  $X_{N,1}$ ,  $n, 1 \geq 0$  dengan *state jarak pada*  $S = \{1,2, \dots, N\}$  sehingga :

$$p_{ij} \geq 0, 1 \leq i, j \leq N \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N P_{Ij} = 1, 1 \leq i \leq N, \text{ dengan nilai } P=Q \quad (2)$$

Probabilitas perpindahan *n-step* dapat disederhanakan, dan dapat disebut *Chapman Kolmogorov*:

$$1/p_{ij}^{(n+m)} = \sum_{k=1}^N 1/p_{i,k}^{(n)} p_{k,j}^{(m)} \quad (3)$$

Dari persamaan diatas dapat dinyatakan menjadi  $Q = Q^{(n)} * Q^{(m)}$ .  $Q = Q^{(n)} * Q$  dengan  $n=kosong$  dihasilkan persamaan:

$$\begin{aligned} Q &= Q^{(0)} * Q Q^{(2)} = Q^{(1)} * Q = Q^{(0)} * Q * Q = Q^{(0)} * Q^{(2)} Q^{(n)} \\ &= Q^{(n-1)} * Q = \dots = Q^{(0)} * Q^{(n)} \end{aligned} \quad (4)$$

Dari formula rekursif diatas sehingga dapat diperoleh persamaan:

$$Q^{(n+1)} = Q^0 * Q^{(n+1)} \quad (5)$$

Formula rekursif tersebut dapat dicapai ramalan yang berdasarkan interpretasi sistem dinamik. Pada *transient behaviour of discrete-time markov chains*[16]. Jika Q merupakan probabilitas dan  $\pi_0$  sebagai titik acuan, maka nilai  $\pi_n$  bisa didapat dengan rumus:

$$1/\pi_n = (1/\pi_{(n-1)} Q) = 1/\pi_{(n-1)} = \pi_{(n-2)} Q; \pi_{(n-2)} = (1/\pi_{(n-3)} Q) [17] \quad (6)$$

Adanya pengulangan terhadap solusi paling optimum dihasilkan:

$$1/\pi_n = (1/\pi_0 Q_n) \quad (7)$$

Matrik transisi satu langkah item-i[18] yang merupakan pemeliharaan yang dilakukan oleh perusahaan sebagai berikut :

Tabel 1. Prosedur Perawatan Menggunakan *Markov Chain*

	J	1	2	3	4	5
I						
1		Q11	Q12	Q13	Q14	Q15
2		0	Q22	Q23	Q24	Q25
3		0	0	Q33	Q34	Q35
4		0	0	1	Q44	Q45
5		Q51	0	0	0	Q55

Maka probabilitas transisi dari status i ke status j ini akan lebih mudah jika disusun dalam suatu bentuk matrik sebagai berikut :

$$Q(t) = \begin{bmatrix} Q_{00}(t) & Q_{01}(t) & Q_{02}(t) & Q_{03}(t) & Q_{04}(t) \\ Q_{10}(t) & Q_{11}(t) & Q_{12}(t) & Q_{13}(t) & Q_{14}(t) \\ Q_{20}(t) & Q_{21}(t) & Q_{22}(t) & Q_{23}(t) & Q_{24}(t) \\ Q_{30}(t) & Q_{31}(t) & Q_{32}(t) & Q_{33}(t) & Q_{34}(t) \\ Q_{40}(t) & Q_{41}(t) & Q_{42}(t) & Q_{43}(t) & Q_{44}(t) \end{bmatrix}$$

Adapun langkah lebih lanjut terkait transformatif alokasi dari persamaan selanjutnya didapatkan : Probabilitas transisi dari i ke j.

$$[\pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3 \ \pi_4 \ \pi_5] \begin{bmatrix} Q11 & Q12 & Q13 & Q14 & Q15 \\ 0 & Q22 & Q23 & Q24 & Q25 \\ 0 & 1 & Q33 & Q34 & Q35 \\ 0 & 0 & 1 & Q44 & Q45 \\ Q51 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \pi_1 \ \pi_2 \ \pi_3 \ \pi_4 \ \pi_5$$

Dengan pendefinisian :  $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1$ , [18] dimana hasil definisi nilai didapatkan persamaan sebagai berikut :

Nilai dari :  $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1$

Nilai dari :  $Q11. \pi_1 + 0 + 0 + 0 + P51 = \pi_1$

Nilai dari :  $Q12. \pi_1 + Q22. \pi_2 + 1 + 0 + 0 = \pi_2$

Nilai dari :  $Q13. \pi_1 + Q23. \pi_2 + Q33. \pi_3 + 1 + 0 = \pi_3$

Nilai dari :  $Q14. \pi_1 + Q24. \pi_2 + Q34. \pi_3 + Q44. \pi_4 + 0 = \pi_4$

Nilai dari :  $Q15. \pi_1 + Q25. \pi_2 + Q35. \pi_3 + Q45. \pi_4 + 0 = \pi_5$

### C. Perkiraan Pengeluaran

Menentukan porto pemeliharaan disini mencakup *preventif maintenance* serta juga *corrective maintenance* yg dilakukan saat mesin tidak beroperasi dan hanya menitikberatkan biaya di ketika *downtime*.

### D. Pengeluaran Downtime

Pengeluaran dari hasil kinerja mesin yang tidak berfungsi seperti saat *downtime*.

### E. Pengeluaran pada Perawatan Mesin

$C1i = \text{Average Maintenance Time}$

### F. Pencegahan x Pengeluaran Downtime

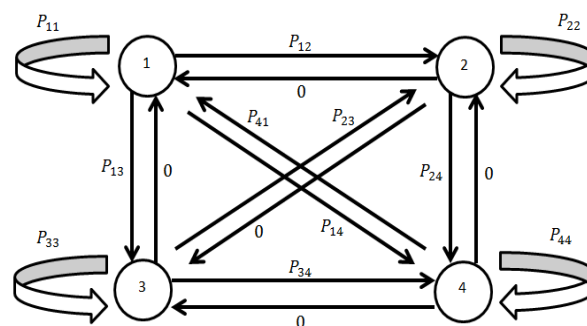
Perlunya pemeliharaan secara berkala dimana pengeluaran pada perawatan ini disimbolkan nilai  $C2i$  pada setiap item-i maka dapat dinyatakan  $C2i = \text{Waktu rata-rata pemeliharaan perbaikan} \times \text{perawatan downtime}$

### G. Pengeluaran Cost Average

Pada kasus penilaian mesin secara downtime serta pencegahan pada mesin yang kurang menguntungkan didapatkan biaya pengeluaran yang disimbolkan  $E(C)$ .

### H. Fungsi Premi asuransi

Fungsi dalam rangka pengembalian status dari kerusakan dan diharapkan penemuan terbaru dengan pemberian solusi alternatif dalam rangka peningkatan nilai sesuai dengan kondisi barang awal bisa dijelaskan pada Gambar 1 yaitu perpindahan state  $P=Q$ .



Gambar 1. Perpindahan State

Analisis perhitungan probabilitas perpindahan tiap variabel ( ), menggunakan perhitungan sederhana dan masih umum dengan nilai peluang bersyarat [19] pada persamaan sebagai berikut :

$$\mu = \begin{bmatrix} 1/\mu_{00} & 1/\mu_{01} & 1/\mu_{02} & 1/\mu_{03} & 1/\mu_{04} \\ 1/\mu_{10} & 1/\mu_{11} & 1/\mu_{12} & 1/\mu_{13} & 1/\mu_{14} \\ 1/\mu_{20} & 1/\mu_{21} & 1/\mu_{22} & 1/\mu_{23} & 1/\mu_{24} \\ 1/\mu_{30} & 1/\mu_{31} & 1/\mu_{32} & 1/\mu_{33} & 1/\mu_{34} \\ 1/\mu_{40} & 1/\mu_{41} & 1/\mu_{42} & 1/\mu_{43} & 1/\mu_{44} \end{bmatrix}$$

$$\mu_{ij}(t) = \lim_{t \rightarrow u} P_{ij} \frac{1}{\mu t} \frac{(t,u) - (\delta_{ij})}{\mu t} \text{ dengan } \delta_{ij} \text{ kronecker delta [20] dengan } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

implementasi solusi terbaik dalam optimalisasi peluang transisi dengan matriks infinitesimal generator (matriks pembuatan), yaitu mengarahkan matriks diagonal (D), matriks vektor *eigen* (A), dan *invers* dari matriks A (C) didapatkan persamaan:

$$P_{ij}(t) = \sum_{k=0}^4 a_{ik} c_{kj} e^{d_k t} \quad (9)$$

Implementasi densitas dari variabel acak( ) dengan:

$$f_{T(x)}(t) = P_{ij}(t) \mu_{ij} \quad (10)$$

Lanjut dengan perhitungan premi bersih sehingga mendapatkan :

$$\bar{A}'_{x:\overline{n}|} = \sum_{k=0}^4 \frac{1}{(\delta - d_k)} (1 - e^{-(\delta - d_k)n}) a_{ik} c_{kj} \mu_{ij} \quad (11)$$

### I. Proses Skokastik

Proses stokastik  $X = \{X(t), t \in T\}$  adalah suatu koleksi (gugus, himpunan, atau kumpulan) dari peubah acak yang memetakan suatu ruang contoh (*sample space*) S. Untuk setiap  $t$  pada gugus (himpunan) indeks T,  $X(t)$  adalah suatu peubah acak. Dimana  $t$  sebagai waktu (meskipun dalam berbagai penerapannya  $t$  tidak selalu menyatakan waktu), dan  $X(t)$  sebagai *state* (keadaan) dari proses pada waktu  $t$  [21]. Jadi analisis ini bukan suatu teknik optimasi melainkan suatu teknik deskriptif [22]. Jika pada waktu  $t$  proses stokastik  $\{X_t, t=0,1,\dots\}$  berada pada *state*  $i$ , maka kita tuliskan kejadian ini sebagai  $X_t=i$ . Terdapat suatu peluang tetap  $P_{ij}$  yang bersifat bebas terhadap waktu maka berlaku.  $P\{X_{t+1}=j | X_0=i, \dots, X_t=i\} = p\{X_{t+1}=j | X_t=i\}$  [23], Dengan  $i = \text{state ke- } i; j = \text{state ke- } j, t = \text{waktu } i_0, \dots, i_{t-1}, i, j$  dan semua  $t \geq 0$  [24]

### J. Peluang Transisi $n$ -step

Jika sebuah rantai *markov*  $\{X_t, t=0,1,2,\dots\}$  dengan ruang *state*  $\{0,1,\dots,M\}$ , maka peluang sistem itu dalam *state*  $i$  pada suatu *state*  $j$  pada pengamatan sebelumnya dilambangkan dengan P pada peluang transisi  $n$ -step  $P_{ij}(n)$  adalah peluang bersyarat suatu sistem yang berada pada *state*  $i$  akan berada pada *state*  $j$  setelah proses mengalami  $n$  transisi [14]. Jadi,  $P_{ij}(n) = P\{X_n=j | X_0=i, i,j \in \{0,1,2,\dots\}\}$  Untuk setiap  $n=1,2,\dots$  Tentunya  $P_{ij}(1) = P_{ij}$ . Nilai  $p_{i,j}$  diatas menyatakan bahwa, jika proses tersebut berada pada *state*  $i$  [25], maka berikutnya akan beralih ke *state*  $j$ . Karena nilai peluang adalah tak negatif dan karena proses tersebut harus mengalami transisi ke suatu *state*, maka:

$$P_{i,j} \geq 0, \text{ untuk semua } i,j \in \{0,1,2,\dots\} \quad (12)$$

$$\sum_j p_{i,j} = 1, \text{ untuk semua } i \in \{0,1,2,\dots\} \quad (13)$$

### K. Persamaan Chapman-Kolmogorov

Persamaan *Chapman-Kolmogorov* merupakan sebuah metode untuk menghitung peluang transisi dalam  $n$ -step. Persamaan *Chapman-Kolmogorov* memberikan metode untuk menentukan transisi  $n$ -step.

$$P_{ij}(n) = \sum_{k=0}^M P_{ik}(m) P_{kj}(n-m) \quad (14)$$

### L. Vektor Keadaan ( State Vector)

*State* atau keadaan pada rantai *markov* yang ditulis dalam bentuk vektor yang dinamakan vektor *state* (*state vector*). Vektor *state* untuk sebuah pengamatan pada suatu rantai *markov* dengan  $X(t)$  *state* adalah vektor baris  $x$ , dapat dituliskan  $x = [x_1, x_2, \dots, x_i]$ . Jika P merupakan matriks transisi rantai *markov* dan  $x(n)$  adalah vektor *state* pada pengamatan ke- $n$ , maka

$$x(n) = P^n x_0, \text{ dimana } x_0 \text{ matriks kejadian } x = [x_1, x_2, \dots, x_i] \quad (15)$$

### M. Peluang Steady State

Proses *markov* akan menuju *steady state* (keseimbangan) artinya setelah proses berjalan beberapa periode, peluang status akan selalu tetap. Analisis rantai *markov* saat ini banyak dikembangkan juga

dalam bentuk model *markov* tersembunyi (HMM). Peluang peralihan di masa depan yang tidak bergantung pada keadaan awal. Dimana peluang ini adalah peluang peralihan yang sudah mencapai keseimbangan sehingga tidak akan berubah terhadap perubahan waktu yang terjadi. Prinsip ini digunakan untuk mengamati berapa *state* untuk menuju titik seimbang. Sehingga didapat *n*-langkah yang akan menjadi *steady state*[26]. Syarat-syarat *steady state* adalah distribusi stasioner, bersifat ergodik, dan *interlinked property of state*[27]. Berdasarkan metodologi penelitian, langkah-langkah aplikasi rantai *Markov* antara lain dapat menampilkan dan menggunakan data awal (data yang sudah ada). Pembentukan interval dan *state*, menentukan probabilitas *state* dan probabilitas transisi, dan menulis *state* matriks probabilitas transisi dengan tranfer *state* dan melakukan simulasi dan menganalisis hasil dari simulasi.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada total waktu pada setiap komponen berat yang mengalami kerusakan pada mesin spiral pada tahun 2021 dan tahun 2022 dapat dilihat dengan adanya kenaikan persentase jumlah kerusakan mesin, perlunya identifikasi dalam setiap komponen mesin untuk melihat tingkat kerusakan pada mesin spiral dapat dilihat dari tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 2. Data jumlah kerusakan komponen beserta jumlah kenaikan persentase *downtime*.

No	Komponen Kerusakan <i>Spiral Pipe Machine</i>	<i>Downtime</i> Jam /Bulan (2021)	<i>Downtime</i> Jam /Bulan (2022)	<i>Persentase</i> %
1	Hidrolis	72.85	78,9	7.66%
2	Sistem Kontrol	12.61	25.80	51.12%
3	<i>Trafo Welding</i>	17.84	19.71	9.49%
4	Bongkar <i>Roll Hold Down</i>	72.61	83.72	13.27%
5	<i>WireFeeder</i>	38.84	40.44	3.96%
6	<i>Cutting Plasma</i>	17.34	34.62	49,91%
7	<i>Elektrode Macet</i>	69.19	78.90	12.30%
8	Motor/ <i>Gearbox Milling</i>	88.16	91.23	3.36%
9	<i>Conveyor Milling</i>	27.34	33.18	17.60%
10	Sikat <i>Gram Milling</i>	61.17	82.5	25.85%
	Total <i>Downtime</i>	477.95	569	-

#### B. Jumlah Komponen Kerusakan Mesin

Tabel 3. Data jumlah komponen kerusakan mesin

No	Type Komponen	Jumlah
1	Hidrolis	3
2	Sistem Kontrol	4
3	<i>Trafo Welding</i>	4
4	Bongkar <i>Roll Hold Down</i>	1
5	<i>Wire Feeder</i>	2
6	<i>Cutting Plasma</i>	2
7	Elektro Macet	6
8	Motor / <i>Gearbox Milling</i>	5
9	<i>Conveyor Milling</i>	8
10	Sikat <i>Gram Milling</i>	3

#### C. Data Waktu Pemeliharaan *Preventif*

Data waktu pemeliharaan pada komponen mesin setiap bulan bisa dilihat di tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Data waktu pemeliharaan *preventive*

No (1)	Mesin (2)	Jumlah (3)	Waktu Mesin (4)	Total Waktu Mesin / Bulan (5)	Total waktu (Jam/bulan)	Total Waktu (Jam/tahun)
1	Hidroliis	3	24.28	72.85	1.21	14.52
2	Sistem Kontrol	4	3.15	12.61	0.21	2.52
3	Trafo Welding	4	4.46	17.84	0.29	3.48
4	Bongkar Roll Hold Down	1	72.61	72.61	1.21	14.52
5	Wirefeeder	2	19.42	38.84	0.64	7.68
6	Cutting Plasma	2	8.67	17.34	0.28	3.36
7	Elektrode Macet	6	11.53	69.19	1.15	13.80
8	Motor / Gearbox Milling	5	17.63	88.16	1.46	17.52
9	Conveyor Milling	8	3.41	27.34	0.45	5.40
10	Sikat Gram Milling	3	20.39	61.17	1.01	12.12

#### D. Data Biaya Downtime

Berikut disampaikan data biaya perbaikan pemeliharaan pada perusahaan yaitu biaya *downtime* yang perlu dianalisa lebih lanjut sehingga menghasilkan nilai optimalisasi data[28] yang diperlukan dalam rangka memberikan penilaian yang ada.

Tabel 5. Data Biaya Downtime

No	Komponen mesin	Jumlah	Biaya <i>down time</i> /jam	Total Biaya Downtime
1	Hidroliis	3	Rp.2.432.000	Rp.7.296.600
2	Sistem Kontrol	4	Rp.12.712.000	Rp.50.848.000
3	Trafo Welding	4	Rp.1.268.730	Rp.5.074.920
4	Bongkar Roll Hold Down	1	Rp.4.711.600	Rp. 4.711.600
5	Wirefeeder	2	Rp.1.430.000	Rp.2.860.000
6	Cutting Plasma	2	Rp.3.424.300	Rp.6.848.600
7	Elektrode Macet	6	Rp.3.568.200	Rp.21.409.200
8	Motor / Gearbox Milling	5	Rp.8.331.000	Rp.41.655.000
9	Conveyor Milling	8	Rp.2.480.152	Rp.19.841216
10	Sikat Gram Milling	3	Rp.936.000	Rp.2.808.000

#### D. Pengolahan Data

Untuk menentukan peluang status akan ditentukan terlebih dahulu besarnya probabilitas transisi yang dapat dihitung berdasarkan proporsi jumlah masing masing status yang dialami[29], untuk selanjutnya dibuat matriks awal yang merupakan pemeliharaan yang dilaksanakan perusahaan. Berikut diuraikan hasil awal matrik berdasarkan tabel probabilitas transisi komponen mesin type A hingga J maka didapatkan nilai probabilitas dari kondisi komponen type A hingga J[7,].

Berdasarkan tabel probabilitas transisi pada komponen mesin maka didapatkan nilai probabilitas dari kondisi semua komponen mesin *spiral pipe* dengan pengklasifikasian sebagai berikut:

Tabel 6. Data Transisi Status Mesin Spiral.

A	Kondisi Baik ke Baik
B	Kondisi Baik ke Ringan
C	Kondisi Baik ke Sedang
D	Kondisi Baik ke Berat
E	Kondisi Ringan ke Ringan
F	Kondisi Ringan ke Sedang
G	Kondisi Ringan ke Berat
H	Kondisi Sedang ke Sedang
I	Kondisi Sedang ke Berat
J	Kondisi Berat ke Baik

Tabel 7. Transisi status

Bulan/ Tahun	Transisi Status									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Januari	1	0	0	0	0	3	*	*	2	1
Februari	0	0	0	*	*	*	*	*	*	1
Maret	0	0	0	0	*	0	*	4	*	*
April	0	0	0	*	2	*	1	*	0	*
Mei	1	0	0	1	*	*	0	*	0	*
Juni	0	0	0	0	*	*	1	0	0	*
Juli	0	0	2	0	*	*	2	0	5	*
Agustus	0	2	1	0	*	*	*	1	0	0
September	1	1	1	0	*	2	*	0	0	0
Oktober	0	0	*	0	*	*	1	0	1	0
November	0	1	*	0	*	*	0	*	0	0
Desember	0	1	*	0	*	1	1	1	0	0

## Kondisi Baik

1. Kondisi Baik ke Baik = 0,818
2. Kondisi Baik ke Ringan = 0,081
3. Kondisi Baik ke Sedang = 0,01
4. Kondisi Baik ke Berat = 0,056

## Kondisi Rusak Ringan

1. Kondisi Ringan ke Ringan = 0,216
2. Kondisi Ringan Ke Sedang = 0,041
3. Kondisi Ringan ke Berat = 0,013

## Kondisi Rusak Sedang

1. Kondisi Sedang ke sedang= 0,333
2. Kondisi Sedang ke Berat = 0,25

## Kondisi Rusak Berat

1. Kondisi Berat ke Berat= 0,38

Tabel 8. Output Matrik Komponen Mesin *Spiral*

I	J	1 (j)	2(j)	3(j)	4(j)
	Baik	Baik	Ringan	Sedang	Berat
Baik		0	0	1	0
Ringan		0,63	0,25	0	0,12
Sedang		0	1	0	0
Berat		1	0	0	0

Jika perbaikan item baru dilakukan setelah item tersebut mengalami kerusakan berat, dengan kata lain untuk status 1, 2 dan 3 tetap dibiarkan saja. Tetapi seandainya kebijaksanaan itu dirubah dimana pemeliharaan dilakukan apabila item berada pada status 2, 3 dan 4 sehingga menjadi status 1[30] juga bisa dilakukan. Status dan kondisi kerusakan (status 1 adalah kondisi baik, status 2 adalah kondisi rusak ringan, status 3 kondisi rusak sedang, dan status 4 adalah kondisi rusak berat)[31]

Tabel 9. Status Tindakan dan Kategori *Policy*

Keputusan	Tindakan yang dilakukan	Policy	Keterangan	d <sub>1</sub> (P)	d <sub>2</sub> (P)	d <sub>3</sub> (P)	d <sub>4</sub> (P)
1	Tidak dilakukan tindakan	P <sub>0</sub>	Pemeliharaan korektif pada status 4	1	1	1	3
2	Dilakukan pemeliharaan pencegahan (sistem kembali ke status sebelumnya)	P <sub>1</sub>	Pemeliharaan korektif pada status 4 dan pemeliharaan pencegahan pada status 3	1	1	2	3



3	Pemeliharaan korektif (sistem kembali ke status 1)	P <sub>2</sub>	Pemeliharaan korektif pada status 3 dan 4, serta pemeliharaan pencegahan pada status 2	1	2	3	3
		P <sub>3</sub>	Pemeliharaan korektif pada status 4, serta pemeliharaan pencegahan pada status 2 dan 3	1	2	2	3
		P <sub>4</sub>	Pemeliharaan korektif pada status 3 dan 4	1	1	3	3

Probabilitas status kerusakan mesin secara keseluruhan menggunakan persamaan linear, diperoleh probabilitas setiap status sebagai berikut:  $X_1 = 0,08$ ;  $X_2 = 0,67$ ;  $X_3 = 0,17$ ;  $X_4 = 0,08$  dengan ekspektasi biaya perawatan dari probabilitas setiap status yang telah diperoleh, kemudian ditentukan estimasi biaya perawatan yang didapatkan dengan acuan biaya ekspektasi paling minimum pada status biaya perawatan dari total komponen mesin.

$$[0,8 \ 0,67 \ 0,17 \ 0,08] \begin{matrix} \text{Rp.0} \\ \text{Rp.50.848.000} \\ \text{Rp.65.074.920} \\ \text{Rp.90.870.530} \\ \hline \text{Rp.206.793.450} \end{matrix}$$

Biaya ekspektasi paling minimum dari tiap komponen mesin diperoleh hasil berikut :

$$[0,8 \ 0,67 \ 0,17 \ 0,08] \begin{bmatrix} 0,087 \\ 0,115 \\ 0,065 \\ 0,182 \\ 0,079 \\ 0,158 \\ 0,072 \\ 0,117 \\ 0,052 \\ 0,073 \end{bmatrix} = \text{Rp. 174.707.874} \begin{bmatrix} \text{Rp. 14.211.723} \\ \text{Rp. 18.785.611} \\ \text{Rp. 10.617.954} \\ \text{Rp. 29.730.272} \\ \text{Rp. 12.904.898} \\ \text{Rp. 25.809.797} \\ \text{Rp. 11.761.426} \\ \text{Rp. 19.112.318} \\ \text{Rp. 8.494.363} \\ \text{Rp. 11.924.779} \end{bmatrix}$$

Sehingga ekspektasi biaya perawatan pada komponen-komponen mesin spiral pada usulan kebijakan 1 adalah sebesar Rp. 174.707.874 dan dapat di transformasikan pada tiap komponen mesin spiral.

#### Enumerasi Sempurna

Pada keputusan mempunyai sebuah *S Stationary Policy*, bahwa nilai *P* (Probabilitas) dan *R* adalah matriks transisi (satu langkah)[32] dan matriks pendapatan yang berkaitan dengan *policy* ke- *k*[33], dengan  $S = 1,2,3,\dots$ ,  $S$ , dengan langkah enumerasi dengan penentuan harga  $V_i^s$  yang merupakan satu langkah pada *state*  $I = 1,2,3,\dots,m$ , dan dilanjutkan dengan nilai :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0,63 & 0,25 & 0,12 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 7 & 6 & 3 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Sehingga nilai  $V_i^k$ :

**Tabel 10.** Status Kerusakan Mesin Spiral

	<i>Stationary Policy</i>			<i>V<sub>i<sup>s</sup></sub></i>				Berdasarkan kondisi kerusakan mesin spiral			
	1	2	3	$\pi_1^s$	$\pi_2^s$	$\pi_3^s$	$E^s$				
1	0	0	3	0	0	1	3				
2	0	1.25	0.12	$\frac{6}{59}$	$\frac{31}{59}$	$\frac{22}{59}$	0.071				

3	0	0	-1	0	0	1	-1
4	0	1,25	-1	0	0	1	-1
5	0	0	0.12	5/154	69/154	80/154	0.06
6	1	1.25	0.3	6/59	0	1	3.10
7	0	0	0.12	5/137	62/137	70/137	0.061
8	0	1.25	0.12	12/135	69/135	54/135	0.69

Perhitungan probabilitas *stationary policy* nya digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\pi^s \cdot P^s = \pi^s \tag{16}$$

$$\pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_n = 1 \tag{17}$$

Pada hasil diatas dapat diketahui bahwa nilai enumerasi untuk solusi optimum terbaik yang direkomendasikan terhadap kondisi kerusakan menggunakan solusi nomer 6 menuju *state 7* yaitu solusi optimum yang paling berpengaruh terjadi pada mesin *cutting plasma* yang perlu dilakukan perubahan. Pada pengujian *markov chain* tiap komponen didapatkan nilai probabilitas perencanaan pemeliharaan fasilitas sepuluh komponen mesin produksi berdasarkan kegiatan pemeliharaan (P), status kerusakan ( ) p1 dan probabilitas transisi dalam keadaan *steady state* (mapan) [34] untuk masing-masing komponen, yaitu:

Tabel 11. Biaya Perawatan dan Probabilitas Transisi Komponen Mesin Spiral

No	Komponen mesin		Biaya perawatan				Biaya	Probabilitas Transisi				Biaya
			P1	P2	P3	P4		P1	P2	P3	P4	
1	Hidrolis	P	0.536	0.107	0.236	0.121	2813351	0.768	0.148	0.058	0.026	1287871
		1					1					1
		P	0.702	0.114	0.158	0.026	1827368	0.381	0.212	0.318	0.089	3948957
		2					5					9
		P	0.529	0.081	0.078	0.312	3839668	0.112	0.129	0.265	0.494	7055236
		3					5					3
2	Sistem Kontrol	P	0.447	0.113	0.342	0.098	33.26907	0.114	0.054	0.321	0.511	7274942
		4					1					2
		P	0.452	0.117	0.356	0.232	5149982	0.118	0.431	0.120	0.331	5829356
		1					5					9
		P	0.322	0.104	0.417	0.157	4803218	0.187	0.356	0.111	0.346	5583410
		2					2					8
3	Trafo Welding	P	0.408	0.128	0.432	0.032	3828127	0.435	0.098	0.157	0.310	4437591
		3					4					0
		P	0.213	0.321	0.390	0.076	4794592	0.032	0.084	0.123	0.761	8409524
		4					9					2
		P	0.525	0.123	0.236	0.116	3253965	0.115	0.123	0.671	0.091	6007133
		1					8					8
4	Bongkar Roll Hold Down	P	0.289	0.435	0.124	0.152	4180894	0.221	0.231	0.128	0.042	2281090
		2					3					3
		P	0.457	0.157	0.030	0.356	4050373	0.081	0.078	0.312	0.529	7487684
		3					7					1
		P	0.435	0.032	0.435	0.098	4055837	0.113	0.342	0.098	0.447	6388672
		4					4					8
5	Wirefeede	P	0.089	0.381	0.212	0.318	6121347	0.081	0.078	0.312	0.471	6939004
		1					2					1
		P	0.494	0.112	0.129	0.265	3880304	0.113	0.342	0.098	0.533	7202232
		2					2					8
		P	0.300	0.157	0.187	0.356	5750753	0.356	0.134	0.191	0.681	8337401
		3					1					8
5	Wirefeede	P	0.435	0.032	0.435	0.098	4055837	0.452	0.112	0.078	0.642	7096211
		4					4					4

<i>r</i>		1				4				4				
6	Cutting Plasma	P	0.090	0.432	0.157	0.321	5993397	0.321	0.234	0.400	0.045	4191911		
		2					0					5		
		P	0.032	0.321	0.061	0.586	7358041	0.044	0.435	0.120	0.401	6508943		
		3					7					1		
		P	0.043	0.071	0.576	0.310	7199937	0.096	0.543	0.099	0.262	5519101		
		4					5					1		
		P	0.076	0.123	0.390	0.411	7103077	0.901	0.021	0.303	0.075	2883235		
		1					0					8		
		P	0.087	0.056	0.076	0.781	8153999	0.453	0.098	0.122	0.327	4357863		
		2					3					0		
7	Elektrode Macet	P	0.080	0.165	0.564	0.056	5123199	0.761	0.065	0.108	0.066	1649147		
		3					1					8		
		P	0.032	0.061	0.632	0.518	9509028	0.076	0.032	0.302	0.590	7796075		
		4					8					0		
		P	0.450	0.231	0.145	0.134	3268247	0.543	0.157	0.187	0.356	5535381		
		1					9					2		
		P	0.301	0.057	0.321	0.321	5490581	0.565	0.032	0.435	0.098	4055837		
		2					9					4		
		P	0.393	0.098	0.452	0.435	7647567	0.489	0.113	0.231	0.145	3450476		
		3					0					4		
8	Motor-Gearbox Milling	P	0.239	0.145	0.134	0.231	3736464	0.081	0.432	0.057	0.321	5306117		
		4					2					0		
		P	0.435	0.098	0.452	0.356	6900227	0.356	0.134	0.851	0.361	9846249		
		1					0					8		
		P	0.623	0.145	0.134	0.098	2478284	0.452	0.112	0.637	0.073	5555366		
		2					2					6		
		P	0.213	0.321	0.321	0.145	4973109	0.134	0.218	0.430	0.078	4640730		
		3					7					8		
		P	0.761	0.082	0.044	0.113	1727799	0.231	0.145	0.134	0.510	6375804		
		4					9					2		
9	Conveyor Milling	P	0.400	0.321	0.145	0.134	3659436	0.218	0.321	0.076	0.615	7735473		
		1					9					7		
		P	0.611	0.044	0.113	0.232	3162594	0.145	0.044	0.087	0.276	3400141		
		2					4					6		
		P	0.625	0.321	0.321	0.021	3800069	0.028	0.114	0.218	0.360	5399376		
		3					7					5		
		P	0.015	0.452	0.435	0.098	5881386	0.011	0.019	0.081	0.111	1689341		
		4					3					2		
		10	Sikat Gram Milling	P	0.114	0.753	0.016	0.117	4489733	0.232	0.022	0.021	0.275	2841452
				1					2					8
P	0.696			0.056	0.032	0.216	2506696	0.115	0.033	0.157	0.695	7797165		
2							1					6		
P	0.132			0.549	0.054	0.265	5264284	0.021	0.019	0.453	0.493	7859742		
3							4					8		
P	0.043			0.462	0.064	0.431	6525223	0.011	0.065	0.021	0.097	1344474		
4							0					2		

Komponen *hidrolis* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.536$  ;  $\pi_2 = 0.107$  ;  $\pi_3 = 0.236$  ;  $\pi_4 = 0.121$  dan setelah dianalisa maka dipilih P1 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.748$ ;  $\pi_2 = 0.148$ ;  $\pi_3 = 0.058$ ;  $\pi_4 = 0.026$ . Pada sistem kontrol : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.435$ ;  $\pi_2 = 0.098$ ;  $\pi_3 = 0.157$  ;  $\pi_4 = 0.310$ ; dan setelah dianalisa maka dipilih P3 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.428$ ;  $\pi_2 = 0.128$ ;  $\pi_3 = 0.432$  ;  $\pi_4 = 0.032$ . *Trafo welding* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.525$ ;  $\pi_2 = 0.123$ ;  $\pi_3 = 0.236$  ;  $\pi_4 = 0.116$  dan setelah dianalisa maka dipilih P2 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.221$ ;  $\pi_2 = 0.231$ ;  $\pi_3 = 0.128$ ;  $\pi_4 = 0.042$ . Bongkar *roll hold down*: Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.081$ ;  $\pi_2 = 0.078$ ;  $\pi_3 = 0.312$ ;  $\pi_4 = 0.471$  dan setelah dianalisa maka dipilih P2 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.494$ ;  $\pi_2 = 0.112$ ;  $\pi_3 = 0.129$ ;  $\pi_4 =$

0.265. *Wirefeeder* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.321$ ;  $\pi_2 = 0.234$ ;  $\pi_3 = 0.400$ ;  $\pi_4 = 0.045$ ; dan setelah dianalisa maka dipilih P1 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.511$ ;  $\pi_2 = 0.113$ ;  $\pi_3 = 0.231$ ;  $\pi_4 = 0.145$ . *Cutting plasma* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.080$ ;  $\pi_2 = 0.165$ ;  $\pi_3 = 0.564$ ;  $\pi_4 = 0.056$  dan setelah dianalisa maka dipilih P3 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.761$ ;  $\pi_2 = 0.065$ ;  $\pi_3 = 0.108$ ;  $\pi_4 = 0.066$ . *Elektrode macet* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.450$ ;  $\pi_2 = 0.231$ ;  $\pi_3 = 0.145$ ;  $\pi_4 = 0.134$  dan setelah dianalisa maka dipilih P3 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.489$ ;  $\pi_2 = 0.113$ ;  $\pi_3 = 0.231$ ;  $\pi_4 = 0.145$ . *Motor/gearbox milling*: Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.761$ ;  $\pi_2 = 0.082$ ;  $\pi_3 = 0.044$ ;  $\pi_4 = 0.113$  dan setelah dianalisa maka dipilih P3 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.134$ ;  $\pi_2 = 0.218$ ;  $\pi_3 = 0.430$ ;  $\pi_4 = 0.078$ . *Conveyor milling* : Untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.611$ ;  $\pi_2 = 0.044$ ;  $\pi_3 = 0.113$ ;  $\pi_4 = 0.232$  dan setelah dianalisa maka dipilih P4 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.011$ ;  $\pi_2 = 0.019$ ;  $\pi_3 = 0.081$ ;  $\pi_4 = 0.111$ . *Sikat gram milling* : untuk pemeliharaan awal atau yang dilakukan perusahaan nilai  $\pi_1 = 0.696$ ;  $\pi_2 = 0.056$ ;  $\pi_3 = 0.032$ ;  $\pi_4 = 0.216$  dan setelah dianalisa maka dipilih P4 hasil probabilitas  $\pi_1 = 0.011$ ;  $\pi_2 = 0.065$ ;  $\pi_3 = 0.021$ ;  $\pi_4 = 0.097$ .

## VII. SIMPULAN

Biaya awal perawatan perusahaan pada mesin spiral Rp.206.793.450 dan didapatkan perawatan usulan 1 sebesar Rp.174.707.874, sehingga menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp.32.085.576. atau dalam persentase sebesar 15.52% dibanding biaya perawatan awal. Pada biaya perawatan usulan 2 sebesar Rp.177.020.697, sehingga menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp.29.772.753 atau dalam persentase sebesar 14.40% dibanding biaya perawatan awal. Sedangkan biaya perawatan usulan 3 sebesar Rp.168.493.139, sehingga menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp.38.300.311. atau dalam persentase sebesar 18.52% dibanding biaya perawatan awal. Implementasi yang didapat dari perhitungan metode *markov chain* pada perawatan mesin spiral yang diusulkan paling minimum menggunakan kebijakan perawatan usulan 3 dengan pemeliharaan pencegahan pada status ringan dan pemeliharaan korektif pada status sedang dan berat, dengan melakukan *overhaul* pada *state* 1 atau 2 dalam *stationary policy* S ke 6.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis kepada semua pihak yang membantu ataupun memberikan dukungan terkait penelitian yang dilakukan seperti bantuan fasilitas penelitian dan lainnya.

## REFERENSI

- [1] A. Z. Arsyad, Muhammad ; Sultan, Manajemen Perawatan. Yogyakarta: CV Budi Utama, 2018.
- [2] G. C. Firmansyah, A. S. Herlambang, and W. Sumarmi, "Peran Sirkular Sampah Produk Untuk Meningkatkan Produktivitas Usaha Masyarakat Desa Bagorejo," J. Pemberdaya. Masy., vol. 9, no. 2, p. 172, Dec. 2021, doi: 10.37064/jpm.v9i2.9769.
- [3] G. C. F. Candra, "Analisis Produktivitas Styrofoam Di Masa Pandemi Covid-19 Menggunakan Metode Cobb Douglas Di PT KCS," Ind. Inov. J. Tek. Ind., vol. 11, no. 2, pp. 123–132, Sep. 2021, doi: 10.36040/industri.v11i2.3694.
- [4] A. Sudrajat, Pedoman Praktis Manajemen Perawatan Mesin Industri. Bandung: Retika Aditama, 2011.
- [5] S. A. Pratama, B. I. Putra, T. Industri, F. Sains, and U. M. Sidoarjo, "Analysis Of Machine Maintenance Using Markov," pp. 208–214, 2022.
- [6] A & D. Ni'mah, "Penerapan Preventive Maintenance Untuk Meningkatkan Kinerja Fasilitas Praktik Laboratorium Prodi Pendidikan Teknik Mesin Undara," J. Teknol., no. January 2015, pp. 1693–9522, 2015.
- [7] U. Nurhasan, A. Dyah Fatmawati, and B. Harijanto, "Implementasi Metode Fuzzy Time Series Markov Chain untuk Prediksi Harga Telur Puyuh," Inform. Mulawarman J. Ilm. Ilmu Komput., vol. 16, no. 2, p. 80, Oct. 2021, doi: 10.30872/jim.v16i2.5251.
- [8] Rr.Rochmoeljati, "Perencanaan Perawatan Mesin Menggunakan Metode Markov Chain Untuk Meminimumkan Biaya Perawatan," J. Prodi Tek. Ind. FTI-UPNV Jatim, pp. 63–74, 2012.
- [9] A. Candra, "Perencanaan Analisa Pemeliharaan Mesin Menggunakan Pendekatan Markov Chain Di PT. Cardsindo Tiga Perkasa," JITMI (Jurnal Ilm. Tek. dan Manaj. Ind., vol. 3, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.32493/jitmi.v3i1.y2020.p1-6.

- [10] J. F. Andry, "Implementasi Penerapan Markov Chain Pada Database Marketing Studi Kasus Pelanggan E-Commerce," *J. Syarikah*, vol. 5, no. 1, pp. 94–108, 2015.
- [11] S. Ross, *Introduction To Probability Models 9th Edition*. San Diego: Hartcourt Academic Press, 2016.
- [12] P. Optimasi, P. Produk, and F. Dan, "Jurnal PASTI Volume X No 3, 320 - 341 Perencanaan Optimasi Produksi Produk Freezer Dan Showcase Di PT FPS Jasan Supratman," vol. X, no. 3, pp. 320–341, 2014.
- [13] I. Irdianto and S. Suhartini, "Penggunaan Metode Markov Chain Dalam Penjadwalan Perawatanmesin Untuk Meminimalkan Biaya Kerusakan Mesin Dan Perawatan ...," *JISO J. Ind. ...*, vol. 2, no. September 2017, pp. 11–17, 2019.
- [14] F. N. Masuku, Y. A. R. Langi, and C. Mongi, "Analisis Rantai Markov Untuk Memprediksi Perpindahan Konsumen Maskapai Penerbangan Rute Manado-Jakarta Analysis of Markov Chain To Predict Consumer Movement of Airline Route Manado-Jakarta," *Ilm. Sains*, vol. 18, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [15] H. A. Taha, *Operations Research: An Introduction*. America: Prentice-Hall, 2002.
- [16] M. Muchlasin, "Analisis Kinerja Mesin Spiral Pipe Machine (SPM) Produksi Pipa Baja AWWA C 200 Dengan Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) Dan Fault Three Analysis (FTA) di PT. Indal Steel Pipe," *Eprints Univ. Muhammadiyah Gresik*, vol. 5, no. 3, pp. 248–253, 2020.
- [17] Sudjana, *Metode Statistik*, vi. Bandung: Tarsito, 2005.
- [18] T. I. Kusanti, Jani ; Tjendrowarsono, "Metode Markov Chain Untuk Prediksi Probing Terhadap Kinerja Promotor Pada Penjualan Oppo," *Infotekmesin*, vol. 11, no. 02, pp. 22–34, 2020.
- [19] M. N. Andriani, F. Firdaniza, and I. Irianingsih, "Reliabilitas Suatu Mesin Menggunakan Rantai Markov (Studi Kasus: Mesin Proofer Di Pabrik Roti Super Jam Banten)," *J. Mat. Integr.*, vol. 13, no. 1, p. 43, 2017.
- [20] I. Kasse, D. Didiharyono, and M. Maulidina, "Metode Markov Chain untuk Menghitung Premi Asuransi pada Pasien Penderita Penyakit Demam Berdarah Dengue," *Al-Khwarizmi J. Pendidik. Mat. dan Ilmu Pengetah. Alam*, vol. 7, no. 2, pp. 151–160, 2020, doi: 10.24256/jpmipa.v7i2.1251.
- [21] F. Kurniawan, *Manajemen Perawatan Industri*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [22] A. J. Hetzel, J. S. Liew, and K. E. Morrison, "The Probability that a Matrix of Integers Is Diagonalizable," *Am. Math. Mon.*, vol. 114, no. 6, pp. 491–499, Jun. 2007.
- [23] R. Manzini, A. Regattieri, H. Pham, and E. Ferrari, *Maintenance for Industrial Systems*. London: Springer London, 2010.
- [24] R. Rochmoeljati, "Perencanaan Perawatan Mesin Menggunakan Metode Markov Chain Untuk Meminimumkan Biaya Perawatan," *Tekmapro*, vol. 8, no. 01, 2016, [Online]. Available: <http://www.ejournal.upnjatim.ac.id/inde x.php/tekmapro/article/view/561>.
- [25] Assauri Sofyan., *Manajemen produksi dan operasi*, 1st ed. Jakarta, 2004.
- [26] M. I. Anshori, Nachnul, Mustajib, *Sistem Perawatan Terpadu (Integrated Maintenance System)*, 01 ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [27] L. Peng, L. Wen, L. Qiang, D. Yue, D. Min, and N. Y. Ying, "Research on Complexity Model of Important Product Traceability Efficiency Based on Markov Chain," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 166, pp. 456–462, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.02.065.
- [28] P. D. T. Y. Handayani, *Teknik Pemeliharaan Dan Perbaikan Sistem Elektronika*, Jilid 1. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar Dan Menengah. Departemen Pendidikan Nasional., 2018.
- [29] F. Kusuma, *Penjadwalan Perawatan Mesin Di Industri Menggunakan Metode Markov Chain*. 2018.
- [30] I. B. O. Ria, E. Nursanti, and H. Galuh, "Perencanaan Pemeliharaan Mesin Boiler Feed Pump Menggunakan Metode Markov Chain (Studi Kasus : PT.PJB Service Bolok, Kupang, NTT)," vol. 4, no. 2, pp. 226–237, 2021.
- [31] M. Eartono' . Ilvas Mas'udin', "Perencanaan Perawatan Mesin Dengan Metode Markov Chain Guna Menurunkan Biaya Perawatan," *J. Tek. Ind.*, vol. 3, no. 02, pp. 173–184, 2022.
- [32] D. Haryadi, "Pengaruh Pemeliharaan Dan Pengendalian Kualitas Terhadap Tingkat Produk Gagal Di PT.Granesia (Studi Kasus Pada Divisi Produksi Buku Percetakan)," *Sosiohumanitas*, vol. 21, no. 2, pp. 166–175, 2020, doi: 10.36555/sosiohumanitas.v21i2.1306.
- [33] T. and A. D. Dimiyati, *Operations Research*. Bandung: Sinar Baru Algesindo, 1999.
- [34] R. Prasyayudha, S. Setyawidayat, and F. Hunaini, "Effectiveness of Minor Overhaul Elimination on Decreasing Cost of Production in Hydroelectric Power Plant," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 71–88, 2021, doi: 10.21070/jeeeu.v5i1.1228.

**Conflict of Interest Statement:**

*The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.*