

MODEL OPTIMISASI PERAWATAN PAHAT DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FAKTOR YANG MEMPENGARUHI UMURNYA

Fifi Herni Mustofa¹⁾, Hendro Prasetyo²⁾, Revina Astriyanti Rahmi³⁾

Jurusan Teknik Industri, Institut Teknologi Nasional^{1,2)}

Jl. P.H.H. Mustapa No.23 Bandung 40124

Telp: (022)7272215 ext 137

E-mail: fifi@itenas.ac.id¹⁾

Abstrak

Proses produksi merupakan tulang punggung perusahaan manufaktur yang berupaya menghasilkan produk dengan kualitas terbaik, yaitu produk yang sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan perusahaan. Pahat merupakan salah satu tools yang digunakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi umur pahat itu sendiri adalah waktu pemotongan, temperatur pahat, penampang geram, kecepatan potong, gaya potong spesifik, dan besaran panas terpadu. Penelitian sebelumnya telah membahas mengenai faktor yang mempengaruhi umur pahat yaitu jenis material, belum ada pertimbangan faktor temperatur yang dapat mempengaruhi umur pahat. Perawatan membutuhkan biaya yang tidak sedikit, sehingga apabila terjadi kesalahan dalam memilih cara perawatan akan menimbulkan biaya tambahan yang cukup besar. Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja. Umur pahat sangat berpengaruh terhadap penentuan keputusan perawatan pahat yang terdiri tiga kebijakan yaitu Do Nothing, Maintenance, dan Replacement. Pemilihan cara perawatan dengan model optimisasi menggunakan pemrograman dinamis probabilistik berdasarkan kriteria minimasi total biaya perawatan. Model optimisasi menggunakan pemrograman dinamis probabilistik berdasarkan kriteria minimasi total biaya perawatan dapat mengakomodasi perawatan pahat.

Kata kunci: umur pahat, maintenance, pemrograman dinamis probabilistik, minimisasi total biaya

1. Pendahuluan

Proses produksi adalah kegiatan utama yang menjadi tulang punggung dari perusahaan manufaktur. Tujuan utama yang diharapkan dari proses produksi adalah mampu menghasilkan produk dengan kualitas yang baik, yaitu produk yang sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan perusahaan. Proses produksi didalamnya mencakup proses pemesinan dengan yang memiliki keterkaitan dengan bahan baku, benda yang diproses, produk jadi (benda kerja), sisa hasil pemesinan (geram), peralatan mesin.

Telah banyak jenis mesin yang digunakan dalam memproduksi suatu produk pada dunia manufaktur seperti mesin milling, mesin bubut, mesin jigsaw, dan mesin perkakas lainnya. Dalam hal ini, *cutting tools* yang dipakai yang menjadi perhatian untuk menentukan hasil permesinan. Setiap *cutting tools* (pahat) memiliki umur pakai yang biasa disebut dengan umur pahat. Faktor-faktor yang mempengaruhi umur pahat adalah waktu pemotongan, temperatur pahat, penampang geram, kecepatan potong, gaya potong spesifik, dan besaran panas terpadu. Selain itu, umur pahat dapat berkurang seiring bertambahnya waktu dan kondisi pemakaian. Pahat yang telah digunakan dapat dilihat kondisinya dengan memperhatikan tingkat keausan dari pahat tersebut.

Produk yang memiliki spesifikasi yang sesuai tentunya harus menggunakan pahat dalam kondisi baik. Seiring bertambahnya waktu, pahat akan mengalami penurunan performansi yang dapat menimbulkan kegagalan produksi. Upaya pencegahan dalam kegagalan produksi salah satunya dengan melakukan perawatan terhadap pahat yang digunakan. Untuk melakukan perawatan dibutuhkan biaya yang tidak sedikit, sehingga apabila terjadi kesalahan dalam memilih cara perawatan akan menimbulkan biaya tambahan yang cukup besar.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Nurrachmah (2006) telah membahas mengenai faktor yang mempengaruhi umur pahat adalah jenis material pahat. Pada kenyatannya pada saat proses pemesinan berlangsung, bukan hanya faktor jenis material yang dapat mempengaruhi umur pahat, tetapi temperatur juga menjadi faktor yang dapat menentukan umur pahat.

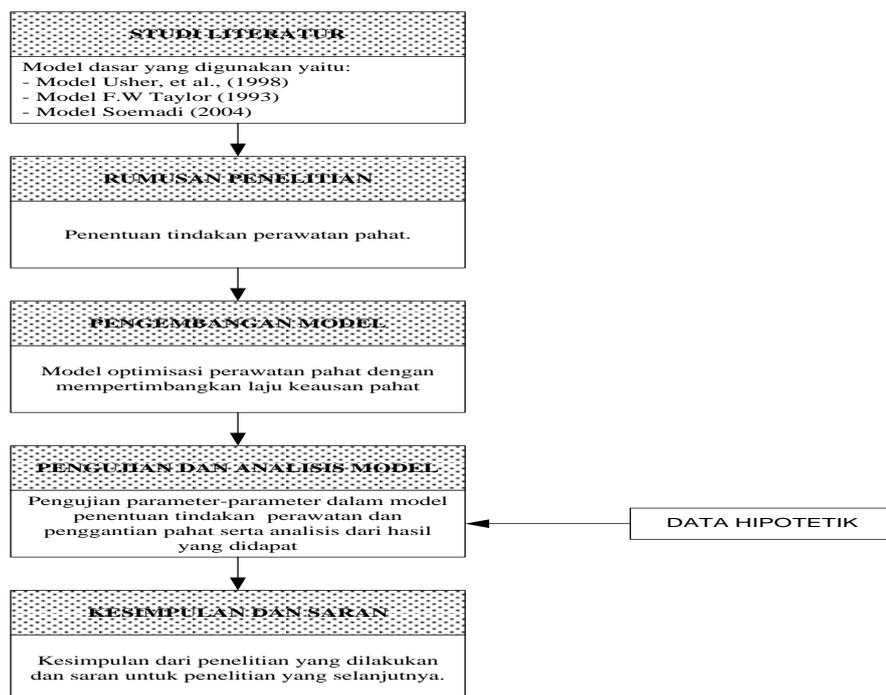
Temperatur merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi umur pahat. Keadaan pahat sangat mempengaruhi kualitas produk, dimana akan tercapai kondisi seimbang antara kualitas pahat dengan kualitas produk yang dihasilkan. Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja (Rochim, 1993). Panas yang terjadi akan tersalurkan pada geram, pahat, dan benda kerja. Panas pada geram dan pahat akan jauh memiliki persentase yang besar dibandingkan benda kerja. Keterkaitan antara temperatur dan umur pahat perlu diperhatikan agar dapat menentukan keputusan perawatan yang akan dilakukan.

Umur pahat sangat berpengaruh terhadap penentuan keputusan perawatan pahat. Keputusan perawatan terdiri atas tiga kebijakan, dimana setiap kebijakan akan mempengaruhi biaya yang akan timbul. Biaya tersebut dapat diminimasi dengan pengambilan keputusan yang tepat dalam memilih cara perawatan. Untuk memilih cara perawatan dibutuhkan suatu metode yang dapat memberikan solusi optimal kapan harus dilakukan perawatan pada *cutting tools* dengan mempertimbangkan jenis material dan temperatur pada saat proses pemesinan sehingga biaya yang dikeluarkan dapat diminimumkan.

Upaya agar biaya-biaya yang dikeluarkan tersebut dapat diminimumkan, maka dibutuhkan suatu metode yang dapat memberikan solusi optimal kapan harus dilakukan perawatan pada *cutting tools*. Model optimisasi keputusan perawatan pahat dapat memberikan solusi optimal berdasarkan kriteria minimasi total biaya terdiri dari biaya kegagalan produksi jika kebijakan pertama *Do Nothing* yang dipilih, biaya perawatan pahat seperti pengasahan pahat dengan menggunakan gerinda jika kebijakan kedua *Maintenance* yang dipilih, biaya untuk penggantian pahat baru jika kebijakan yang ketiga *Replacement* yang terpilih. Penelitian yang dilakukan memiliki tujuan untuk memperoleh model perawatan pahat dengan memperhatikan faktor jenis material dan temperatur pada saat proses pemesinan dengan kriteria minimisasi total biaya perawatan.

2. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah penelitian untuk mendapatkan pemecahan masalah terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Flowchart* Metodologi Penelitian

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Nurrachmah (2006) penentu keputusan kebijakan perawatan pahat memperhatikan jenis material pahat. Pada penelitian yang dilakukan saat ini penentuan tindakan untuk perawatan pahat yaitu memperhatikan jenis material dan temperatur pada saat proses pemesinan. Peta posisi penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Peta Posisi Penelitian

Keterangan	Nurrachmah (2006)	Penelitian
Pendekatan	Diskrit	Diskrit
Metode Solusi	Pemrograman Dinamis	Pemrograman Dinamis
Variabel Keputusan	<i>Do Nothing, Maintenance, dan Replacement</i>	<i>Do Nothing, Maintenance, dan Replacement</i>
Faktor yang dipertimbangkan	Jenis Material	Jenis Material dan Temperatur

Selama proses pemesinan berlangsung dua faktor tersebut dapat mempengaruhi umur pahat yang dipakai. Probabilitas umur pahat dapat diketahui dengan menentukan suatu fungsi laju kerusakan pahat. Probabilitas laju kerusakan bisa didapatkan dengan memanfaatkan distribusi Weibull. Setelah diketahui probabilitas laju kerusakan, maka model pemrograman dinamis dapat dipakai untuk mendapatkan kebijakan keputusan perawatan dengan total biaya terkecil. Dalam perumusan konstanta Taylor dapat diketahui umur pahat dengan mempertimbangkan temperatur pada saat proses pemesinan.

$$vt^n = C_T \quad (1)$$

Umur pahat yang didapat melalui pemodelan konstanta Taylor akan mempengaruhi keseputusan untuk memilih pengembangan pemodelan dasar. Keputusan yang dipilih digunakan untuk memperhitungkan biaya yang akan timbul akibat adanya perbaikan. Nurrachmah (2006) melakukan pengembangan model optimisasi perawatan pahat yang bertujuan untuk mengetahui tindakan pencegahan atau penggantian pahat dengan mengintegrasikan kegiatan produksi dengan perawatan dan jenis material benda kerja. Jenis material merupakan faktor penentu yang digunakan untuk mengetahui umur pahat, sehingga dapat diestimasi kebijakan kapan dilakukannya perawatan. Kebijakan perawatan yang dipakai kebijakan perawatan yang dipakai dalam pemrograman dinamis, yaitu:

1. Bila keputusan $x_j=DN$, maka umur pahat di $j+1$ adalah $(t+s)$
Keputusan *do nothing* ini tidak merubah/mempertahankan kinerja mesin/komponen, artinya tidak dilakukan tindakan apapun pada mesin/komponen, mesin/komponen meneruskan pengoperasiannya. Bila keputusan $x_j=DN$ terpilih, maka tidak mengakibatkan adanya biaya apapun ($c_1=0$).
2. Bila keputusan $x_j=M$, maka umur pahat di $j+1$ adalah $[t + (s.\gamma)]$
Keputusan *maintenance* dalam penelitian ini adalah perawatan terhadap mesin/komponen mesin, artinya aktivitas perawatan dilakukan dengan suatu tindakan perbaikan minimal, misalnya dengan mengencangkan baut, menyambung benang yang putus pada mesin tenun, menambah *cutting oil, coolant, air, dan other fluids*. Bila keputusan $x_j=M$ terpilih, maka mengakibatkan adanya biaya yang disebut dengan biaya *maintenance* (c_2) yang besarnya ditentukan.
3. Bila keputusan $x_j=R$ ($t=0$), maka umur pahat di $j+1$ adalah $(t=s)$.
Keputusan pengambilan kebijakan akan berpengaruh terhadap biaya perawatan yang akan dikeluarkan. Bila keputusan $x_j=R$ terpilih, maka mengakibatkan adanya biaya yang disebut dengan biaya *replacement* (c_3) yang besarnya ditentukan.

Setelah didapatkan model pemrograman dinamis dengan memanfaatkan model laju keausan, maka model matematis pemrograman dinamis tersebut akan diuji untuk mengetahui apakah model tersebut layak digunakan. Pengujian model matematis dilakukan dengan memasukkan input data berupa data hipotetik seperti nilai $p, q, n, f_{no}, a_{ac}, v_{no}, c_{no}, c_p, c_m, c_r, c_o$ berdasarkan

literatur yang digunakan dan hasil wawancara seperti c_1, c_2, c_3, c_4 , pada pihak Laboratorium Proses Manufaktur di Institut Teknologi Nasional. Hasil pengujian model berupa sebuah keputusan kebijakan perawatan dengan total biaya terkecil.

Setelah model dikembangkan, maka untuk mengetahui kepekaan pemodelan akan dilakukan pengujian parameter yang memungkinkan mengalami perubahan dan dapat mempengaruhi keputusan awal. Data yang dipakai untuk melakukan pengujian adalah data hipotetik, sehingga tidak perlu pengumpulan data terlebih dahulu. Hasil pengujian model akan dianalisis untuk mengetahui seberapa besar pengaruh parameter tersebut.

3. Pengembangan Model

Model dasar yang dikembangkan adalah model Nurrachmah (2006) yang membahas mengenai model optimasi perawatan pahat berdasarkan jenis material dan model dasar umur pahat Taylor. Model dasar umur pahat yang dikembangkan merupakan persamaan umur pahat yang mempertimbangkan kecepatan pemotongan, temperatur pahat, gerak makan, dan kedalaman pemotongan.

Pemodelan Laju Keausan Pahat

$$\lambda_{ac}(t) = \left(\frac{\gamma \cdot t^{\gamma-1}}{\theta^\gamma}\right) \cdot \left(\frac{n \sqrt{\frac{c_{no}}{f_{no}^p \cdot a_{no}^q \cdot v_{no}} \cdot \frac{c_{ac}}{f_{ac}^p \cdot a_{ac}^q \cdot v_{ac}}}}}{\theta}\right)^{\gamma_{ac}} \quad (2)$$

Pemodelan Probabilitas Keausan Pahat

$$f_{ac}(t_{ac}) = \left(\frac{n \sqrt{\frac{c_{no}}{f_{no}^p \cdot a_{no}^q \cdot v_{no}} \cdot \frac{c_{ac}}{f_{ac}^p \cdot a_{ac}^q \cdot v_{ac}}}}}{\theta}\right) \cdot \left\{ \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t \cdot \left(\frac{n \sqrt{\frac{c_{no}}{f_{no}^p \cdot a_{no}^q \cdot v_{no}} \cdot \frac{c_{ac}}{f_{ac}^p \cdot a_{ac}^q \cdot v_{ac}}}}}{\theta}\right)^{\gamma-1}}{\theta}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{t \cdot \left(\frac{n \sqrt{\frac{c_{no}}{f_{no}^p \cdot a_{no}^q \cdot v_{no}} \cdot \frac{c_{ac}}{f_{ac}^p \cdot a_{ac}^q \cdot v_{ac}}}}}{\theta}\right)^{\gamma}}{\theta}\right)\right] \right\} \quad (3)$$

Pemrograman Dinamis Probabilistik

Nilai total biaya terkecil dari selama siklus produksi T pada tahap j bagi pahat dengan status umur (t) sehingga dapat dinyatakan oleh fungsi rekursif sebagai berikut:

$$\tau_{c_j}(t) = \min \begin{cases} x_j = DN : C_1 + C_4 + \left[(f_{ac}(t_{ac})) (C_3 + C_5 + TC_{j+1}^*(t=s)) + (1 - (f_{ac}(t_{ac}))) (TC_{j+1}^*) \right] (t+s) \\ x_j = M : C_2 + C_4 + \left[(f_{ac}(t_{ac})) (C_3 + C_5 + TC_{j+1}^*(t=s)) + (1 - (f_{ac}(t_{ac}))) (TC_{j+1}^*) \right] (t+(s,\epsilon)) \\ x_j = R : C_3 + C_4 + \left[(f_{ac}(t_{ac})) (C_3 + C_5 + TC_{j+1}^*(t=s)) + (1 - (f_{ac}(t_{ac}))) (TC_{j+1}^*) \right] (t=s) \end{cases} \quad (4)$$

4. Pengujian Model Dan Analisis Sensitivitas

Data-data input didapatkan berdasarkan studi literatur dan wawancara. Pahat yang diteliti digunakan pada mesin bubut berjenis universal berada di Laboratorium Proses Manufaktur, Institut Teknologi Nasional Bandung. Tabel *input* data untuk pengujian model dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Input Data

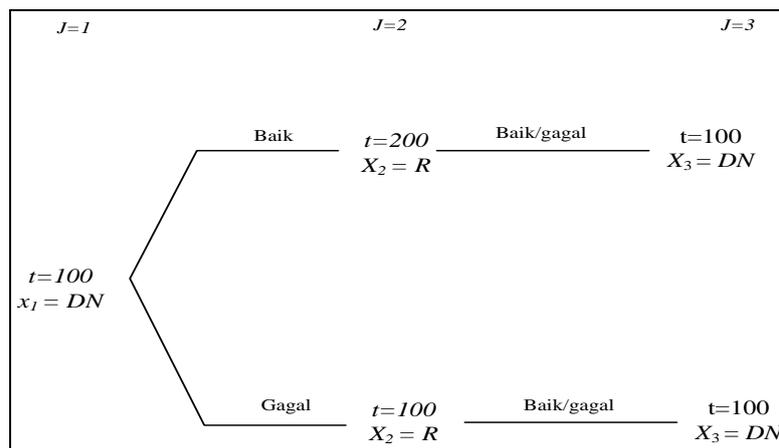
Notasi	Keterangan	Notasi	Keterangan
T	4 jam	c_{no}	298
N	4	c_{ac}	308
s	1 jam	v_{no}	196,886
γ	5,5	v_{ac}	250
n	0,22	c_1	Rp -
θ	45	c_2	Rp 10.000,-

Tabel 2. Input Data (lanjutan)

Notasi	Keterangan	Notasi	Keterangan
p	0,26	c_3	Rp 15.000,-
q	0,11	c_4	Rp 8.500,-
f_{ac}	1,1	c_5	Rp 12.500,-
f_{no}	0,5	c_p	Rp 3.000/jam
a_{ac}	11	c_r	Rp 2.000/jam
a_{no}	5	c_o	Rp 7.500/jam

Berdasarkan Tabel 2 perhitungan waktu siklus didasarkan atas 4 jam kerja mulai dari pukul 08.00-12.00 atau 13.00-17.00 dengan selang inspeksi 1 jam, sehingga jumlah titik inspeksi yang didapatkan adalah waktu siklus dibagi dengan selang inspeksi yaitu 4 titik inspeksi. Upah operator yang didapat berdasarkan upah minimum regional (UMR) Kota Bandung yaitu sebesar Rp 1.271.625 dibagi dengan jumlah hari kerja dan jam kerja.

Dengan menggunakan pohon pencabangan dapat terlihat kemungkinan-kemungkinan yang terjadi untuk kebijakan beserta umur pahatnya pada setiap titik inspeksi. Pohon pencabangan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pohon Pencabangan Input Data

Solusi kebijakan yang didapatkan untuk setiap tahap dengan solusi umur pahat optimal berdasarkan input data pada Tabel 2 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Solusi Kebijakan Untuk Setiap Tahap

Status (t)	X_1^*	X_2^*	X_3^*
100	DN	-	-
200	-	R	-
100	-	-	DN

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan persamaan rekursif (4) dan solusi kebijakan berdasarkan Tabel 3 didapatkan biaya terkecil untuk perawatan pahat adalah Rp.49.597,470.

Setelah pengujian model dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah analisis sensitivitas. Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji model optimisasi kepekaan terhadap pengaruh jenis material dan temperatur untuk mendapatkan total biaya perawatan terkecil.

Parameter Biaya Keputusan Replacement (c_3)

Biaya keputusan *replacement* dapat terjadi jika keputusan untuk mengganti pahat terpilih. Pada biaya *replacement* dengan harga pahat baru yang dinaikkan sebesar 300% yaitu Rp 60.000, maka model baru peka terhadap perubahan hasil keputusan. Input data untuk pengujian parameter biaya keputusan *replacement* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Input Data Perubahan Biaya Keputusan Replacement

Notasi	Keterangan	Notasi	Keterangan
T	4 jam	c_{no}	298
N	4	c_{ac}	308
s	1 jam	v_{no}	196,886
γ	5,5	v_{ac}	250
n	0,22	c_1	Rp -
θ	45	c_2	Rp 10.000,-
p	0,26	c_3	Rp 60.000,-
q	0,11	c_4	Rp 8.500,-
f_{ac}	1,1	c_5	Rp 12.500,-
f_{no}	0,5	c_p	Rp 3.000/jam
a_{ac}	11	c_r	Rp 2.000/jam
a_{no}	5	c_o	Rp 7.500/jam

Berdasarkan *input* data pada Tabel 4, maka didapatkan solusi optimum keputusan kebijakan dan umur pahatnya untuk setiap titik inspeksi yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Solusi Kebijakan Untuk Setiap Tahap Dengan Perubahan Biaya Keputusan *Replacement*

Status (t)	X_1^*	X_2^*	X_3^*
100	M	-	-
150	-	M	-
200	-	-	M

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan persamaan (4) dan solusi kebijakan berdasarkan Tabel 5. didapatkan ekspektasi total biaya terkecil untuk perawatan pahat adalah Rp.69.821,823

Parameter Biaya Operator (c_o) dan Biaya Inspeksi (c_i)

Upah umum regional (UMR) seringkali mengalami perubahan untuk kurun waktu yang tidak dapat diprediksi. Input data untuk kenaikan UMR dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Input Data Kenaikan UMR

Notasi	Keterangan	Notasi	Keterangan
T	4 jam	c_{no}	298
N	4	c_{ac}	308
s	1 jam	v_{no}	196,886
γ	5,5	v_{ac}	250
n	0,22	c_1	Rp -
θ	45	c_2	Rp 10.000,-
p	0,26	c_3	Rp 15.000,-
q	0,11	c_4	Rp 14.000,-
f_{ac}	1,1	c_5	Rp 14.500,-
f_{no}	0,5	c_p	Rp 3.000 /jam
a_{ac}	11	c_r	Rp 2.000 /jam
a_{no}	5	c_o	Rp 9.500 /jam

Pada pengujian sensitivitas model UMR dinaikkan sebesar 30%. Nilai 30% didapatkan berdasarkan kemungkinan kenaikan gaji sekitar Rp 150.000 yang setara dengan kenaikan 30% gaji. Setelah melihat berbagai macam kemungkinan berdasarkan pohon pencabangan dengan adanya perubahan biaya keputusan, maka didapatkan solusi optimum keputusan kebijakan dan umur pahatnya untuk setiap titik inspeksi. Solusi optimum keputusan kebijakan dan umur pahatnya untuk setiap titik inspeksi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Solusi Kebijakan Untuk Setiap Tahap Dengan Perubahan UMR

Status (t)	X_1^*	X_2^*	X_3^*
100	DN	-	-
200	-	R	-
100	-	-	DN

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan persamaan rekursif (4) dan solusi kebijakan berdasarkan Tabel 7 didapatkan ekspektasi total biaya terkecil untuk perawatan pahat adalah Rp 59.708,447.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan kesimpulan yang didapat, yaitu:

1. Hasil penelitian ini menghasilkan pengembangan model optimisasi perawatan pahat dengan mempertimbangkan jenis material dan temperatur.
2. Pengembangan model sensitif terhadap perubahan-perubahan yang mungkin terjadi seperti adanya kenaikan biaya material sebesar 300% dan upah minimum regional (UMR) sebesar 30%.

6. Daftar Notasi

Notasi-notasi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- T : panjang siklus produksi.
 N : jumlah titik inspeksi selama satu siklus produksi.
 s : selang waktu antar inspeksi
 j : titik inspeksi ($j=1, \dots, N$).
 t_{no} : umur pahat dibawah kondisi pemakaian secara normal.
 t_{ac} : umur pahat dibawah kondisi pemakaian secara terakselerasi.
 t : umur pahat di suatu j ($0, \dots, js$).
 t_c : waktu pemotongan
 v : kecepatan potong
 x_j : keputusan yang dipilih pada suatu j ($x_j=DN, M, \text{ atau } R$).
 DN : keputusan *do nothing*/tidak melakukan tindakan perawatan.
 M : keputusan *maintenance*/melakukan perawatan terhadap pahat.
 R : keputusan *replacement*/melakukan tindakan penggantian.
 $\lambda(t)$: laju keausan pahat berumur t .
 $f_{ac}(t_{ac})$: probabilitas keausan pahat yang berumur t .
 θ_{no} : parameter skala untuk distribusi Weibull pada kondisi pemakaian secara normal.
 θ_{ac} : parameter skala untuk distribusi Weibull pada kondisi pemakaian secara terakselerasi
 γ_{no} : parameter bentuk untuk distribusi Weibull pada kondisi pemakaian secara normal
 γ_{ac} : parameter bentuk untuk distribusi Weibull pada kondisi pemakaian secara terakselerasi.
 $\lambda_{ac}(t)$: fungsi laju keausan pada kondisi yang terakselerasi.
 A : faktor akselerasi.
 C_T : konstanta Taylor.
 W_0 : keausan tepi yang dianggap sebagai batas saat berakhirnya umur pahat
 h : tebal geram sebelum terpotong.
 p : konstanta, pangkat untuk tebal geram sebelum terpotong.
 b : lebar pemotongan ; mm.
 q : konstanta, pangkat bagi lebar pemotongan
 n : konstanta, harga spesifik bagi suatu kombinasi pahat dengan benda kerja.

- v_{no} : kecepatan potong pada kondisi pemakaian secara normal ; m/min.
 v_{ac} : kecepatan potong ; pada kondisi pemakaian secara terakselerasi ; m/min.
 f_{no} : gerak makan pada kondisi pemakaian secara normal; mm/r.
 f_{ac} : gerak makan pada kondisi pemakaian secara terakselerasi; mm/r.
 a_{no} : kedalaman potong pada kondisi pemakaian secara normal; mm.
 a_{ac} : kedalaman potong pada kondisi pemakaian secara terakselerasi; mm.
 C_{no} : temperatur pahat pada kondisi normal
 C_{ac} : temperatur pahat pada kondisi terakselerasi
 ε : *improvement factor*.
 $TC_j(t)$: total biaya total biaya pada tahap j dan status (t) (dari tahap j hingga tahap N)
 C_1 : biaya keputusan *do nothing*.
 C_2 : biaya keputusan *maintenance*.
 C_3 : biaya keputusan *replacement*.
 C_4 : biaya inspeksi.
 C_5 : biaya kerugian.
 c_r : biaya penyiapan dan peralatan.
 c_p : biaya pemesinan.
 c_o : biaya operator.
 C_f : ongkos tetap atas pemilikan mesin; Rp/tahun
 C_o : harga pembelian mesin lengkap dengan peralatannya, ongkos pengangkutan dan pemasangan termasuk *training operator* (mesin siap berproduksi); Rp
 y : umur mesin produktif yang ditetapkan bagi mesin yang bersangkutan, atau periode penyusutan (*depreciation period*); tahun
 I_{pti} : besarnya bunga (*premium*), pajak (*tax*) dan asuransi (*insurance*) bagi mesin yang bersangkutan dan selama periode penyusutan; %

Daftar Pustaka

- [1] Hillier, Frederick S. dan Gerald, J. Lieberman., 1995, *Introduction To Operations Research*, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [2] Nurrachmah., 2006, *Model Optimisasi Perawatan Pahat Dengan Mempertimbangkan Laju Keausan Pahat*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- [3] Rochim, Taufiq, 1993, *Teori & Teknologi Proses Pemesinan*, Lab. Teknik Produksi, Jurusan Teknik Mesin FTI-ITB.
- [4] Soemadi, K., 2004, *Model Penggantian Optimal Untuk Mesin Reparabel Bergaransi Dengan Pemrograman Dinamis*, Disertasi S-3 Departemen Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [5] Sudrajat, Ating., 2011, *Pedoman Praktis Manajemen Perawatan Mesin Industri*, PT. Refika Aditama, Bandung.
- [6] Walpole, Ronald E., Raymond H. Myers, *Probabilty and Statistic for Engineer and Scientist*, 2nd ed., Macmilan Publishing Company, New York, 1985.
- [7] Wolstenholme, Linda C., 1999, *Reliability Modelling A Statistical Approach.*, Chapman & Hall/CRC, United States.