

# Pengembangan Model Evaluasi *Total Cost of Ownership* untuk Mengestimasi Umur Ekonomis pada Sebuah Subsistem Produksi yang Terdiri dari Beberapa Komponen (Studi Kasus di Industri Semen)

Stanley Simon Mariono, dan Yudha Andrian Saputra

Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*E-mail:* yandrian@ie.its.ac.id

**Abstract**—Dalam ekonomi global, khususnya untuk item dengan nilai yang besar, pertimbangan biaya tidak berhenti hanya pada akuisisi melainkan sepanjang siklus hidup. Total Cost of Ownership (TCO) merupakan penjumlahan dari seluruh biaya dalam produk selama siklus hidup. Penggunaan istilah TCO dibandingkan life cycle cost (LCC) dipilih karena penelitian terfokus pada kepemilikan aset fisik. TCO dapat digunakan sebagai alat untuk membantu dalam pembuatan keputusan penggantian aset melalui penentuan umur ekonomis yang dihitung melalui equivalent uniform annualized cost (EUAC) TCO dengan mempertimbangkan discount rate dan tingkat inflasi per tahun. TCO melalui EUAC diproyeksikan ke dalam jangka waktu tertentu hingga mendapatkan nilai minimum untuk menentukan umur ekonomis. Umur ekonomis pada penelitian ini dipertimbangkan dalam ruang lingkup sistem untuk menemukan jangka waktu pengoperasian sistem yang dapat meminimalkan biaya dan menemukan komponen kritis yang berdampak pada EUAC dan umur ekonomis sistem tersebut. Pada penelitian ini, model TCO akan dikembangkan pada subsistem produksi yaitu Raw Mill dan Packer dengan mengakomodasi faktor ketidakpastian yang berkaitan dengan operasional, pemeliharaan, dan faktor produksi yang digunakan untuk mengestimasi umur ekonomis. Tujuan penelitian ini antara lain adalah melakukan evaluasi atau analisis terkait struktur TCO dan komponen penyusun dari TCO, mengembangkan teknik solusi dan rekayasa matematis yang diperlukan untuk mendapatkan profil TCO yang dapat digunakan untuk mengevaluasi TCO, dan menentukan estimasi umur ekonomis sistem, EUAC, profil biaya komponen, dan komponen kritis pada sistem Raw Mill dan Packer. Pengembangan model TCO dilakukan dengan metode simulasi monte carlo. Hasil estimasi umur ekonomis untuk sistem Raw Mill adalah 15 tahun dan Packer adalah 28 tahun. Nilai umur ekonomis dan EUAC pada sistem Raw Mill dipengaruhi secara signifikan oleh Roller Mill dari aspek kerusakan dan Raw Mill Fan dari aspek operasional, sedangkan untuk Packer dipengaruhi oleh Packing Machine secara keseluruhan.

**Kata Kunci**—Total Cost of Ownership, Umur Ekonomis, Equivalent Uniform Annualized Cost, Komponen Kritis, Simulasi Monte Carlo.

## I. PENDAHULUAN

SAAT ini, dalam ekonomi global dan karena berbagai tekanan pasar, keputusan akuisisi dalam keteknikan, khususnya untuk item dengan nilai yang cukup besar seperti

peralatan untuk produksi, tidak hanya dibuat berdasarkan biaya pengadaan di awal tetapi mempertimbangkan biaya dalam siklus hidup [1]. Beberapa kasus mengindikasikan bahwa biaya kepemilikan (di luar biaya pembelian) seringkali melebihi biaya pembelian atau biaya akuisisi. Hal ini yang lantas mendasari munculnya konsep *Total Cost of Ownership* (TCO) atau biaya siklus hidup (LCC).

TCO adalah biaya pembelian sebuah aset ditambahkan dengan biaya untuk operasional. Baringer dan Webber, secara garis besar menjelaskan bahwa TCO dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu biaya akuisisi dan biaya berkelanjutan (sustaining cost) [2]. TCO dapat digunakan sebagai alat untuk mengevaluasi komponen biaya dan mengidentifikasi komponen biaya yang signifikan di dalam suatu siklus hidup. Raghavan dan Chowdhury pada tahun 2012 melakukan implementasi terhadap LCC operasional melalui penelitian terkait manajemen LCC pada komponen pembangkit listrik [3]. Tujuan penelitian terkait adalah menentukan net present value (NPV) dari biaya di masa depan yang berasosiasi dengan rencana tertentu dan meminimasi biaya dalam jangka panjang. TCO juga berguna sebagai alat untuk membandingkan objek dari aspek biaya. Perbandingan alternatif menggunakan TCO, salah satunya dilakukan oleh Wadud pada tahun 2017 melalui analisis TCO pada kendaraan yang terotomasi sepenuhnya atau fully automated vehicle [4]. Penelitian tersebut membandingkan TCO fully automated vehicles pada beberapa sektor kendaraan yang berbeda di UK.

TCO juga dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan oleh manajemen dalam perusahaan melalui evaluasi siklus hidup [5]. Salah satu keputusan yang dipertimbangkan adalah terkait penggantian aset menggunakan indikator umur ekonomis. Umur ekonomis adalah jangka waktu penggunaan aset yang paling menguntungkan dari segi biaya sebelum melakukan penggantian. Pengambilan keputusan dengan aspek biaya dapat dianalisis melalui indikator finansial yang mengakomodasi time value of money (TVM) yaitu *net present value* (NPV) dan *equivalent uniform annualized cost* (EUAC). Menurut Sullivan, umur ekonomis dapat didefinisikan sebagai periode waktu (tahun) yang menghasilkan minimum EUAC [6]. Penelitian terkait penggunaan indikator finansial untuk

menentukan umur ekonomis dilakukan oleh Hanafi pada tahun 2019 melalui penelitian tentang manajemen biaya siklus hidup pada suatu komponen atau mesin dalam sistem produksi dengan mempertimbangkan aspek keandalan untuk menentukan umur ekonomis asset

Beberapa penelitian yang dipaparkan menggunakan TCO untuk mengevaluasi aset atau entitas tunggal. Pada kenyataannya dalam industri terutama di bidang manufaktur, aset yang dimiliki akan saling berinteraksi membentuk sebuah sistem untuk menghasilkan produk. Salah satu contoh interaksi yang terjadi adalah terkait kerusakan. Penelitian terkait penerapan TCO dalam sistem produksi dilakukan oleh Patil melalui penelitian tentang optimasi biaya siklus hidup pada mesin band saw cutting dengan analisis keandalan [7]. Kekurangan dari penelitian oleh Patil adalah tidak mempertimbangkan adanya keacakan pada variabel input seperti pada biaya dan kemungkinan kerusakan mesin.

Penelitian ini akan mencoba untuk melakukan pengembangan model evaluasi TCO atau LCC pada suatu sistem dengan mempertimbangkan adanya unsur ketidakpastian. Evaluasi TCO dalam ruang lingkup sistem menjadi suatu topik bahasan yang perlu dikaji karena melibatkan beberapa komponen yang saling berinteraksi dari aspek biaya dan produktivitas dengan susunan sistem tertentu, sehingga hasil yang didapat lebih komprehensif.

Sistem yang akan diobservasi adalah subsistem produksi pada industri semen yang terdiri dari beberapa komponen yaitu Raw Mill dan Packer. Kedua sistem ini dipilih karena dapat merepresentasikan susunan sistem yang terdiri dari seri dan parallel. Sistem Raw Mill merupakan sistem yang cukup kritis karena bahan yang diproses masih berupa bahan setengah jadi. Berbeda dengan Packer dimana bahan yang diproses sudah dalam bentuk barang jadi. Biaya yang akan dipertimbangkan dalam penelitian ini antara lain adalah biaya akuisisi, biaya operasional, biaya konsekuensi, dan biaya pemeliharaan.

Model ini akan mengestimasi biaya siklus hidup untuk beberapa periode ke depan dengan melakukan pengolahan dari data historis untuk menemukan pola distribusi statistik sebagai input dan menjalankan metode simulasi monte carlo. Simulasi monte carlo dipilih karena fungsinya untuk memodelkan resiko dari outcome yang tidak pasti seperti kerusakan system [8]. Output yang diharapkan dari model TCO ini adalah umur ekonomis sistem, EUAC, profil biaya tiap komponen, dan komponen kritis sistem.

Tujuan dari penelitian ini antara lain adalah: (1) Melakukan evaluasi atau analisis terkait struktur TCO dan komponen penyusun dari TCO pada sistem Raw Mill dan Packer. (2) Mengembangkan teknik solusi dan rekayasa matematis yang diperlukan untuk mendapatkan profil TCO yang dapat digunakan untuk mengevaluasi TCO dari sistem Raw Mill dan Packer. (3) Menentukan estimasi umur ekonomis, EUAC, profil biaya, dan komponen kritis pada sistem Raw Mill dan Packer. Penelitian ini terbatas pada dua objek amatan yaitu sistem Raw Mill dan Packer.

## II. METODOLOGI DAN DATA

### A. Total Cost of Ownership

Total cost of ownership (TCO) adalah seluruh biaya yang diasosiasikan dengan proyek, program, atau aset sepanjang hidupnya. TCO atau LCC secara definisi adalah penjumlahan dari biaya langsung, tidak langsung, berulang, tidak berulang, dan biaya lainnya yang dikenakan atau diestimasi untuk dikenakan pada tahap perancangan, riset dan pengembangan, investasi, operasi, pemeliharaan, retirement, dan tahapan lain yang mendukung sepanjang siklus hidup [9].

### B. Umur Ekonomis

Umur ekonomis secara konsep umum didefinisikan sebagai jangka waktu penggunaan aset, dimana penggunaan aset terkini masih lebih menguntungkan daripada melakukan penggantian. Secara teknis, umur ekonomis dapat didefinisikan sebagai periode waktu (tahun) yang menghasilkan minimum EUAC untuk memiliki dan mengoperasikan aset.

### C. Keandalan dan Availabilitas

Keandalan dalam definisi formal adalah peluang yang dimiliki suatu item untuk dapat menjalankan fungsinya dengan baik pada periode tertentu dalam kondisi operasi tertentu pula tanpa adanya kerusakan atau failure [10]. Keandalan untuk suatu sistem dapat digambarkan dengan menggunakan jaringan keandalan yang terdiri dari susunan seri, parallel, dan *k-out-of-n* [10]. Availabilitas dapat didefinisikan sebagai peluang suatu sistem atau komponen dapat digunakan pada suatu rentang waktu dan kondisi yang telah ditentukan [10].

### D. Probability plotting untuk analisis distribusi

Probability plot adalah teknik untuk menilai atau menentukan apakah sekumpulan data mengikuti sebuah distribusi probabilitas seperti Normal atau Weibull [11]. Probability plot diukur dengan koefisien korelasi atau error untuk menemukan distribusi probabilitas dan parameter yang dapat menggambarkan dengan akurat kecenderungan dari sekumpulan data.

### E. Kriteria Kelayakan Finansial

Di dalam bidang teknik, finansial dipertimbangkan dalam suatu ilmu ekonomi teknik. Menurut Blank, ekonomi teknik melibatkan formulasi, estimasi, dan evaluasi hasil ekonomi dari alternatif yang dirancang untuk mencapai tujuan yang ditentukan [12]. Kriteria kelayakan finansial yang digunakan pada penelitian ini adalah *Net Present Value* (NPV) dan *Equivalent Uniform Annualized Cost* (EUAC).

$$NPV = \sum \frac{F}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Dimana  $F$  adalah nilai uang di masa depan,  $i$  adalah tingkat bunga,  $t$  adalah periode yang sedang di observasi.

$$EUAC = \frac{NPV \times i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (2)$$

Tabel 1.  
Biaya Akuisisi

Sistem	Biaya Akuisisi
Raw Mill	IDR 111,246,977,057
Packer	IDR 14,844,199,740

Tabel 2.  
Biaya Konsekuensi

Tonase/tahun	3,000,000
Jumlah Hari	320
Tonase/hari	9,375
Biaya konsekuensi/ton	IDR 200,000
Biaya konsekuensi/hari	IDR 1,875,000,000

Tabel 3.  
Waktu antar Kerusakan Raw Mill

Nama Equipment	Distribusi	Sq Error	P-value
Rotary Feeder	48 + EXPO(394)	0.050	>0.15
Roller Mill	WEIB(31.2, 0.591)	0.003	>0.15
Circulation Lube System	2 + WEIB(157, 0.336)	0.062	>0.15
Hydraulic System	73 + EXPO(500)	0.018	>0.15
Separator	WEIB(95.6, 0.536)	0.011	>0.15
Cyclone	200 + EXPO(816)	0.027	>0.15
Raw Mill Fan	9 + WEIB(212, 0.456)	0.057	>0.15

Dimana  $n$  adalah jumlah periode atau tahun yang diobservasi.

F. Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo merupakan teknik matematika terkomputerisasi yang dapat digunakan untuk membuat analisis kuantitatif dan pengambilan keputusan terhadap risiko. Metode ini banyak digunakan pada beberapa bidang seperti keuangan, manajemen proyek, energi, keteknikan, riset dan pengembangan, manufaktur, asuransi, minyak dan gas bumi, transportasi, dan lingkungan. Metode monte carlo tidak menghasilkan output yang eksak karena input data merupakan data skotastik yaitu data dengan nilai yang tidak pasti atau acak.

Beberapa tahap yang dilakukan dalam simulasi Monte Carlo antara lain [13]:

- 1) Menetapkan probability density function (pdf) untuk setiap model data input
- 2) Membangkitkan sejumlah N bilangan acak untuk setiap data input
- 3) Mengkombinasikan sampel acak untuk mendapatkan N vector input
- 4) Melakukan simulasi pada model sebanyak N kali sehingga didapatkan vector hasil, dan pemetaan input-output.
- 5) Setelah dilakukan proses simulasi maka akan muncul sekumpulan data output ( $y_1 \dots y_2 \dots y_N$ ) beserta pdf dari hasil tersebut.

G. Teknik Validasi

Validasi merupakan suatu tahap dalam simulasi untuk menentukan sejauh mana model simulasi dapat merepresentasikan kondisi nyata [14]. Validasi model simulasi dengan *input* yang tidak pasti perlu melalui tahap penentuan jumlah replikasi untuk mengakomodasi variabilitas. Output

Tabel 4.  
Waktu Perbaikan Raw Mill

Nama Equipment	Distribusi	Sq Error	P-value
Roller Mill	-0.5+WEIB(1.41, 0.79)	0.084	<0.005
Circulation Lube System	-0.5 + LOGN(0.772, 0.459)	0.010	<0.005
Hydraulic System	-0.5+LOGN(1.2, 1.15)	0.020	<0.005
Circulation Lube System	-0.5 + WEIB(0.759, 1.96)	0.000	
Separator	-0.5 + LOGN(0.597, 0.241)	0.008	
Cyclone	-0.5 + 3 * BETA(0.475, 1.23)	0.056	

Tabel 5.  
Biaya Pemeliharaan Korektif Raw Mill

Nama Equipment	Distribusi	Sq Error	P-value
Rotary Feeder 1	EXPO(2.34e+006)	0.133	0.0761
Roller Mill	EXPO(2.62e+007)	0.001	<0.01
Circulation Lube System 1	UNIF(-0.001, 4.05e+007)	0.160	>0.15
Hydraulic System	EXPO(2.65e+007)	0.032	>0.15
Separator	EXPO(2.82e+007)	0.033	>0.15
Raw Mill Fan	EXPO(6.73e+006)	0.042	>0.15

model simulasi diharapkan memenuhi batas nilai *error* tertentu sesuai yang ditetapkan.

Apabila nilai *error* sudah memenuhi syarat, maka tahap selanjutnya adalah melakukan validasi dengan data yang sudah disiapkan. Validasi dilakukan dengan menggunakan uji

student's t dua rataan populasi dan satu rataan populasi.

$$H_0: \mu_{simulasi} = \mu_{aktual} \tag{3}$$

$$H_1: \mu_{simulasi} \neq \mu_{aktual} \tag{4}$$

Dimana  $H_0$  adalah hipotesis *null*,  $H_1$  adalah hipotesis alternatif, dan  $\mu$  adalah rata – rata populasi.

Model dikatakan valid apabila hasil dari pengujian adalah tidak tolak  $h_0$  yang berarti tidak ada perbedaan antara rata – rata hasil simulasi dan rata – rata hasil pada kondisi aktual. Validasi dilakukan dengan menggunakan indikator t yang nilai nya didapat dari *pooled standard deviation* untuk uji hipotesis dua rataan populasi. Apabila, t hitung terletak di antara rentang nilai kritis pada Tabel *student's t* yaitu antara  $-t_{\alpha/2}$  dan  $t_{\alpha/2}$ . maka hasil pengujian adalah tidak tolak  $h_0$  sehingga dapat dikatakan bahwa model yang dibangun memenuhi syarat validasi.

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \tag{5}$$

Dimana  $s_p$  adalah *pooled standart deviation*,  $n_1$  adalah jumlah sampel pada populasi 1,  $n_2$  adalah jumlah sampel pada populasi 2,  $s_1$  adalah standar deviasi populasi 1, dan  $s_2$  adalah standar deviasi populasi 2.

Tabel 6.  
Biaya Pemeliharaan Preventif Raw Mill

Nama Equipment	Probabilitas Biaya = 0	Distribusi (Biaya > 0)	Sq Error	P-Value
Rotary Feeder 1	25%	UNIF(1.25e+006, 4.12e+008)	0.133	>0.15
Roller Mill	0%	2.72e+008 + 4.28e+009 * BETA(0.408, 0.514)	0.046	0.0623
Circulation Lube System 1	0%	1.91e+008 + EXPO(4.26e+008)	0.043	>0.15
Hydraulic System	0%	1.93e+007 + EXPO(2.08e+008)	0.016	>0.15
Main Drive for Raw Mill	38%	3.23e+007 + EXPO(3.36e+007)	0.035	>0.15
Circulation Lube System 2	13%	2.57e+007 + EXPO(1.67e+008)	0.032	>0.15
Separator	0%	2.52e+007 + EXPO(2.99e+008)	0.029	>0.15
Main Drive for Separator	13%	8.18e+007 + EXPO(1.11e+008)	0.035	>0.15
Circulating Lube System 2	88%	994000		
Grease System	75%	5.92e+006 + 1.01e+008 * BETA(0.112, 0.112)	0.211	<0.01
Fan				
Circulation System	38%	3.54e+005 + EXPO(3.03e+006)	0.075	>0.15
Water Spray	25%	1.88e+006 + EXPO(4.27e+007)	0.038	>0.15
Multicyclone	13%	8.22e+006 + EXPO(5.04e+007)	0.018	>0.15
Raw Mill Fan	0%	UNIF(2.93e+007, 1.95e+008)	0.113	>0.15
Ventury	100%			
Damper	88%	251651814		

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

Dimana  $t$  adalah nilai *student's t*,  $\bar{x}_1$  adalah rata – rata sampel pada populasi 1,  $\bar{x}_2$  adalah rata – rata sampel pada populasi 2.

H. Perancangan dan Pengembangan Model

Pembuatan model secara umum dibagi menjadi dua tahap yaitu identifikasi struktur TCO dan model perhitungan EUAC dan umur ekonomis.

1) Struktur Total Cost of Ownership

Komponen biaya yang dikalkulasi ke dalam TCO untuk penelitian ini adalah biaya akuisisi, biaya operasional, biaya konsekuensi, dan biaya pemeliharaan. Setiap komponen biaya ini dijumlahkan setiap tahun nya lalu dikonversi ke dalam EUAC. Biaya akuisisi merupakan biaya yang dikeluarkan untuk pembelian komponen sistem yaitu akuisisi tiap mesin seperti dalam tabel 1. Biaya operasional merupakan biaya yang dikeluarkan selama masa aktif sistem produksi di luar pemeliharaan yaitu biaya untuk penggunaan energi. Biaya konsekuensi merupakan biaya yang dikeluarkan sebagai akibat

Tabel 7.  
Hasil Validasi

Sistem Amatan	Data	Objek	t	Critical Value	Hasil
Raw Mill	Rata Rata Kerusakan	Sistem Raw Mill	-	1.97	Valid
		Sistem Raw Mill	0.101	1.97	Valid
	Hari Efektif Operasi	Sistem Raw Mill	-	1.97	Valid
Packer	Biaya Kepemilikan	Sistem Raw Mill	-	2.01	Valid
		Bucket Elevator	0.170	1.96	Valid
		Bucket Elevator Lini 2	0.810	1.96	Valid
	Total Hari Kerusakan	Packing Machine Lini 1	1.230	1.96	Valid
		Packing Machine Lini 2	1.162	1.96	Valid
		Packing Machine Lini 3	1.190	1.96	Valid
Biaya Kepemilikan	Sistem Packer	1	1.98	Valid	

Tabel 8.  
Data Historis TCO Raw Mill

Data	Biaya Pemeliharaan	Biaya Operasional	Biaya Konsekuensi
TCO 2012 - 2019	IDR 34,894,650,866	IDR 591,485,804,300	IDR 153,750,000,000
Persentase	4.47%	75.82%	19.71%

Tabel 9.  
Data Historis TCO Packer

Data	Biaya Pemeliharaan	Biaya Operasional
TCO 2012 - 2019	IDR 13,771,281,916	IDR 13,284,086,881
Persentase	50.90%	49.10%

kehilangan produksi seperti dalam table 2. Biaya pemeliharaan merupakan biaya yang dikeluarkan untuk perawatan berkala dan perbaikan pada kerusakan komponen seperti dalam tabel 5 dan tabel 6. Kedua sistem yang akan diobservasi memiliki struktur biaya yang berbeda. Sistem Raw Mill akan mempertimbangkan biaya konsekuensi karena sistem ini merupakan sistem kritis seperti dalam tabel 3 dan tabel 4, berbeda dengan sistem Packer yang hanya melakukan pengemasan, sehingga tidak terjadi kehilangan produksi apabila terjadi kerusakan.

2) Model perhitungan EUAC dan umur ekonomis

Perhitungan biaya siklus hidup dilakukan dengan menghitung empat elemen biaya secara terpisah. Setiap elemen biaya ini memiliki *output* antara dan *input* berupa eksak dan tidak pasti. Biaya operasional menghasilkan *output* antara yaitu penggunaan listrik dari konsumsi listrik tiap peralatan, efisiensi, dan waktu perbaikan yang tidak pasti. Penggunaan listrik ini lalu dihitung berdasarkan tarif listrik pada tahun tertentu. Biaya

Tabel 10.  
Hasil Umur Ekonomis dan EUAC Sistem

Objek Amatan	EUAC	Tahun Minimum	Umur Ekonomis
Raw Mill	IDR 112,164,469,660	2026	15
Raw Mill (Tanpa Konsekuensi)	IDR 91,479,935,146	2031	20
Packer	IDR 5,325,847,33	2039	28

Tabel 11.  
Profil Biaya Sistem Raw Mill

Nama Peralatan	%M	%O	%K	Persentase Total
Rotary Feeder 1	3.58%	0.11%	0.00%	0.24%
Roller Mill	53.20%	0.00%	83.53%	18.84%
Circulation Lube System 1	14.37%	0.06%	2.65%	1.21%
Hydraulic System	5.48%	0.19%	3.89%	1.15%
Main Drive for Roller Mill	0.94%	38.62%	0.00%	29.32%
Circulation Lube System 2	3.85%	0.37%	0.00%	0.45%
Separator	8.67%	0.00%	3.57%	1.09%
Main Drive for Separator	3.82%	2.63%	0.00%	2.17%
Circulation Lube System 3	0.00%	0.02%	0.00%	0.01%
Grease System	0.31%	0.00%	0.00%	0.01%
Fan Circulation System	0.05%	0.05%	0.00%	0.04%
Water Spray	0.76%	0.08%	0.00%	0.09%
Multicyclone	1.59%	0.12%	0.00%	0.16%
Raw Mill Fan	2.68%	57.75%	6.36%	45.16%
Ventury	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Damper	0.70%	0.00%	0.00%	0.03%

\*%M – Persentase Biaya Pemeliharaan

\*%O – Persentase Biaya Operasional

konsekuensi menghasilkan *output* antara yaitu total kehilangan produksi akibat waktu perbaikan sistem. Total kehilangan produksi lalu dihitung dengan biaya konsekuensi tiap ton. Biaya pemeliharaan menghasilkan *output* antara yaitu total biaya pemeliharaan preventif dari *input* biaya pemeliharaan preventif tiap peralatan yang tidak pasti dan total biaya pemeliharaan korektif dari *input* biaya pemeliharaan korektif tiap peralatan dan waktu antar kerusakan yang keduanya merupakan elemen ketidakpastian. Seluruh biaya akan diobservasi dan diproyeksikan ke dalam beberapa tahun ke depan dengan mempertimbangkan asumsi peningkatan tarif listrik dan inflasi. Tahun yang menunjukkan nilai minimum EUAC akan dijadikan sebagai batas periode umur ekonomis. Waktu antar kerusakan mesin dan waktu perbaikan mesin memberikan pengaruh pada biaya pemeliharaan, biaya operasional dan biaya konsekuensi.

### I. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data yang digunakan untuk perhitungan TCO terdiri dari data eksak dan data tidak pasti. Data tidak pasti akan diestimasi menggunakan distribusi probabilitas tertentu. Data pasti yang digunakan adalah data operasional, biaya konsekuensi tiap ton, dan biaya akuisisi. Data tidak pasti yang digunakan adalah waktu antar kerusakan, waktu perbaikan,

Tabel 12.  
Profil Biaya Sistem Packer

Nama Peralatan	%M	%O	Persentase Total Biaya
Bucket Elevator	20.70%	4.98%	12.98%
Bin Storage	0.04%	31.63%	15.55%
Packing Machine	60.68%	32.11%	46.65%
Bag Placer	9.94%	3.00%	6.53%
Belt Weigher	3.53%	1.05%	2.31%
Rear Loader	5.11%	27.22%	15.97%

biaya pemeliharaan preventif, dan biaya pemeliharaan korektif. Indikator yang digunakan untuk menilai akurasi distribusi probabilitas terhadap data aktual adalah *square error* dan *p-value*.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Validasi Model

Jenis data untuk validasi yang digunakan pada sistem Raw Mill dan Packer tidak sama. Data yang akan dibandingkan untuk sistem Raw Mill adalah jumlah hari efektif operasional, rata – rata jumlah kerusakan, dan total biaya kepemilikan di luar akuisisi. Data yang divalidasi untuk sistem Packer adalah hari efektif operasional untuk periode 2012 hingga 2019 dan total biaya kepemilikan di luar akuisisi. Langkah perhitungan akan dijabarkan untuk data rata – rata kerusakan pada Raw Mill.

Hasil perhitungan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi dan data historis sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi nyata sistem.

### B. Data Historis TCO

Data historis TCO diringkas dari periode 2012 hingga 2019 meliputi biaya akuisisi, biaya pemeliharaan, biaya operasional, dan biaya konsekuensi pada Tabel 8 dan tabel 9.

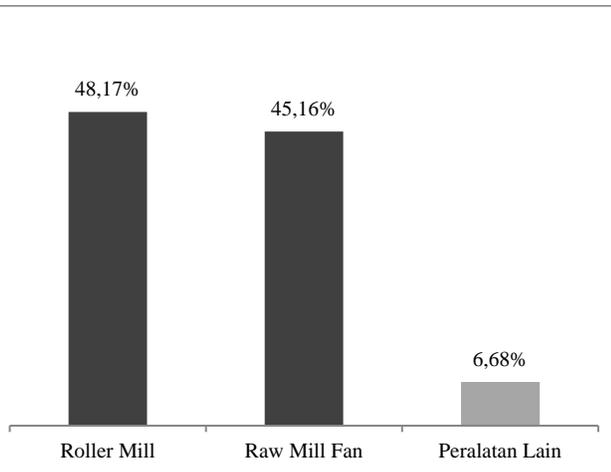
Total biaya pemeliharaan, biaya operasional, dan biaya konsekuensi sistem Raw Mill dari tahun 2012 hingga 2019 menurut data historis adalah sebesar Rp 34,894,650,866, Rp 591,485,804,300, dan Rp. 153,750,000,000. Total biaya pemeliharaan dan biaya operasional sistem Raw Mill dari tahun 2012 hingga 2019 menurut data historis adalah sebesar Rp 13,771,281,916 dan Rp 13,284,086,881.

### C. Umur Ekonomis dan EUAC

Simulasi dijalankan dalam 50 replikasi untuk EUAC dan 150 replikasi umur ekonomis. Perbedaan jumlah replikasi ini disesuaikan dengan kebutuhan untuk memenuhi syarat *error*. Tabel 10 merupakan hasil umur ekonomis dan EUAC sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata – rata minimum EUAC Raw Mill adalah Rp 112,164,469,660, Raw Mill tanpa biaya konsekuensi adalah Rp. 91,479,935,146, dan untuk Packer sebesar Rp 5,325,847,339. Rata - rata umur ekonomis untuk Raw Mill, Raw Mill tanpa mempertimbangkan biaya konsekuensi, dan Packer secara berturut – turut adalah 15, 20, dan 28 tahun.

### D. Profil Biaya Sistem

Biaya yang dikeluarkan oleh sistem merupakan susunan dari tiap komponen dan dampak dari interaksi yang terjadi. Pada



Gambar 1. Persentase Biaya Komponen Sistem Raw Mill.

sistem Raw Mill, proporsi antara biaya operasional, biaya konsekuensi, dan biaya pemeliharaan pada data historis secara berturut – turut adalah 4.47%, 75.82%, dan 19.71% sehingga menghasilkan persentase total biaya dalam Tabel 11 Roller Mill menghasilkan persentase biaya terbesar pada aspek pemeliharaan dan konsuensi. Raw Mill Fan menghasilkan persentase biaya terbesar pada aspek operasional. Pada sistem Packer, proporsi antara biaya operasional dan biaya pemeliharaan pada data historis adalah 49.10% banding 50.90% sehingga menghasilkan persentase total biaya dalam.Tabel 12. Packing Machine menghasilkan biaya pemeliharaan dan biaya operasional terbesar pada sistem Packer.

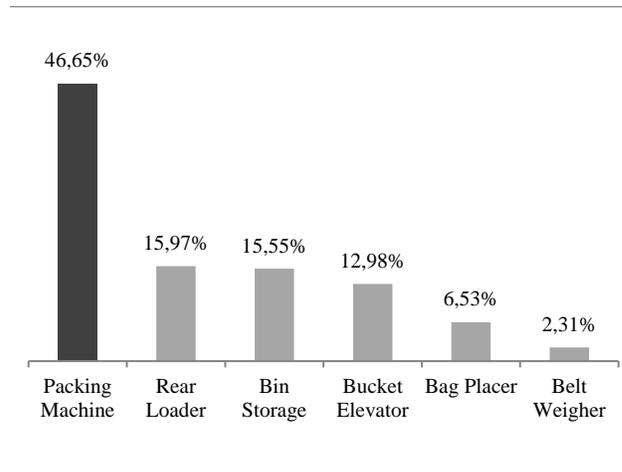
**E. Pembahasan Komponen Penyusun TCO**

Data historis TCO pada sistem Raw Mill menunjukkan bahwa proporsi biaya operasional, biaya konsekuensi, dan biaya pemeliharaan memiliki perbedaan dengan nilai perbandingan berturut – turut adalah 75.82%, 19.71% dan 4.47%. Pada sistem Packer, biaya operasional dan biaya pemeliharaan memiliki perbedaan yang sangat kecil dengan nilai perbandingan berturut – turut adalah 49.08% dan 50.92%.

Dari hasil pengolahan data historis TCO, biaya operasional pada sistem Raw Mill memberikan dampak yang signifikan terhadap nilai TCO, sedangkan untuk sistem Packer, biaya operasional dan biaya pemeliharaan memberikan pengaruh yang seimbang. Pada sistem Raw Mill dan Packer, perbandingan antara biaya pemeliharaan preventif dan korektif menghasilkan persentase yang sama melalui pengujian hipotesis. Untuk Raw Mill, sebesar 92.81% untuk biaya pemeliharaan preventif dan 7.19% untuk biaya pemeliharaan korektif, sedangkan untuk Packer adalah sebesar 93.77% dibandingkan 6.23%. Perbandingan yang jauh antara dua jenis biaya pemeliharaan ini menyebabkan biaya pemeliharaan korektif tidak membawa dampak yang signifikan terhadap TCO baik untuk sistem Raw Mill maupun Packer.

**F. Pembahasan EUAC dan Umur Ekonomis Sistem**

Nilai umur ekonomis ini memberi arti bahwa satu kesatuan sistem tersebut dapat digunakan dengan pengeluaran tahunan minimum sebesar nilai yang tertera pada Tabel selama 15 tahun untuk Raw Mill dan 28 tahun untuk Packer. Nilai EUAC dan



Gambar 2. Persentase Biaya Komponen Sistem Packer.

umur ekonomis pada sistem merupakan pengaruh dari interaksi antar komponen dalam sistem. Salah satu interaksi antar komponen yang dimaksud adalah kerusakan peralatan yang berkontribusi terhadap kehilangan produksi yang memunculkan biaya konsekuensi. Hal ini ditunjukkan melalui nilai umur ekonomis yang didapatkan dari sistem Raw Mill dengan skenario mempertimbangkan biaya konsekuensi dan tidak. Hasil simulasi menunjukkan terdapat perbedaan EUAC sebesar Rp 20,684,534,514 dan umur ekonomis sebesar 5 tahun.

Interaksi antar komponen dalam sistem dapat ditunjukkan juga melalui perbedaan nilai umur ekonomis yang dihitung pada komponen tunggal dan ketika diintegrasikan dalam sistem secara keseluruhan. Beberapa peralatan memiliki nilai umur ekonomis yang lebih besar atau lebih kecil dari sistem apabila dipertimbangkan sebagai komponen tunggal. Hal ini menjadi catatan penting karena pengambilan keputusan dengan indikator umur ekonomis seperti penggantian peralatan tidak bisa dilakukan hanya dengan memperhatikan umur ekonomis dari komponen tunggal melainkan harus dianalisis dalam ruang lingkup sistem. Beberapa peralatan bisa jadi diganti tidak sesuai dengan umur ekonomis nya, melainkan perlu dianalisis dampaknya terhadap sistem. Umur ekonomis pada sistem mempertimbangkan biaya konsekuensi sedangkan pada komponen tunggal tidak dipertimbangkan karena tidak ada interaksi untuk melakukan produksi bahan.

**G. Pembahasan Komponen Kritis Sistem**

Komponen kritis sistem yang dimaksud pada subbab ini mengacu pada komponen yang memberikan dampak signifikan terhadap beberapa hasil simulasi terutama TCO, EUAC, dan umur ekonomis. Penentuan komponen kritis ditentukan dengan salah satunya mengacu pada prinsip Pareto yang menjelaskan bahwa sekitar 80% dari hasil keseluruhan disebabkan oleh sekitar 20% kejadian, dengan kata lain sebagian besar efek disebabkan oleh sebagian kecil penyebab. Pada pembahasan komponen kritis, Peralatan Roller Mill yang sebelumnya dipisahkan dengan *main drive* nya akan digabungkan untuk melihat signifikansi nya dengan peralatan lain. Gambar 1 menunjukkan bahwa sistem Raw Mill, Roller Mill dan Raw

Mill Fan memberikan dampak yang signifikan terhadap biaya kepemilikan sekitar 93.32%. Hal ini menunjukkan dari jumlah subsistem atau peralatan sebesar 16 (peralatan Cyclone dan Rotary Feeder digabungkan menjadi satu kesatuan dalam Multicyclone), biaya kepemilikan sistem Raw Mill hanya didominasi oleh 12.5% komponen. Roller Mill mendominasi 53.2% biaya pemeliharaan dan 83.53% biaya konsekuensi, sedangkan Raw Mill Fan mendominasi 57.75% biaya operasional.

Pada sistem Packer, Gambar 2 menunjukkan bahwa Packing Machine mendominasi dengan proporsi biaya paling besar yaitu sebesar 46.65%. Peralatan di luar Packing Machine cenderung memberikan kontribusi tidak jauh berbeda. Peralatan ini memberikan kontribusi terbesar pada keseluruhan biaya yaitu biaya pemeliharaan dan biaya operasional.

Dominasi proporsi total biaya pada tiap komponen dalam sistem Raw Mill terhitung cukup besar apabila dibandingkan dengan sistem Packer. Komponen kritis pada sistem Raw Mill memberikan pengaruh yang jauh lebih signifikan dalam total biaya. Hal ini disebabkan oleh beberapa peralatan pada sistem Raw Mill yang merupakan komponen dengan tegangan listrik tinggi sehingga membutuhkan kapasitas listrik yang sangat besar dibandingkan Packer. Komponen kritis pada sistem Raw Mill juga disebabkan oleh adanya biaya konsekuensi sebagai dampak dari kehilangan kapasitas produksi akibat kerusakan peralatan dan waktu perbaikan sistem, dimana hanya satu peralatan yang mendominasi yaitu Roller Mill.

Berbeda dengan sistem Raw Mill, sistem Packer tidak mengalami pengurangan hari efektif operasional sistem dikarenakan susunan utama sistem yang berbentuk paralel. Pada sistem ini, hari efektif operasional dan waktu perbaikan juga tidak menjadi faktor yang penting karena barang yang diproses sudah berbentuk barang jadi, sehingga tidak ada kehilangan produksi apabila terdapat peralatan yang rusak.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

##### A. Kesimpulan

Berdasarkan tujuan penelitian, kesimpulan yang dapat diambil untuk penelitian ini antara lain: (1) Komponen penyusun TCO yang dipertimbangkan pada penelitian ini adalah biaya akuisisi, biaya operasional, biaya konsekuensi, dan biaya pemeliharaan. Biaya akuisisi sistem didapatkan dari biaya akuisisi tiap peralatan. Biaya operasional dipengaruhi oleh kebutuhan operasional tiap peralatan dan faktor eksternal. Kebutuhan operasional yang dimaksud meliputi kapasitas listrik, waktu efektif operasional, dan efisiensi, sedangkan faktor eksternal meliputi perubahan tarif listrik tiap tahun. Biaya pemeliharaan terbagi menjadi biaya pemeliharaan preventif dan korektif yang mempertimbangkan adanya inflasi. Biaya konsekuensi dihitung dari biaya konsekuensi tiap satuan ton dan total kehilangan produksi. Pada setiap sistem yang diobservasi, komponen biaya ini memiliki tingkatan dampak yang berbeda terhadap nilai TCO. Pada sistem tertentu, salah satu komponen biaya dapat memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap nilai TCO seperti signifikansi biaya operasional pada sistem Raw Mill dan di sisi lain tidak.

Biaya pemeliharaan korektif cenderung tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap nilai TCO dari hasil penelitian pada sistem Raw Mill dan Packer; (2) Penelitian ini melakukan pengembangan model untuk mengevaluasi TCO menggunakan simulasi monte carlo. Model yang dibangun pada penelitian ini mempertimbangkan susunan komponen dalam sistem yang terdiri dari susunan seri dan paralel. Model ini membangkitkan nilai acak pada waktu antar kerusakan sistem dari setiap peralatan, waktu perbaikan, dan biaya pemeliharaan tiap peralatan. TCO dihitung dari tahun 2011 hingga 2070 melibatkan asumsi inflasi sebesar 3% dan proyeksi peningkatan tarif listrik. Dari hasil simulasi model TCO, didapatkan profil biaya untuk setiap peralatan, sehingga dapat ditentukan komponen yang kritis terhadap nilai TCO; (3) Umur ekonomis sistem ditentukan dengan menghitung dan mencari nilai minimum EUAC melalui nilai TCO yang dihasilkan. Estimasi umur ekonomis pada sistem Raw Mill adalah sebesar 15 tahun dengan EUAC sebesar Rp. 112,164,469,660 dan pada sistem Packer sebesar 28 tahun dengan EUAC sebesar Rp. 5,325,847,339 yang memberi arti bahwa pengoperasian sistem selama jangka waktu tersebut memberikan keuntungan terbesar karena menghasilkan pengeluaran tahunan terendah. Pada sistem Raw Mill, komponen Roller Mill memberikan kontribusi biaya terbesar dari aspek konsekuensi akibat kehilangan produksi dan aspek pemeliharaan, sedangkan Raw Mill Fan berkontribusi besar terhadap biaya operasional. Pada sistem Packer, Packing Machine berkontribusi besar terhadap keseluruhan biaya operasional dan pemeliharaan. Evaluasi dalam ruang lingkup sistem memberikan pemahaman bahwa interaksi antar peralatan berdampak pada nilai umur ekonomis dan EUAC, sehingga nilai umur ekonomis yang dihitung pada komponen tunggal harus dipertimbangkan bersama satu sistem keseluruhan sebagai dasar pengambilan keputusan. Umur ekonomis menjadi indikator yang sesuai untuk melakukan evaluasi dalam ruang lingkup komponen tunggal dan ruang lingkup sistem secara bersamaan karena memberikan hasil yang sepadan, berbeda dengan indikator EUAC yang besaran nilainya sangat dipengaruhi oleh nilai akuisisi dan biaya kepemilikan.

##### B. Saran

Saran atau rekomendasi untuk perusahaan dan penelitian selanjutnya antara lain: (1) Keputusan penggantian tidak bisa serta merta dilakukan hanya dengan melihat nilai umur ekonomis dari penelitian saat ini. Umur ekonomis merupakan peringatan dini bahwa suatu objek memberikan keuntungan yang paling besar apabila dipertahankan dalam jangka waktu tersebut sekaligus memberi gambaran terkait dengan nilai minimum biaya tahunan suatu objek yang diestimasi akan dikeluarkan oleh perusahaan. Nilai umur ekonomis dari penelitian ini hanya berupa estimasi sehingga dapat berubah – ubah apabila diukur dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, perhitungan TCO dan penentuan umur ekonomis harus dievaluasi kembali dalam beberapa periode ke depan untuk mendapatkan hasil terbaru; (2) Penelitian terkait pengembangan model TCO dapat dikembangkan lebih lanjut untuk melakukan perbaikan pada TCO menggunakan indikator EUAC melalui

pengujian terhadap beberapa strategi; (3) Pencatatan biaya pemeliharaan dan kerusakan harus dilakukan dengan detail dan diperbarui secara berkala agar didapatkan estimasi nilai TCO yang lebih akurat dan strategi perbaikan yang tepat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. S. Dhillon, *Life cycle costing for engineers*. Crc Press, 2009.
- [2] H. P. Barringer and D. P. Weber, "Life Cycle Cost Tutorial. Houston." Gulf Publishing Company and Hydrocarbon Processing, 1996.
- [3] S. Raghavan and B. Chowdhury, "Developing life cycle management plans for power plant components," in *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 2012, pp. 1–6.
- [4] Z. Wadud, "Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 101, pp. 163–176, 2017.
- [5] D. Galar, P. Sandborn, and U. Kumar, *Maintenance costs and life cycle cost analysis*. CRC Press, 2017.
- [6] W. G. Sullivan, E. M. Wicks, and C. P. Koelling, *Engineering economy*. Pearson, 2015.
- [7] R. B. Patil, "Reliability analysis and life cycle cost optimization of band saw cutting machine," *Master Eng. Mech. Eng. thesis*, 2013.
- [8] S. Robinson, *Simulation: The Practice of Model Development and Use*, 2nd ed. UK: Red Globe Press, 2014.
- [9] J. V. Farr and I. Faber, *Engineering Economics of Life Cycle Cost Analysis*. CRC Press, 2018.
- [10] B. S. Dhillon, *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC press, 2006.
- [11] J. M. Chambers, W. S. Cleveland, B. Kleiner, and P. A. Tukey, "Graphical methods for data analysis. Wadsworth & Brooks," *Cole Stat. Ser.*, 1983.
- [12] L. T. Blank, A. J. Tarquin, and S. Iverson, *Engineering Economy*, vol. 1221. McGraw-Hill New York, 2005.
- [13] H. Zaroni, L. B. Maciel, D. B. Carvalho, and E. de O. Pamplona, "Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system," *Energy*, vol. 172, pp. 498–508, 2019.
- [14] R. G. Sargent, "Verification and validation of simulation models," in *Proceedings of the 2010 winter simulation conference*, 2010, pp. 166–183.