

ESTIMASI BIAYA *MAINTENANCE* DENGAN METODE *MARKOV CHAIN* DAN PENENTUAN UMUR MESIN SERTA JUMLAH *MAINTENANCE CREW* YANG OPTIMAL DENGAN METODE *LIFE CYCLE COST* (STUDI KASUS: PT TOA GALVA)

¹Ade Rizka Eliyus, ²Judi Alhilman, ³Sutrisno

^{1,2,3}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Telkom University

¹aderizkaeliyus@gmail.com, ²judi.alhilman@gmail.com, ³sutrisno_mr@yahoo.com

Abstrak—PT Toa Galva Industries adalah perusahaan yang bergerak dibidang elektronika dengan spesialisasi *sound and communication*. Agar dapat memenuhi permintaan pasar, perusahaan membutuhkan mesin-mesin yang mendukung proses produksi, antara lain mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual*. Kedua mesin ini memiliki peran yang sangat penting dalam proses produksi, sehingga apabila mesin-mesin tersebut mengalami kerusakan akan mengakibatkan kerugian bagi perusahaan. Berdasarkan data historis, perawatan korektif untuk mesin *plastic injection* pada tahun 2013 mencapai 16% dari total perawatan korektif keseluruhan mesin produksi, sedangkan mesin *spinning* mencapai 14%. Hal ini terjadi karena masih sering terjadi kerusakan mendadak pada mesin. Manajer Pemeliharaan belum mampu menghitung kebutuhan biaya *maintenance* untuk menjamin performansi mesin karena tidak dapat memprediksi kondisi mesin-mesin tersebut. Selain itu, mesin akan mengalami penuaan dan peningkatan *hazard rate*, sehingga perhitungan umur mesin dan jumlah *maintenance crew* yang optimal perlu dilakukan. Penelitian ini menggunakan metode *Markov Chain* untuk mengetahui kondisi mesin pada tahun yang akan datang sehingga dapat mengestimasi biaya *maintenance* yang dibutuhkan. Di samping itu, penelitian ini menggunakan metode *Life Cycle Cost* untuk menentukan umur mesin dan jumlah *maintenance crew* yang optimal. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan *Markov Chain*, penelitian ini menghasilkan total biaya *maintenance* selama 5 tahun untuk mesin *plastic injection* adalah sebesar Rp 607,335,692.62 dan untuk mesin *spinning manual* adalah sebesar Rp 302,480,000. Berdasarkan perhitungan *LCC*, maka total *LCC* yang paling rendah untuk mesin *plastic injection* adalah Rp 5,287,581,342.10 yang menghasilkan jumlah *maintenance set crew* sebanyak 1 orang/*shift* dan umur mesin 10 tahun. Sedangkan total *LCC* yang paling rendah untuk mesin *spinning manual* adalah Rp 1,434,002,591.21 yang menghasilkan jumlah *maintenance crew* sebanyak 1 orang/*shift* dan umur mesin 3 tahun.

Kata Kunci—Manajemen Perawatan, Biaya *Maintenance*, *Markov Chain*, *Life Cycle Cost*

I. PENDAHULUAN

PT Toa Galva Industries adalah perusahaan yang bergerak dibidang elektronika dengan spesialisasi *sound and communication*. Produk-produk yang dihasilkan merupakan produk yang berkualitas dan ramah lingkungan sehingga produk Toa ini sangat diminati oleh masyarakat baik dari dalam maupun luar negeri. Sebesar 70% produk-produk yang dihasilkan oleh perusahaan ini diekspor ke berbagai negara dan 30% sisanya didistribusikan di dalam negeri.

Agar perusahaan mampu memenuhi permintaan *customer*, perusahaan harus memperhatikan ketepatan waktu produksi. Namun, terdapat kendala yang menghambat ketepatan waktu produksi tersebut, salah satunya adalah kerusakan mesin produksi. PT Toa Galva Industries memiliki beberapa departemen, antara lain *Diaphragm*, *Metal Machine*, *PCB*, *Spinning*, *Roller Cut*, *Plastic Injection*, *Painting*, *Megaphone*, dan *Speaker*.

Pada departemen *plastic injection*, terdapat 8 mesin *plastic injection* dan bagian *spinning* terdapat 18 mesin *spinning manual* yang memiliki presentase *maintenance* yang cukup tinggi pada tahun 2012 dan tahun 2013. Mesin *plastic injection* berfungsi untuk mengubah bahan baku bijih plastik ABS dan fijero menjadi *horn megafon* dan *casing speaker*, sedangkan mesin *spinning manual* berfungsi untuk mengubah lempengan aluminium/besi menjadi *speaker horn*. *Horn* ini berguna untuk memperluas batasan frekuensi yang rendah dari pengeras suara sehingga menghasilkan suara yang lebih baik. Karena alasan inilah, mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual* memiliki peran yang sangat penting sehingga PT Toa Galva Industries melakukan kegiatan *maintenance* untuk mempertahankan fungsi mesin-mesin tersebut.

Departemen Pemeliharaan PT Toa Galva Industries telah menerapkan kegiatan *preventive maintenance* dan *corrective*

maintenance untuk merawat mesin-mesin di perusahaan. Meskipun demikian, kerusakan mendadak pada mesin masih sering terjadi sehingga menimbulkan *cost* yang tinggi.

Manajer bagian Pemeliharaan PT Toa Galva Industries belum mampu menghitung kebutuhan biaya *maintenance* per tahunnya untuk menjamin mesin-mesin di perusahaan dapat berfungsi dengan baik dan tidak menghambat proses produksi. Hal ini dikarenakan Manajer Pemeliharaan tidak dapat memprediksi kondisi mesin pada tahun berikutnya sehingga mengalami kesulitan dalam membuat rencana anggaran yang akan diberikan kepada pihak manajemen. Apabila terjadi kerusakan pada mesin, bagian pemeliharaan akan menunggu dana dari pihak manajemen terlebih dahulu sehingga mengakibatkan mesin mengalami *downtime* yang lebih lama. Semakin lama *downtime* yang dialami mesin, profit perusahaan akan semakin berkurang. Oleh sebab itu, perhitungan estimasi biaya *maintenance* perlu dilakukan untuk mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual*.

Mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual* suatu waktu akan mengalami *failure function*. Apabila mesin ini *failed*, maka kegiatan produksi akan terhenti dan menyebabkan kerugian bagi perusahaan. Mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual* telah dioperasikan selama lebih dari 20 tahun. Semakin lama digunakan, mesin akan mengalami penuaan dan peningkatan *hazard rate* pun akan terjadi. Hal ini akan menyebabkan biaya *maintenance* mesin dan *lost revenue* semakin tinggi. Oleh sebab itu, analisis umur mesin yang optimal agar perusahaan dapat mengetahui masa pensiun mesin sehingga mesin tidak dipaksakan untuk beroperasi setelah umur optimal.

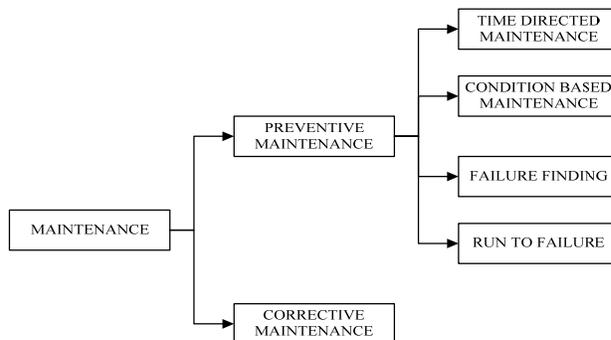
PT Toa Galva Industries telah menerapkan kegiatan pemeliharaan mesin yang dilakukan oleh *maintenance crew*. Perusahaan memiliki 6 orang *maintenance crew* yang merawat mesin *plastic injection* dan dibagi ke dalam tiga *shift*. Pembagian *shift* ini dilakukan karena perusahaan melaksanakan proses produksi selama 24 jam tiap harinya selama lima hari dalam seminggu. Untuk masing-masing *shift* diisi oleh 2 *maintenance crew*. Mesin *spinning manual* ditangani 4 orang *maintenance crew* yang dibagi ke dalam 2 *shift*. Masing-masing *shift* juga diisi oleh 2 *maintenance crew*. Jumlah *maintenance crew* merupakan hal yang penting dalam kegiatan *maintenance* karena jika terdapat mesin yang rusak secara bersamaan, mesin tersebut harus segera diperbaiki agar proses produksi tidak terhambat. Apabila jumlah *maintenance crew* tidak terpenuhi, mesin-mesin tersebut akan memiliki *downtime* yang lama sehingga dapat mengurangi *profit* perusahaan. Namun, jika perusahaan memiliki jumlah *maintenance crew* yang terlalu banyak juga akan meningkatkan *cost* berupa *overhead cost* dan biaya investasi peralatan *maintenance*.

Menurut Manajer Pemeliharaan, yaitu Bapak Hardi Susetyo, PT Toa Galva Industries saat ini masih kekurangan *maintenance crew* untuk merawat mesin di seluruh bagian perusahaan. Oleh karena itu, analisis terhadap jumlah *maintenance crew* perlu dilakukan untuk memperoleh jumlah *maintenance crew* perusahaan yang optimal.

II. STUDI LITERATUR

1. Manajemen Perawatan

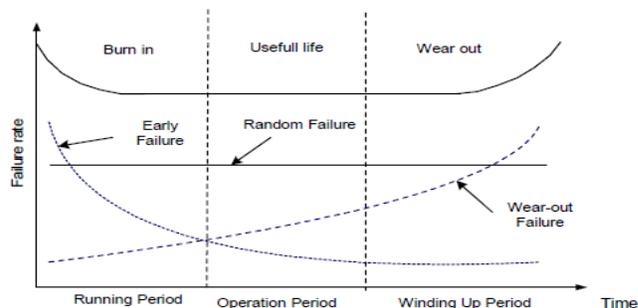
Perawatan (*maintenance*) didefinisikan sebagai aktivitas agar komponen/ sistem yang rusak akan dikembalikan/diperbaiki dalam suatu kondisi tertentu pada periode tertentu [1]. *Maintenance* diklasifikasikan sebagai berikut [2]:



Gambar 1 Klasifikasi *maintenance*

2. Pola Laju Kerusakan

Pola dasar dari fungsi laju kerusakan $\lambda(t)$ akan berubah sepanjang waktu dari produk tersebut mengalami usaha. Kurva laju kerusakan atau disebut *Bathub Curve* merupakan suatu kurva yang menunjukkan pola laju kerusakan sesaat yang umum bagi suatu produk. Pada umumnya laju kerusakan suatu sistem selalu berubah sesuai dengan bertambahnya waktu. Laju kerusakan suatu produk akan mengikuti suatu pola dasar sebagai berikut:



Gambar 2 *Bathub curve*

3. Markov Chain

Rantai markov (*Markov Chain*) merupakan sebuah teknik yang berhubungan dengan probabilitas akan *state* di masa mendatang dengan menganalisa probabilitas saat ini [3].

1) Probabilitas State

Setelah *state* dari sistem atau proses yang akan diteliti telah diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menentukan probabilitas sistem berada dalam *state* tertentu dengan menggunakan vektor probabilitas *state*.

$$n(i) = \text{vektor dari probabilitas state untuk periode } i \\ = (n_1, n_2, n_3, \dots, n_n)$$

dimana

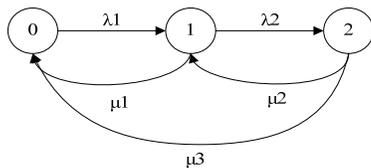
n = jumlah *state*
 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ = probabilitas berada dalam *state* ke-1, *state* ke-2, *state* ke- n

2) Failure Transition Probability Matrices

Suatu sistem akan mengalami laju kerusakan jika digunakan selama jangka waktu tertentu. Dalam proses markov, laju kerusakan dari sistem dilambangkan dengan *failure transition probability matrix*. TPM's merupakan probabilitas suatu sistem berubah kondisi pada satuan waktu tertentu, dengan demikian tingkat kerusakan dapat diprediksi. Pada Gambar 3 diilustrasikan proses terjadinya kerusakan.

3) Maintenance Transition Probability Matrices

Pada poin sebelumnya, dijelaskan jika tindakan *maintenance* tidak dilakukan, maka kondisi mesin akan tetap atau menurun pada tahun depan. Tetapi jika dilakukan tindakan pemeliharaan, maka *transition probability* akan berbeda. Suatu sistem akan kembali ke kondisi yang diinginkan sebesar μ .



Gambar 3 Ilustrasi *failure* dan *maintenance transition*

Perubahan yang terjadi akan menimbulkan kondisi yang lebih baik, tergantung dari jenis tindakan pemeliharaan yang dilakukan.

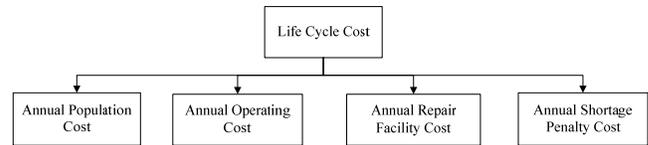
4. Simulasi Monte Carlo

Metode Monte Carlo adalah algoritma komputasi untuk mensimulasikan berbagai perilaku sistem fisika dan matematika [4]. Metode Monte Carlo digunakan dengan istilah *sampling statistic*. Penggunaan metode Monte Carlo memerlukan sejumlah besar bilangan acak, dan hal tersebut semakin mudah dengan perkembangan pembangkit bilangan acak, yang jauh lebih cepat dan praktis dibandingkan dengan metode sebelumnya yang menggunakan Tabel bilangan acak untuk *sampling statistic*.

5. Life Cycle Cost

Life Cycle Cost merupakan penjumlahan perkiraan biaya dari awal hingga penyelesaian, baik peralatan maupun proyek seperti yang ditentukan oleh studi analisis dan perkiraan pengeluaran total yang dialami selama hidup [5]. Tujuan dari analisis LCC adalah untuk memilih pendekatan biaya yang paling efektif dari serangkaian alternatif sehingga *cost term ownership* (kepemilikan) yang paling pendek tercapai.

Dalam penelitian ini, permasalahan dimodelkan melalui pendekatan LCC, yang diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 4 Model *life cycle cost*

Life cycle cost terdiri atas [6]:

1. *Annual population cost*
2. *Annual operating cost*
3. *Annual repair facility cost*
4. *Annual shortage penalty cost*

$$AELCC = PC + OC + RC + SC$$

Dimana: AELCC : *annual equivalent life cycle cost*

PC : *annual equivalent population cost*

OC : *annual operating cost*

RC : *annual repair facility cost*

SC : *annual shortage penalty cost*

III. METODOLOGI PENELITIAN

1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Bagian *Plastic Injection* dan Bagian *Spinning* PT Toa Galva Industries yang berlokasi di Depok pada bulan November 2013-Juni 2014.

2. Metode Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk penelitian ini diperoleh melalui :

1. Studi Literatur yaitu metode pengumpulan data dengan mempelajari teori dan ilmu yang akan dijadikan sebagai dasar dalam menyelesaikan masalah penelitian. Teori yang digunakan dalam penelitian ini adalah konsep manajemen perawatan, konsep statistika, *Markov Chain*, dan *Life Cycle Cost*
2. Studi Lapangan yaitu metode pengumpulan data dengan melakukan *survey* langsung ke lapangan untuk memperoleh data-data pendukung dan informasi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah.
3. Teknik pengumpulan data yang dilakukan adalah wawancara dan observasi. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi :
 - a. Data *time to failure*
 - b. Data *time to repair*
 - c. *Existing maintenance cost*
 - d. Data harga mesin
 - e. Jumlah *maintenance crew existing*
 - f. Data *energy cost* dan *labor operating cost*
 - g. Data *shortage cost*
 - h. Data jumlah mesin

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Life Data Analysis

1) Mesin Plastic Injection

Data waktu antar kegagalan (*Time To Failure*) dan waktu antar perbaikan (*Time To Repair*) yang digunakan adalah data mesin *plastic injection* tahun 2012 hingga 2013. Data hasil sampling untuk mesin *plastic injection* berjumlah 51.

Berdasarkan hasil plotting distribusi menggunakan software Avsim+ 9.0 dan uji kecocokan distribusi menggunakan uji Kolmogorov Smirnov, maka diperoleh:

TABEL I
DISTRIBUSI YANG MEWAKILI TTF MESIN PLASTIC INJECTION

Mesin	Distribusi	Parameter Distribusi TTF	
		η	β
Plastic Injection	Weibull	η	300.823
		β	0.730876
		γ	0

TABEL II
DISTRIBUSI YANG MEWAKILI TTR MESIN PLASTIC INJECTION

Mesin	Distribusi	Parameter Distribusi TTR	
Plastic Injection	Eksponensial	μ	1.28451

Penentuan parameter keandalan dilakukan berdasarkan distribusi yang mewakili. Distribusi yang paling mewakili untuk data *time to failure* bagi mesin *plastic injection* adalah distribusi weibull, sedangkan distribusi yang paling mewakili data *time to repair* adalah distribusi eksponensial. Adapun penentuan parameter keandalan MTBF dan MTTR mesin *plastic injection* adalah sebagai berikut:

TABEL III
PARAMETER KEANDALAN TTF MESIN PLASTIC INJECTION

Mesin	$(1/\beta+1)$	$\Gamma(1/\beta+1)$	μ	MTBF (Clock Hours)
Plastic Injection	2.3682	1.21836	-	366.5107

TABEL IV
PARAMETER KEANDALAN TTR MESIN PLASTIC INJECTION

Mesin	$(1/\beta+1)$	$\Gamma(1/\beta+1)$	μ	MTTR (Clock Hours)
Plastic Injection	-	-	1.28451	1.28451

V. MESIN SPINNING MANUAL

Data waktu antar kegagalan (*Time To Failure*) dan waktu antar perbaikan (*Time To Repair*) yang digunakan adalah data mesin *spinning manual* tahun 2012 hingga 2013. Data hasil sampling untuk mesin *spinning manual* berjumlah 20. Berdasarkan hasil plotting distribusi menggunakan software Avsim+ 9.0 dan uji kecocokan distribusi menggunakan uji Kolmogorov Smirnov, maka diperoleh:

TABEL V
DISTRIBUSI YANG MEWAKILI TTF MESIN SPINNING MANUAL

Mesin	Distribusi	Parameter Distribusi TTF	
Spinning Manual	Eksponensial	μ	789.6

TABEL VI
DISTRIBUSI YANG MEWAKILI TTF MESIN SPINNING MANUAL

Mesin	Distribusi	Parameter Distribusi TTR	
		η	β
Spinning Manual	Weibull	η	0.482559
		β	2.51899
		γ	0

Penentuan parameter keandalan dilakukan berdasarkan distribusi yang mewakili. Distribusi yang paling mewakili untuk data *time to failure* bagi mesin *spinning manual* adalah distribusi eksponensial, sedangkan distribusi yang paling mewakili data *time to repair* adalah distribusi weibull. Adapun penentuan parameter keandalan MTBF dan MTTR mesin *spinning manual* adalah sebagai berikut:

TABEL VII
PARAMETER KEANDALAN TTF MESIN SPINNING MANUAL

Mesin	$(1/\beta+1)$	$\Gamma(1/\beta+1)$	μ	MTBF (Clock Hours)
Spinning Manual	-	-	789.6	789.6

TABEL VIII
PARAMETER KEANDALAN TTR MESIN SPINNING MANUAL

Mesin	$(1/\beta+1)$	$\Gamma(1/\beta+1)$	μ	MTTR (Clock Hours)
Spinning Manual	1.3970	0.88785	-	0.4284

B. Markov Chain

1) Klasifikasi Kondisi Mesin

Klasifikasi kondisi bertujuan untuk mempermudah pengambilan keputusan jenis tindakan pemeliharaan yang tepat. Pada Tabel di bawah ini, terdapat 3 kondisi yang mewakili keadaan mesin *plastic injection* dan *spinning manual* beserta kategorisasi nilai atau jenis kerusakan.

TABEL IX
KLASIFIKASI KONDISI MESIN PLASTIC INJECTION

No.	Performance Indicator	Klasifikasi Kondisi Mesin Plastic Injection		
		Good	Bad	Very Bad
1	Oli Hidrolik	High level	Medium level	Low level
2	Motor	Running well	Noisy	Off
3	Hose mesin	Tidak Bocor	Bocor	-
4	Heater	Panas	Tidak panas / overheating	-
5	Monitor	Berfungsi	Tidak berfungsi	-
6	Peralatan kontrol	Berfungsi	Tidak berfungsi	-

TABEL X
KLASIFIKASI KONDISI MESIN SPINNING MANUAL

No.	Performance Indicator	Klasifikasi Kondisi Mesin Spinning Manual		
		Good	Bad	Very Bad
1	Motor	Running well	Noisy	Off
2	V-Belt	Tidak retak	Kendur/retak	Putus
3	Bearing	Tidak berisik	Berisik	-
4	Push Button	Berfungsi	Tidak berfungsi	-

2) *Identifikasi Performance Indicator Aktual*

Identifikasi dilakukan pada 8 mesin *plastic injection* dan 16 mesin *spinning manual*. Pengukuran dilakukan setiap minggu pada tahun 2013 terhadap *performance indicator* yang telah ditetapkan. Identifikasi ini bertujuan untuk mendapatkan *probability vector* yang digunakan pada proses *markov chain*.

3) *Probability Vector*

Setelah mengidentifikasi *performance indicator* aktual, maka selanjutnya menghitung *probability vector*.

1. Mesin *Plastic Injection*

- *Probability vector* pada indikator oli hidrolik adalah:
 $V_{\text{oli hidrolik}} = | 0.8269 \quad 0.0962 \quad 0.0769 |$

- *Probability vector* pada indikator motor adalah:
 $V_{\text{motor}} = | 0.8846 \quad 0.0769 \quad 0.0385 |$

- *Probability vector* pada indikator hose mesin adalah:
 $V_{\text{hose mesin}} = | 0.8846 \quad 0.1154 |$

- *Probability vector* pada indikator heater adalah:
 $V_{\text{heater}} = | 0.8846 \quad 0.1154 |$

- *Probability vector* pada indikator monitor adalah:
 $V_{\text{monitor}} = | 0.9423 \quad 0.0577 |$

- *Probability vector* pada indikator peralatan kontrol adalah:
 $V_{\text{peralatan kontrol}} = | 0.8654 \quad 0.1346 |$

2. Mesin *Spinning Manual*

- *Probability vector* pada indikator motor adalah:
 $V_{\text{motor}} = | 0.8269 \quad 0.0769 \quad 0.0962 |$

- *Probability vector* pada indikator v-belt adalah:
 $V_{\text{v-belt}} = | 0.8269 \quad 0.0769 \quad 0.0962 |$

- *Probability vector* pada indikator bearing adalah:
 $V_{\text{bearing}} = | 0.9038 \quad 0.0962 |$

- *Probability vector* pada indikator push button adalah:
 $V_{\text{push button}} = | 0.9231 \quad 0.0769 |$

4) *Transition Probability Matrices*

Transition probability matrices diperoleh dengan melakukan simulasi monte carlo terlebih dahulu. Simulasi monte carlo digunakan pada penelitian ini karena data historis kondisi mesin *plastic injection* dan *spinning manual* tidak cukup dijadikan landasan untuk menentukan *transition probability matrix*. Jumlah tahun yang cukup untuk menentukan *transition probability matrix* adalah 10 tahun [7], sedangkan data historis yang dimiliki PT Toa Galva Industries hanya 2 tahun. Dengan demikian simulasi monte carlo digunakan untuk mencukupkan data historis. Dari hasil simulasi monte carlo, maka diperoleh *transition probability matrix* untuk mesin *plastic injection* dan *spinning manual*.

5) *Biaya Maintenance 5 Tahun ke Depan*

Perhitungan biaya *maintenance* hanya dilakukan untuk kegiatan *repair*, sedangkan biaya *maintenance* tetap tidak dilakukan perhitungan dengan metode *markov chain*. Hal ini disebabkan biaya tersebut sifatnya tidak sensitif dan kecil kemungkinan terjadinya perubahan sesuai dengan perencanaan. Jika terdapat perubahan pun jumlahnya tidak terlalu berbeda dengan biaya yang direncanakan. Estimasi biaya *maintenance* untuk masing-masing mesin adalah sebagai berikut

1. Mesin *plastic injection*

TABEL XI
MAINTENANCE COST MESIN PLASTIC INJECTION

Year	Maintenance Cost		Total Maintenance Cost
	Fix Maintenance Cost	Repair Cost	
2013	Rp 18,549,538.75	Rp 75,038,691.09	Rp 93,588,229.84
2014	Rp 18,549,538.75	Rp 72,199,953.81	Rp 90,749,492.56
2015	Rp 18,549,538.75	Rp 85,699,953.81	Rp 104,249,492.56
2016	Rp 18,549,538.75	Rp 91,699,953.81	Rp 110,249,492.56
2017	Rp 18,549,538.75	Rp 85,699,953.81	Rp 104,249,492.56
2018	Rp 18,549,538.75	Rp 85,699,953.81	Rp 104,249,492.56

2. Mesin *Spinning Manual*

TABEL XII
MAINTENANCE COST MESIN SPINNING MANUAL

Year	Maintenance Cost		Total Maintenance Cost
	Fix Maintenance Cost	Repair Cost	
2013	Rp 37,555,000.00	Rp 14,910,000.00	Rp 52,465,000.00
2014	Rp 37,555,000.00	Rp 13,605,000.00	Rp 51,160,000.00
2015	Rp 37,555,000.00	Rp 12,105,000.00	Rp 49,660,000.00
2016	Rp 37,555,000.00	Rp 12,140,000.00	Rp 49,695,000.00
2017	Rp 37,555,000.00	Rp 12,195,000.00	Rp 49,750,000.00
2018	Rp 37,555,000.00	Rp 12,195,000.00	Rp 49,750,000.00

6) *Life Cycle Cost*

Total *Life cycle cost* merupakan perhitungan total biaya keseluruhan sistem, mulai dari awal pembelian sampai dengan akhir hidup sistem tersebut. Total LCC didapat dari penjumlahan *population cost*, *operating cost*, *repair facility cost*, dan *shortage cost*. Hasil perhitungan LCC untuk mesin *plastic injection* dan mesin *spinning manual* adalah sebagai berikut:

1. Mesin *Plastic Injection*

TABEL XIII
TOTAL LCC MESIN *PLASTIC INJECTION*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3
1	Rp 17,347,763,532.12	Rp 10,141,336,660.75	Rp 7,820,478,170.95
2	Rp 17,444,395,128.81	Rp 10,243,262,859.79	Rp 7,927,956,238.36
3	Rp 17,541,592,208.93	Rp 10,345,921,328.60	Rp 8,036,382,561.15
4	Rp 17,638,792,197.64	Rp 10,448,583,950.78	Rp 8,144,814,813.42
5	Rp 17,735,992,197.61	Rp 10,551,246,590.73	Rp 8,253,247,093.70
6	Rp 17,833,192,197.61	Rp 10,653,909,230.73	Rp 8,361,679,374.06

TABEL XIV
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *PLASTIC INJECTION*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 4	Tahun 5	Tahun 6
1	Rp 6,720,934,391.56	Rp 6,110,508,273.25	Rp 5,744,848,150.68
2	Rp 6,834,224,102.05	Rp 6,229,868,497.63	Rp 5,870,532,190.83
3	Rp 6,948,741,769.35	Rp 6,350,818,897.98	Rp 5,998,275,497.06
4	Rp 7,063,267,899.56	Rp 6,471,781,373.66	Rp 6,126,036,027.59
5	Rp 7,177,794,073.93	Rp 6,592,743,918.92	Rp 6,253,796,667.70
6	Rp 7,292,320,248.46	Rp 6,713,706,464.46	Rp 6,381,557,308.29

TABEL XV
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *PLASTIC INJECTION*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 7	Tahun 8	Tahun 9
1	Rp 5,521,831,004.21	Rp 5,387,796,918.39	Rp 5,315,287,541.45
2	Rp 5,654,080,286.68	Rp 5,526,832,539.77	Rp 5,461,299,004.43
3	Rp 5,788,996,341.63	Rp 5,669,321,720.39	Rp 5,611,783,033.27
4	Rp 5,923,936,956.85	Rp 5,811,845,908.35	Rp 5,762,316,939.36
5	Rp 6,058,877,744.62	Rp 5,954,370,367.83	Rp 5,912,851,272.48
6	Rp 6,193,818,533.21	Rp 6,096,894,828.73	Rp 6,063,385,608.09

TABEL XVI
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *PLASTIC INJECTION*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 10	Tahun 11	Tahun 12
1	Rp 5,287,581,342.10	Rp 5,295,753,900.25	Rp 5,332,328,933.85
2	Rp 5,440,711,619.83	Rp 5,456,079,703.46	Rp 5,499,834,711.48
3	Rp 5,599,634,279.03	Rp 5,623,907,386.52	Rp 5,677,056,720.65
4	Rp 5,758,627,968.74	Rp 5,791,836,173.24	Rp 5,854,422,558.70
5	Rp 5,917,622,329.68	Rp 5,959,766,014.32	Rp 6,031,790,051.74
6	Rp 6,076,616,694.94	Rp 6,127,695,862.89	Rp 6,209,157,557.77

TABEL XVII
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *PLASTIC INJECTION*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 13	Tahun 14	Tahun 15
1	Rp 5,393,763,677.29	Rp 5,477,991,754.04	Rp 5,583,194,356.96
2	Rp 5,568,307,431.65	Rp 5,659,260,163.20	Rp 5,770,643,927.72
3	Rp 5,755,435,889.41	Rp 5,856,829,352.55	Rp 5,979,208,799.53
4	Rp 5,942,768,831.04	Rp 6,054,689,064.29	Rp 6,188,186,129.11
5	Rp 6,130,104,368.35	Rp 6,252,552,843.50	Rp 6,397,169,826.32
6	Rp 6,317,439,928.16	Rp 6,450,416,661.67	Rp 6,606,153,590.86

Penentuan jumlah tim *maintenance* optimal dipilih dari total biaya yang mempunyai total *cost* yang paling kecil. Dari perhitungan total *LCC*, maka yang mempunyai total *cost* paling kecil untuk mesin *plastic injection* adalah M = 1 tim per *shift*, dengan n = 10 tahun dengan total *cost* sebesar Rp Rp 5,287,581,342.10.

2. Mesin *Spinning Manual*

TABEL XVIII
TOTAL LCC MESIN *SPINNING MANUAL*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3
1	Rp 1,609,605,856.80	Rp 1,442,612,731.27	Rp 1,434,002,591.21
2	Rp 1,674,276,787.89	Rp 1,510,887,272.26	Rp 1,506,074,120.51
3	Rp 1,739,076,510.24	Rp 1,579,328,635.04	Rp 1,578,361,739.18
4	Rp 1,803,876,509.74	Rp 1,647,770,394.25	Rp 1,650,649,924.84
5	Rp 1,868,676,509.74	Rp 1,716,212,154.25	Rp 1,722,938,111.75
6	Rp 1,933,476,509.74	Rp 1,784,653,914.25	Rp 1,795,226,298.66

TABEL XIX
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *SPINNING MANUAL*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 4	Tahun 5	Tahun 6
1	Rp 1,468,021,502.78	Rp 1,521,766,457.40	Rp 1,587,805,028.19
2	Rp 1,544,091,555.58	Rp 1,602,044,378.25	Rp 1,672,507,363.71
3	Rp 1,620,441,525.73	Rp 1,682,684,912.54	Rp 1,757,679,461.01
4	Rp 1,696,792,306.77	Rp 1,763,326,606.43	Rp 1,842,853,216.47
5	Rp 1,773,143,089.78	Rp 1,843,968,303.45	Rp 1,928,026,976.85
6	Rp 1,849,493,872.80	Rp 1,924,610,000.47	Rp 2,013,200,737.25

TABEL XX
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *SPINNING MANUAL*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 7	Tahun 8	Tahun 9
1	Rp 1,663,236,467.51	Rp 1,746,726,879.01	Rp 1,837,808,814.52
2	Rp 1,752,586,012.47	Rp 1,840,951,262.37	Rp 1,937,138,477.17
3	Rp 1,842,544,159.59	Rp 1,935,964,167.90	Rp 2,037,489,836.33
4	Rp 1,932,504,677.51	Rp 2,030,980,462.85	Rp 2,137,846,040.60
5	Rp 2,022,465,203.22	Rp 2,125,996,770.09	Rp 2,238,202,264.28
6	Rp 2,112,425,728.95	Rp 2,221,013,077.36	Rp 2,338,558,488.02

TABEL XXI
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *SPINNING MANUAL*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 10	Tahun 11	Tahun 12
1	Rp 1,936,396,801.32	Rp 2,042,700,300.38	Rp 2,157,029,797.51
2	Rp 2,041,062,171.74	Rp 2,152,927,914.75	Rp 2,273,037,032.65
3	Rp 2,147,051,459.36	Rp 2,264,871,201.81	Rp 2,391,267,818.60
4	Rp 2,253,047,672.12	Rp 2,376,824,385.63	Rp 2,509,512,745.97
5	Rp 2,359,043,915.53	Rp 2,488,777,617.85	Rp 2,627,757,749.71
6	Rp 2,465,040,159.05	Rp 2,600,730,850.25	Rp 2,746,002,753.77

TABEL XXII
LANJUTAN TOTAL LCC MESIN *SPINNING MANUAL*

M	Life Cycle Cost		
	Tahun 13	Tahun 14	Tahun 15
1	Rp 2,279,883,875.03	Rp 2,411,881,360.16	Rp 2,553,734,247.39
2	Rp 2,401,871,860.33	Rp 2,540,025,499.82	Rp 2,688,171,607.70
3	Rp 2,526,741,909.34	Rp 2,671,905,662.87	Rp 2,827,452,603.66
4	Rp 2,651,632,161.57	Rp 2,803,814,684.07	Rp 2,966,774,812.18
5	Rp 2,776,522,534.29	Rp 2,935,723,895.34	Rp 3,106,097,320.45
6	Rp 2,901,412,907.58	Rp 3,067,633,107.61	Rp 3,245,419,830.44

Penentuan jumlah tim *maintenance* optimal dipilih dari total biaya yang mempunyai total *cost* yang paling kecil. Dari perhitungan total *LCC*, maka yang mempunyai total *cost* paling kecil adalah M = 1 tim per *shift*, dengan n = 3 tahun dengan total *cost* sebesar Rp 1,434,002,591.21.

VI. PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Estimasi biaya *maintenance* dihitung dengan markov chain yang melibatkan komponen *probability vector*, *transition probability matrix*, dan biaya *maintenance* eksisting.
2. Umur mesin *plastic injection* yang meminimasi *Life Cycle Cost* adalah 10 tahun dengan jumlah mesin 8 unit, sedangkan umur mesin *spinning manual* yang meminimasi *Life Cycle Cost* adalah 3 tahun dengan jumlah mesin 18 unit.
3. Jumlah *maintenance crew* untuk mesin *plastic injection* dan *spinning manual* yang meminimasi *Life Cycle Cost* masing-masing adalah 1 *maintenance crew* per *shift*, dimana 1 *maintenance crew* terdiri atas 1 orang teknisi. Berdasarkan perhitungan dengan metode *Life Cycle Cost*, maka total *life cycle cost* yang paling minimum untuk mesin *plastic injection* adalah Rp 5,287,581,342.10 sedangkan untuk mesin *spinning manual* adalah Rp 1,434,002,591.21.

B. Saran

Bagi perusahaan:

1. Bagian Pemeliharaan PT Toa Galva Industries sebaiknya melakukan pencatatan waktu kerusakan dan waktu perbaikan mesin secara lebih detail agar dapat membantu bagian pemeliharaan dalam mengetahui karakteristik kerusakan mesin.
2. Perusahaan sebaiknya melakukan pencatatan biaya-biaya yang dikeluarkan untuk memelihara mesin dengan lebih rinci, sehingga tanggal, *maintenance material* yang dibutuhkan, dan biaya yang dibutuhkan dapat diketahui dengan jelas.

Bagi penelitian selanjutnya:

1. Perhitungan biaya *maintenance* dengan metode *Markov Chain* dapat dilakukan dengan bantuan *software* seperti Matlab, *Reliasoft* (Reno), ataupun *Mathcad* sehingga memberikan solusi simbolik.
2. Menggunakan data biaya-biaya untuk perhitungan *Life Cycle Cost* yang lebih akurat dan mengurangi asumsi biaya agar dapat menggambarkan kondisi perusahaan yang sebenarnya.
3. Melakukan perhitungan dengan metode *replacement*, sehingga dapat memberikan usulan kebijakan atau tindakan yang dapat dilakukan perusahaan apabila mesin telah mencapai umur optimalnya berdasarkan perhitungan dengan metode *Life Cycle Cost*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ebeling, Charles. 1997. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Singapore : The McGraw-Hill Companies Inc.
- [2] Marquez, Adolfo Crespo. 2007. *The Maintenance Management Framework*. Google Books, (online), (<http://books.google.com>, diakses 15 November 2013).
- [3] Render, B. dan Heizer, J. 2006. *Manajemen Operasi, Edisi Ketujuh*. Jakarta: Salemba Empat.
- [4] Susanto, Mudji. 2008. Simulasi Monte Carlo pada Proses Acak Berdasarkan Algoritma Jaringan Saraf. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Barringer, H. Paul and David P. Weber. 1996. *Life Cycle Cost Tutorial*. Texas: Marriott Houston Westside.
- [6] Blanchard, Fabrycky. 1990. *System Engineering and Analysis, 2nd ed.* Englewood Cliffs : Prentice-Hall.
- [7] FHWA (Federal Highway Administration). 2003. *Asphalt Pavement Warranties Technology and Practice in Europe*. Washington : Report FHWA-PL-04-002, FHWA.