

# Analisis Reliabilitas dan Availabilitas pada Mesin Produksi dengan Sistem Seri Menggunakan Pendekatan Analisis Markov di PT. "X"

Luh Ade Arista Dwi Astarini dan Haryono  
Jurusan Statistika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia  
e-mail: haryono@statistika.its.ac.id

**Abstrak**—*Performance* mesin merupakan salah satu penentu besarnya kapasitas suatu sistem produksi. Sebuah riset menyatakan kebutuhan terhadap bahan bangunan akan mengalami peningkatan hingga tahun 2016 dikarenakan tingginya pembangunan di Indonesia. Peningkatan kebutuhan bahan bangunan membentuk persaingan antar produsen bahan bangunan. PT. "X" mendirikan pabrik baru untuk meningkatkan kapasitas produksi yakni Pabrik 4 (P4). P4 telah dilengkapi dengan peralatan terbaru dan tercanggih. Namun dengan komposisi mesin baru dan canggih, P4 masih memiliki kapasitas produksi yang rendah. Hal ini disebabkan oleh availabilitas dan reliabilitas mesin yang masih rendah. Selain itu, total biaya *maintenance* yang dikeluarkan untuk P4 paling tinggi dibandingkan *plant* lainnya. Sebagai bentuk evaluasi dan peningkatan *performance* mesin, dapat dilakukan penelitian menggunakan pendekatan persamaan diferensial yang diperoleh melalui diagram transisi Markov sebab kondisi subsistem saling dependen. Hasil penelitian menunjukkan interval perawatan setiap 55 jam (3 hari) sekali sebagai waktu optimal yang dapat meminimumkan biaya perawatan sistem. Selain itu agar *performance* sistem meningkat, subsistem *Rollermill* dan *Rawmill* 4 harus diberi prioritas utama dalam hal *maintenance*. Sebab perubahan laju kerusakan kedua subsistem memberikan perubahan yang signifikan terhadap availabilitas dan reliabilitas sistem.

**Kata Kunci**—Analisis Markov, Availabilitas, Persamaan Diferensial, Reliabilitas, Runge-Kutta.

## I. PENDAHULUAN

Memasuki tahun 2014, perekonomian global masih dibayangi oleh krisis Uni Eropa serta belum pulihnya ekonomi Amerika Serikat. Kondisi ini mendorong pemerintah Indonesia untuk menahan laju ekonomi dan pembangunan yang berdampak bagi sebagian besar industri di Indonesia seperti industri semen [1]. Meskipun demikian, berdasarkan data Asosiasi Semen Indonesia (2013) kebutuhan terhadap semen tetap mengalami peningkatan dari tahun 2012 hingga tahun 2014. Kenaikan kebutuhan semen diprediksi akan tetap naik hingga tahun 2016 dikarenakan tingginya pembangunan di Indonesia. Peningkatan kebutuhan semen membuat produsen semen di Indonesia bersaing dalam meningkatkan kapasitas produksi maupun kualitas produk.

Di tengah persaingan yang kian ketat, Pabrik 4 milik PT. "X" mengalami permasalahan dalam memenuhi target produksi serta pengeluaran biaya perawatan. Mesin-mesin produksi yang terdapat di Pabrik 4 merupakan mesin dengan spesifikasi terbaru dan tercanggih apabila dibandingkan dengan mesin-mesin di *plant* lainnya. Namun dengan

komposisi mesin baru dan canggih, Pabrik 4 masih memiliki kapasitas produksi yang rendah dibandingkan pabrik lainnya. Hal ini disebabkan oleh availabilitas dan reliabilitas mesin yang masih rendah. Mesin-mesin pada Pabrik 4 sering mengalami kerusakan dengan selang waktu singkat setelah mendapat perbaikan. Kebijakan *maintenance* yang diterapkan di PT. "X" adalah *corrective maintenance*. Total biaya *maintenance* yang dikeluarkan untuk Pabrik 4 paling tinggi dibandingkan pabrik lainnya. Sebagai bentuk evaluasi dan peningkatan *performance* mesin, dapat dilakukan penelitian menggunakan pendekatan persamaan diferensial yang diperoleh melalui diagram transisi Markov sebab kondisi subsistem saling dependen.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi kondisi sistem menggunakan analisis availabilitas, reliabilitas, dan dengan menentukan probabilitas sistem berada pada suatu *state* proses produksi di PT. "X", mengidentifikasi subsistem yang memberi pengaruh besar terhadap kondisi sistem, serta menganalisis reliabilitas sistem proses produksi di PT. "X" untuk menentukan penjadwalan *maintenance* yang dapat meminimumkan biaya sebagai tindak lanjut penyelesaian masalah.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Proses Produksi Semen di Pabrik 4 PT. "X"

Proses pembuatan semen secara garis besar melalui 5 tahapan yakni sebagai berikut.

1. Penambangan dan penyimpanan bahan mentah
2. Penggilingan dan pencampuran bahan mentah
3. Homogenisasi hasil penggilingan bahan mentah
4. Pembakaran
5. Penggilingan akhir hasil pembakaran

Produksi semen dilakukan di empat area utama yakni *Crusher*, *Rawmill*, *Kiln* dan *Finishmill*. *Crusher* merupakan area produksi awal (pencampuran). Tahap awal pembuatan semen dimulai dengan menambang batu kapur serta tanah liat, yang dilanjutkan dengan pencampuran kedua material utama. Penambahan bahan tambahan seperti pasir silika dan *copper slag* dilakukan sesuai spesifikasi produk.

*Rawmill* merupakan area produksi tahap kedua. Campuran batu kapur serta tanah liat, pasir silika, dan *copper slag* digiling di mesin penggilingan bahan baku (*Rawmill*) hingga mencapai kehalusan 90 mikron. *Kiln* merupakan area produksi ketiga yakni tahap pembakaran. Hasil pembakaran pada mesin *Kiln* berupa butiran-butiran yang dinamakan *terak* atau *clinker*. Wujud akhir terak adalah berupa butiran berwarna

hitam. *Finishmill* merupakan area terakhir pada proses produksi semen. Hasil dari penggilingan akhir berupa semen disimpan di dalam silo penyimpanan semen.

**B. Goodness of Fit Anderson-Darling**

Uji Anderson-Darling merupakan salah satu tes yang digunakan untuk menguji distribusi dari suatu sampel data. Hipotesis dari uji Anderson-Darling adalah sebagai berikut.

- $H_0$  : Data mengikuti distribusi tertentu
- $H_1$  : Data tidak mengikuti distribusi tertentu

Statistik uji Anderson-Darling dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$A^2 = -N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2i-1] \left[ \ln(F(t_i)) + \ln(1 - (F(t_{N+1+i}))) \right] \quad (1)$$

Keputusan diambil dengan membandingkan statistik uji terhadap nilai kritis (CV). Ketika nilai statistik uji lebih dari CV maka hipotesis awal ( $H_0$ ) ditolak [2].

**C. Analisis Reliabilitas dan Availabilitas**

Analisis reliabilitas dan availabilitas merupakan alat untuk meningkatkan kualitas dan mengurangi timbulnya kerusakan pada suatu sistem [3]. Terdapat beberapa istilah penting dalam analisis reliabilitas, yakni sebagai berikut.

**1. Laju Kerusakan**

Laju kerusakan adalah kecepatan suatu mesin atau komponen mencapai kondisi tidak beroperasi atau rusak yang dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\alpha(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

$f(t)$  merupakan distribusi dari suatu kumpulan data, sedangkan  $R(t)$  merupakan fungsi reliabilitas [4].

**2. Mean Time to Failure (MTTF) dan Mean Time to Repair (MTTR)**

Rata-rata waktu antar kerusakan (MTTF) merupakan rata-rata waktu suatu komponen mengalami kerusakan setelah dilakukan perbaikan. Sedangkan Rata-rata waktu antar perbaikan (MTTR) merupakan rata-rata waktu suatu komponen mengalami perbaikan. MTTF dan MTTR untuk data berdistribusi Eksponensial dinyatakan dalam persamaan berikut [4].

$$MTTF = \frac{1}{\alpha(t)}, MTTR = \frac{1}{\beta(t)} \quad (3)$$

Dengan  $\alpha(t)$  merupakan laju kerusakan dan  $\beta(t)$  merupakan laju perbaikan. MTTF dan MTTR data berdistribusi Normal dinyatakan sebagai rata-rata atau disimbolkan  $\mu$ . MTTF dan MTTR dari data berdistribusi Lognormal adalah sebagai berikut.

$$MTTF = MTTR = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (4)$$

MTTF dan MTTR data yang memiliki distribusi Weibull adalah sebagai berikut.

$$MTTF = MTTR = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (5)$$

**3. Availabilitas**

Availabilitas merupakan probabilitas suatu sistem beroperasi pada suatu waktu atau dalam selang waktu

tertentu. Availabilitas sistem dapat diukur menggunakan persamaan berikut [5].

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTBF} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (6)$$

**4. Fungsi Reliabilitas**

Fungsi reliabilitas merupakan sebuah fungsi yang menggambarkan komponen berjalan dengan baik dalam suatu satuan waktu  $t$  [6]. Ketika suatu data berasal dari distribusi Normal, maka fungsi reliabilitas data yang berasal dari distribusi Normal adalah sebagai berikut.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \quad (7)$$

Apabila data berdistribusi Log-Normal, maka fungsi reliabilitas adalah sebagai berikut.

$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(t) - \mu_N}{\sigma_N}\right] \quad (8)$$

dengan  $\Phi$  merupakan fungsi kepadatan kumulatif dari distribusi Normal. Data yang berasal dari distribusi Weibull, memiliki fungsi reliabilitas sebagai berikut.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (9)$$

Pada kondisi data berasal dari distribusi Eksponensial, maka fungsi reliabilitas dinyatakan sebagai berikut [7].

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

**D. Maximum Likelihood Estimation (MLE)**

*Maximum Likelihood Estimation* (MLE) merupakan metode penaksiran parameter dengan cara memaksimumkan fungsi likelihood pada suatu persamaan. Fungsi likelihood disimbolkan dengan huruf L yang dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$L(t_1, t_2, \dots, t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = f(t_1; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \times f(t_2; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \times \dots \times f(t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (11)$$

Sebagai langkah kedua, persamaan (11) dirubah ke dalam bentuk logaritma natural sebagai berikut.

$$\ln L(t_1, t_2, \dots, t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \ln f(t_1; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \times \ln f(t_2; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \times \dots \times \ln f(t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (12)$$

Selanjutnya persamaan (12) diturunkan terhadap  $\alpha_i$  sehingga dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{\partial \ln L(t_1, t_2, \dots, t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)}{\partial \alpha_i} = 0 \quad (13)$$

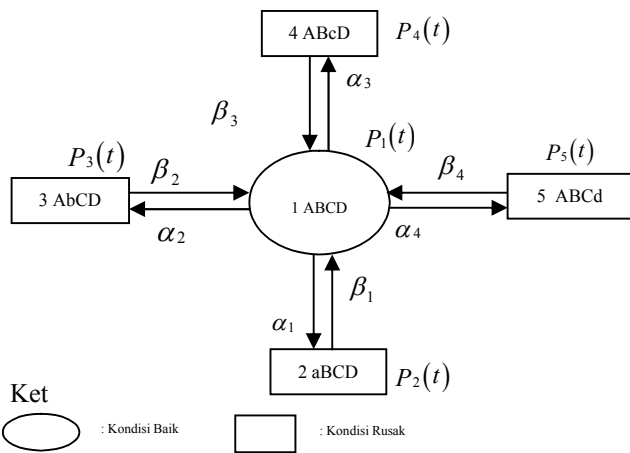
Dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Untuk mengecek fungsi telah mencapai kondisi optimum, maka persamaan (13) diturunkan kembali terhadap  $\alpha_i$  dan dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\frac{\partial^2 \ln L(t_1, t_2, \dots, t_k; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)}{\partial^2 \alpha_i} < 0 \quad (14)$$

Apabila turunan kedua bernilai negatif atau kurang dari nol, maka fungsi dinyatakan mencapai kondisi optimum [6].

**E. Analisis Markov terhadap Sistem Seri**

Diagram transisi Markov secara umum digambarkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Transisi Markov

Berikut dijelaskan pengertian dari simbol-simbol yang digunakan dalam diagram transisi.

- a. A, B, C, dan D merupakan simbol yang menyatakan subsistem dari proses produksi dalam kondisi baik.
- b. a, b, c, dan d merupakan simbol yang menyatakan subsistem dari proses produksi dalam kondisi rusak.
- c.  $\alpha_i$  dengan  $i = 1, 2, 3,$  dan  $4$  merupakan simbol yang menyatakan laju kerusakan subsistem A, B, C, dan D.
- d.  $\beta_i$  dengan  $i = 1, 2, 3,$  dan  $4$  merupakan simbol yang menyatakan laju perbaikan subsistem A, B, C, dan D.
- e.  $P_j(t)$  dengan  $j = 1, 2, 3,$  dan  $4$  merupakan simbol yang menyatakan probabilitas sistem berada pada *state* ke- $j$  di waktu ke- $t$ .

Berdasarkan pada gambar 1, diperoleh persamaan diferensial pada *state* 1 hingga *state* 5 sebagai berikut.

$$P'_1(t) = [-\alpha_1 - \alpha_2 - \dots - \alpha_4]P_1(t) + P_2(t)\beta_1 + P_3(t)\beta_2 + \dots + P_5(t)\beta_4 \quad (15)$$

$$P'_2(t) = \alpha_1 P_1(t) - P_2(t)\beta_1 \quad (16)$$

$$P'_3(t) = \alpha_2 P_1(t) - P_3(t)\beta_2 \quad (17)$$

$$P'_4(t) = \alpha_3 P_1(t) - P_4(t)\beta_3 \quad (18)$$

$$P'_5(t) = \alpha_4 P_1(t) - P_5(t)\beta_4 \quad (19)$$

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + \dots + P_5(t) = 1 \quad (20)$$

Persamaan (15) hingga (20) memiliki kondisi awal  $P_j(0) = 1$  untuk  $j = 1$  dan  $P_j(0) = 0$  untuk  $j$  lainnya.. Reliabilitas sistem dinyatakan dalam persamaan berikut [8].

$$R(t) = P_1(t) \quad (21)$$

**F. Metode Runge-Kutta**

Bentuk umum metode Runge-Kutta dijabarkan sebagai berikut.

$$y_0 = \alpha$$

dan,

$$y_{i+1} = y_i + hF(x_i, y_i)$$

Dengan  $i=0, 1, 2, \dots$  Fungsi  $F$  disebut sebagai fungsi kenaikan yang dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$F = \alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 + \dots + \alpha_m k_m$$

di mana  $m$  merupakan orde dari metode Runge-Kutta,  $k_i$  adalah konstanta yang dijabarkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i), \\ k_2 &= f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h), \\ &\vdots \\ k_m &= f\left(x_i + p_{m-1} h, y_i + q_{m-1,1} k_1 h + q_{m-1,2} k_2 h + \dots + q_{m-1,m-1} k_{m-1} h\right). \end{aligned} \quad (22)$$

Nilai-nilai  $\alpha_i, p_i,$  dan  $q_{ij}$  untuk suatu orde  $m$  dinyatakan dengan cara menyamakan persamaan dengan ekspansi deret Taylor orde  $m$  [9]. Metode Runge-Kutta orde 4

$$y_{r+1} = y_r + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (23)$$

dengan  $k_1$  diperoleh dari persamaan (23), dan  $k_2, k_3,$  dan  $k_4$  sebagai berikut [10].

$$\begin{aligned} k_2 &= hf\left(x_r + \frac{1}{2}h, y_r + \frac{1}{2}k_1\right) \\ k_3 &= hf\left(x_r + \frac{1}{2}h, y_r + \frac{1}{2}k_2\right) \\ k_4 &= hf(x_r + h, y_r + k_3) \end{aligned} \quad (24)$$

**G. Penentuan Waktu Perawatan Optimal dan Perhitungan Total Biaya Pemeliharaan**

Penentuan interval waktu penggantian optimal untuk meminimumkan ekspektasi total biaya penggantian per satuan waktu dalam jangka panjang mengikuti model stokastik. Ekspektasi biaya total per satuan waktu untuk waktu pengamatan  $t_p$  ditulis dengan  $C(t_p)$  sebagai berikut.

$$C(t_p) = \frac{\text{Ekspektasi Total Biaya dalam Interval Waktu } (0, t_p)}{\text{Panjang Interval}} \quad (25)$$

Di mana,

$$\text{Ekspektasi Total Biaya dalam Interval Waktu } (0, t_p) = C_p + C_f H(t_p)$$

dengan,

$C_p$  = Biaya penggantian terencana

$C_f$  = Ekspektasi biaya penggantian kerusakan

$H(t_p)$  = Ekspektasi banyak kerusakan dalam interval  $(0, t_p)$

Nilai  $C_p$  dan  $C_f$  dihitung dengan formulasi berikut.

$$C_p = \left( \begin{matrix} \text{banyak tenaga kerja} \times \text{biaya tenaga kerja} \\ \text{x lama kegiatan preventif} \end{matrix} \right) \times \text{jumlah mesin}$$

$$C_f = \sum_{i=1}^n \left( \begin{matrix} \text{rata-rata downtime} \times \text{banyak tenaga kerja} \\ \text{x biaya tenaga kerja} \end{matrix} \right) + \text{lost production}$$

**H. Maintenance**

*Maintenance* atau perawatan merupakan segala kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan mesin dalam kondisi beroperasi. Terdapat empat jenis sistem pemeliharaan yakni *corrective maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance,* dan *repairs maintenance* [11]. *Corrective maintenance* atau pemeliharaan perbaikan merupakan semua kegiatan yang dilakukan untuk mengembalikan kondisi mesin dari status rusak menjadi status beroperasi [7]. *Preventive maintenance* merupakan pemeliharaan terjadwal yang

dilakukan secara periodik [4]. *Predictive maintenance* merupakan sebuah cara perawatan yang menggunakan berbagai alat ukur spesifik untuk menilai sebuah perubahan pada suatu benda atau keadaan. *Repairs maintenance* merupakan suatu metode yang hanya melakukan perawatan ketika dibutuhkan atau terjadi kerusakan. [11].

I. Penelitian Terdahulu

Analisis avaiabilitas mesin pernah diterapkan oleh Gupta dan kawan-kawan (2004) pada proses pembuatan *butter-oil* dan oleh Agustina (2013) di sebuah perusahaan manufaktur yang memproduksi BOPP (*Biaxially Oriented Polypropylene*).

III. METODOLOGI PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian adalah data sekunder yang diperoleh dari PT. “X”. Data meliputi data usia pakai dan data lama waktu perbaikan yang terjadi di mesin *Lime Stone Crusher 7*, *Rawmill 4*, *Kiln*, dan *Rollermill*. Data yang digunakan dimulai dari bulan Juli 2012 sampai dengan bulan Desember 2013. Pengambilan data dilakukan oleh operator yang bertugas di masing-masing area produksi dengan bantuan komputer.

Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah usia pakai mesin *Lime Stone Crusher 7*, *Rawmill 4*, *Kiln*, serta *Rollermill* dan lama waktu perbaikan *Lime Stone Crusher 7*, *Rawmill 4*, *Kiln*, serta *Rollermill*. Usia pakai dimulai dari mesin mulai beroperasi hingga berhenti beroperasi karena mati, mendapatkan perbaikan atau pemeliharaan. Lama waktu perbaikan dihitung mulai dari mesin mulai diperbaiki sampai dengan selesai diperbaiki.

Langkah analisis yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Melakukan pendugaan dan pengujian kesesuaian distribusi untuk data usia pakai dan lama waktu perbaikan setiap subsistem dengan uji Anderson-Darling.
2. Menghitung nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) untuk masing-masing mesin.
3. Menghitung reliabilitas dan avaiabilitas masing-masing subsistem
4. Membentuk diagram transisi dan membuat persamaan diferensial berdasarkan diagram transisi.
5. Menghitung nilai probabilitas sistem berada pada *state ke-j* untuk kondisi *steady state* dan *transient state*.
6. Menghitung efek perubahan laju kerusakan atau laju perbaikan terhadap avaiabilitas dan reliabilitas sistem.
7. Menentukan waktu perbaikan optimum sistem.
8. Membandingkan hasil analisis dengan kondisi kebijakan yang sedang diterapkan di PT. “X”.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Reliabilitas dan Avaiabilitas di Masing-masing Subsistem

Pengujian distribusi data usia pakai dan lama waktu perbaikan dilakukan dengan *Goodness-of-fit* Anderson-Darling *Test*. Penentuan distribusi ditinjau dari nilai statistik uji Anderson-Darling terkecil yang signifikan jika dibandingkan dengan *critical value*. Nilai statistik uji dihitung

dengan formulasi yang di paparkan pada persamaan (1). Berdasarkan perhitungan diketahui data usia pakai subsistem *Lime Stone Crusher 7* dan *Rollermill* mengikuti distribusi Weibull. Sedangkan data usia pakai subsistem *Rawmill 4* dan *Kiln* mengikuti distribusi Lognormal. Data lama waktu perbaikan subsistem *Lime Stone Crusher 7* mengikuti distribusi Lognormal. Sedangkan data lama waktu perbaikan subsistem *Rawmill 4* dan *Rollermill* mengikuti distribusi Weibull. Data lama waktu perbaikan subsistem *Kiln* dinyatakan mengikuti distribusi Normal.

Berdasarkan hasil pengujian distribusi dapat ditentukan nilai MTTF dan MTTR dari data usia pakai dan lama waktu perbaikan subsistem. Berikut disajikan hasil perhitungan MTTF dan MTTR yang didasarkan pada Persamaan (3) hingga (5) untuk masing-masing subsistem.

Tabel 1.  
MTTF dan MTTR Tiap Subsistem

Subsistem	MTTF (jam)	MTTR (jam)
234CR1	296,572	0,497
344RM1	61,502	7,764
444KL1	653,981	2,186
547BE1	344,431	5,201

Tabel 1 menunjukkan bahwa subsistem *Kiln* memiliki rata-rata kerusakan tertinggi yakni sebesar 653,981 jam, yang berarti subsistem *Kiln* mengalami kerusakan setiap 653,981 jam sekali. Perhitungan avaiabilitas didasarkan pada Tabel 4.1 dengan menggunakan formula pada persamaan (6). Berdasarkan hasil perhitungan avaiabilitas untuk masing-masing subsistem, diketahui bahwa avaiabilitas terbesar dimiliki oleh subsistem *Lime Stone Crusher 7* yakni sebesar 0,99833. Sedangkan subsistem *Rawmill 4* memiliki avaiabilitas paling rendah yakni 0,88791. Nilai avaiabilitas masing-masing subsistem tergolong tinggi, namun terdapat satu subsistem yakni *Rawmill 4* yang memiliki avaiabilitas di bawah target perusahaan yaitu 95%. Reliabilitas subsistem dihitung berdasarkan persamaan (7) hingga (10) dengan hasil tertera pada tabel 2 berikut.

Tabel 2.  
Nilai Reliabilitas Masing-masing Subsistem

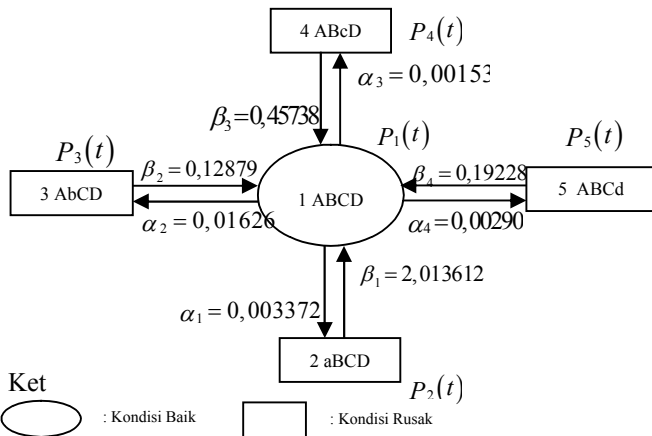
Mesin	Waktu (Jam)			
	t=30	t=60	t=90	t=120
234CR1	0,78053	0,671313	0,590829	0,526788
344RM1	0,630619	0,334335	0,191222	0,117133
444KL1	0,999936	0,998057	0,990224	0,973987
547BE1	0,623212	0,520445	0,454376	0,40578

Tabel 2 menunjukkan kondisi reliabilitas masing-masing subsistem ketika telah dioperasikan selama waktu ke-*t*. Berdasarkan hasil perhitungan, terlihat bahwa seluruh subsistem mengalami penurunan nilai reliabilitas dari waktu ke waktu. Subsistem *Kiln* tergolong mesin yang memiliki reliabilitas tinggi, sebab nilai reliabilitas subsistem masih berada di atas angka 95% setelah dioperasikan selama 120 jam. Hal ini menunjukkan laju kerusakan subsistem *Kiln* rendah. Namun kondisi tersebut berkebalikan dengan subsistem *Rawmill* yang memiliki nilai reliabilitas rendah 63,06% setelah dioperasikan selama 30 jam. Hampir seluruh subsistem penyusun sistem memiliki nilai reliabilitas rendah dan berada di bawah target perusahaan yakni 95%. Kondisi

subsistem yang memiliki reliabilitas rendah mengindikasikan perawatan (*maintenance*) tidak optimal.

**B. Pemodelan Markov terhadap Sistem Produksi di PT. “X”**

Pembentukan model Markov didasarkan pada kondisi sistem produksi di PT. “X” seperti gambar 2.



Gambar 2. Diagram Transisi Proses Produksi di PT. “X”

Mengacu diagram transisi pada gambar 2, terlihat bahwa *Rawmill 4* merupakan subsistem yang paling sering mengalami kerusakan jika dibandingkan dengan subsistem lainnya. Sebab, laju kerusakan subsistem *Rawmill 4* paling tinggi yakni sebesar 0,01626 kerusakan/jam atau subsistem akan mengalami kerusakan setelah dioperasikan selama 62 jam. Berdasarkan Gambar 4.1 dibentuk persamaan diferensial untuk setiap *state* yang disesuaikan dengan formula pada persamaan (15) hingga (20) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P'_1(t) &= -0.024064P_1(t) + 2.01361P_2(t) + 0.1288P_3(t) \\
 &\quad + 0.04574P_4(t) + 0.1923P_5(t) \\
 P'_2(t) &= 0.003372P_1(t) - 2.01361P_2(t) \\
 P'_3(t) &= 0.01626P_1(t) - 0.12879P_3(t) \\
 P'_4(t) &= 0.00153P_1(t) - 0.45738P_4(t) \\
 P'_5(t) &= 0.002903P_1(t) - 0.19228P_5(t) \\
 P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) &= 1
 \end{aligned}$$

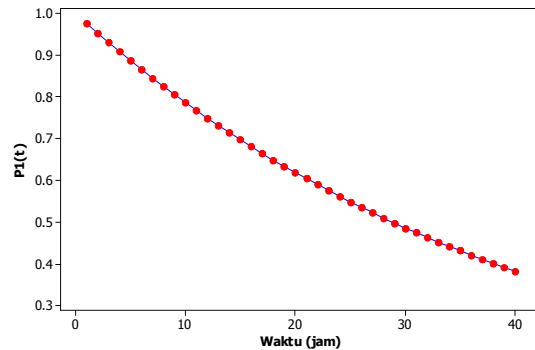
Probabilitas sistem saat kondisi *steady state* atau pada waktu  $t \rightarrow \infty$  digunakan sebagai dasar perhitungan nilai *availabilitas* jangka panjang. Berdasarkan Tabel 4.4, diketahui bahwa nilai *availabilitas* sistem jangka panjang adalah sebesar 0,8723, yang berarti probabilitas sistem beroperasi dengan baik pada kondisi *steady* adalah 87%. *Availabilitas* sistem masih dikategorikan rendah sebab berada di bawah target perusahaan yakni 95%. Probabilitas subsistem *Rawmill 4* mengalami kerusakan lebih tinggi dibandingkan lainnya karena kerja subsistem paling berat dan sering terjadi kerusakan akibat batu mengganjal pada proses penggilingan.

Tabel 3.

Nilai Probabilitas Setiap *State* pada Kondisi *Steady State*

State ke-	Peluang
1	0,872324
2	0,001461
3	0,110128
4	0,002916
5	0,013172

Probabilitas sistem saat kondisi *transient state* atau pada kondisi probabilitas dipengaruhi oleh waktu, diperlukan untuk mengetahui dugaan nilai reliabilitas sistem jangka panjang. Berdasarkan persamaan diferensial yang diuraikan pada uraian sebelumnya dapat digambarkan kondisi nilai reliabilitas sistem seperti gambar 3 berikut.



Gambar 3. Nilai Reliabilitas Sistem

Gambar 3 menunjukkan nilai reliabilitas sistem terlihat menurun dari waktu ke waktu secara drastis. Sehingga, dapat dinyatakan kondisi mesin turun dan *maintenance* yang dilakukan tidak maksimal.

Perubahan laju kerusakan maupun laju perbaikan akan memberikan efek kenaikan atau penurunan terhadap *availabilitas* dan reliabilitas sistem. Berdasarkan perhitungan ketika laju kerusakan subsistem *Rollermill* sebesar 0,003 dengan laju perbaikan 0,05 diperoleh probabilitas sistem beroperasi dengan baik sebesar 84%. Setiap kenaikan 50% laju kerusakan subsistem *Rollermill* terjadi penurunan *availabilitas* mencapai 58,3 persen. Nilai penurunan *availabilitas* akibat kenaikan laju kerusakan subsistem *Rollermill* merupakan penurunan tertinggi dibandingkan subsistem lainnya. Oleh karena itu dinyatakan bahwa subsistem *Rollermill* merupakan subsistem penting dan harus mendapat prioritas utama dalam perawatan.

Nilai reliabilitas sistem diketahui bahwa, ketika laju kerusakan subsistem *Rawmill* meningkat sebesar 50% yakni sebesar 0,036 maka probabilitas sistem beroperasi dengan baik setelah dioperasikan selama 36 jam adalah 21%. Diketahui bahwa terjadi penurunan reliabilitas sistem mencapai angka 71,7 persen. Kondisi ini menunjukkan mesin *Rawmill 4* sebagai subsistem yang memberi efek kenaikan dan penurunan tertinggi pada nilai reliabilitas sistem. Oleh karena itu, *Rawmill 4* harus diprioritaskan juga dalam *maintenance* agar laju kerusakan subsistem menurun dan memberikan efek kenaikan nilai bagi reliabilitas sistem.

**C. Penentuan Waktu Penggantian Optimal**

Nilai fungsi laju kerusakan sistem dapat digunakan untuk menghitung waktu perawatan optimal yang meminimumkan

biaya pemeliharaan. Berdasarkan persamaan (25) diperoleh fungsi biaya perawatan optimal subsistem sebagai berikut.

$$C(t_p) = \frac{8.064.000 + 564.624.000H(t_p)}{t_p}$$

dengan,

$$H(t_p) = \int_0^{t_p} h(t) dt$$

$$= \int_0^{t_p} \frac{0.0000043095t^2 - 0.00053614t + 0.0239}{0.0000014365t^3 + 0.00026807t^2 - 0.0239t + 0.9996} dt$$

Hasil analisis yang didasarkan pada fungsi biaya menunjukkan  $t=55$  sebagai waktu perawatan optimal yang meminimumkan biaya perawatan. Jadi, interval waktu perawatan sistem dilakukan setiap 55 jam sekali (3 hari) dengan biaya perawatan Rp 1.078.761 per jam..

Informasi yang diperoleh dari perusahaan menyatakan setiap tahun sistem mengalami *downtime* mencapai 3.617 kali dengan jumlah waktu 3078 jam. Biaya perawatan yang dikeluarkan perusahaan adalah sebesar Rp 6.472.994 per jam perawatan. Besaran biaya dihitung berdasarkan *loss production* dan biaya tenaga kerja *maintenance* sistem. Jadi, apabila perawatan sistem dilakukan setiap 55 jam sekali perusahaan akan menghemat biaya perawatan sebesar 83%..

## V. KESIMPULAN

Availabilitas subsistem *Lime Stone Crusher 7, Rawmill 4, Kiln, dan Rollermill* secara berturut-turut adalah 0,9983, 0,8879, 0,9967, dan 0,9851. Terdapat satu subsistem yakni *Rawmill 4* yang memiliki nilai availabilitas di bawah target perusahaan yakni 95%. Nilai reliabilitas, subsistem *Lime Stone Crusher 7, Rawmill 4, dan Rollermill* dikategorikan rendah. Sebab nilai reliabilitas ketiga subsistem turun dari waktu ke waktu secara drastis. Kondisi berbeda ditunjukkan oleh subsistem *Kiln* yang memiliki nilai reliabilitas tinggi dan mengalami penurunan ketahanan rendah dari waktu ke waktu.

Pada kondisi *steady state*, probabilitas sistem berada pada *state 1* adalah 87.23%, pada *state 2* sebesar 0.15%, pada *state 3* sebesar 11,01%, pada *state 4* sebesar 0.29%, dan pada *state 5* sebesar 1.32%. Sehingga availabilitas sistem jangka panjang adalah 87.23%. Availabilitas sistem tergolong tinggi namun masih berada di bawah target perusahaan yakni 95%. Pada kondisi *transient state*, diketahui terjadi penurunan reliabilitas sistem dari waktu ke waktu yang menunjukkan ketahanan sistem rendah. Subsistem *Rawmill 4* dinyatakan sebagai subsistem yang paling memberi pengaruh terhadap nilai availabilitas dan reliabilitas sistem ditinjau dari efek perubahan laju kerusakan dan laju perbaikan subsistem.

Analisis terhadap fungsi biaya menunjukkan 55 jam (3 hari) sebagai interval waktu optimal perawatan mesin yang mampu meminimumkan biaya.

Oleh karena penurunan dan kenaikan availabilitas serta reliabilitas sistem tertinggi dipengaruhi oleh laju kerusakan subsistem *Rawmill 4*, sebaiknya subsistem *Rawmill 4* diberi prioritas lebih dalam hal *maintenance*. Dengan demikian, diharapkan laju kerusakan subsistem menurun dan memberikan efek kenaikan pada nilai availabilitas dan

reliabilitas sistem. Untuk meminimumkan biaya *maintenance*, sebaiknya perawatan dilakukan setelah subsistem beroperasi selama 55 jam atau setiap 3 hari sekali. Perawatan yang dilakukan secara terjadwal dapat menurunkan *maintenance cost* dibandingkan memberikan perbaikan atau perawatan ketika mesin telah mengalami kerusakan atau gejala kerusakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. Semen Indonesia (Persero), T. (2014, April 30). *Rapat Umum Pemegang Saham*. Dipetik September 9, 2014, dari Semen Indonesia Web Site: <http://www.semenindonesia.com>
- [2] Anderson, T.W., & Darling, D. (1954). A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of The America*, 765-769.
- [3] ASI. (2013, Februari 13). *Perkembangan Industri Semen di Indonesia Tahun 2012-2016*. Dipetik September 9, 2014, dari Asosiasi Semen Indonesia: <http://www.asi.or.id>
- [4] Ebeling, C. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Singapore: McGraw Hill.
- [5] Kumar, U., & Tim. (2006). *Reliability and Six Sigma*. USA: Springer
- [6] Dhillon, B. (1985). *Quality Control, Reliability, and Engineering Design*. New York: MARCEL DEKKER, INC.
- [7] O'Connor, P. (2004). *Practical Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Lewis, E. (1987). *Introduction to Reliability Engineering*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Munir, R. (2005). *Metode Numerik (Edisi Revisi ke-2)*. Bandung: Informatika.
- [10] Chapra, S., & Canale, R. (1991). *Metode Numerik untuk Teknik*. Jakarta: UI-Press.
- [11] Higgins, L., Mobley, R., & Smith, R. (2002). *Maintenance Engineering Handbook*. New York: McGraw Hill.