

PREVENTIVE MAINTENANCE SYSTEM DENGAN MODULARITY DESIGN SEBAGAI SOLUSI PENURUNAN BIAYA MAINTAINANCE (Studi Kasus di Perusahaan Tepung Ikan)

Willyanto Anggono

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra Surabaya
e-mail: willy@petra.ac.id

Julianingsih

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Industri, Universitas Kristen Petra Surabaya
e-mail: jningsih@peter.petra.ac.id

Linawati

Alumni Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Industri, Universitas Kristen Petra Surabaya

ABSTRAK

Modularity design telah banyak diterapkan di negara-negara Eropa terutama dalam hal perakitan dan manufaktur di bidang industri. *Modularity design* menyebabkan proses manufaktur dan perakitannya lebih sederhana dan murah. Perusahaan-perusahaan di Indonesia biasanya lebih banyak melakukan kegiatan *corrective maintenance* atau *preventive maintenance*. Dalam penelitian ini, *modularity design* dicoba diterapkan dalam kegiatan *preventive maintenance* di perusahaan tepung ikan di Indonesia. Pada penelitian ini dibandingkan biaya yang diperlukan untuk kegiatan *corrective maintenance*, *preventive maintenance* dan *preventive maintenance* dengan *modularity design*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penerapan *preventive maintenance* dengan *modularity design* dapat menurunkan biaya sebesar 35,98% dari keadaan awal (*corrective maintenance*).

Kata kunci: *corrective maintenance, preventive maintenance, modularity design.*

ABSTRACT

Modularity design has been applied in many European countries, especially in industrial assembling and manufacturing. *Modularity design* cause manufacture process and assembly process easier and cheaper. Many industries in Indonesia usually doing *corrective maintenance* or *preventive maintenance*. So, in this research, *modularity design* will be applied in *preventive maintenance* in fish mill Indonesian factory. In this research, *corrective maintenance* and *preventive maintenance* cost will be compared to *preventive maintenance* cost using *modularity design*. From the research, the application of *preventive maintenance* using *modularity design* reduces cost up to 35.98% from the initial condition (*corrective maintenance*).

Keywords: *corrective maintenance, preventive maintenance, modularity design.*

1. PENDAHULUAN

Modularity design banyak digunakan di negara Eropa terutama dalam hal perakitan dan manufaktur di bidang industri (Gershenson, Allamneni, and Prasad, 1999). Dengan adanya *modularity* maka pada proses manufaktur dan perakitannya akan lebih sederhana dan lebih murah. Di Indonesia, perakitan dan manufaktur jarang dilakukan. Biasanya di Indonesia lebih

banyak kegiatan *maintenance*. Dalam penelitian ini, *modularity design* diterapkan dalam kegiatan *maintenance* di perusahaan tepung ikan.

Penentuan jadwal *preventive maintenance* dalam perusahaan tepung ikan ini sulit untuk dilakukan secara teratur dan baik. Kesulitan tersebut diakibatkan oleh pengelompokan komponen-komponen penyusun mesin yang belum dilakukan dengan benar. Dengan kondisi yang demikian maka perusahaan pada umumnya melakukan perbaikan atau penggantian komponen mesin apabila komponen telah aus atau mesin tidak berfungsi dengan baik.

Untuk melakukan suatu sistem *preventive maintenance* diperlukan pengelompokan mesin berdasarkan fungsi dan proses. Pengelompokan ini dilakukan dengan desain *modularity* dengan harapan dapat mengurangi waktu *maintenance*. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem *preventive maintenance* dengan menggunakan *modularity design* untuk mencapai hasil yang diinginkan.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan biaya *maintenance* antara desain awal, desain *preventive maintenance*, dan desain *preventive maintenance* yang sudah menggunakan *modularity*. Penelitian ini juga dibatasi untuk perancangan jadwal penggantian pencegahan (*preventive*) pada komponen mesin yang usianya lebih kecil dari dua tahun.

2. TEORI DASAR

2.1. *Modularity*

Dalam menyusun produk yang modular digunakan perbandingan antara *component tree* dan *process graph* dari sebuah produk dan memastikan pada setiap detail level, atribut produk bersifat *independence* dan atribut lainnya selama memungkinkan untuk setiap detail level dari *life cycle process*.

Untuk meningkatkan *independence* dan *similarity*, sebuah produk didesain dengan segi *modularity* berikut:

1. *Attribute independence*, mengijinkan terjadinya desain ulang dari modul dengan meminimalisasi efek dari berhentinya sebuah produk.
2. *Process independence*. Setiap kegiatan dari setiap *life cycle process* dari tiap-tiap komponen dalam modul mempunyai sedikit *dependencies* dalam proses dari komponen *external*. Hal ini berarti proses dari modul selama *life cyclenya* bersifat *independen* dari proses yang dijalani *external* modul. Setiap *dependencies* yang terjadi berusaha untuk diminimalkan baik jumlah maupun kekritisannya. *Process independence* dapat mengakibatkan pengurangan biaya dalam setiap *life cycle process* dan desain ulang dari modul jika proses harus berubah.
3. *Process similarity*. Pengelompokkan komponen dan *subassembly* yang menjalani *life cycle process* yang sama ke dalam satu modul. *Process similarity* meminimalkan jumlah dari *external* komponen yang menjalani proses yang sama, menciptakan perbedaan jelas di antara modul, mengurangi proses yang berulang, dan mengurangi biaya proses. *Process similarity* juga menghemat usaha desain ulang dengan memastikan bahwa perubahan pada *life cycle process* secara individu hanya mempengaruhi satu modul dari produk.

Modularity memberikan desainer fleksibilitas untuk melakukan perubahan dalam proses. Keuntungan dari *modularity* adalah mengurangi biaya *life cycle* dengan mengurangi jumlah proses dan mengurangi proses yang berulang. Beberapa keuntungan lain dari *modularity* adalah:

1. Kemudahan dalam melakukan *update* produk.
2. Meningkatkan variasi dari produk.
3. Menurunkan *order lead time*.
4. Memudahkan dalam desain dan pengujiannya..

Pengukuran modularitas digunakan untuk membandingkan *modularity relative* dari 2 produk yang sejenis. Empat langkah pengukuran untuk memahami bentuk fisik dan hubungan dalam proses di antara komponen-komponen yaitu:

1. Membangun *component tree*. Sebuah *component tree* memberikan gambaran detail mengenai hubungan fisik diantara komponen-komponen pada level abstraksi. Untuk membangun *component tree*, produk dibagi dalam modul-modul dan komponen-komponen. Lebih lanjut modul-modul tersebut akan diklasifikasikan ke dalam *subassemblies*, kemudian menjadi individual komponen, dan terakhir atribut produk yang menjelaskan komponen tersebut.
2. Membangun *process graph*. Untuk setiap proses, *process graph* harus menggambarkan detail dari tiap tahap dari *life cycle*, setiap proses dalam tiap tahapan dan setiap kegiatan dan sub tugas dalam setiap proses. Komponen-komponen dikelompokkan bersama berdasarkan proses *manufacturing* yang dijalani dan setiap proses *manufacturing* diperluas yang meliputi kegiatan-kegiatan yang berhubungan dan sub tugas dari setiap proses.
3. Membangun matriks. Menggunakan *component tree* dan *process graph*, dua *modularity evaluation* matriks dibangun, satu untuk menyimpan data *similarity* dan satu untuk menyimpan *dependencies*.

2.2. Parameter dan Fungsi Keandalan

2.2.1. Mean Time To Failure. *Mean Time To Failure* (MTTF) merupakan nilai rata-rata waktu kegagalan dari sebuah sistem (komponen). MTTF dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (1)$$

di mana:

$f(t)$ = *probability density function*

t = waktu

$R(t)$ = *reliability function*.

2.5.2. Fungsi Keandalan Masing-Masing Distribusi. Fungsi dan parameter keandalan untuk masing-masing distribusi berbeda antara satu dengan yang lainnya. Di bawah ini akan diberikan fungsi keandalan untuk distribusi normal, lognormal, Weibull, dan eksponensial.

- Distribusi Normal

$$\text{Fungsi keandalan: } R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$$MTTF = \mu \quad (3)$$

- Distribusi lognormal

$$\text{Fungsi keandalan: } R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[\frac{-(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$MTTF = \exp \mu \quad (5)$$

$$\text{di mana: } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln ti$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln ti - \mu)^2}$$

- Distribusi Weibull

Fungsi keandalan: $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}$ (6)

MTTF = $\beta \Gamma\left[\frac{1}{\alpha} + 1\right]$ (7)

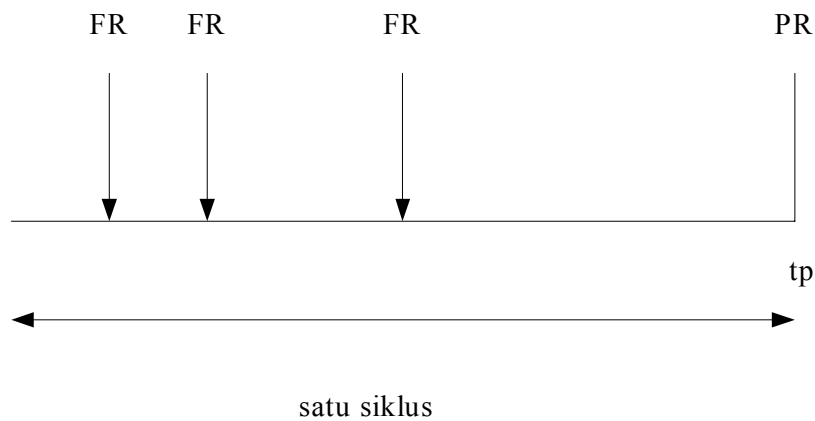
- Distribusi eksponensial

Fungsi keandalan: $R(t) = \exp(-\lambda.t)$ (8)

MTTF = $\frac{1}{\lambda}$ (9)

2.3. Replacement Decision

2.3.1. Model Penggantian Komponen yang Optimal. Model penggantian komponen yang akan digunakan adalah dengan melakukan penggantian komponen pada selang waktu tp dengan mempertimbangkan probabilitas terjadinya penggantian komponen akibat kerusakan (*failure replacement*) di dalam selang waktu tp tersebut. Model penggantian komponennya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Penggantian Komponen

Keterangan: FR = *Failure Replacement*, PR = *Preventive Replacement*

2.3.2. Model Perhitungan Total Ekspektasi Biaya Penggantian. Tujuan menentukan selang waktu penggantian komponen yang optimal adalah untuk meminimumkan total ekspektasi biaya penggantian per satuan waktu. Persamaan berikut merupakan total ekspektasi biaya penggantian komponen per satuan waktu.

$$TC(tp) = \frac{[C_p * R(tp)] + [C_f * F(tp)]}{tp} \quad (10)$$

di mana:

$TC(tp)$ = total ekspektasi biaya penggantian komponen per satuan waktu.

C_p = biaya akibat *preventive replacement*

C_f = biaya akibat *failure replacement*

$R(tp)$ = probabilitas komponen andal selama waktu tp

$F(tp)$ = probabilitas komponen gagal (tidak andal) selama waktu tp .

3. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Mempelajari proses pembuatan tepung ikan
- Mengelompokkan komponen-komponen mesin pembuat tepung ikan berdasarkan *design modularity*.
- Menentukan jenis distribusi dilakukan terhadap data selang waktu interval kerusakan komponen.
- Menghitung biaya yang dikeluarkan perusahaan akibat penggantian pencegahan dan korektif dari mesin.
- Menghitung fungsi keandalan dan nilai MTTF untuk masing-masing komponen.
- Menghitung selang waktu penggantian pencegahan yang optimal dengan menggunakan penghitungan biaya total (*total cost*) untuk masing-masing komponen dimana selang waktu penggantian pencegahan (tp) optimal dipilih pada saat total biaya minimum.
- Analisa selang waktu penggantian pencegahan (tp) untuk masing-masing komponen
- Perancangan jadwal penerapan yang optimal bagi perusahaan.
- Penghitungan selang waktu penggantian untuk per modul yang optimal dan selang waktu penggantian modifikasi yang dilakukan pada waktu jam istirahat produksi.
- Membandingkan biaya antara *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *preventive maintenance dengan modularity*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penentuan Waktu Standar Penggantian Komponen

Data waktu penggantian yang telah diperoleh kemudian diuji kenormalan uji keseragaman, dan uji kecukupan data. Perhitungan waktu baku masing-masing komponen adalah dengan mempertimbangkan adanya faktor penyesuaian dan juga kelonggaran (*allowances*) untuk setiap aktifitas penggantian. Tabel 1 adalah perbandingan lamanya waktu baku yang diperlukan untuk melakukan penggantian komponen secara *preventif* dan secara korektif dalam satuan jam.

Tabel 1. Waktu Baku Preventive dan Failure Replacement

| Komponen | Mesin | Wb Preventive (jam) | Wb Failure (jam) |
|----------|-----------|---------------------|------------------|
| Motor | Giling | 7.026 | 8.662 |
| Pulley 1 | Giling | 6.781 | 8.808 |
| V-belt | Giling | 1.42 | 2.754 |
| Poros | Giling | 8.502 | 9.461 |
| Bearing | Giling | 6.918 | 8.617 |
| Pulley 2 | Giling | 8.245 | 9.356 |
| Pisau | Giling | 0.217 | 0.369 |
| Bearing | Blower | 6.701 | 8.485 |
| Pulley 1 | Blower | 6.716 | 8.821 |
| V-belt | Blower | 1.372 | 2.674 |
| Poros | Blower | 8.492 | 9.408 |
| Pulley 2 | Blower | 6.621 | 8.568 |
| Impeller | Blower | 6.837 | 8.624 |
| Motor | Blower | 6.492 | 8.572 |
| Motor | Cyclone | 6.85 | 8.499 |
| Copling | Cyclone | 1.374 | 2.634 |
| Bearing | Cyclone | 6.675 | 8.898 |
| Impeller | Cyclone | 6.972 | 8.785 |
| Pegas | Separator | 1.389 | 2.737 |
| Wire | Separator | 1.34 | 2.704 |
| Motor | Separator | 6.741 | 8.422 |
| Bearing | Separator | 6.552 | 8.53 |
| V-belt | Separator | 1.343 | 2.715 |
| Poros | Separator | 8.413 | 9.415 |
| Pulley 1 | Separator | 6.956 | 8.7 |
| Pulley 2 | Separator | 6.687 | 8.438 |
| Motor | Bag house | 6.706 | 8.812 |
| Copling | Bag house | 1.361 | 2.711 |
| Bearing | Bag house | 6.947 | 8.614 |
| Impeller | Bag house | 6.664 | 8.867 |
| Filter | Bag house | 6.549 | 8.556 |

4.2. Analisa Biaya Tenaga Kerja

Biaya tenaga kerja adalah biaya tenaga kerja yang melakukan penggantian komponen pada mesin. Biaya tenaga kerja dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu biaya tenaga kerja akibat penggantian korektif (*failure replacement*) dan biaya tenaga kerja akibat penggantian pencegahan (*preventive replacement*). Biaya tenaga kerja akibat *failure replacement* dan *preventive replacement* adalah Rp. 1.000.000,00/175 jam = Rp. 5714,00/jam/orang.

4.3. Analisa Biaya Kehilangan Produksi

Biaya kehilangan produksi ditentukan berdasarkan output yang seharusnya didapat karena kehilangan produksi dan laba produksi. Contoh perhitungan biaya kehilangan produksi untuk komponen motor pada mesin giling:

Biaya kehilangan produksi = laba per kg * *output*/jam = 600 * 95,24 = Rp. 57.144,00/jam

4.4. Analisa Biaya Penggantian Komponen

Biaya penggantian komponen dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu biaya penggantian korektif dan biaya penggantian *preventif*. Tabel 2 dan 3 merupakan hasil perhitungan biaya penggantian secara korektif dan *preventif*.

Tabel 2. Biaya *Failure Replacement* (Cf)

| No | Komponen | a | b | c | d | e | Cf |
|----|-----------------------------|-------|-------|------|-------|------------|--------------|
| 1 | Motor (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,662 | 15.000.000 | 15.643.465,3 |
| 2 | Pulley 1 (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,808 | 500.000 | 1.154.311,1 |
| 3 | V-belt (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,754 | 1.000.000 | 1.204.583,6 |
| 4 | Poros (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 9,461 | 3.500.000 | 4.202.819,8 |
| 5 | Bearing (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,617 | 2.400.000 | 3.040.122,5 |
| 6 | Pulley 2 (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 9,356 | 500.000 | 1.195.019,8 |
| 7 | Pisau (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 0,369 | 450.000 | 477.411,5 |
| 8 | Bearing (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,485 | 1.000.000 | 1.630.316,7 |
| 9 | Pulley 1 (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,821 | 100.000 | 755.276,8 |
| 10 | V-belt (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,674 | 360.000 | 558.640,8 |
| 11 | Poros (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 9,408 | 250.000 | 948.882,7 |
| 12 | Pulley 2 (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,568 | 100.000 | 736.482,4 |
| 13 | Impeller (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,624 | 200.000 | 840.642,5 |
| 14 | Motor (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,572 | 3.000.000 | 3.636.779,6 |
| 15 | Motor (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,499 | 1.200.000 | 1.831.356,7 |
| 16 | Copling (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,634 | 200.000 | 395.669,3 |
| 17 | Bearing (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,898 | 600.000 | 1.260.996,8 |
| 18 | Impeller (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,785 | 250.000 | 902.602,5 |
| 19 | Pegas (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,737 | 400.000 | 603.320,8 |
| 20 | Wire (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,704 | 200.000 | 400.869,3 |
| 21 | Motor (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,422 | 1.200.000 | 1.825.636,7 |
| 22 | Bearing (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,53 | 600.000 | 1.233.659,6 |
| 23 | V-belt (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,715 | 100.000 | 551.686,5 |
| 24 | Poros (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 9,415 | 150.000 | 849.402,7 |
| 25 | Pulley 1 (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,7 | 100.000 | 746.288,2 |
| 26 | Pulley 2 (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,438 | 100.000 | 726.825,3 |
| 27 | Motor (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,812 | 1.200.000 | 1.854.608,2 |
| 28 | Copling (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 2,711 | 200.000 | 401.389,3 |
| 29 | Bearing (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,614 | 600.000 | 1.239.899,6 |
| 30 | Impeller (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,867 | 250.000 | 908.694 |
| 31 | Filter (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,556 | 1.000.000 | 1.635.591 |

Tabel 3. Biaya *Preventive Replacement* (Cp)

| No | Komponen | a | b | c | d | e | Cp |
|----|-------------------------|-------|-------|------|-------|------------|--------------|
| 1 | Motor (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 7,026 | 15.000.000 | 15.521.933,4 |
| 2 | Pulley 1 (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,781 | 500.000 | 1.003.733,4 |
| 3 | V-belt (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,42 | 1.000.000 | 1.105.486,1 |
| 4 | Poros (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,502 | 3.500.000 | 4.131.579,6 |
| 5 | Bearing (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,918 | 2.400.000 | 2.913.910,5 |
| 6 | Pulley 2 (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,245 | 500.000 | 1.112.488,1 |
| 7 | Pisau (mesin giling) | 11428 | 57144 | 5714 | 0,217 | 450.000 | 466.120,1 |
| 8 | Bearing (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,701 | 1.000.000 | 1.497.790,5 |
| 9 | Pulley 1 (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,716 | 100.000 | 598.904,8 |
| 10 | V-belt (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,372 | 360.000 | 461.920,4 |
| 11 | Poros (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,492 | 250.000 | 880.836,7 |
| 12 | Pulley 2 (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,621 | 100.000 | 591.847,6 |
| 13 | Impeller (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,837 | 200.000 | 707.893,4 |
| 14 | Motor (blower) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,492 | 3.000.000 | 3.482.264,7 |
| 15 | Motor (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,85 | 1.200.000 | 1.708.859,1 |

Tabel 3. (lanjutan)

| No | Komponen | a | b | c | d | e | Cp |
|----|-----------------------------|-------|-------|------|-------|-----------|-------------|
| 16 | Copling (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,374 | 200.000 | 302.069 |
| 17 | Bearing (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,675 | 600.000 | 1.095.859,1 |
| 18 | Impeller (cyclone) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,972 | 250.000 | 767.922 |
| 19 | Pegas (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,389 | 400.000 | 503.183,3 |
| 20 | Wire (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,34 | 200.000 | 299.543,2 |
| 21 | Motor (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,741 | 1.200.000 | 1.700.761,9 |
| 22 | Bearing (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,552 | 600.000 | 1.086.721,9 |
| 23 | V-belt (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,343 | 100.000 | 199.766,1 |
| 24 | Poros (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 8,413 | 150.000 | 774.968,1 |
| 25 | Pulley 1 (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,956 | 100.000 | 616.733,4 |
| 26 | Pulley 2 (separator) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,687 | 100.000 | 596.750,5 |
| 27 | Motor (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,706 | 1.200.000 | 1.698.161,9 |
| 28 | Copling (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 1,361 | 200.000 | 301.103,2 |
| 29 | Bearing (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,947 | 600.000 | 1.116.064,8 |
| 30 | Impeller (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,664 | 250.000 | 745.041,9 |
| 31 | Filter (bag house filter) | 11428 | 57144 | 5714 | 6,549 | 1.000.000 | 1.486.499 |

Keterangan: a = biaya tenaga kerja/jam, b = biaya kehilangan produksi/jam, c = biaya operator menganggur/jam, d = waktu standar penggantian komponen secara *preventif* / korektif dalam jam, e = harga komponen/unit (Rp), Cp = biaya *preventive replacement* (Rp), Cf = biaya *failure replacement* (Rp).

4.5. Perhitungan Selang Waktu Penggantian (tp) Optimal

Setelah melakukan perhitungan untuk mendapatkan selang waktu penggantian yang optimal dipandang dari segi total biaya minimum pada saat *tp*, maka pada Tabel 4 dapat dilihat hasil selang waktu penggantian yang optimal untuk masing-masing komponen.

Tabel 4. Selang Waktu Penggantian *Preventive* Optimal

| No | Komponen | Waktu <i>preventive</i> /tp (jam) | Biaya (Rp/jam) |
|----|-------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 | Motor (mesin giling) | 8748 | 1775,15945 |
| 2 | Pulley 1 (mesin giling) | 8747 | 114,76908 |
| 3 | V-belt (mesin giling) | 4311 | 256,52570 |
| 4 | Poros (mesin giling) | 8749 | 472,30442 |
| 5 | Bearing (mesin giling) | 8749 | 333,11559 |
| 6 | Pulley 2 (mesin giling) | 8746 | 127,22765 |
| 7 | Pisau (mesin giling) | 158 | 1437,66060 |
| 8 | Bearing (blower) | 8745 | 171,29538 |
| 9 | Pulley 1 (blower) | 8733 | 68,60401 |
| 10 | V-belt (blower) | 4307 | 107,27972 |
| 11 | Poros (blower) | 8745 | 100,74719 |
| 12 | Pulley 2 (blower) | 8750 | 67,64634 |
| 13 | Impeller (blower) | 4311 | 164,25962 |
| 14 | Motor (blower) | 8746 | 398,24461 |
| 15 | Motor (cyclone) | 8738 | 195,62517 |
| 16 | Copling (cyclone) | 8737 | 34,58203 |
| 17 | Bearing (cyclone) | 8735 | 125,48666 |
| 18 | Impeller (cyclone) | 8722 | 88,08281 |
| 19 | Pegas (separator) | 4300 | 117,08848 |
| 20 | Wire (separator) | 4293 | 69,82949 |
| 21 | Motor (separator) | 8741 | 194,62906 |
| 22 | Bearing (separator) | 8745 | 124,28226 |

Tabel 4. (lamjutan)

| No | Komponen | Waktu <i>preventive</i> /tp (jam) | Biaya (Rp/jam) |
|----|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 23 | V-belt (separator) | 4307 | 46,39833 |
| 24 | Poros (separator) | 8735 | 88,75473 |
| 25 | Pulley 1 (separator) | 8742 | 70,56261 |
| 26 | Pulley 2 (separator) | 8737 | 68,31434 |
| 27 | Motor (bag house filter) | 8738 | 194,40594 |
| 28 | Copling (bag house filter) | 8741 | 34,45245 |
| 29 | Bearing (bag house filter) | 8741 | 127,70693 |
| 30 | Impeller (bag house filter) | 8736 | 85,29861 |
| 31 | Filter (bag house filter) | 4310 | 344,96085 |

4.6. Analisa Biaya Preventive Maintenance

Tabel 5 menunjukkan perbandingan biaya pada saat kondisi sekarang (*corrective maintenance*) dan pada saat *preventive maintenance* (dengan selang waktu yang optimal). Dari Tabel 5 terlihat perbedaan bahwa selang waktu penggantian komponen dari hasil perhitungan lebih cepat daripada selang waktu penggantian yang selama ini diterapkan oleh perusahaan karena selang waktu hasil perhitungan tersebut menentukan penggantian komponen sebelum komponen tersebut mengalami kerusakan. Namun, selang waktu hasil perhitungan akan memberikan tingkat keandalan yang lebih baik dan akan memberikan perkiraan biaya yang lebih kecil daripada yang selama ini dilakukan perusahaan.

Tabel 5. Perbandingan Biaya Akibat Preventive Replacement dan Failure Replacement

| No | Komponen | Tp (jam) | Biaya (Rp/jam) | MTTF (jam) | Biaya (Rp/jam) |
|----|-----------------------------|----------|----------------|------------|----------------|
| 1 | Motor (mesin giling) | 8748 | 1775,15945 | 8760 | 1779,16846 |
| 2 | Pulley 1 (mesin giling) | 8747 | 114,76908 | 8761 | 123,91925 |
| 3 | V-belt (mesin giling) | 4311 | 256,52570 | 4320 | 266,37432 |
| 4 | Poros (mesin giling) | 8749 | 472,30442 | 8760 | 475,96944 |
| 5 | Bearing (mesin giling) | 8749 | 333,11559 | 8760 | 339,38722 |
| 6 | Pulley 2 (mesin giling) | 8746 | 127,22765 | 8760 | 131,91260 |
| 7 | Pisau (mesin giling) | 158 | 1437,66060 | 168 | 1844,38972 |
| 8 | Bearing (blower) | 8745 | 171,29538 | 8758 | 178,14632 |
| 9 | Pulley 1 (blower) | 8733 | 68,60401 | 8760 | 77,51116 |
| 10 | V-belt (blower) | 4307 | 107,27972 | 4321 | 118,44474 |
| 11 | Poros (blower) | 8745 | 100,74719 | 8761 | 104,69949 |
| 12 | Pulley 2 (blower) | 8750 | 67,64634 | 8762 | 76,28533 |
| 13 | Impeller (blower) | 4311 | 164,25962 | 4320 | 178,89980 |
| 14 | Motor (blower) | 8746 | 398,24461 | 8760 | 405,92170 |
| 15 | Motor (cyclone) | 8738 | 195,62517 | 8761 | 202,30199 |
| 16 | Copling (cyclone) | 8737 | 34,58203 | 8761 | 39,79783 |
| 17 | Bearing (cyclone) | 8735 | 125,48666 | 8759 | 134,65972 |
| 18 | Impeller (cyclone) | 8722 | 88,08281 | 8756 | 95,59223 |
| 19 | Pegas (separator) | 4300 | 117,08848 | 4320 | 128,63153 |
| 20 | Wire (separator) | 4293 | 69,82949 | 4321 | 81,47014 |
| 21 | Motor (separator) | 8741 | 194,62906 | 8759 | 201,57839 |
| 22 | Bearing (separator) | 8745 | 124,28226 | 8760 | 132,70431 |
| 23 | V-belt (separator) | 4307 | 46,39833 | 4321 | 86,67582 |
| 24 | Poros (separator) | 8735 | 88,75473 | 8759 | 92,61935 |
| 25 | Pulley 1 (separator) | 8742 | 70,56261 | 8760 | 78,17162 |
| 26 | Pulley 2 (separator) | 8737 | 68,31434 | 8759 | 75,60719 |
| 27 | Motor (bag house filter) | 8738 | 194,40594 | 8761 | 203,09682 |
| 28 | Copling (bag house filter) | 8741 | 34,45245 | 8758 | 39,74712 |
| 29 | Bearing (bag house filter) | 8741 | 127,70693 | 8759 | 134,87228 |
| 30 | Impeller (bag house filter) | 8736 | 85,29861 | 8757 | 95,01403 |
| 31 | Filter (bag house filter) | 4310 | 344,96085 | 4319 | 362,59944 |

4.7. Analisa Waktu Penggantian *Preventive Maintenance* dengan *Modularity*

Tabel 6 menunjukkan waktu penggantian *preventive maintenance* dengan *modularity*. Penentuan waktu penggantian *preventive maintenance* dengan *modularity* hanya dilakukan satu kali di perusahaan.

Tabel 6. Waktu Penggantian *Preventive Maintenance* dengan *Modularity*

| Komponen | Waktu penggantian (jam) |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Motor(g) + pulley1(g) | 2 |
| Poros(g) + bearing(g) + pulley2(g) | 2 |
| V-belt(g) | 1,42 |
| Pisau(g) | 0,217 |
| Poros(bl) + bearing(bl) + pulley2(bl) | 2 |
| Motor(bl) + pulley1(bl) | 2 |
| Impeller(bl) | 6,837 |
| V-belt(bl) | 1,372 |
| Copling(c) + bearing(c) + impeller(c) | 2 |
| Motor(c) | 6,85 |
| Pegas(s) + wire(s) | 1 |
| Poros(s) + bearing(s) + pulley2(s) | 2 |
| Motor(s) + pulley1(s) | 2 |
| V-belt(s) | 1,343 |
| Copling(b) + bearing(b) + impeller(b) | 2 |
| Motor(b) | 6,706 |
| Filter(b) | 6,549 |

Keterangan: g: mesin giling, bl: blower, c: cyclone, s: separator, b: bag house filter

Pada Tabel 6 terlihat perbedaan antara waktu penggantian komponen yang dilakukan dengan menerapkan *preventive* dengan *modularity*. Waktu penggantian komponen dengan *modularity* lebih cepat daripada waktu penggantian yang selama ini diterapkan oleh perusahaan.

4.8. Analisa Selang Waktu Penggantian yang Optimal Berdasarkan *Design Modularity*

Tabel 7 menunjukkan selang waktu penggantian modul berdasarkan *design modularity*.

Tabel 7. Selang Waktu Penggantian Modul Berdasarkan *Design Modularity*

| Komponen | tp modul (jam) |
|---------------------------------------|----------------|
| Motor(g) + pulley1(g) | 8747 |
| Poros(g) + bearing(g) + pulley2(g) | 8748 |
| V-belt(g) | 4311 |
| Pisau(g) | 158 |
| Poros(bl) + bearing(bl) + pulley2(bl) | 8746 |
| Motor(bl) + pulley1(bl) | 8739 |
| Impeller(bl) | 4311 |
| V-belt(bl) | 4307 |
| Copling(c) + bearing(c) + impeller(c) | 8727 |
| Motor(c) | 8738 |
| Pegas(s) + wire(s) | 4296 |
| Poros(s) + bearing(s) + pulley2(s) | 8738 |
| Motor(s) + pulley1(s) | 8741 |
| V-belt(s) | 4307 |
| Copling(b) + bearing(b) + impeller(b) | 8738 |
| Motor(b) | 8738 |
| Filter(b) | 4310 |

4.9. Analisa Biaya Selang Waktu Penggantian Modifikasi

Perhitungan untuk mencari selang waktu penggantian modifikasi dari beberapa selang waktu modul yang telah diperoleh ditujukan agar penggantian *preventive* komponen dilakukan pada waktu mesin-mesin produksi tidak bekerja atau di luar jam produksi. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi biaya kehilangan produksi yang ditanggung oleh perusahaan. Pada Tabel 8 dapat dilihat alternatif *tp* modifikasi beserta dengan perhitungan biayanya.

Tabel 8. Alternatif *tp* Modifikasi dan Biaya *tp* Modifikasi

| No | Komponen | <i>tp</i> modifikasi (jam) | Total biaya/jam |
|----|---|----------------------------|-----------------|
| 1 | <i>Impeller</i> (bl) | 4309 | 164,28807 |
| | | 4316 | 166,92322 |
| 2 | Pisau(g) | 152 | 1455,36712 |
| | | 159 | 1440,24610 |
| 3 | Motor(bl) + <i>pulley</i> 1(bl) | 8733 | 467,35183 |
| | | 8740 | 467,19764 |
| 4 | <i>Copling</i> (b) + <i>bearing</i> (b) + <i>impeller</i> (b) | 8733 | 247,59357 |
| | | 8740 | 247,51157 |
| 5 | <i>V-belt</i> (bl) | 4302 | 107,37392 |
| | | 4309 | 107,31656 |
| 6 | <i>V-belt</i> (s) | 4302 | 46,43570 |
| | | 4309 | 46,45962 |
| 7 | <i>Copling</i> (c) + <i>bearing</i> (c) + <i>impeller</i> (c) | 8726 | 248,31049 |
| | | 8733 | 248,47793 |
| 8 | Pegas(s) + <i>wire</i> (s) | 4295 | 187,00641 |
| | | 4302 | 187,42035 |

Penentuan *tp* modifikasi adalah berdasarkan pada biaya terendah yang harus ditanggung oleh perusahaan. Dari Tabel 8 dapat ditentukan selang waktu modifikasi dengan biaya yang minimum. Tabel 9 menunjukkan *tp* modifikasi beserta dengan biaya minimumnya.

Tabel 9. Selang Waktu Modifikasi dengan Biaya Minimum

| No | Komponen | <i>tp</i> modifikasi (jam) | Total biaya/jam |
|----|---|----------------------------|-----------------|
| 1 | <i>Impeller</i> (bl) | 4309 | 164,28807 |
| 2 | Pisau(g) | 159 | 1440,24610 |
| 3 | Motor(bl) + <i>pulley</i> 1(bl) | 8740 | 467,19764 |
| 4 | <i>Copling</i> (b) + <i>bearing</i> (b) + <i>impeller</i> (b) | 8740 | 247,51157 |
| 5 | <i>V-belt</i> (bl) | 4309 | 107,31656 |
| 6 | <i>V-belt</i> (s) | 4302 | 46,43570 |
| 7 | <i>Copling</i> (c) + <i>bearing</i> (c) + <i>impeller</i> (c) | 8726 | 248,31049 |
| 8 | Pegas(s) + <i>wire</i> (s) | 4295 | 187,00641 |

4.10. Analisa Biaya Antara Selang Waktu Penggantian *Corrective*, Selang Waktu Penggantian *Preventive*, dan Selang Waktu Penggantian *Preventive* dengan *Modularity*

Pada bagian ini akan dibandingkan total biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk menerapkan jadwal selang waktu penggantian *corrective*, selang waktu penggantian *preventive*, dan selang waktu penggantian *preventive* dengan *modularity* selama satu siklus. Yang dimaksud dengan satu siklus di sini sama dengan masing-masing komponen mengalami penggantian sebanyak satu kali.

4.10.1. Biaya Penggantian *Corrective* dan *Preventive*. Tabel 10 menunjukkan *total cost* penggantian komponen apabila perusahaan menerapkan penggantian komponen secara *corrective* dan *preventive*.

Tabel 10. Total Cost Penggantian *Corrective* dan *Preventive*

| Komponen | Biaya Perawatan <i>Corrective/siklus (Rp)</i> | Biaya Perawatan <i>Preventive/siklus (Rp)</i> |
|------------------------------------|--|--|
| Motor (mesin giling) | 15.643.465,3 | 15.521.933,4 |
| <i>Pulley</i> 1 (mesin giling) | 1.154.311,1 | 1.003.733,4 |
| <i>V-belt</i> (mesin giling) | 1.204.583,6 | 1.105.486,1 |
| Poros (mesin giling) | 4.202.819,8 | 4.131.579,6 |
| <i>Bearing</i> (mesin giling) | 3.040.122,5 | 2.913.910,5 |
| <i>Pulley</i> 2 (mesin giling) | 1.195.019,8 | 1.112.488,1 |
| Pisau (mesin giling) | 477.411,5 | 466.120,1 |
| <i>Bearing</i> (blower) | 1.630.316,7 | 1.497.790,5 |
| <i>Pulley</i> 1 (blower) | 755.276,8 | 598.904,8 |
| <i>V-belt</i> (blower) | 558.640,8 | 461.920,4 |
| Poros (blower) | 948.882,7 | 880.836,7 |
| <i>Pulley</i> 2 (blower) | 736.482,4 | 591.847,6 |
| <i>Impeller</i> (blower) | 840.642,5 | 707.893,4 |
| Motor (blower) | 3.636.779,6 | 3.482.264,7 |
| Motor (cyclone) | 1.831.356,7 | 1.708.859,1 |
| <i>Copling</i> (cyclone) | 395.669,3 | 302.069 |
| <i>Bearing</i> (cyclone) | 1.260.996,8 | 1.095.859,1 |
| <i>Impeller</i> (cyclone) | 902.602,5 | 767.922 |
| Pegas (separator) | 603.320,8 | 503.183,3 |
| <i>Wire</i> (separator) | 400.869,3 | 299.543,2 |
| Motor (separator) | 1.825.636,7 | 1.700.761,9 |
| <i>Bearing</i> (separator) | 1.233.659,6 | 1.086.721,9 |
| <i>V-belt</i> (separator) | 551.686,5 | 199.766,1 |
| Poros (separator) | 849.402,7 | 774.968,1 |
| <i>Pulley</i> 1 (separator) | 746.288,2 | 616.733,4 |
| <i>Pulley</i> 2 (separator) | 726.825,3 | 596.750,5 |
| Motor (bag house filter) | 1.854.608,2 | 1.698.161,9 |
| <i>Copling</i> (bag house filter) | 401.389,3 | 301.103,2 |
| <i>Bearing</i> (bag house filter) | 1.239.899,6 | 1.116.064,8 |
| <i>Impeller</i> (bag house filter) | 908.694 | 745.041,9 |
| Filter (bag house filter) | 1.635.591 | 1.486.499 |
| Total Cost Perawatan | 53.393.251,6 | 49.476.717,7 |

4.10.2. Biaya Penggantian *Preventive* dengan *Modularity* Pada Waktu Istirahat *Shift*. Pada Tabel 11 dapat dilihat *total cost* penggantian komponen apabila perusahaan menerapkan penggantian komponen secara *preventive* dengan *modularity* pada waktu istirahat *shift*. Biaya pemasangan komponen-komponen menjadi modul tidak diperhitungkan karena komponen-komponen tersebut sudah dirakit menjadi modul oleh *supplier* komponen dan biaya penerapan penggantian komponen secara *preventive* dengan *modularity* pada waktu istirahat *shift* tidak diperlukan karena waktu istirahat dari staff *maintenance* tidak sama dengan waktu istirahat staff produksi.

Tabel 11. Total Cost Penggantian Preventive dengan Modularity (Istirahat Shift)

| Komponen | Biaya Perawatan/siklus (Rp) |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Motor(g) + pulley1(g) | 15.597.142 |
| Poros(g) + bearing(g) + pulley2(g) | 6.497.142 |
| V-belt(g) | 1.042.628,2 |
| Impeller(bl) | 645.035,3 |
| Pisau(g) | 452.479,9 |
| Poros(bl) + bearing(bl) + pulley2(bl) | 1.447.142 |
| Motor(bl) + pulley1(bl) | 3.197.142 |
| Copling(b) + bearing(b) + impeller(b) | 1.147.142 |
| V-belt(bl) | 399.062,4 |
| V-belt(s) | 136.908,2 |
| Copling(c) + bearing(c) + impeller(c) | 1.147.142 |
| Motor(c) | 1.646.001,1 |
| Motor(b) | 1.526.063,7 |
| Poros(s) + bearing(s) + pulley2(s) | 947.142 |
| Pegas(s) + wire(s) | 617.142 |
| Motor(s) + pulley1(s) | 1.397.142 |
| Filter(b) | 1.423.641,1 |
| Total Cost Perawatan | 39.266.097,9 |

4.10.3. Biaya Penggantian Preventive dengan Modularity Tidak pada Waktu Istirahat Shift.

Tabel 12 menunjukkan *total cost* penggantian komponen apabila perusahaan menerapkan penggantian komponen secara *preventive* dengan *modularity* tidak pada waktu istirahat *shift*.

Tabel 12. Total Cost Penggantian Preventive dengan Modularity (Bukan Istirahat Shift)

| Komponen | Biaya Perawatan/siklus (Rp) |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Motor(g) + pulley1(g) | 15.660.000 |
| Poros(g) + bearing(g) + pulley2(g) | 6.560.000 |
| V-belt(g) | 1.105.486,1 |
| Impeller(bl) | 707.893,4 |
| Pisau(g) | 466.120,1 |
| Poros(bl) + bearing(bl) + pulley2(bl) | 1.510.000 |
| Motor(bl) + pulley1(bl) | 3.260.000 |
| Copling(b) + bearing(b) + impeller(b) | 1.210.000 |
| V-belt(bl) | 461.920,4 |
| V-belt(s) | 199.766,1 |
| Copling(c) + bearing(c) + impeller(c) | 1.210.000 |
| Motor(c) | 1.708.859,1 |
| Motor(b) | 1.698.161,9 |
| Poros(s) + bearing(s) + pulley2(s) | 1.010.000 |
| Pegas(s) + wire(s) | 680.000 |
| Motor(s) + pulley1(s) | 1.460.000 |
| Filter(b) | 1.486.499 |
| Total Cost Perawatan | 40.394.706,1 |

4.10.4. Perbandingan Biaya Antara Penggantian *Corrective*, Penggantian *Preventive*, dan Penggantian *Preventive* dengan *Modularity*. Pada Tabel 13 dapat dilihat perbandingan *total cost* penggantian *corrective*, *preventive*, *preventive* dengan *modularity* (pada waktu istirahat *shift*), *preventive* dengan *modularity* (tidak pada waktu istirahat *shift*).

Tabel 13. Perbandingan Total Biaya Antara Penggantian *Corrective*, *Preventive*, dan *Preventive* dengan *Modularity*

| Penggantian | Total Biaya (Rp) |
|--|------------------|
| <i>Corrective</i> | 53.393.251,6 |
| <i>Preventive</i> | 49.476.717,7 |
| <i>Preventive</i> dengan <i>modularity</i> (istirahat <i>shift</i>) | 39.266.097,9 |
| <i>Preventive</i> dengan <i>modularity</i> (bukan istirahat <i>shift</i>) | 40.394.706,1 |

Dari Tabel 13 dapat dilihat bahwa penggantian *preventive* dengan *modularity* (istirahat *shift*) menghasilkan *total cost* yang paling kecil jika dibandingkan dengan yang lain.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

- Penggantian komponen yang terlalu cepat ataupun terlalu lama akan berakibat timbulnya ekspektasi biaya yang tidak optimal. Penentuan selang waktu penggantian yang optimal adalah untuk menerapkan sistem *preventive maintenance* dengan *modularity design* yang mana pengeluaran biaya dapat ditekan seminimum mungkin.
- Beberapa selang waktu penggantian yang optimal untuk modul merupakan selang waktu penggantian yang terletak pada jam produksi perusahaan. Oleh karena itu dilakukan perhitungan tp modifikasi yang merupakan selang waktu penggantian yang terletak pada waktu istirahat *shift*.
- Penggantian *preventive* dengan *modularity* (istirahat *shift*) menghasilkan *total cost* yang paling kecil (Rp. 39.266.097,9) jika dibandingkan dengan penggantian *corrective*, *preventive*, dan *preventive* dengan *modularity* (bukan istirahat *shift*). Maka dari itu dalam membuat jadwal penggantian komponen digunakan sistem *preventive maintenance* dengan *modularity* yang dilakukan pada waktu istirahat *shift*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharya, G. K., R. A. Johnson, 1977. *Statistical Concepts and Method*. New York: John Willey and Sons.
- Ebeling, C. E., 1997. *Reliability and Maintainability Engineering*, McGraw-Hill International Editions.
- Ehrlich, M. R., 1992. Transmission & Distribution. *Modular Capacitor-Bank Controls Reduce Costly Power Losses*, ABI/INFORM Global, <<http://www.proquest.com/pqdauto>>
- Freeman, M., 2001. *What's New in Building: Modular System for a Better Bathroom*. Tonbridge, http://gateway.proquest.com/openurl?url_ver=Z39.88-2004&res_dat=xri:pqd&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&rft_dat=

- Gershenson, J.K., G.J. Prasad, 1997. *Modularity in Product Design for Manufacturability*. International Journal of Agile Manufacturing, vol. 1, Issue 1.
- Gershenson, J.K., S. Allamneni, G.J. Prasad, 1999. *Modular Product Design: A Life-Cycle View*, Transactions of SDPS, vol. 3, no. 4, pp. 13-26.
- Rao, S. S., 1992. *Reliability-Based Design*, McGraw-Hill International Book Company.
- Siegel, S.B., 1997. *Maintenance The Modular Solution*, Fleet Owner, ABI/INFORM Global, <<http://www.proquest.com/pqdauto>>.
- Sullivan, 2003. *GCI: New Standard for Manufacturing Efficiency*, pp. 56-57. May <<http://www.proquest.com/pqdauto>>.
- Sutalaksana, Z. I., A. Ruhana, J. H. Tjakraatmadja, 1979. *Teknik Tata Cara Kerja*, Bandung: Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Bandung.