

## SIMULASI MONTE CARLO DALAM OPTIMASI BIAYA PEMELIHARAAN

Wilson Kosasih<sup>1,3)</sup>, Iphov Kumala Sriwana<sup>2,4)</sup>, Winda Jeania Purnama<sup>1,5)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara, Jakarta 11440

<sup>2)</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom, Bandung 40257  
e-mail: <sup>3)</sup>wilsonk@ft.untar.ac.id, <sup>4)</sup>iphovkumala@gmail.com, <sup>5)</sup>winda.jeania@gmail.com

### ABSTRACT

*Unplanned maintenance can result in high costs. This study uses a Monte Carlo simulation to minimize maintenance costs, where the failure cost and the preventive cost could be balanced. This research was conducted in a medium-sized company that produces shoe soles. The object of research is focused on the critical components of a rotary injection molding machine. The research data is obtained from the company's factual data in the form of historical machine breakdowns, labor costs, component costs, and production loss costs. The results demonstrate that the optimal preventive maintenance schedule could save the rate of maintenance costs for each critical component by 24.54%, 54.63%, and 21.51% compared to actual maintenance.*

**Keywords:** Maintenance, prevention, Monte Carlo simulation, maintenance cost rate

### ABSTRAK

*Pemeliharaan yang tidak terencana dapat mengakibatkan biayanya menjadi tinggi. Penelitian ini menggunakan simulasi Monte Carlo untuk meminimumkan biaya pemeliharaan, dimana biaya kerusakan (failure cost) dan biaya pencegahan (preventive cost) dapat seimbang. Penelitian ini dilakukan di perusahaan berskala menengah yang memproduksi sol sepatu. Objek penelitian difokuskan pada komponen kritis dari mesin rotary injection moulding. Data penelitian diperoleh dari data faktual perusahaan berupa historis kerusakan mesin, biaya tenaga kerja, biaya komponen, dan biaya kehilangan produksi. Hasil penelitian menunjukkan jadwal pemeliharaan pencegahan yang optimal dapat menghemat laju biaya pemeliharaan masing-masing komponen kritis sebesar 24,54%, 54,63%, and 21,51% dibandingkan dengan pemeliharaan aktual.*

**Kata kunci:** Pemeliharaan, pencegahan, simulasi Monte Carlo, laju biaya pemeliharaan.

## PENDAHULUAN

Pemeliharaan dapat didefinisikan sebagai semua tindakan untuk mempertahankan peralatan, atau mengembalikannya ke kondisi tertentu. Jika pemeliharaan tidak dijadwalkan dengan baik, dapat menyebabkan biaya pemeliharaan menjadi tinggi karena terjadi penurunan produktivitas [1][2]. Biaya pemeliharaan peralatan produksi pada perusahaan dapat mencapai hingga 30% dari total biaya operasi [3]. Dengan menetapkan jadwal pemeliharaan yang baik, perusahaan sekaligus mengoptimalkan keduanya baik biaya dan kinerja pemeliharaan.

Sistem pemeliharaan yang baik adalah pemeliharaan yang dilakukan dalam jadwal waktu tertentu ketika proses produksi sedang tidak berjalan. Pemeliharaan mesin yang sering dilakukan akan meningkatkan biaya pemeliharaan, sebaliknya apabila pemeliharaan tidak dilakukan maka dapat mengurangi kinerja mesin tersebut [1],[2],[4]. Lebih detilnya, tingkat pemeliharaan yang semakin tinggi menyebabkan biaya kerusakan (*failure cost*) yang ditanggung akan semakin kecil, akan tetapi biaya pencegahan (*preventive cost*) yang dikeluarkan semakin besar sehingga total biaya akan meningkat pula [5]. Pada dasarnya, biaya pemeliharaan pada komponen mesin terbagi ke dalam dua jenis yaitu biaya pencegahan merupakan biaya yang timbul karena adanya pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*) yang sudah terjadwal dan biaya kerusakan merupakan biaya yang timbul karena kerusakan yang terjadi di luar perkiraan (*breakdown*) yang menyebabkan terhentinya waktu produksi. Kedua biaya tersebut kemudian digunakan untuk mencari total biaya minimum, tujuannya untuk memperoleh suatu pola *maintenance* yang optimal agar biaya kerusakan dan biaya pencegahan dapat seimbang sehingga dapat

menghasilkan total biaya minimum [6],[7].

Penelitian ini dilakukan di perusahaan berskala menengah yang bergerak dalam bidang produksi sol sepatu. Perusahaan tersebut belum menerapkan jadwal pemeliharaan yang baik pada mesin *rotary injection moulding*, sehingga sering terjadi kerusakan mesin pada saat proses produksi berlangsung yang mengakibatkan biaya pemeliharaan menjadi tinggi. Studi ini menggunakan simulasi Monte Carlo bertujuan untuk menentukan waktu pemeliharaan pencegahan supaya menghasilkan laju biaya pemeliharaan yang minimum.

Simulasi Monte Carlo seringkali diterapkan untuk menentukan interval waktu pemeliharaan pada suatu peralatan produksi agar diperoleh penghematan laju biaya pemeliharannya dan terjadi peningkatan keandalannya [8]. Simulasi Monte Carlo merupakan alat yang berguna untuk memodelkan fenomena ketidakpastian pada suatu input dan dapat diaplikasikan untuk banyak kasus seperti keandalan, ketersediaan, peramalan logistik, analisis perbaikan sistem dan lain sebagainya. Simulasi Monte Carlo menggunakan sejumlah variabel random sebagai input dan menghasilkan output random. Dalam studi ini, simulasi dijalankan dengan membangkitkan bilangan acak untuk input berdasarkan distribusi probabilitas dari data aktual. Oleh karena itu, distribusi yang dipilih untuk setiap input adalah yang paling merepresentasikan data aktual yang dipakai [9]. Semakin banyak jumlah bilangan acak yang dibangkitkan ( $N$ ) maka hasil yang diperoleh akan semakin presisi, namun pilihan jumlah bilangan acak yang baik seringkali adalah  $N = 500$  [10]. Bilangan acak tersebut mempunyai nilai yang terdistribusi seragam  $(0,1)$ , sehingga harus dikonversi ke distribusi tidak seragam, sebelum proses simulasi dilakukan, menggunakan metode transformasi invers. Metode ini efisien jika fungsi distribusi kumulatif dapat dengan mudah ditransformasi invers, namun untuk distribusi normal atau lognormal yang memiliki struktur kompleks sehingga tidak memiliki penyajian invers, maka teknik transformasi invers tidak dapat langsung digunakan [9].

## METODE PENELITIAN

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah menentukan mesin kritis dan komponen kritis yang menjadi objek penelitian berdasarkan data kerusakan dan *Failure Mode and Effect Criticality Analysis* (FMECA). Data yang digunakan adalah historis kerusakan mesin dalam waktu 14 bulan yaitu dari bulan Juli 2016 hingga Agustus 2017. Tahap selanjutnya, melakukan perhitungan waktu menuju kerusakan (*time to failure* – TTF) dan waktu perbaikan (*time to repair* – TTR). Pengujian *index of fit* data TTF dan TTR untuk mengetahui jenis distribusi yang mendasari data, kemudian melakukan uji *goodness of fit* untuk memperkuat distribusi yang diduga adalah benar [11], [12]. Selanjutnya perhitungan *mean time to failure* (MTTF) yaitu waktu rata-rata antar kerusakan dan *mean time to repair* (MTTR) yaitu waktu rata-rata antar perbaikan berdasarkan parameter dari distribusi yang terpilih.

Dalam penelitian ini terdapat dua variabel tidak pasti yaitu data TTF dan TTR, maka pembangkitan bilangan acak dilakukan terhadap data-data tersebut sesuai dengan distribusi terpilih yang mendasari data aktual. Tahap selanjutnya, menilai validitas data TTF dan TTR yang telah dibangkitkan dengan uji kesamaan dua rata-rata untuk mengetahui data hasil pembangkitan bilangan acak tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan data pada sistem aktual.

Selanjutnya data-data, seperti biaya tenaga kerja, biaya kehilangan produksi dan biaya komponen, digunakan untuk perhitungan biaya pada simulasi Monte Carlo. Simulasi dilakukan terhadap data waktu menuju kerusakan dan waktu perbaikan kerusakan yang telah dibangkitkan pada beberapa nilai  $T_p$  (waktu pemeliharaan pencegahan). Simulasi

dimulai dengan menentukan  $T_p$  dengan acuan MTTF sebagai nilai tengah dan berakhir pada  $T_p$  yang menghasilkan laju biaya pemeliharaan yang telah meningkat. Langkah-langkah dalam melakukan simulasi Monte Carlo seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan dapat dijabarkan sebagai berikut [10], [13], [14] :

1. Nilai  $T_i$  diperoleh dari nilai TTF hasil pembangkitan bilangan acak.
2. Penentuan kesuksesan/kegagalan sub-sistem
  - a. Sub-sistem sukses beroperasi apabila waktu menuju kerusakan berikutnya ( $T_i$ ) lebih besar dari jadwal pemeliharaan pencegahan ( $T_p$ ). Jika sub-sistem sukses beroperasi ( $T_i > T_p$ ), maka dilakukan pemeliharaan pencegahan selama  $T_{pmi}$  yaitu lama pemeliharaan pencegahan yang telah direncanakan.
  - b. Sub-sistem gagal beroperasi apabila waktu menuju kerusakan berikutnya lebih kecil dari jadwal pemeliharaan pencegahan ( $T_i < T_p$ ). Jika sub-sistem gagal beroperasi, maka dilakukan pemeliharaan setelah kerusakan selama  $T_{umi}$  yaitu lama pemeliharaan yang tidak direncanakan.

3. Perhitungan  $T_{opr_i}$  dan  $T_{hari_i}$

Waktu operasi pada setiap *run* ditentukan dengan fungsi berikut:

$$T_{opr_i} = \sum_{i=1}^N (T_{p_i} \times I_i^s + T_i \times I_i^g) \tag{1}$$

Lama total waktu pada setiap *run* ditentukan dengan fungsi berikut:

$$T_{hari_i} = \sum_{i=1}^N (T_{pm_i} \times I_i^s + T_{um_i} \times I_i^g) + T_{opr_i} \tag{2}$$

4. Perhitungan Keandalan  $R(T_p)$

Nilai  $R(T_p)$  dapat dihitung sesuai rumus fungsi keandalan masing-masing distribusi, antara lain [15], [16]:

- a. Distribusi *Weibull* merupakan distribusi empiris yang paling banyak digunakan dan hampir muncul pada semua karakteristik kegagalan dari mesin karena mencakup ketiga fase kerusakan yang mungkin terjadi pada distribusi kerusakan. Dua parameter yang digunakan dalam distribusi ini adalah  $\theta$  yang disebut dengan parameter skala dan  $\beta$  yang disebut parameter bentuk. Fungsi pada distribusi ini dapat dinyatakan dengan persamaan matematis:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \tag{3}$$

- b. Distribusi *Lognormal* merupakan distribusi yang menggunakan dua parameter dalam distribusinya, yaitu  $s$  yang merupakan parameter bentuk dan  $t_{med}$  sebagai parameter lokasi yang merupakan nilai tengah dari suatu distribusi kerusakan. Distribusi ini dapat memiliki berbagai macam bentuk, sehingga sering dijumpai bahwa data yang sesuai dengan distribusi *Weibull* juga sesuai dengan distribusi *Lognormal*. Fungsi pada distribusi ini dapat dinyatakan dengan persamaan matematis:

$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right] \tag{4}$$

- c. Distribusi Normal tepat digunakan dalam memodelkan fenomena kelelahan (*fatigue*) dan keausan (*wear out*). Parameter yang digunakan adalah  $\mu$  (nilai tengah) dan  $\sigma$  (standar deviasi). Karena hubungannya dengan distribusi *lognormal*, distribusi ini dapat juga digunakan untuk menganalisis probabilitas *lognormal*. Fungsi pada distribusi ini dapat dinyatakan dengan persamaan matematis:

$$R(t) = \Phi\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right] \tag{5}$$

- d. Distribusi Eksponensial digunakan untuk menghitung kehandalan dari distribusi kerusakan yang memiliki laju kerusakan konstan. Distribusi ini mempunyai laju kerusakan yang tetap terhadap waktu. Parameter yang digunakan dalam distribusi

*Eksponensial* adalah  $\lambda$ , yang menunjukkan rata-rata kerusakan yang terjadi. Fungsi pada distribusi ini dapat dinyatakan dengan persamaan matematis:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

5. Laju Biaya Pemeliharaan ( $C_i$ ) dihitung dengan fungsi berikut:

$$C_i = \sum_{i=1}^N (C_i^p \times I_i^s + C_i^f \times I_i^g) / T_{hari_i} \quad (7)$$

Perhitungan *Preventive Cost* ( $C_i^p$ )

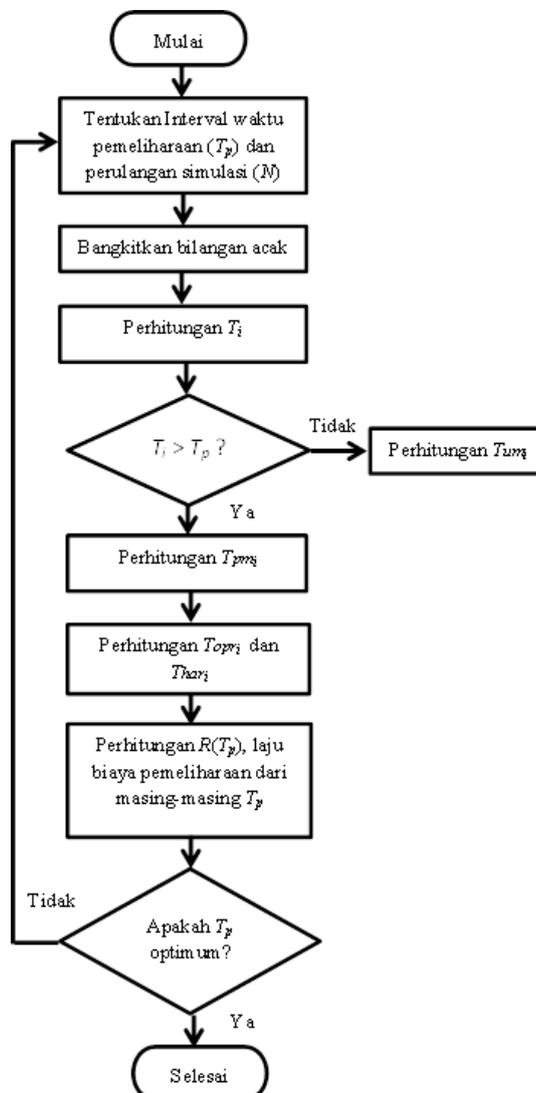
$$C_i^p = (BTK \times T_{pm_i}) + HK \quad (8)$$

Perhitungan *Failure Cost* ( $C_i^f$ )

$$C_i^f = ((BTK + BKP) \times T_{um_i}) + HK \quad (9)$$

Dimana, BTK adalah biaya tenaga kerja, BKP adalah biaya kehilangan produksi, dan HK adalah harga komponen.

6. Penentuan  $T_p$  optimal berdasarkan laju biaya pemeliharaan minimum.



Gambar 1. Diagram Alir Simulasi Monte Carlo

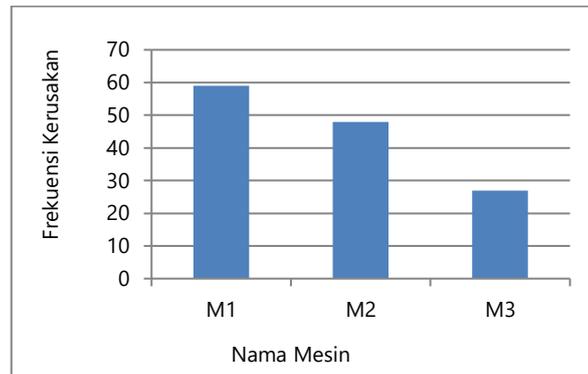
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penentuan Mesin dan Komponen Kritis

Penentuan mesin kritis didasarkan pada frekuensi kerusakan yang terjadi pada ketiga mesin *rotary injection moulding*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pembahasan lebih

lanjut akan difokuskan pada mesin tersebut dengan frekuensi kerusakan tertinggi yaitu M1 sebanyak 59 kerusakan. Berdasarkan data historis kerusakan M1 terdapat 9 komponen mesin yang tercatat kerusakannya. Komponen kritis dianalisis menggunakan *Failure Mode and Effect Criticality Analysis* (FMECA) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan FMECA, komponen dengan nilai kekritisitas ( $C_r$ ) yang tertinggi adalah elemen pemanas *nozzle*, elemen pemanas *barrel*, relay, dan *oil seal*. Komponen kritis juga ditentukan berdasarkan frekuensi kerusakan sebagai penguat dengan konsep pareto 80-20, yang dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 2. Diagram Frekuensi Kerusakan Mesin

Tabel 1. Hasil *Failure Mode and Effect Criticality Analysis*

| Part/Item                    | Operating Time | Occurrence | Failure Rate | Failure Effect Probability | Failure Mode Ratio | Failure Mode Criticality Number ( $C_m$ ) | Item Criticality Number ( $C_r$ ) |
|------------------------------|----------------|------------|--------------|----------------------------|--------------------|---|-----------------------------------|
| Elemen pemanas <i>nozzel</i> | 7262           | 6          | 0,000000826  | 1                          | 0,5<br>0,5         | 0,003<br>0,003                            | 0,006                             |
| Elemen pemanas <i>barrel</i> | 7262           | 6          | 0,000000826  | 1                          | 0,5<br>0,5         | 0,003<br>0,003                            | 0,006                             |
| Relay                        | 7262           | 6          | 0,000000826  | 1                          | 0,5<br>0,5         | 0,003<br>0,003                            | 0,006                             |
| Switch                       | 7262           | 2          | 0,000000275  | 1                          | 1                  | 0,002                                     | 0,002                             |
| Thermocouple                 | 7262           | 2          | 0,000000275  | 1                          | 0,5<br>0,5         | 0,001<br>0,001                            | 0,002                             |
| Oil seal                     | 7262           | 6          | 0,000000826  | 1                          | 1<br>0,33          | 0,006<br>0,0017                           | 0,006                             |
| Bearing                      | 7262           | 5          | 0,000000689  | 1                          | 0,33<br>0,33       | 0,0017<br>0,0017                          | 0,005                             |
| Karet kopling                | 7262           | 2          | 0,000000275  | 1                          | 1                  | 0,002                                     | 0,002                             |
| Solenoid                     | 7262           | 2          | 0,000000275  | 1                          | 1                  | 0,002                                     | 0,002                             |

Tabel 2. Data Kerusakan Komponen-komponen dari M1

| Nama Komponen                | Frekuensi Kerusakan | % Frekuensi Kerusakan | % Kumulatif |
|------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------|
| Elemen pemanas <i>nozzle</i> | 16                  | 27,12%                | 27,12%      |
| <i>Oil seal</i>              | 15                  | 25,42%                | 52,54%      |
| Elemen pemanas <i>barrel</i> | 11                  | 18,64%                | 71,19%      |
| Relay                        | 8                   | 13,56%                | 84,75%      |
| <i>Bearing</i>               | 5                   | 1,69%                 | 86,44%      |
| Switch                       | 1                   | 8,47%                 | 94,92%      |
| Thermocouple                 | 1                   | 1,69%                 | 96,61%      |
| Karet kopling                | 1                   | 1,69%                 | 98,31%      |
| Solenoid                     | 1                   | 1,69%                 | 100,00%     |
| Total kerusakan              | 59                  | 100,00%               |             |

Berdasarkan frekuensi kerusakan komponen M1 yang termasuk komponen kritis adalah elemen pemanas *nozzle*, *oil seal*, dan elemen pemanas *barrel*, karena persentase kumulatif frekuensi kerusakan mencapai 80% sehingga dibahas lebih lanjut.

### Perhitungan MTTF dan MTTR Komponen Kritis

Pengujian *index of fit* untuk mengetahui jenis distribusi data TTF dan TTR berdasarkan nilai *correlation coefficient* ( $r$ ) terbesar. Tahap selanjutnya melakukan uji *goodness of fit* untuk memperkuat distribusi yang diduga adalah benar berdasarkan nilai signifikansi ( $p$ -value) dengan  $\alpha = 0,05$ . Penentuan distribusi berdasarkan nilai *Anderson-Darling* (AD) terkecil dan  $p$ -value terbesar serta nilai  $p$ -value lebih besar dari nilai  $\alpha$  [14],[15]. Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian keduanya pada distribusi TTF dan TTR dari tiap komponen kritis.

Tahap selanjutnya adalah menghitung parameter komponen kritis sesuai distribusi yang terpilih, kemudian menghitung MTTF dan MTTR sesuai rumus dari distribusi terpilih seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Uji *Index of Fit* dan *Goodness of Fit* TTF dan TTR Komponen Kritis

| Komponen                     | Distribusi    | <i>Index of Fit</i> ( $r$ ) | AD    | $P$ -value |
|------------------------------|---------------|-----------------------------|-------|------------|
| Elemen Pemanas <i>Nozzle</i> | TTF Normal    | 0,986                       | 0,203 | 0,848      |
|                              | TTR Normal    | 0,977                       | 0,377 | 0,367      |
| <i>Oil Seal</i>              | TTF Lognormal | 0,985                       | 0,214 | 0,812      |
|                              | TTR Lognormal | 0,988                       | 0,207 | 0,835      |
| Elemen Pemanas <i>Barrel</i> | TTF Normal    | 0,989                       | 0,179 | 0,889      |
|                              | TTR Normal    | 0,978                       | 0,308 | 0,508      |

Tabel 4. Hasil Perhitungan MTTF dan MTTR Komponen Kritis

| Komponen                     | Distribusi | Parameter TTF                       | MTTF (Hari) | Parameter TTR                       | MTTR (Hari) |
|------------------------------|------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| Elemen Pemanas <i>Nozzle</i> | Normal     | $\mu = 19,86$<br>$\sigma = 6,1463$  | 19,86       | $\mu = 0,0247$<br>$\sigma = 0,0067$ | 0,0247      |
| <i>Oil Seal</i>              | Lognormal  | $s = 0,3684$<br>$tmed = 20,3116$    | 21,74       | $s = 0,2626$<br>$tmed = 0,0541$     | 0,0560      |
| Elemen Pemanas <i>Barrel</i> | Normal     | $\mu = 28,70$<br>$\sigma = 11,2486$ | 28,70       | $\mu = 0,0372$<br>$\sigma = 0,0082$ | 0,0372      |

### Pembangkitan Bilangan Acak TTF dan TTR Komponen Kritis

Seperti dibahas sebelumnya bahwa dalam penelitian ini pembangkitan bilangan acak akan dilakukan terhadap data TTF dan TTR sesuai dengan distribusi terpilih yang mendasari data sebenarnya. Pembangkitan bilangan acak dilakukan dengan bantuan *statistics software* dengan memasukkan parameter distribusi yang terpilih dan jumlah bilangan yang akan dibangkitkan ( $N = 500$ ). Hasil pembangkitan bilangan acak TTF dan TTR dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pembangkitan Bilangan Acak Komponen Kritis

| No  | Elemen Pemanas <i>Nozzle</i> |            | <i>Oil Seal</i> |            | Elemen Pemanas <i>Barrel</i> |            |
|-----|------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------------------|------------|
|     | TTF (Hari)                   | TTR (Hari) | TTF (Hari)      | TTR (Hari) | TTF (Hari)                   | TTR (Hari) |
| 1   | 22,9479                      | 0,0327     | 18,6370         | 0,0474     | 31,1386                      | 0,0360     |
| 2   | 22,6633                      | 0,0292     | 15,3150         | 0,0628     | 35,1748                      | 0,0420     |
| 3   | 19,8028                      | 0,0341     | 12,3289         | 0,0544     | 27,8915                      | 0,0231     |
| ... | ....                         | ....       | ....            | ....       | ....                         | ....       |
| 499 | 16,9807                      | 0,0267     | 24,1013         | 0,0471     | 39,4473                      | 0,0286     |
| 500 | 18,5266                      | 0,0230     | 13,9567         | 0,0424     | 37,2033                      | 0,0337     |

### Validasi Data Bilangan Acak TTF dan TTR Komponen Kritis

Data TTF dan TTR bilangan acak dikatakan valid, apabila data tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan data TTF dan TTR pada sistem aktual ( $H_0$ ). Validasi data hasil pembangkitan bilangan acak dapat dilakukan dengan uji kesamaan dua rata-rata.  $H_0$  diterima jika  $-t_{tabel} \leq t_{hitung} < t_{tabel}$ . Hasil validasi TTF dan TTR komponen kritis dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Validasi Data TTF dan TTR Komponen Kritis

| Komponen                     | TTF         |              |                | TTR         |              |                |
|------------------------------|-------------|--------------|----------------|-------------|--------------|----------------|
|                              | $t_{tabel}$ | $t_{hitung}$ | Kesimpulan     | $t_{tabel}$ | $t_{hitung}$ | Kesimpulan     |
| Elemen pemanas <i>nozzle</i> | ±1,9647     | 0,0394       | $H_0$ diterima | ±1,9647     | 0,1289       | $H_0$ diterima |
| <i>Oil seal</i>              | ±1,9647     | 0,0475       | $H_0$ diterima | ±1,9647     | 0,2369       | $H_0$ diterima |
| Elemen pemanas <i>barrel</i> | ±1,9647     | 0,0369       | $H_0$ diterima | ±1,9647     | 0,0462       | $H_0$ diterima |

### Simulasi Monte Carlo

Hasil Simulasi Monte Carlo menunjukkan semakin kecil interval waktu pemeliharaan pencegahan ( $T_p < T_p \text{ optimal}$ ) semakin banyak indikator sukses yang terjadi, artinya pemeliharaan yang dilakukan semakin sering yang menyebabkan *preventive cost* tinggi. Sedangkan, semakin besar interval waktu pemeliharaan pencegahan ( $T_p > T_p \text{ optimal}$ ) semakin banyak indikator gagal yang terjadi, artinya pemeliharaan yang dilakukan semakin jarang yang menyebabkan *failure cost* tinggi. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal untuk komponen elemen pemanas *nozzle*, *oil seal*, dan elemen pemanas *barrel* berturut-turut adalah 14 hari, 12 hari, dan 22 hari dengan laju biaya pemeliharaan minimum masing-masing yaitu Rp 12.551,94/hari, Rp 11.933,31/hari, Rp 13.219,50/hari, seperti dapat dilihat masing-masing pada Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 7. Hasil Simulasi Komponen Elemen Pemanas *Nozzle*

| Indikator                         | $T_p$ (Hari) |           |           |                  |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|--------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   | 11           | 12        | 13        | 14               | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| Sukses                            | 464          | 451       | 439       | <b>417</b>       | 392       | 370       | 348       | 319       | 280       | 250       |
| Gagal                             | 36           | 49        | 61        | <b>83</b>        | 108       | 130       | 152       | 181       | 220       | 250       |
| Keandalan                         | 92,51%       | 89,97%    | 86,65%    | <b>82,89%</b>    | 78,52%    | 73,57%    | 68,08%    | 61,79%    | 55,57%    | 49,20%    |
| Laju biaya pemeliharaan (Rp/Hari) | 13.564,13    | 13.019,64 | 12.581,39 | <b>12.551,94</b> | 12.652,21 | 12.714,95 | 12.817,94 | 13.136,07 | 13.712,95 | 14.062,12 |

Tabel 8. Hasil Simulasi Komponen *Oil Seal*

| Indikator                         | $T_p$ (Hari) |           |                  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|--------------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   | 10           | 11        | 12               | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        | 21        | 22        |
| Sukses                            | 490          | 482       | <b>470</b>       | 455       | 439       | 414       | 379       | 350       | 325       | 301       | 261       | 237       | 200       |
| Gagal                             | 10           | 18        | <b>30</b>        | 45        | 61        | 86        | 121       | 150       | 175       | 199       | 239       | 263       | 300       |
| Keandalan                         | 97,26%       | 95,15%    | <b>92,36%</b>    | 88,69%    | 84,38%    | 79,39%    | 74,22%    | 68,44%    | 62,93%    | 57,14%    | 51,60%    | 46,41%    | 41,29%    |
| Laju biaya pemeliharaan (Rp/Hari) | 12.371,93    | 11.956,50 | <b>11.933,31</b> | 12.186,65 | 12.507,96 | 13.471,20 | 15.040,96 | 16.121,17 | 17.083,37 | 17.920,79 | 19.425,32 | 20.310,04 | 21.615,47 |

Tabel 9. Hasil Simulasi Komponen Elemen Pemanas *Barrel*

| Indikator                         | $T_p$ (Hari) |           |                  |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|--------------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   | 20           | 21        | 22               | 23        | 24        | 25        | 26        | 27        | 28        | 29        |
| Sukses                            | 392          | 383       | <b>374</b>       | 358       | 335       | 324       | 311       | 295       | 268       | 244       |
| Gagal                             | 108          | 117       | <b>126</b>       | 142       | 165       | 176       | 189       | 205       | 232       | 256       |
| Keandalan                         | 77,94%       | 75,17%    | <b>72,57%</b>    | 69,50%    | 66,28%    | 62,93%    | 59,48%    | 55,96%    | 52,39%    | 48,80%    |
| Laju biaya pemeliharaan (Rp/Hari) | 13.401,23    | 13.287,12 | <b>13.219,50</b> | 13.334,95 | 13.666,50 | 13.729,18 | 13.826,19 | 13.979,50 | 14.429,36 | 14.785,26 |

### Perbandingan Laju Biaya Pemeliharaan

Laju biaya pemeliharaan adalah kriteria utama dalam menentukan waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal. Berdasarkan hasil perhitungan aktual diperoleh laju biaya pemeliharaan komponen elemen pemanas *nozzle*, *oil seal*, dan elemen pemanas *barrel* masing-masing adalah Rp 16.632,82/hari, Rp 26.302,22/hari, Rp 16.842,94/hari, sedangkan berdasarkan hasil simulasi, laju biaya pemeliharaan dapat direduksi masing-masing menjadi Rp 12.551,94/hari, Rp 11.933,31/hari, Rp 13.219,50/hari. Tabel 10 memperlihatkan persentase penghematan yang akan terjadi untuk masing-masing komponen kritis dibandingkan dengan pemeliharaan aktual, yakni pemeliharaan dilakukan setelah terjadi kerusakan. Hal ini terjadi karena apabila pemeliharaan dilakukan setelah terjadi kerusakan maka akan ada biaya kehilangan produksi, namun jika perusahaan membuat perencanaan terlebih dahulu maka tidak perlu ada biaya kehilangan produksi.

Tabel 10. Hasil Penghematan Laju Biaya Pemeliharaan

| Komponen                     | Laju Biaya Pemeliharaan Aktual (Rp/Hari) | Laju Biaya Pemeliharaan Hasil Simulasi (Rp/Hari) | Penghematan (%) |
|------------------------------|--|--|-----------------|
| Elemen Pemanas <i>Nozzle</i> | 16.632,82                                | 12.551,94  | 24,54           |
| <i>Oil Seal</i>              | 26.302,22                                | 11.933,31  | 54,63           |
| Elemen Pemanas <i>Barrel</i> | 16.842,94                                | 13.219,50  | 21,51           |

## KESIMPULAN

Dari hasil simulasi Monte Carlo, diperoleh waktu pemeliharaan pencegahan optimum untuk komponen elemen pemanas *nozzle*, *oil seal*, dan elemen pemanas *barrel* adalah 14 hari, 12 hari dan 22 hari dengan laju biaya pemeliharaan minimum masing-masing Rp 12.551,94/hari, Rp 11.933,31/hari, Rp 13.219,50/hari. Dengan menggunakan simulasi Monte Carlo terjadi penghematan laju biaya pemeliharaan untuk masing-masing komponen sebesar 24,54%, 54,63%, dan 21,51% .

Agar penjadwalan pemeliharaan pencegahan dapat dilakukan lebih efektif dan akurat, maka disarankan pada perusahaan untuk melakukan pencatatan secara kontinu dan lengkap terhadap setiap kegagalan yang terjadi pada masing masing komponen. Untuk penelitian selanjutnya, penetapan komponen biaya pemeliharaan pada simulasi dapat lebih diakuratkan lagi, sehingga hasilnya dapat merepresentasikan sistem aktual.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini mendapatkan hibah dari Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Tarumanagara. Pada kesempatan ini, Penulis menyampaikan terima kasih kepada lembaga tersebut dan semua pihak yang membantu sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Corder, A.S. (1997). *Teknik Manajemen Pemeliharaan*. Jakarta, ID: Erlangga.
- [2] Dhillon, B.S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- [3] Duc, L.M. & Ming, T.C. (2011). Cost Comparison of Maintenance Policies. Paper presented at Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2011, Montreal, Quebec, Canada. New York, USA: PHM Society.
- [4] Soesetyo, I. & Bendatu, L.Y. (2014). Penjadwalan Predictive Maintenance dan Biaya Pemeliharaan Mesin Pellet di PT Charoen Pokphand Indonesia–Sepanjang. *Jurnal Tirta*, 2(2), 147-154.
- [5] Mustaqim, F., Kosasih, W. & Ahmad. (2020). Pemeliharaan Mesin Hydraulic Shear Menggunakan Pendekatan Reliability Centered Maintenance dan Manajemen Suku Cadang. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 9(3), 153-162.
- [6] Kosasih, W., Ahmad & Nurtanti, W. (2014). Pemeliharaan Terencana: Penjadwalan Interval Pembersihan Nozzle dan Penggantian Nozzle Heater pada Mesin Automatic Injection Molding E-110B (Studi Kasus: Perusahaan Guna Plast). Paper presented at 2<sup>nd</sup> Indonesian Statistical Analysis Conference, Bandung (pp. 211-214). Bandung, ID: Jurusan Teknik Industri Universitas Parahyangan.
- [7] Ahmad, Kosasih, W. & Wijoyo, B. (2014). Penentuan Jadwal Penggerindaan pada Mata Pahat Mesin Giling dan Penggantian Mata Gerinda dengan Menggunakan Metode Preventive Maintenance. *Jurnal Kajian Teknologi*, 10(2), 73-82.
- [8] Febrianti, W. & Soepangkat, B.O.P. (2016). Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan pada Peralatan Sub Unit Sintesa Unit Urea di PT X Menggunakan Simulasi Monte Carlo. Paper presented at Seminar Nasional Manajemen Teknologi XXIV, Surabaya. Surabaya, ID: Program Studi MMT-ITS.

- [9] O'Connor, Patrick & Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*. Fifth Edition. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- [10] Zio, Enrico. (2013). *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. London, UK: Springer.
- [11] Anderson, T. W. (2010). *Anderson darling Tests of Goodness-of-Fit*. USA: Stanford University.
- [12] Anderson, T. W. & Darling, D. A. (1954). A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of American Statistical Association*, 49(268), 765-769.
- [13] Witjaksono, A. & Soepangkat, B.O.P. (2016). Penentuan Interval waktu Pemeliharaan Pencegahan pada Peralatan di Medium Pressure Gas Compression Area (MPGCA) di PT Texi Menggunakan Simulasi Monte Carlo. Paper presented at Seminar Nasional Manajemen Teknologi XXIV, Surabaya (pp. 1-8). Surabaya, ID: Program Studi MMT-ITS.
- [14] Lyonnet, P. (1991). *Maintenance Planning: Methods and Mathematics*. London: Chapman and Hall.
- [15] Ebeling, Charles E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill. 6.
- [16] Jardine, A.K.S. (1973). *Maintenance, Replacement, and Reliability*. London, UK: Sir Issac Pitman and Sons Ltd.