

Penggantian Pencegahan Selang Hidraulik Mesin *Induction Furnace* Bercadangan (Kasus di Divisi Tempa dan Cor PT. Pindad (Persero))

KUSMANINGRUM SOEMADI, LINDA ROSDIANA PUSPA,
FIFI HERNI MUSTOFA

Jurusan Teknik Industri – FTI Institut Teknologi Nasional, Bandung
Email: kusmaningrum@itenas.ac.id

ABSTRAK

Salah satu proses penting pada Divisi Tempa dan Cor PT.Pindad (Persero) adalah proses pencairan logam pada mesin *Induction Furnace* yang pengoperasiannya membutuhkan dukungan panel pengendali. Panel tersebut hanya dapat mengendalikan satu mesin di suatu saat. Terdapat dua mesin yang dikendalikan melalui satu panel, sehingga bila salah satu mesin tengah dioperasikan maka mesin yang lain berfungsi sebagai cadangan yang segera digunakan bila mesin yang dioperasikan tersebut mengalami kerusakan. Kerusakan mesin yang paling sering terjadi diakibatkan oleh kebocoran selang hidraulik. Makalah ini menyajikan optimisasi penggantian pencegahan terhadap selang hidraulik dari dua mesin *Induction Furnace* yang merupakan sistem mesin bercadangan. Optimisasi dilakukan menggunakan pendekatan model pemrograman dinamis. Solusi yang dihasilkan adalah urutan keputusan yang memberikan ekspektasi total biaya penggantian kerusakan dan biaya penggantian pencegahan minimum selama periode perencanaan terbatas.

Kata kunci: mesin bercadangan, penggantian kerusakan, penggantian pencegahan, pemrograman dinamis.

ABSTRACT

One of important processes in the foundry and casting division at PT. Pindad is the metal melting process on the induction furnace machine. The machine is operated by using a control panel, that can control only one machine at a time. There are two machines and one control panel. By then, if one machine is used, the other machine serves as a backup that immediately used when the operated machine are failed. Machine failure occurred frequently due to the leakage in the hydraulic pipe. This study presents the optimization of hydraulic pipe preventive replacement. Two machines with single panel are considered as a system with a standby unit. Optimization is performed using dynamic programming approach. The resulting solution is a sequential decisions that minimizing the total expected repair and replacement cost for a finite horizon planning.

Keywords: machine with standby unit, failure replacement, preventive replacement, dynamic programming.

Catatan: Makalah ini dikembangkan dari makalah yang disampaikan pada Seminar Nasional Teknik Industri & Kongres BKSTI V, Makassar, 16-17 Juli 2008.

1. PENDAHULUAN

Salah satu proses penting pada Divisi Tempa dan Cor PT. Pindad (Persero) adalah proses pengecoran menggunakan mesin *Induction Furnace*. Mesin ini dalam pengoperasiannya membutuhkan dukungan panel pengendali yang hanya dapat mengendalikan satu mesin di suatu saat. Pada saat ini terdapat satu panel yang melayani dua buah mesin (mesin A dan mesin B) sehingga bila satu mesin tengah dioperasikan maka mesin yang lain berfungsi sebagai cadangan yang segera digunakan bila mesin yang tengah dioperasikan mengalami kerusakan.

Kerusakan yang paling sering terjadi diakibatkan oleh kebocoran selang hidraulik. Kerusakan yang berakibat operasi mesin terhenti tersebut dapat dihindari antara lain dengan melakukan penggantian pencegahan terhadap selang hidraulik. Sejalan dengan bertambahnya umur dan pemakaian mesin, waktu antara dua kejadian kegagalan cenderung semakin singkat dan mesin tersebut dinyatakan mengalami deteriorasi [1]. Membiarkan mesin beroperasi sampai terjadi kerusakan akan menimbulkan ongkos yang lebih tinggi [2]. Oleh karena itu, perlu dipertimbangkan keputusan mengalihkan operasi ke mesin cadangan sebelum kerusakan selang hidraulik terjadi dan melakukan pemasangan selang hidraulik baru terhadap mesin yang semula dioperasikan.

Penelitian ini membahas penggantian optimal selang hidraulik pada mesin *Induction Furnace* bercadangan untuk meminimumkan ongkos penggantian dan ongkos kerusakan selama periode pengoperasian terbatas. Seperti berbagai peralatan lain kerusakan selang hidraulik akan meningkat sejalan dengan lamanya pemakaian, sehingga semakin tua umurnya semakin besar kemungkinan terjadinya kebocoran. Penggantian pencegahan selang hidraulik akan memperkecil risiko kebocoran dan kerusakan mesin yang diakibatkannya. Namun, tindakan tersebut menimbulkan konsekuensi biaya pengadaan yang perlu dipertimbangkan. Oleh sebab itu, diperlukan kebijakan yang memberikan keseimbangan antara ongkos penggantian pencegahan dan ongkos penggantian kerusakan yang terjadi akibat kebocoran selang hidraulik.

Pengadaan mesin cadangan ditujukan untuk memastikan sistem tetap dapat berfungsi meskipun terjadi kerusakan pada salah satu mesin. Penelitian tentang sistem mesin bercadangan telah dilakukan antara lain untuk dan menentukan saat perawatan pencegahan untuk meminimumkan ekspektasi ongkos per satuan waktu [3], menentukan konfigurasi desain optimal yang memaksimumkan keandalan [4], menentukan pengaruh perawatan pencegahan terhadap keandalan sistem menggunakan metode simulasi [5]. Sepanjang mesin cadangan tidak pernah rusak selama dicadangkan dan waktu perbaikan kerusakan satu mesin cukup singkat dibandingkan dengan waktu antar kejadian rusaknya, maka dari perspektif sistem keseluruhan seolah-olah tidak pernah ada kerusakan yang terjadi [6]. Dalam hal mesin *Induction Furnace* keberadaan mesin cadangan berfungsi memperpendek *down time* yang dialami apabila terjadi kerusakan pada mesin yang tengah dioperasikan. Meskipun demikian pengalihan operasi secara dini dari suatu mesin yang sedang dioperasikan ke mesin cadangan juga berkontribusi dalam mengurangi resiko terjadinya kerusakan di tengah operasi. Maka persoalan yang dihadapi adalah menentukan lama operasi suatu mesin *Induction Furnace* sebelum kebocoran selang hidraulik terjadi dan mengalihkan operasi ke mesin cadangan. Susunan penyajian akan dilakukan sebagai berikut, pada Bab 2 diketengahkan pengoperasian mesin *Induction Furnace* bercadangan. Pada Bab 3 diuraikan formulasi model, di dalam Bab 4 disajikan solusi model, dan di Bab 5 disajikan kesimpulan.

2. PENGOPERASIAN MESIN *INDUCTION FURNACE* BERCADANGAN

Mesin *Induction Furnace* A dan mesin B adalah dua mesin *independent* yang dikendalikan oleh panel tunggal yang hanya dapat mengendalikan satu mesin saja sehingga satu mesin yang menganggur berfungsi sebagai cadangan. Mesin memiliki kapasitas peleburan 2 ton baja, dioperasikan 8 jam kerja per hari untuk meleburkan 8 lot, sehingga kecepatan produksinya rata-rata adalah satu jam per lot. Bila saat dioperasikan terjadi kerusakan maka operasi peleburan yang tengah berlangsung dialihkan ke

mesin cadangan, dan mesin yang rusak diperbaiki. Pengalihan ke mesin cadangan membutuhkan waktu sekitar 15 menit. Biaya pengalihan yang timbul meliputi biaya *down time*, biaya pengadaan selang hidraulik, biaya elektroda las untuk membantu pencantingan logam panas, serta biaya akibat komponen lain yang ikut rusak akibat kebocoran tersebut. Berbagai biaya ini cukup besar dan diinginkan untuk dihindari. Bila suatu mesin mengalami kebocoran selang hidraulik maka mesin segera dihentikan dan diganti selang hidrauliknya. Selanjutnya mesin tersebut kembali disiyagakan sebagai mesin cadangan. Kebijakan yang diterapkan saat ini adalah mengoperasikan mesin *Induction Furnace* sampai selang hidrauliknya mengalami kebocoran. Maka, pengalihan ke mesin cadangan hanya dilakukan bila terjadi kerusakan mesin saja. Di dalam penelitian ini dipertimbangkan upaya mengalihkan operasi ke mesin cadangan sebelum terjadi kebocoran selang hidraulik untuk mengurangi resiko kegagalan operasi yang memicu timbulnya berbagai biaya sebagaimana dikemukakan di atas.

Operasi peleburan logam lazim direncanakan selama beberapa hari. Kebijakan pengoperasian mesin setiap hari selama perioda perencanaan tersebut dikembangkan sebagai model pengambilan keputusan optimal. Model bertujuan untuk menunjang pemilihan dua alternatif keputusan di awal setiap hari produksi. Alternatif pertama adalah melanjutkan operasi mesin *Induction Furnace* yang telah digunakan pada hari sebelumnya. Alternatif kedua adalah mengalihkan operasi di hari itu ke mesin cadangan. Tujuan dari pemilihan keputusan adalah meminimumkan total ongkos penggantian pencegahan dan perbaikan kerusakan selang hidraulik selama perioda perencanaan tersebut. Total ongkos penggantian pencegahan dan perbaikan selang hidraulik dapat dinyatakan sebagai fungsi dari pilihan keputusan yang diambil sepanjang perioda perencanaan dan dioptimumkan menggunakan pendekatan pemrograman dinamis.

Optimisasi kebijakan penggantian periodik dengan suatu perioda perencanaan tertentu dan karakteristik operasi yang cenderung berubah merupakan suatu proses pemilihan keputusan sekuensial yang dapat didekati dengan formulasi pemrograman dinamis. Pemrograman dinamis adalah metode matematik yang menyediakan prosedur sistematis untuk membuat suatu urutan keputusan yang satu sama lain saling berhubungan dan menghasilkan solusi optimal secara keseluruhan. Pemrograman dinamis telah banyak diterapkan dalam persoalan perawatan dan penggantian [7, 8] karena pendekatan pemrograman dinamis secara efektif mereduksi jumlah urutan keputusan yang harus dipertimbangkan.

3. FORMULASI MODEL

Mesin *Induction Furnace* bercadangan dioperasikan selama suatu perioda perencanaan operasi terbatas, T dan selama perioda tersebut setiap hari dilakukan evaluasi. Pada setiap titik evaluasi terdapat dua pilihan keputusan yaitu tetap melanjutkan operasi ($x_j=L$) atau menggantikan mesin yang tengah dioperasikan ke mesin cadangan ($x_j=G$), untuk $j=1,2,\dots, T$. Kebocoran selang hidraulik merupakan penyebab utama kerusakan mesin *Induction Furnace*. Sebagaimana lazimnya komponen yang mengalami beban mekanik maka semakin tua umur selang hidraulik yang dioperasikan akan semakin besar pula peluang terjadinya kerusakan mesin [2]. Pengamatan masa lalu terhadap perilaku kebocoran selang hidraulik kedua mesin tersebut menunjukkan bahwa karakteristik kerusakan selang di mesin A tidak identik dengan mesin B. Dalam penelitian ini karakteristik kerusakan kedua mesin dimodelkan dalam fungsi keandalan yang merupakan fungsi dari umur selang hidraulik t dan dinyatakan sebagai $R_A(t)$ dan $R_B(t)$.

Keputusan x_j dipilih untuk meminimasi ekspektasi ongkos penggantian pencegahan dan perbaikan selang hidraulik selama perioda perencanaan terbatas. Ekspektasi ongkos pada suatu hari sangat dipengaruhi oleh identitas mesin yang dioperasikan (mesin A atau mesin B), dan umur dari selang hidrauliknya. Selang hidraulik yang diganti umurnya menjadi nol. Selama mesin tak dioperasikan tak terjadi deteriorasi sehingga umur selang pada mesin cadangan diasumsikan selalu sama dengan nol. Dalam berbagai literatur keandalan kondisi ini dikenal sebagai *no failures in the standby mode* [6].

Setiap keputusan di j akan berpengaruh terhadap umur mesin di $j+1$, dan seterusnya sehingga pengambilan keputusan x_j juga perlu mempertimbangkan berbagai akibat yang timbul terhadap urutan keputusan yang dapat dipilih sepanjang sisa tahapan operasi $x_{j+1}, x_{j+2}, \dots, x_{T-1}$. Dengan demikian permasalahan pengambilan keputusan di j berbentuk sekuensial dan salah satu model yang sesuai adalah model pemrograman dinamis [9].

3.1 Asumsi

Dalam pengembangan model digunakan sejumlah asumsi sebagai berikut:

1. Di hari pertama dioperasikan mesin dengan selang hidraulik berumur $t=0$.
2. Tingkat deteriorasi selang hidraulik yang pernah dioperasikan kurang dari satu hari adalah sama dengan selang yang telah dioperasikan selama 1 hari.

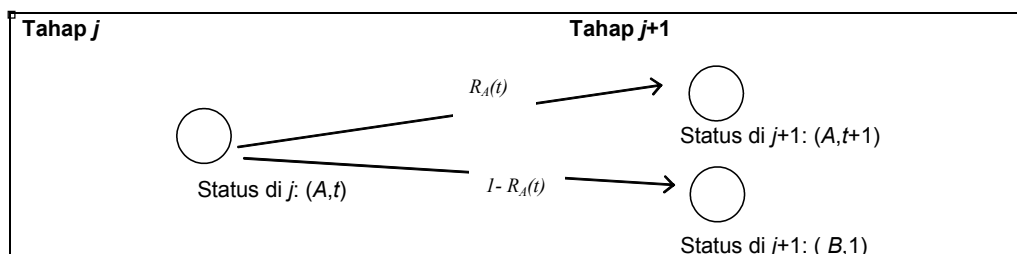
Asumsi pertama membatasi status umur selang hidraulik yang dipertimbangkan, sehingga di setiap titik keputusan j umur selang hidraulik adalah $t=(0,1,2,\dots, T-1)$. Asumsi kedua memberikan penyederhanaan karena status umur selang hidraulik tersebut akan berbentuk bilangan bulat.

3.2. Notasi

- T : panjang hari perencanaan operasi peleburan logam
- j : hari yang menjadi titik pengambilan keputusan selama $T, j=(0, 1, \dots, T)$
- t : umur selang hidraulik di suatu $j, t=1,2, \dots, T-1$
- x_j : keputusan yang dipilih pada suatu hari $j, x_j = L, G$
- L : me-Lanjut-kan operasi mesin yang telah dioperasikan di $j-1$
- G : meng-Ganti operasi mesin ke mesin cadangan
- A : identitas mesin yang dioperasikan, $a = \{A,B\}$
- c_1 : ongkos penggantian pencegahan selang hidraulik
- c_2 : ongkos penggantian kerusakan selang hidraulik

3.3. Ekspektasi Total Ongkos Penggantian Pencegahan dan Perbaikan

Bila di hari j diputuskan untuk mengoperasikan mesin a ($a=\{A,B\}$) dengan selang hidraulik berumur t terdapat dua kemungkinan yang terjadi. Pertama adalah selang hidraulik berumur t tidak mengalami kebocoran dan kemungkinan kedua adalah selang mengalami kebocoran sehingga diganti oleh mesin cadangan. Menggunakan pendekatan pemrograman dinamis maka tahap pengambilan keputusan adalah hari ke- j . Dasar keputusan di suatu tahap adalah identitas mesin a dan umur selang t yang terpasang di mesin tersebut dan dinyatakan sebagai status (a,t) . Hubungan antara status di dua tahap yang berturut-turut bila di j dioperasikan mesin A ditampilkan pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan dua situasi pengoperasian mesin A yang lazim dikenal sebagai siklus sukses dan siklus gagal. Pada siklus sukses mesin A berumur t berhasil melampaui beban operasi di j dan di hari ke $j+1$ umurnya menjadi $t+1$. Peluang siklus sukses adalah $R_A(t)$. Pada siklus gagal mesin A yang dioperasikan di j mengalami kerusakan sehingga dialihkan ke mesin B. Maka di $j+1$ terdapat mesin B yang umurnya 1. Peluang siklus gagal adalah $(1 - R_A(t))$.



Gambar 1. Diagram Peluang Perubahan Status dari Suatu Tahap j ke Tahap $j+1$

Berbagai status yang mungkin terdapat pada hari j , keputusan x_j yang dapat dipilih, serta perubahan status yang mungkin terjadi selama $(j,j+1)$ serta peluang terjadinya perubahan tersebut disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Berbagai Kemungkinan Status di j , Keputusan x_j , Status di Tahap $j+1$ dan Peluangnya

Status di j	Keputusan x_j	Status di $j+1$	Peluang
(A,t)	L	$(A,t+1)$ $(B,1)$	$R_A(t)$ $(1 - R_A(t))$
	G	$(B,1)$ $(A,1)$	$R_B(0)$ $(1 - R_B(0))$
(B,t)	L	$(B,t+1)$ $(A,1)$	$R_B(t)$ $(1 - R_B(t))$
	G	$(A,1)$ $(B,1)$	$R_A(0)$ $(1 - R_A(0))$

Selanjutnya ongkos yang terjadi di suatu hari j adalah tergantung pada keputusan x_j yang dipilih dan ekspektasi ongkos yang terjadi di j ditambah ekspektasi ongkos di berbagai hari berikutnya hingga periode perencanaan berakhir. Ongkos keputusan x_j dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$C_j(a,t) = \begin{cases} 0, & x_j = L \\ C_1, & x_j = G \end{cases} \quad (1)$$

maka biaya di suatu hari j dapat dinyatakan sebagai biaya akibat keputusan x_j yang dipilih ditambah dengan ekspektasi ongkos yang timbul pada hari tersebut. Ekspektasi ongkos di suatu hari j adalah penjumlahan ongkos siklus sukses dan siklus gagal yang dijelaskan di atas. Menggunakan pendekatan Soemadi [10] bila $F_j^*(a,t)$ didefinisikan sebagai ekspektasi nilai fungsi optimal di j dan hari berikutnya hingga hari ke T , maka formulasi $F_j^*(a,t)$ untuk $a=A$ dapat dinyatakan sebagai persamaan (2).

$$F_j^*(A,t) = \min \begin{cases} L : 0 + (R_A(t)) \times \left\{ F_{j+1}^*(A,t+1) \right\} + (1 - R_A(t)) \times \left[C_2 + \left\{ R_B(0) \times F_{j+1}^*(B,1) + (1 - R_B(0)) \times F_{j+1}^*(A,1) \right\} \right] \\ G : C_1 + (R_B(0)) \times \left\{ F_{j+1}^*(B,1) \right\} + (1 - R_B(0)) \times \left[C_2 + \left\{ R_A(0) \times F_{j+1}^*(A,1) + (1 - R_A(0)) \times F_{j+1}^*(B,1) \right\} \right] \end{cases}, \quad (2)$$

untuk $j = 1, 2, \dots, T-1$

$$F_j^*(A,t) = 0 \quad \text{untuk } j = T$$

Solusi optimal pemrograman dinamis sangat dipengaruhi oleh status di tahap pertama, dan fungsi ongkos di tahap terakhir yang dipertimbangkan. Dalam pengoperasian mesin *Induction Furnace* bercadangan meskipun diasumsikan umur mesin di tahap pertama ($j=1$) selalu sama dengan nol namun terdapat dua kemungkinan mesin yang dioperasikan yakni mesin A atau mesin B. Bentuk formulasi $F_j^*(a,t)$ untuk $a=B$ bentuknya analog dengan persamaan (2) di atas. Status di tahap terakhir dianggap tidak berdampak apapun terhadap ekspektasi total ongkos yang dipertimbangkan selama periode perencanaan T sehingga $F_j^*(a,t)=0$ untuk $j=T$.

4. SOLUSI

Solusi penggantian pencegahan optimal selang hidraulik mesin A dan B diperoleh dengan menerapkan data yang diperoleh pada divisi Tempa dan Cor PT. Pindad (Persero). Data awal yang diolah adalah data waktu antarkerusakan selang hidraulik mesin A dan B. Pencatatan waktu antarkerusakan

dilakukan secara harian sehingga diperoleh hari antarkerusakan. Pengolahan data menghasilkan waktu antarkerusakan selang hidraulik berdistribusi Weibull dua parameter. Menggunakan distribusi tersebut dihitung keandalan mesin A dan B pada berbagai umur t dan disajikan pada Tabel 2. Perhitungan selanjutnya memberikan rata-rata umur selang hidraulik sebelum bocor di mesin A adalah 8,103 hari, dan rata-rata umur selang hidraulik sebelum bocor di mesin B adalah 8,007 hari.

Tabel 2. Keandalan Mesin A dan B di Umur t

Umur (hari)	Keandalan Mesin A $R_A(t)$	Keandalan Mesin B $R_B(t)$
0	1	1
1	0.9877	0.9842
2	0.9522	0.9430
3	0.8963	0.8817
4	0.8239	0.8054
5	0.7396	0.7194
6	0.6484	0.6287
7	0.5552	0.5378
8	0.4644	0.4504
9	0.3795	0.3696
10	0.3029	0.2971

Selanjutnya ongkos pendekatan perhitungan ongkos penggantian pencegahan c_1 memberikan nilai Rp. 327.800 per tindakan, dan ongkos penggantian kerusakan c_2 bernilai Rp. 507.800 per tindakan. Kedua ongkos ini besarnya sama bagi kedua mesin. Berdasarkan umur rata-rata selang hidraulik yang berkisar sekitar 8 hari, dipilih perioda perencanaan 10 hari. Pemilihan perioda perencanaan tersebut juga dengan mempertimbangkan 5 hari kerja per minggu yang saat ini berlaku di perusahaan sehingga perencanaan kebijakan pencegahan per dua minggu diharapkan cukup mudah dilaksanakan.

Solusi optimal yang dihasilkan model berupa serangkaian keputusan kondisional selama 9 hari dan ongkos optimal yang dihasilkan oleh keputusan tersebut. Model diterapkan pada dua skenario pengoperasian mesin. Skenario 1 adalah mengoperasikan mesin A di $j=1$, dan skenario 2 mengoperasikan mesin B di $j=1$. Kebijakan optimal kondisional bagi kedua skenario adalah mesin yang dioperasikan di hari pertama ($j=1$), sepanjang tidak mengalami kerusakan, dapat terus dioperasikan hingga hari ke lima ($j=5$). Pada awal hari ke enam mesin yang masih dapat dioperasikan dan berumur $t=5$ tersebut dihentikan untuk melaksanakan penggantian pencegahan terhadap selang hidrauliknya. Pada awal hari ke enam tersebut mesin cadangan dioperasikan. Solusi optimal berupa rangkaian keputusan disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Rangkaian Keputusan Tindakan

Skenario	Hari (j)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mesin A di $j=1$	L	L	L	L	L	G	L	L	L
Mesin A di $j=1$	L	L	L	L	L	G	L	L	L

Ekspektasi total ongkos optimal untuk skenario 1 sebesar Rp. 566.000, sedangkan ekspektasi total ongkos skenario 2 sebesar Rp. 631.000. Perbedaan ongkos ini sesuai dengan data keandalan selang hidraulik yang terpasang di kedua mesin, dimana selang yang terpasang di mesin A memiliki keandalan yang lebih baik dibandingkan dengan selang yang terpasang di mesin B. Kebijakan saat ini yang dilakukan adalah mengoperasikan mesin hingga terjadi kerusakan. Ekspektasi ongkos total yang dihasilkan model tidak dapat dibandingkan dengan kebijakan perusahaan saat ini mengingat pendekatan perioda perencanaan yang digunakan tidak terdapat di perusahaan. Dengan demikian solusi optimal yang dihasilkan tidak dapat diverifikasi terhadap ongkos yang terjadi saat.

Meskipun demikian pengaruh kebijakan optimal terhadap umur penggunaan selang hidraulik dapat diuraikan sebagai berikut. Bila perhitungan umur rata-rata selang hidraulik sebelum terjadi kebocoran digunakan sebagai pendekatan umur selang saat terjadi kerusakan, maka penggantian selang saat ini diperkirakan dilakukan rata-rata di sekitar umur 8 hari. Maka penggantian pencegahan selang hidraulik dengan mengalihkan operasi ke mesin cadangan berakibat umur pemakaian selang hidraulik dipersingkat 3 hari sehingga berkurang sekitar 37,5%. Meskipun demikian dengan mempertimbangkan *moral hazard* operator akibat kerusakan mesin dan interupsi proses peleburan logam maka manfaat yang diperoleh dari penggantian pencegahan selang hidraulik ini cukup baik untuk dilaksanakan.

5. KESIMPULAN

Permasalahan penggantian pencegahan selang hidraulik pada mesin *Induction Furnace* bercadangan didekati dengan model pemrograman dinamis. Mesin cadangan yang disediakan untuk mempersingkat *down time* dipertimbangkan pemanfaatannya untuk mengurangi risiko kerusakan mesin. Hal ini ditempuh dengan mengalihkan operasi secara dini sebelum kebocoran selang hidraulik yang mengakibatkan kerusakan mesin terjadi. Alternatif keputusan di setiap hari adalah mengoperasikan mesin yang telah beroperasi di hari sebelumnya atau mengalihkan operasi hari itu ke mesin cadangan. Ongkos yang dipertimbangkan adalah ongkos penggantian pencegahan selang hidraulik, dan ongkos penggantian kerusakan bagi selang hidraulik yang telah mengalami kebocoran. Selang hidraulik kedua mesin menunjukkan karakteristik yang berbeda dan perbedaan tersebut dapat diakomodasi dengan baik dalam formulasi pemrograman dinamis. Saran penelitian lebih lanjut adalah dengan mempertimbangkan ongkos kualitas produk akibat kerusakan yang terjadi [11] dan adanya lebih dari satu jenis komponen yang mungkin mengalami kerusakan. Di samping itu, penelitian lanjutan yang masih berkaitan adalah menentukan jumlah mesin cadangan optimal pada kondisi banyak mesin yang dioperasikan. Kedua situasi tersebut sangat lazim terjadi pada industri jasa transportasi yang memerlukan keandalan armada angkutannya baik dengan melakukan penggantian pencegahan sejumlah komponen kritis maupun dengan menyediakan armada cadangan yang keduanya menimbulkan beban biaya dan perlu diperimbangkan keputusan terbaik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rigdon, S. E. dan Basu, A. P., (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- [2] Barlow, R. E., Proschan, F., (1965). *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [3] Zijlstra, (1983). "Optimization of Preventive Maintenance for Two-Unit Cold Standby Redundant Systems with a General Cost Structure", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 27, 1, pp. 55-63.
- [4] Coit, D., W., (2001), "Cold-standby Redundancy Optimization for Nonrepairable Systems", *IIE Transactions*, 33, pp. 471-478.
- [5] Davidovic dan Jankovic, (2003). "Reliability Analysis of a Two-unit Standby System by Computer Simulation", *Yugoslav Journal of Operations Research*, 13, 1, pp. 85-94.
- [6] Ebeling, C. E., (1997). *Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill, International Edition, Singapore.
- [7] Besnard, F., (2007). "On Stochastic Dynamic Programming and its Application to Maintenance", *Master Thesis*, Royal Institute of Technology KTH School of Electrical Engineering.
- [8] Korpijärvi, J. dan Kortelainen, J., (2009). "A Dynamic Programming Model for Maintenance of Electric Distribution System", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No. 53, pp. 636-639.
- [9] Dreyfus, S.E. dan Law, A.M., (1977). *The Art and theory of Dynamic Programming*, Academic Press, Inc., New York.

- [10] Soemadi, K., (2005) ' "Model Penggantian Optimal untuk Mesin Reparabel Bergaransi dengan Pemrograman Dinamis", *Proceeding 1st Indonesian Business Management Conference*, 26 Januari 2005, Prasetya Mulya Business School.
- [11] Soemadi, K., Mustofa, F. H., dan Fitria, L., (2007). "Model Optimisasi Penggantian Mesin dengan Mempertimbangkan Biaya Kualitas Menggunakan Pemrograman Dinamis", *Jurnal Itenas*, No 3, Vol 11, 115-123.

