

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pemeliharaan (*Maintenance*)**

Pemeliharaan merupakan gabungan dari setiap tindakan yang dilakukan untuk merawat suatu barang atau untuk memperbaiki sampai suatu kondisi yang dapat diterima (Corder, 1992).

Berdasarkan definisi tersebut, pemeliharaan merupakan kegiatan yang dilakukan untuk memelihara, memperbaiki dan menjaga mesin/peralatan produksi agar tetap berada dalam kondisi yang siap dipakai, sehingga keberlangsungan proses produksi dapat berjalan sesuai rencana dan keuntungan yang diharapkan dapat tercapai. Kegiatan-kegiatan pemeliharaan tersebut dapat berupa pencegahan sebelum terjadi kerusakan, ataupun penggantian penggunaan bagian mesin yang rusak. Menurut Stephens (2004) usaha yang dilakukan agar kontinuitas produksi dapat terjamin dan mesin dapat terus terpakai, maka kegiatan pemeliharaan harus dilakukan, kegiatan tersebut meliputi aktivitas pemeriksaan (*checking*), pemberian pelumas (*lubrication*), perbaikan mesin yang rusak dan penyesuaian atau penggantian komponen.

##### **2.1.1 Tujuan Pemeliharaan (*Maintenance*)**

Pemeliharaan bertujuan menjaga mesin/peralatan dalam kondisi terbaik untuk mencapai target produksi. Tujuan pemeliharaan menurut Corder (1992) adalah sebagai berikut:

1. Memperpanjang usia kegunaan aset.
2. Menjamin ketersediaan optimum peralatan produksi atau jasa dan mendapatkan laba investasi (*return of investment*) yang maksimum.
3. Menjamin kesiapan operasional peralatan setiap waktu.
4. Menjamin keselamatan orang yang menggunakan sarana tersebut.

##### **2.1.2 Jenis-Jenis Pemeliharaan (*Maintenance*)**

Menurut Dhillon (2002) berdasarkan tujuan dari pemeliharaan terdapat dua bentuk kebijakan dari program pemeliharaan, yaitu pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*) dan pemeliharaan korektif (*corrective maintenance*).

1. *Preventive maintenance* (pemeliharaan pencegahan)

*Preventive maintenance* dilakukan untuk memperpanjang umur peralatan ataupun meningkatkan *reliability* dari peralatan. Tindakan pemeliharaan ini

bervariasi mulai dari perawatan ringan, perbaikan atau penggantian komponen secara terencana. *Preventive maintenance* merupakan tindakan perawatan pencegahan dalam rangkaian aktivitas pemeliharaan dengan tujuan:

- Memperpanjang umur produktif aset dengan mendeteksi bahwa sebuah aset memiliki titik kritis penggunaan (*critical wear point*) dan mungkin akan mengalami kerusakan.
- Melakukan inspeksi secara efektif dan menjaga supaya kondisi peralatan selalu dalam keadaan baik.
- Mengeliminasi kerusakan peralatan dan hasil produksi yang cacat serta meningkatkan ketahanan mesin dan kemampuan proses.
- Mengurangi waktu yang terbuang oleh kerusakan mesin atau peralatan dengan membuat aktivitas pemeliharaan mesin atau peralatan.
- Menjaga biaya produksi seminimum mungkin.

#### 2. *Corrective maintenance* (pemeliharaan korektif)

Pemeliharaan ini merupakan tindakan mengembalikan kondisi peralatan atau komponen saat mengalami kerusakan. Tindakan yang dilakukan berupa perbaikan dari komponen rusak ataupun penggantian komponen rusak. Kegiatan ini tidak direncanakan dan dilakukan apabila terjadi kerusakan mesin secara tiba-tiba (*breakdown*).

### 2.2 *Total Productive Maintenance* (TPM)

Nakajima (1988) menyimpulkan bahwa kegiatan TPM fokus pada menghilangkan enam kerugian utama; kegagalan peralatan, pengaturan dan waktu penyetelan, *idling* dan penghentian minor, berkurangnya kecepatan, cacat dalam proses dan berkurangnya hasil. Sistem TPM merupakan sistem Jepang yang unik dari suatu kepakaran manajerial, telah diciptakan pada tahun 1971, berdasarkan konsep pemeliharaan pencegahan atau pemeliharaan mandiri (*preventive maintenance*) yang telah diperkenalkan dari Amerika Serikat pada tahun 1950-an sampai tahun 1960-an (Corder, 1992). TPM adalah upaya perbaikan proses (efisiensi mesin dan reliabilitas) yang melibatkan seluruh karyawan untuk bersama-sama mengupayakan sedapat mungkin produksi dengan tingkat kerusakan nihil dan tanpa cacat. TPM adalah metodologi perbaikan yang didorong oleh alasan-alasan produksi yang dirancang

untuk mengoptimalkan kehandalan peralatan dan memastikan pengelolaan yang efisien dari aset pabrik (Robinson dan Ginder, 1995).

Definisi menyeluruh dari TPM menurut Nakajima (1998), terdiri dari lima elemen penting, yaitu:

1. TPM bertujuan untuk memaksimalkan efektivitas peralatan.
2. TPM menetapkan sebuah sistem yang sungguh-sungguh dari pemeliharaan peralatan selama dipakai.
3. TPM diimplementasikan oleh banyak departemen dalam sebuah perusahaan.
4. TPM melibatkan setiap karyawan, mulai dari top manajemen sampai karyawan di *shop floor*.
5. TPM adalah sebuah strategi yang agresif fokus pada perbaikan nyata pada fungsi dan desain peralatan produksi.

Mengutip pendapat dari Nakajima (1988), kata “Total” dalam kalimat “Total Productive Maintenance” memiliki arti sebagai berikut:

1. Total *effectiveness* (merujuk pada elemen ke-1) yang mengindikasikan bahwa TPM mencari efisiensi ekonomi atau profitabilitas.
2. Total *maintenance system* (merujuk pada elemen ke-2) termasuk pemeliharaan pencegahan dan peningkatan kemampuan utama.
3. Total *participation of all employees* (merujuk pada elemen ke-3, ke-4, dan ke-5) termasuk *autonomous maintenance* yang dilakukan oleh operator melalui pembentukan tim.

### 2.2.1 Tujuan *Total Productive Maintenance* (TPM)

Tujuan dari *Total Productive Maintenance* (TPM) menurut O'Brien (2015), antara lain yaitu:

- a) Untuk meningkatkan sistem perawatan terencana yang ada, mengembalikan mesin/peralatan ke kondisi optimal dan mempertahankannya dalam kondisi itu.
- b) Untuk mengidentifikasi masalah pada tahap awal, dan memperbaikinya sebelum menjadi perbaikan besar yang mahal.
- c) Untuk meningkatkan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE).
- d) Untuk memberikan pelatihan serta meningkatkan keterampilan operator dalam pemeliharaan.
- e) Untuk melibatkan semua orang dan memanfaatkan kerja tim lintas fungsi - operator adalah pemantau kondisi terbaik dari peralatan yang mereka gunakan.

### 2.2.2 Pilar *Total Productive Maintenance*

Menurut O'Brien (2015), terdapat delapan pilar dalam *Total Productive Maintenance* (TPM) yang berguna untuk memaksimalkan mesin. (Gambar 2.1). Pilar-pilar tersebut diantaranya *autonomous maintenance*, *equipment and process improvement*, *planned maintenance / preventive maintenance*, *quality maintenance*, *early management of new equipment*, *education and training*, *tpm in the office* dan *safety, health and environment*.



Gambar 2.1 Model delapan pilar TPM (O'Brien, 2015)

#### 1. *Autonomous maintenance / jishu hozen* (perawatan terotomasi)

Pilar *autonomous maintenance* melibatkan pelatihan bagi operator produksi untuk menangani tugas perawatan dasar, membebaskan staf perawatan untuk lebih fokus pada aktivitas perawatan yang lebih krusial/kritis. Untuk mendukung penerapan program AM ini maka terdapat beberapa solusi untuk mengurangi *losses*, salah satunya menggunakan pilar *autonomous maintenance* seperti:

- Melatih operator dalam perawatan dan operasi mereka yang efektif mesin
- Meningkatkan kepemilikan operator untuk pemeliharaan
- Meningkatkan pemeliharaan peralatan harian
- Pembersihan peralatan yang sering menyebabkan deteksi masalah lebih awal
- Membebaskan personil pemeliharaan yang ditunjuk untuk tingkat yang lebih tinggi tugas pemeliharaan

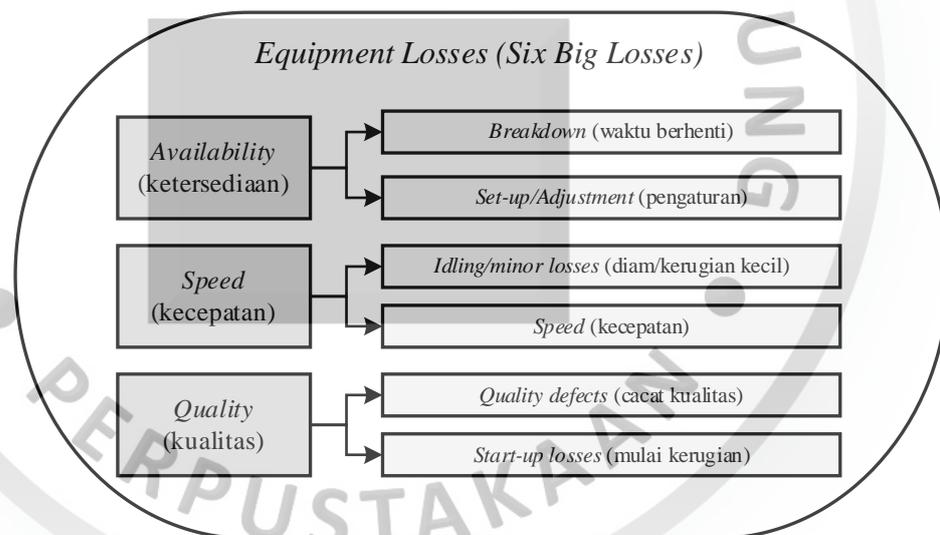
Operator dilatih untuk mengklaim “kepemilikan” atas alat atau mesin, mengurus kegiatan perawatan rutin seperti kebersihan, pelumasan, dan inspeksi, dan harus menjadi yang pertama mencoba menangani masalah di dalam bidang pelatihan mereka, sebelum memanggil teknisi ahli.

2. *Equipment and process improvement* (perbaikan peralatan dan proses)

Tujuan perbaikan peralatan dan proses adalah pengurangan dan penghapusan limbah dan kerugian produksi. Kerugian pabrikasi didefinisikan dalam tiga judul:

- Kerugian peralatan (*equipment losses*)

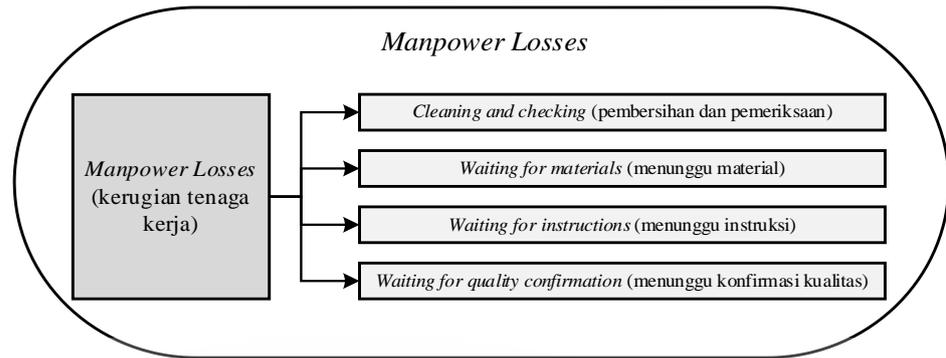
Kerugian peralatan yakni kerugian yang diperlihatkan dengan mengetahui nilai *availability*, *speed*, dan *quality* dimana ini termasuk dalam perhitungan nilai OEE dengan melihat *six big losses*. *Losses* yang mempengaruhi nilai *availability* yaitu *breakdown* dan *setup/adjustment*, nilai *speed* dipengaruhi oleh *idling/minor losses* dan *speed*, dan nilai *quality* dipengaruhi oleh *quality defect* dan *start-up losses* seperti dijelaskan pada Gambar 2.2 .



Gambar 2.2 *Equipment Losses* (O’Brien, 2015)

- Kerugian tenaga kerja (*manpower losses*)

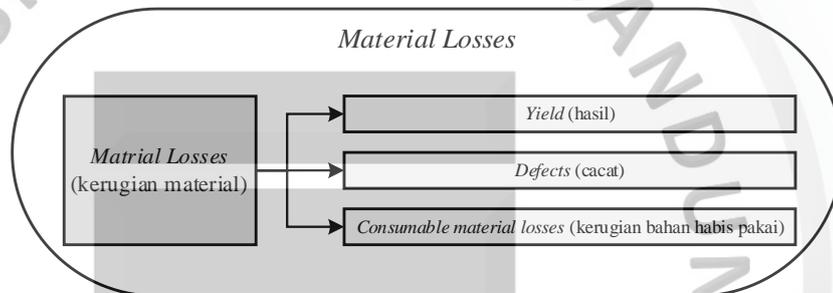
Kerugian tenaga kerja disini meliputi pembersihan dan pengecekan, menunggu material, dan menunggu konfirmasi kualitas yang terdapat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 *Manpower Losses* (O'Brien, 2015)

- Kerugian material (*material losses*)

Kerugian material disebabkan oleh *yield*, cacat (*defect*), dan kerugian dari pemakaian bahan (*consumable material losses*) seperti ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Material Losses* (O'Brien, 2015)

Penggunaan pilar perbaikan peralatan dan proses ini dapat meningkatkan efisiensi operasi proses dan mesin / peralatan yaitu:

- Menginstal perbaikan permanen untuk masalah yang berulang
- Mendorong kerja tim melalui pembentukan lintas tim proyek fungsional
- Memperkenalkan teknik pemecahan masalah dan meningkatkan keterampilan karyawan

### 3. *Planned maintenance / preventive maintenance* (perawatan pencegahan)

Pilar *planned maintenance* menjadwalkan pemeliharaan untuk mengurangi kehilangan waktu produksi yang tersedia. Penjadwalan kegiatan pemeliharaan didasarkan pada tingkat kegagalan yang diprediksi berasal dari analisis kerusakan masa lalu dan menghasilkan *downtime*. Tujuannya adalah untuk mengatur sistem pemeliharaan preventif dan prediktif untuk peralatan dan perkakas.

Penjadwalan kegiatan pemeliharaan untuk mengurangi dampaknya menjalankan produksi seperti:

- Mengurangi gangguan pada produksi karena kerusakan / *downtime*, meningkatkan efisiensi alat berat
- Menjadwalkan pemeliharaan selama periode saat produksi tidak berjalan
- Mendorong implementasi suku cadang yang sesuai program, berdasarkan analisis kerusakan sebelumnya
- Berkontribusi pada peningkatan keselamatan dan kinerja kualitas

Pemeliharaan mencegah kerusakan sementara intervensi oleh teknisi tingkat tinggi direncanakan dengan hati-hati sehingga waktu henti minimal diperlukan untuk setiap pembaruan perangkat lunak atau penggantian bagian.

Adapun jenis-jenis perawatannya dapat dilihat pada penjelasan dibawah ini:

- Preventive Maintenance* (PM) merupakan perpaduan antara *condition-based* dan *time-based maintenance* yang digunakan untuk menjaga fungsi peralatan melalui pengecekan komponen peralatan, perakitan, sub-perakitan dan lain sebagainya. Selain itu juga merawat performa struktur material dan mencegah korosi, kelelahan dan kelainan lainnya dari kelemahan peralatan.
- Breakdown Maintenance* (BM) merupakan bentuk perawatan yang digunakan ketika kegagalan mesin mempengaruhi operasi secara signifikan.
- Corrective Maintenance* (CM) merupakan bentuk perawatan dengan melakukan perbaikan peralatan dan komponennya sehingga bentuk kelemahan dari suatu peralatan dapat dirancang ulang.
- Time-Based Maintenance* (TBM) merupakan bentuk perawatan yang terdiri atas beberapa aktivitas pendukung yaitu, pemeriksaan per periode, pelayanan dan pembersihan peralatan serta penempatan ulang komponen mesin guna mencegah terjadinya kegagalan mesin tiba-tiba dan mencegah permasalahan pada proses operasi.
- Condition-Based Maintenance* (CBM) merupakan suatu bentuk perawatan dimana perlakuan diagnosis digunakan pada peralatan guna memonitor dan mendiagnosa kondisi perubahan mesin secara konsisten dan ketat selama operasi dan selama *on-stream inspection*—pengecekan kondisi statis peralatan dan memonitor tanda-tanda perubahan dengan teknik inspeksi non destruktif.

#### 4. *Quality maintenance* (pemeliharaan mutu)

Proses manajemen kualitas didefinisikan sebagai proses untuk mengendalikan kondisi komponen peralatan yang mempengaruhi variabilitas dalam kualitas produk. Ini termasuk elemen-elemen seperti pemeriksaan kesalahan, memperkenalkan sistem untuk mencegah kesalahan terjadi di tempat pertama dan akar penyebab analisis untuk menemukan penyebab yang sebenarnya, dan dapat memperbaikinya secara permanen. Inisiatif ini digunakan untuk mengurangi biaya kualitas dengan terus meningkatkan sistem untuk menangkap cacat sedini mungkin dalam proses atau untuk mencegahnya dari terjadi sama sekali.

- Memperkenalkan proyek peningkatan untuk mengatasi kualitas masalah yang berulang
- Mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah kualitas untuk mengurangi biaya kualitas
- Memperkenalkan inisiatif lean seperti pemeriksaan kesalahan dan analisis akar masalah untuk mengurangi terjadinya cacat untuk meningkatkan tingkat kualitas

#### 5. *Early management of new equipment* (manajemen awal peralatan baru)

Manajemen awal peralatan baru berarti menggunakan pengetahuan dan pengalaman diperoleh dari program TPM untuk meningkatkan desain peralatan baru. Tujuannya adalah untuk membuat peralatan menjadi mudah dioperasikan, mudah untuk dibersihkan, mudah dirawat, lebih terpercaya, mengurangi waktu pengaturan, dan beroperasi dengan biaya siklus hidup terendah.

Penggunaan pilar ini dapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan peralatan yang berjalan pada tingkat kinerja yang dinyatakan

- Mengurangi jumlah masalah start-up yang mengarah pada penurunan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kinerja yang diinginkan
- Mengurangi waktu *start-up*, *commissioning*, dan stabilisasi untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi

#### 6. *Education and training* (pendidikan dan latihan)

Pilar *training* dan *education* ini dilakukan dengan membekali semua karyawan dengan keterampilan yang dibutuhkan untuk melakukan mesin dasar

pemeliharaan. Proses pemberdayaan operator ini berarti personil pemeliharaan dapat dirilis untuk terlibat dalam analisis dan akar penyebab masalah *downtime*, sehingga mereka bisa lebih proaktif dalam menyiapkan sistem untuk mengurangi kejadian di masa depan.

Pilar ini diaplikasikan dalam perusahaan seperti sebagai berikut:

- Kembangkan operator sehingga mereka dapat secara rutin mempertahankan produksi peralatan
- Tingkatkan ketrampilan operator untuk membersihkan dan merawat peralatan mereka harian
- Personel perawatan yang bebas untuk berkonsentrasi proaktif pada kegiatan peningkatan seperti pencegahan pemeliharaan
- Melatih manajer untuk membimbing dan melatih karyawan tentang teknik TPM

#### 7. *TPM in the Office* (TPM di kantor)

Departemen administrasi dan dukungan dapat dilihat sebagai pabrik proses yang memiliki tugas utama untuk mengumpulkan, memproses, dan mendistribusikan informasi. Analisis proses harus diterapkan untuk merampingkan aliran informasi dan mengurangi proses operasi. Seringkali masalah yang dialami oleh produksi seringkali berasal lebih awal dalam proses, misalnya dalam cara pesanan diambil, dimasukkan ke dalam sistem atau direncanakan melalui produksi.

TPM di kantor menggunakan TPM dan metodologi Lean lainnya untuk merampingkan dukungan operasi, meningkatkan aliran melalui semua proses dan antara lain sebagai berikut:

- Mengatasi limbah dalam fungsi administrasi dan dukungan.
- Menerapkan teknik TPM untuk mendukung kegiatan mengurangi proses pemborosan dan penyederhanaan.

Meningkatkan efisiensi produksi dengan mengurangi masalah yang dihasilkan dalam tugas administratif seperti mentah pengadaan material, pemasukan pesanan dan pelepasan pesanan ke produksi

#### 8. *Safety, health and environment* (keselamatan, kesehatan dan lingkungan)

Pilar ini bertujuan untuk meningkatkan keselamatan tempat kerja, mengurangi risiko kecelakaan dan menjaga lingkungan yang aman dan sehat serta

mengurangi kemungkinan cedera pada operator. Implementasi program 5S adalah yang langkah pertama untuk meningkatkan keamanan dengan menghilangkan cacat bahaya mesin, peralatan, dan keselamatan.

Lingkungan kerja yang lebih aman diciptakan dengan mengidentifikasi risiko kesehatan dan potensi bahaya dan berupaya menghilangkannya. Kondisi yang tidak nyaman merusak efektivitas dan karyawan tidak boleh diharapkan menjadi produktif saat dalam risiko.

### 2.3 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Menurut Borris (2006), *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) menyatakan bahwa suatu alat atau mesin dapat menghasilkan tingkat efisiensi penggunaannya dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu *Availability Rate* (ketersediaan waktu), *Performance Rate* (kinerja), dan *Quality Yield* (kualitas yang dihasilkan). Pengukuran OEE dilakukan untuk mengetahui kondisi yang diperlukan untuk meningkatkan efektivitas ataupun efisiensi mesin/peralatan, dan untuk mengetahui area *bottleneck* yang ada pada lintasan produksi. OEE juga merupakan alat ukur untuk memperbaiki dan mengevaluasi proses produksi yang ada sehingga efektivitas pada penggunaan mesin/peralatan dapat ditingkatkan. Adapun formula matematis OEE menurut Borris (2006) dirumuskan sebagai berikut.

$$OEE = Availability \times Performance\ efficiency \times Quality\ Rate \dots\dots\dots(II.1)$$

Kriteria perusahaan yang “menguntungkan” menurut O’Brien (2015) yaitu perusahaan yang memiliki nilai OEE sebesar minimal 85% dengan komposisi variabel OEE yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 Kriteria-kriteria tersebut telah disepakati oleh *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM).

Tabel 2.1 Standar nilai ideal *Overall Equipment Effectiveness* (OEE)

Faktor OEE	Standar Nilai Ideal
<i>Availability (Ketersediaan)</i>	≥ 90%
<i>Performance ( Kinerja)</i>	≥ 95%
<i>Quality (Kualitas)</i>	≥ 99%
<i>Overall Equipment Effectiveness (OEE)</i>	≥ 85%

Sumber: O’Brien, 2015

Perhitungan OEE dapat dilakukan ketika semua faktornya sudah dihitung, perhitungan setiap faktor OEE dapat dilihat sebagai berikut.

1. *Availability* (ketersediaan)

*Availability* merupakan persentase antara waktu operasi dan waktu kerja yang tersedia. Dimana waktu operasi adalah selisih antara waktu kerja dan *downtime*. Dalam hal ini, kategori *downtime* yang berpengaruh terhadap *availability* adalah *breakdown* dan *setup losses*. Adapun formulasi *Availability* menurut Davis (1995) adalah sebagai berikut.

$$Availability = \frac{Loading\ Time - Breakdown\ and\ Setup\ Losses}{Loading\ Time} \times 100\% \dots\dots\dots(II.2)$$

Dimana:

$$Loading\ Time = \text{Jumlah Jam Kerja} \times \text{Total Jam Operasi Mesin} \dots\dots\dots(II.3)$$

*Breakdown* : waktu yang hilang karena rusak dan *set up* mesin

2. *Performance efficiency* (kinerja)

*Performance efficiency* menggambarkan kemampuan peralatan atau mesin dalam menghasilkan produk selama periode tertentu meskipun dengan kecepatan yang rendah. Nilai *performance efficiency* didapatkan dengan membandingkan hasil pengurangan *run time* dan *idling and minor stoppages loss* dengan *run time*. Adapun formulasi *performance efficiency* menurut Davis (1995) adalah sebagai berikut.

$$Performance\ Efficiency = \frac{Run\ Time - Idling\ and\ Minor\ Stop}{Run\ Time} \times 100\% \dots\dots\dots(II.4)$$

Dimana :

$$Run\ Time = Loading\ Time - (Breakdown + Setup\ Losses) \dots\dots\dots(II.5)$$

*Idling and Minor Stop*: waktu terjadinya pemberhentian mesin karena hal kecil

3. *Quality rate* (kualitas)

*Quality rate* menggambarkan kemampuan peralatan atau mesin dalam menghasilkan produk sesuai standar. *Quality rate* merupakan perbandingan antara jumlah produk sesuai standar dengan jumlah seluruh produk yang dihasilkan selama periode tertentu. Adapun formulasi *quality rate* menurut Davis (1995) adalah sebagai berikut.

$$Quality\ Rate = \frac{Jumlah\ Produk - Jumlah\ Produk\ Cacat}{Jumlah\ Produk} \times 100\% \dots\dots\dots(II.6)$$

**2.4 Six Big Losses**

Menurut Davis (1995) untuk meningkatkan efektivitas, fasilitas harus diukur dan harus mengurangi besarnya kerugian atau dapat disebut enam kerugian besar (*six big losses*) dari *downtime losses* yaitu *equipment failure (breakdown loss)* dan *setup and*

*adjustment loss, speed losses* yaitu *idling and minor stoppages* dan *reduce speed Loss* dan *defect losses* yaitu *process defects loss* dan *reduce yield loss*. Berikut ini adalah formula penentuan *Six Big Losses*.

1. *Equipment failure (breakdown loss)*

*Equipment failure (breakdown loss)* yaitu kerusakan mesin secara tiba-tiba sehingga menyebabkan kerugian karena mesin tidak beroperasi menghasilkan output. Untuk menentukan *equipment failure (breakdown loss)* menggunakan formula:

$$\text{Breakdown Loss} = \frac{\text{Total Breakdown Losses}}{\text{Loading Time}} \times 100\% \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

2. *Idling and minor stoppages*

*Idle and minor stoppages* yaitu kerugian yang disebabkan oleh kejadian-kejadian seperti mesin berhenti sejenak, mesin macet, dan *idle time* pada mesin. Untuk menentukan *idle and minor stoppages* menggunakan formula:

$$\text{Idling and Minor Loss} = \frac{\text{Total Idling and Minor Stoppages}}{\text{Loading Time}} \times 100\% \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

3. *Setup and adjustment loss*

*Setup and adjustment loss* yaitu kerugian karena pemasangan dan penyetelan yaitu semua waktu *setup* termasuk waktu penyesuaian (*adjustment*) dan juga waktu yang dibutuhkan untuk kegiatan – kegiatan pengganti satu jenis produk ke jenis produk berikutnya untuk proses produksi selanjutnya. Untuk menghitung *setup and adjustment loss* menggunakan formula:

$$\text{Setup and Adjustment Loss} = \frac{\text{Total Setup and Adjustment Losses}}{\text{Loading Time}} \times 100\% \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

4. *Defects loss*

*Defects loss* yaitu kerugian karena adanya produk cacat maupun produk yang diproses ulang. Untuk menghitung *process defects loss* menggunakan formula sebagai berikut.

$$\text{Deffect Loss} = \frac{\text{Waktu Siklus} \times \text{Jumlah Produk Cacat}}{\text{Loading Time}} \times 100\% \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

5. *Reduce speed loss*

*Reduce speed loss* yaitu kerugian karena mesin tidak bekerja optimal (penurunan kecepatan operasi). *Ideal cycle time* yaitu waktu proses yang diharapkan dapat dicapai dalam keadaan optimal atau tidak mengalami hambatan selama proses produksi. Untuk menghitung *reduce speed loss* menggunakan formula sebagai berikut.

$$Reduce\ Speed\ Loss = \frac{Operation\ Time - (Waktu\ Siklus \times Jml\ Produk\ Cacat)}{Loading\ Time} \times 100..(II.11)$$

6. *Reduce yield loss*

*Reduce yield loss* yaitu kerugian karena adanya sampah bahan baku (*scrap*) ataupun jumlah sisa produk yang tidak terpakai. Untuk menghitung *reduce yield loss* menggunakan formula sebagai berikut.

$$Reduce\ Yield\ Loss = \frac{Waktu\ Siklus \times Scrap}{Loading\ Time} \times 100\% .....(II.12)$$

**2.5 Distribusi Kerusakan**

Menurut Taufik dan Septyani (2015), distribusi kerusakan merupakan informasi mengenai umur pakai suatu mesin/peralatan. Data kerusakan setiap mesin perlu diidentifikasi jenis distribusinya. Hal ini bertujuan untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan dan penjadwalan interval pemeliharaan mesin. Terdapat empat distribusi yang digunakan pada penelitian ini, yaitu distribusi normal, lognormal, eksponensial, dan weibull. Nilai *index of fit* dari keempat distribusi tersebut akan dibandingkan. Nilai *index of fit* yang paling mendekati 1 merupakan distribusi kerusakan terpilih. Namun, perlu dilakukan uji kecocokan lebih lanjut untuk memilih distribusi yang cocok. Adapun penjelasan dari setiap distribusi kerusakan adalah sebagai berikut.

**2.5.1 Distribusi Eksponensial**

Distribusi ini mempunyai laju kerusakan yang tetap terhadap waktu, dengan kata lain probabilitas terjadinya kerusakan tidak tergantung pada umur alat. Distribusi ini merupakan distribusi yang paling mudah untuk dianalisa. Menurut Ebeling (1997) dalam penentuan nilai *x* dan *y* pada masing-masing distribusi menggunakan Persamaan II.13 dan II.14.

$$x_i = t_i = .....(II.13)$$

$$y_i = \ln \left[ \frac{1}{1-F(t_i)} \right] .....(II.14)$$

Dengan:

*t<sub>i</sub>* = data kerusakan ke – *i*

**2.5.2 Distribusi Normal**

Distribusi normal cocok untuk digunakan dalam memodelkan fenomena keausan mesin. Menurut Ebeling (1997) dalam penentuan nilai *x* dan *y* pada masing-masing distribusi menggunakan Persamaan II.15 dan II.16.

$$x_i = t_i \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

$$y_i = Z_i = \Phi^{-1}[F_i(t_i)] \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

Dengan:

$t_i$  = Waktu kerusakan ke- $i$

$\Phi(z)$  = Diperoleh dari tabel gamma

### 2.5.3 Distribusi Lognormal

Distribusi ini dapat memiliki berbagai macam bentuk, sehingga sering di jumpai bahwa data yang sesuai dengan distribusi Weibull juga sesuai dengan distribusi lognormal. Menurut Ebeling (1997) parameter-parameter perhitungan yang digunakan dalam distribusi lognormal menggunakan Persamaan II.17 dan II.18.

$$x_i = \ln t_i \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

$$y_i = Z_i = \Phi^{-1} [F(t_i)] \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Dengan:

$t_i$  = data kerusakan ke -  $i$

$\Phi(z)$  = Diperoleh dari tabel gamma

### 2.5.4 Distribusi Weibull

Distribusi weibull merupakan distribusi yang paling banyak digunakan untuk waktu kerusakan, karena distribusi ini baik digunakan untuk laju kerusakan yang meningkat maupun laju kerusakan yang menurun. Menurut Ebeling (1997) parameter-parameter perhitungan yang digunakan dalam distribusi weibull, menggunakan Persamaan II.19 dan II.20

$$x_i = \ln t_i \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

$$y_i = \ln \left[ -\ln \left[ \frac{1}{1-F(t_i)} \right] \right] \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

dengan:

$t_i$  = data kerusakan ke -  $i$

## 2.6 Identifikasi Distribusi Kerusakan

Menurut Ebeling (1997) dalam mengidentifikasi distribusi kerusakan dan perbaikan melalui dua tahap yaitu yang pertama *index of fit (r)* dan yang kedua *goodness of fit test*.

### 2.6.1 Index Of Fit ( $r$ )

Penentuan nilai *index of fit* dengan menggunakan metode *least square curve fitting* (LSCF). Kriteria distribusi yang dipilih ialah distribusi yang memiliki nilai *index of fit* terbesar untuk diuji menggunakan *goodness of fit test*. Persamaan umum dalam perhitungan *index of fit* menggunakan persamaan II.22 (Ebeling, 1997).

$$F(t_i) = \frac{i-0,3}{n+0,4} \dots\dots\dots(II.21)$$

$$r = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \dots\dots\dots(II.22)$$

$i$  : 1, 2, 3, .....,  $n$

$n$  : jumlah kerusakan data

$F(t_i)$  : pendekatan *median rank*

$r$  : *Index of fit*

### 2.6.2 Goodness Of Fit Test

Setelah melakukan perhitungan *Index of fit* terhadap distribusi TTF dan TTR, maka tahap selanjutnya melakukan perhitungan uji *goodness of fit* atau uji kecocokan distribusi terhadap data TTF dan TTR yang diperoleh. Uji ini dilakukan dengan membandingkan antara hipotesa nol ( $H_0$ ) yang menyatakan bahwa data kerusakan mengikuti distribusi pilihan dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) yang menyatakan bahwa data kerusakan tidak mengikuti distribusi pilihan (Ebeling, 1997). Hipotesa nol ( $H_0$ ) menyatakan bahwa waktu kerusakan tidak berasal pada distribusi lain.

Pengujian yang dilakukan dalam *goodness of fit* terdapat tiga macam yaitu *Bartlett's Test* untuk distribusi Eksponensial, *Kolmogorov-Smirnov Test* untuk distribusi Normal & Lognormal dan *Mann's Test* untuk distribusi Weibull. Nilai kritis tergantung pada derajat kepercayaan ( $\alpha$ ) pengujian sampel yang ada. Secara umum, apabila pengujian statistik ini berada di luar nilai kritis, maka hipotesa nol ( $H_0$ ) diterima.

#### 2.6.2.1 Bartlett's Test Untuk Distribusi Eksponensial

Menurut Ebeling (1997) dalam menguji distribusi dengan *goodness of fit* pada distribusi eksponensial dapat dilakukan dengan langkah hipotesis *Bartlett's Test*. Menurut Ebeling (1997) untuk mengetahui nilai uji statistik *Bartlett's Test* menggunakan Persamaan II.23.

H<sub>0</sub> : Data kerusakan berdistribusi Eksponential

H<sub>1</sub> : Data kerusakan tidak berdistribusi Eksponential

Uji statistiknya adalah:

$$B = \frac{2r \left[ \ln \left( \frac{1}{r} \right) \sum_{i=1}^r t_i - \left( \frac{1}{r} \right) \sum_{i=1}^r \ln t_i \right]}{1 + \frac{(r+1)}{6r}} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

Dengan:

$t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$r$  : Jumlah data

$B$  : Nilai uji statistik untuk uji *Barlett's Test*

Jika  $X_{\frac{1-\alpha}{2}, r-1}^2 < B < X_{\frac{\alpha}{2}, r-1}^2$ , maka Ho diterima

### 2.6.2.2 Uji *Kolmogorov-Smirnov* Untuk Distribusi Normal Dan Lognormal

Menurut Ebeling (1997) dalam menguji distribusi dengan *goodness of fit* pada distribusi normal dan lognormal dapat dilakukan dengan langkah hipotesis *Kolmogorov-Smirnov Test* dengan hipotesis berikut:

H<sub>0</sub> : Data kerusakan terdistribusi normal dan lognormal

H<sub>1</sub> : Data kerusakan tidak terdistribusi normal dan lognormal

$$D_1 = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \Phi \left( \frac{\ln t_i - \bar{t}}{s} \right) - \frac{i-1}{n} \right\} \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

$$D_2 = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - \Phi \left( \frac{\ln t_i - \bar{t}}{s} \right) \right\} \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln t_i - \bar{t})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

$$D_n = \max \{ D_1, D_2 \} \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

dimana,

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n \ln t_i / n \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

dengan:  $t_i$  : Waktu kerusakan ke- $i$

$\bar{t}$  : Rata-rata data waktu kerusakan

$\Phi$  : Probabilitas nilai  $z$

$n$  : Banyaknya data

$s$  : Standar deviasi

$D_i$  : Sebuah taksiran

Jika  $D_n < D_{\text{kritis}}$  maka terima Ho. Nilai  $D_{\text{kritis}}$  diperoleh dari tabel *critical value for Kolmogorov-Smirnov test for normality*.

### 2.6.2.3 Uji Mann Untuk Distribusi Weibull

Menurut Ebeling (1997) uji ini digunakan untuk mengetahui data kerusakan pada pengamatan distribusi Weibull dengan hipotesis berikut:

$H_0$  : Data kerusakan terdistribusi weibull

$H_1$  : Data kerusakan tidak terdistribusi weibull

Sedangkan statistik uji sebagai berikut:

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{r=1} \left( \frac{\ln(t_{i+1}) - \ln(t_i)}{M_i} \right)}{k_2 \sum_{i=1}^{r=1} \left( \frac{\ln(t_{i+1}) - \ln(t_i)}{M_i} \right)} \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

$$M_i = Z_{i+1} - Z_i \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

$$Z_i = \ln \left[ -\ln \left[ 1 - \frac{i-0,}{n+0,251} \right] \right] \dots\dots\dots(\text{II.31})$$

$$k_1 = \left[ \frac{r}{2} \right] \dots\dots\dots(\text{II.32})$$

$$k_2 = \left[ \frac{r-1}{2} \right] \dots\dots\dots(\text{II.33})$$

$$F_{tabel} = F_{\alpha, v1, v2} \dots\dots\dots(\text{II.34})$$

- dengan:  $t_i$  : Waktu kerusakan ke  $i$
- $M, k_1, k_2$  : Sebuah taksiran
- $r$  : Banyaknya data
- $F_{tabel}$  : Nilai persentase distribusi F
- $\alpha$  : Batas kesalahan maksimal

Jika nilai M hitung < Ferit ( $\alpha, 2k_1, 2k_2$ ), maka  $H_0$  diterima. Nilai Ferit diperoleh dari Tabel Distribusi F.

### 2.7 Perhitungan Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR)

Data waktu kerusakan yang digunakan adalah *time to repair* (TTR) dan *time to failure* (TTF) dimana TTR adalah lamanya waktu perbaikan hingga mesin dapat berfungsi kembali, sedangkan TTF adalah selang waktu kerusakan setelah diperbaiki hingga terjadi kerusakan berikutnya. Perhitungan TTF dilakukan dengan menghitung selisih waktu antar kerusakan yang terjadi. Perhitungan nilai TTF dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini (Taufik dan Septyani, 2015):

$$\text{Jumlah hari antar kerusakan} = O_{i+1} - O_i \dots\dots\dots(\text{II.35})$$

$$TTF_{i+1} = O_{i+1} - O_i - TTR_i \dots\dots\dots(\text{II.36})$$

Dimana:

$$TTF_{i+1} = \text{Waktu antar kerusakan komponen periode } i + 1$$

- $O_{i+1}$  = Waktu kumulatif operasi komponen pada periode  $i + 1$
- $O_i$  = Waktu kumulatif operasi komponen pada periode  $i$
- $TTR_i$  = Waktu untuk memperbaiki komponen pada periode

**2.8 Penentuan Parameter *Time to Failure* dan *Time to Repair***

Menurut ebeling (1997) persamaan  $y_i = a + b \cdot x_i$  menggambarkan garis lurus dengan  $a$  sebagai konstanta dan  $b$  sebagai gradien lurus. Dengan menggunakan metode *least square curve fitting*, nilai  $a$  dan  $b$  dapat diperoleh melalui persamaan:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \dots\dots\dots (II.37)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \dots\dots\dots (II.38)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (II.39)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \dots\dots\dots (II.40)$$

- Dimana,  $a$  : konstanta
- $b$  : gradien lurus
- $\bar{y}$  : rata-rata nilai  $y$
- $\bar{x}$  : rata-rata nilai  $x$

**2.8.1 Distribusi Eksponensial**

Parameter dari distribusi eksponensial menurut Ebeling (1997) dikutip dalam Fithri (2010) adalah sebagai berikut.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \dots\dots\dots (II.41)$$

$$\lambda = b \dots\dots\dots (II.42)$$

- Dimana,  $b$  = nilai konstanta
- $\lambda$  = parameter distribusi eksponensial

**2.8.2 Distribusi Normal**

Parameter dari distribusi normal menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut

$$\sigma = 1 / b \dots\dots\dots (II.43)$$

$$\mu = - a \sigma \dots\dots\dots (II.44)$$

$$\mu = - a / b \dots\dots\dots (II.45)$$

- Dimana,  $\sigma$  = parameter standar deviasi distribusi normal
- $\mu$  = parameter nilai tengah distribusi normal

### 2.8.3 Distribusi Lognormal

Parameter dari distribusi lognormal menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$s = 1 / b \dots\dots\dots(\text{II.46})$$

$$t_{med} = e^{-sa} \dots\dots\dots(\text{II.47})$$

Dimana,  $s$  : parameter bentuk distribusi lognormal

$t_{med}$  : parameter lokasi distribusi lognormal

$e$  : eksponensial

### 2.8.4 Distribusi Weibull

Parameter dari distribusi Weibull menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$\beta = b \dots\dots\dots(\text{II.48})$$

$$\theta = e^{-\left(\frac{a}{b}\right)} \dots\dots\dots(\text{II.49})$$

Dimana,  $a$  = konstanta

$b$  = gradien lurus

$\beta$  = parameter bentuk distribusi Weibull

$\theta$  = parameter skala distribusi Weibull

$e$  = eksponensial

## 2.9 Perhitungan Mean Time to Failure dan Mean Time to Repair

*Mean Time to Failure* (MTTF) merupakan waktu rata-rata untuk selang terjadinya kerusakan pada suatu komponen. Sementara *Mean Time to Repair* (MTTR) merupakan waktu rata-rata yang diperlukan untuk melakukan pemeriksaan atau perbaikan. Perhitungan MTTF dan MTTR harus mengikuti distribusi terpilih yang sesuai dengan data TTF dan TTR.

### 2.9.1 Distribusi Eksponensial

Formulasi nilai MTTF dan MTTR untuk distribusi eksponensial menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$\text{MTTF} / \text{MTTR} = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots(\text{II.50})$$

Dengan fungsi keandalannya:

$$R_{(t)} = e^{-(\lambda t)} \dots\dots\dots(\text{II.51})$$

dengan :  $\lambda$  = Laju kerusakan

$t$  = Waktu kerusakan

### 2.9.2 Distribusi Normal

Formulasi nilai MTTF dan MTTR untuk distribusi normal menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$MTTF = \mu \dots\dots\dots(II.52)$$

$$MTTR = t_{med} e^{\left(\frac{s^2}{2}\right)} \dots\dots\dots(II.53)$$

Dengan fungsi keandalan menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut:

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{t - \bar{t}}{s} \right] \dots\dots\dots(II.54)$$

Dengan,  $\Phi$  : Probabilitas nilai z

$\bar{t}$  : Rata-rata waktu

$t$  : Selang waktu perbaikan

$s$  : Simpangan baku

### 2.9.3 Distribusi Lognormal

Formulasi nilai MTTF dan MTTR untuk distribusi lognormal menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$MTTF / MTTR = t_{med} e^{\left(\frac{s^2}{2}\right)} \dots\dots\dots(II.55)$$

Dan fungsi keandalan menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut:

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}} \right] \dots\dots\dots(II.56)$$

Dengan:  $\Phi$  : Probabilitas nilai z

$t$  : Selang waktu perbaikan

$s$  : Simpangan baku

$t_{med}$  : Parameter lokasi

### 2.9.4 Distribusi Weibull

Formulasi nilai MTTF dan MTTR untuk distribusi Weibull menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut.

$$MTTF/MTTR = \theta \gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots\dots\dots(II.57)$$

Nilai  $\gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = \gamma(x)$  dapat dilihat pada Tabel Fungsi Gamma

Dan fungsi keandalan menurut Ebeling (1997) adalah sebagai berikut:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \dots\dots\dots(II.58)$$

Dengan:

- $\gamma$  : Nilai gamma
- $t$  : Selang waktu perbaikan
- $\theta$  : Parameter skala
- $\beta$  : Parameter bentuk

**2.10 Keandalan dengan *Planned Maintenance***

Peningkatan kehandalan dapat ditempuh dengan cara *planned maintenance*. Dengan *planned maintenance* maka pengaruh *wear out* mesin atau komponen dapat dikurangi dan menunjukkan hasil yang cukup signifikan terhadap umur sistem. Menurut Ebeling (1997), model keandalan berikut mengasumsikan sistem kembali ke kondisi baru setelah menjalani *planned maintenance*. Secara umum, persamaan untuk menghitung keandalan dengan *planned maintenance* adalah sebagai berikut.

$$R_m(t) = R(T)^n \times R(t - nT) \text{ untuk } nT \leq t \leq (n+1)T \dots \dots \dots (II.59)$$

Keterangan:

- $n$  = Jumlah pemeliharaan
- $R_m(t)$  = Keandalan dengan *planned maintenance*
- $R(T)^n$  = Probabilitas keandalan hingga n selang waktu pemeliharaan
- $R(t - nT)$  = Probabilitas keandalan untuk waktu t-nT dari tindakan *planned maintenance* yang terakhir

**2.11 Diagram Sebab Akibat**

Tisnowati, Hubies dan Hardjomidjojo (2008) mengemukakan bahwa diagram sebab-akibat atau *fishbone* dapat dijadikan sebagai alat pengendalian proses statistika untuk mengetahui faktor penyebab (sebab) dan karakteristik kualitas (akibat) yang disebabkan faktor-faktor penyebab. Untuk merumuskan penyebab cacat yang terjadi pada produk yang diamati digunakan Ishikawa diagram atau dikenal juga dengan *fishbone* diagram atau *cause effect matrix*. Diagram Ishikawa adalah diagram yang menunjukkan penyebab penyebab dari sebuah even yang spesifik. Diagram ini pertama kali diperkenalkan oleh Kaoru Ishikawa pada tahun 1953. Pemakaian diagram Ishikawa yang paling umum adalah untuk mencegah *defect* serta mengembangkan kualitas produk. Diagram Ishikawa dapat membantu mengidentifikasi faktor-faktor yang signifikan memberi efek terhadap sebuah kejadian.

Setelah cacat, kesalahan, atau masalah telah diidentifikasi dan diisolasi untuk studi lebih lanjut, kita harus mulai menganalisis penyebab potensial dari efek yang

tidak diinginkan ini. Dalam situasi di mana penyebabnya tidak jelas (kadang-kadang penyebabnya), diagram sebab-akibat adalah alat formal yang sering berguna dalam membuka kemungkinan penyebab. Diagram sebab-akibat sangat berguna dalam langkah menganalisis (Montgomery, 2012). Prinsip yang digunakan untuk membuat diagram *Fishbone* ini adalah sumbang saran atau *brainstorming*.

Faktor-faktor penyebab utama dalam diagram *Fishbone* ini dapat dikelompokkan dalam:

1. *Material* (bahan baku)

Berkaitan dengan ketiadaan spesifikasi kualitas dari bahan baku dan bahan penolong yang ditetapkan, ketiadaan bahan penanganan yang efektif terhadap bahan baku dan bahan penolong itu.

2. *Machine* (mesin)

Berkaitan dengan sistem perawatan preventif terhadap mesin-mesin produksi, termasuk fasilitas dan peralatan lain, tidak sesuai dengan spesifikasi tugas, tidak dikalibrasi, terlalu *complicated*, terlalu panas, dan lain-lain.

3. *Man* (tenaga kerja)

Berkaitan dengan pengetahuan yang kurang memadai (tidak terlatih, tidak berpengalaman), kekurangan dengan keterampilan dasar yang berkaitan dengan mental dan fisik, kelelahan, stress, ketidakpedulian dan lain-lain.

4. *Method* (metode)

Berkaitan dengan tidak ada prosedur dan metode kerja yang benar, tidak jelas, tidak diketahui, tidak distandardisasi, tidak cocok dan lain-lain.

5. *Environment* (lingkungan)

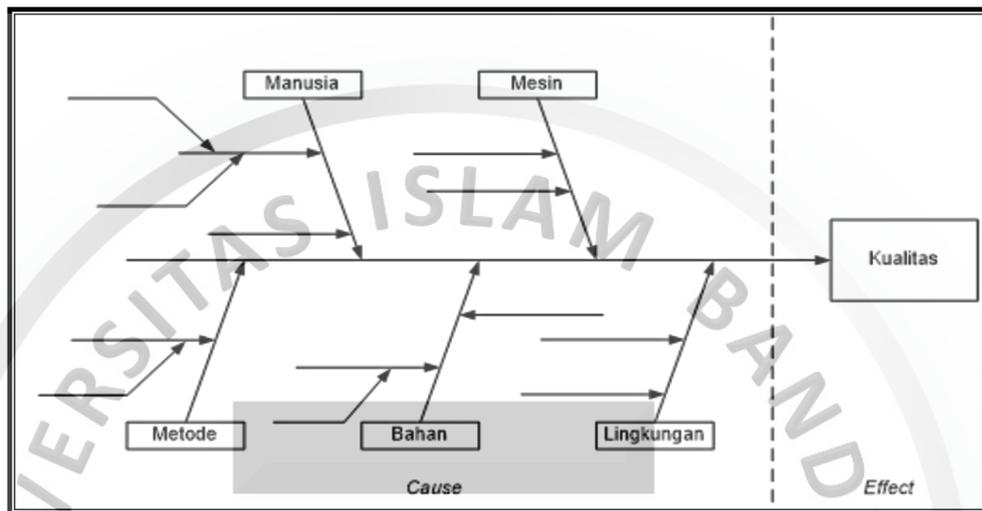
Berkaitan dengan kondisi tempat kerja saat melakukan pekerjaan yang berpengaruh terhadap karyawan/operator, kelembapan, suhu ruangan, tingkat kebisingan dan lain-lain.

Cara membuat diagram sebab-akibat menurut Montgomery (2012) dapat diurutkan sebagai berikut:

- 1) Definisikan masalah atau efek yang akan dianalisis.
- 2) Bentuk tim untuk melakukan analisis. Seringkali tim akan mengungkap potensi penyebab melalui *brainstorming*.
- 3) Gambar kotak efek dan garis tengah.
- 4) Tentukan kategori penyebab potensial utama dan gabungkan sebagai kotak yang terhubung garis tengah.

- 5) Identifikasi kemungkinan penyebabnya dan golongan ke dalam kategori pada langkah 4. Buat kategori baru, jika perlu.
- 6) Urutan peringkat penyebab untuk mengidentifikasi orang-orang yang tampaknya paling mungkin berdampak masalah.
- 7) Ambil tindakan korektif.

Contoh diagram *Fishbone* ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Diagram *Fishbone* (Montgomery, 2012)

