

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 1.1. Asset Management

Asset Management adalah kegiatan praktik dan proses pengelolaan asset fisik yang digunakan dalam industry, seperti contoh industry yang menerapkannya adalah industry pembangkitan. Proses pengelolaan asset management ini mencakup dari berbagai peralatan dan fasilitas yang digunakan dalam pembangkitan energi, seperti generator turbin kondenser boiler, transformator dan infrastruktur peralatan pendukung lainnya. Tujuan utama dari asset management pembangkit adalah untuk memastikan efisiensi operasional, keandalan sistem, dan pengoptimalan nilai dari aset-aset tersebut sepanjang siklus hidupnya. Beberapa aspek utama dalam proses asset management pembangkit adalah :

- **Manajemen Siklus Hidup Aset (Asset Lifecycle Management)** : Ini mencakup perencanaan, pengadaan, operasi, pemeliharaan, pembaruan, dan pembongkaran aset. Manajemen siklus hidup aset membantu memaksimalkan nilai dari aset sepanjang hidupnya.
- **Pemeliharaan dan Perbaikan Aset** : Melibatkan jadwal pemeliharaan terjadwal dan perbaikan untuk memastikan bahwa peralatan beroperasi dalam kondisi optimal. Ini mencakup pemeliharaan preventif dan pemeliharaan berbasis kondisi.
- **Optimasi Kinerja Aset** : Fokus pada peningkatan efisiensi operasional dan kinerja aset untuk memaksimalkan produksi energi dan meminimalkan downtime.
- **Manajemen Risiko Aset** : Identifikasi, evaluasi, dan pengelolaan risiko yang terkait dengan aset, termasuk risiko operasional dan keandalan peralatan.
- **Pemantauan dan Pengukuran Kinerja** : Menggunakan sistem pemantauan dan pengukuran untuk mengumpulkan data kinerja aset secara real-time dan melalui waktu.
- **Pemeliharaan Keberlanjutan** : Memastikan bahwa operasi pembangkit listrik mematuhi standar lingkungan, kepatuhan peraturan, dan praktik berkelanjutan.
- **Pemantauan Keamanan dan Kesehatan Kerja (K3)**: Memastikan bahwa operasi pembangkit listrik mematuhi standar keamanan dan kesehatan kerja untuk melindungi pekerja dan lingkungan.
- **Pemantauan dan Prediksi Kegagalan** : Menggunakan teknologi pemantauan dan analisis

data untuk mendeteksi potensi kegagalan peralatan dan merencanakan tindakan perbaikan sebelum terjadi kegagalan.

Asset Management adalah kegiatan praktik dan proses pengelolaan asset fisik yang digunakan dalam industry

Dengan mengintegrasikan semua aspek ini, asset management pembangkit membantu memastikan bahwa pembangkit energi dapat beroperasi secara efisien, handal, dan sesuai dengan standar keamanan dan keberlanjutan.

## **1.2. Pemeliharaan Peralatan**

Pemeliharaan adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk menjaga, memperbaiki, dan memastikan kinerja optimal suatu sistem, peralatan, atau fasilitas. Tujuan utama dari pemeliharaan adalah untuk memperpanjang umur pakai peralatan, mencegah kegagalan yang tidak terduga, dan meminimalkan downtime atau waktu ketika suatu peralatan tidak beroperasi. Berikut adalah jenis mode pemeliharaan yaitu :

### **A. Preventive Maintenance (PM)**

Pemeliharaan yang bertujuan untuk mencegah kegagalan atau kerusakan dengan menjadwalkan dan melaksanakan Tindakan perawatan secara teratur dan terjadwal. Kegiatan PM bisa berupa inspeksi berkala, pelumasan, penggantian komponen aus dan perawatan berkala lainnya.

Manfaat dari Preventive Maintenance (PM) :

- Mengurangi risiko kegagalan peralatan.
- Memperpanjang umur pakai peralatan.
- Menjaga kinerja optimal dan efisiensi sistem.

$$= ((\text{PM Plant Cost} * (\text{Cap Equipment} / \text{Cap Plant})) / 2)$$

Dimana :

PM Plant Cost : Biaya Pemeliharaan Preventive pembangkit pertahun

Cap Equipment :Capital Cost Peralatan Kondenser

Cap Plant : Capital Cost Pembangkit

2 : Jumlah Unit pembangkit

Biaya yang ditimbulkan dari Pemeliharaan ini disebut dengan **Biaya Preventive Maintenance (PM COST)**

## B. Proaktif Maintenance (PAM)

Pemeliharaan yang bertujuan untuk selalu konsisten merespon dengan cepat secara pemeliharaan terhadap indikasi kegagalan pada sebuah peralatan. Kegiatan PAM bisa berupa pemantauan secara berkala, analisis data realtime dan perubahan strategi pemeliharaan sesuai dengan kebutuhan

Manfaat dari Proactive Maintenance (PAM) :

- Respons cepat terhadap perubahan kondisi.
- Efisiensi dalam penggunaan sumber daya pemeliharaan.

## C. Predictive Maintenance (PdM)

Pemeliharaan yang bertujuan untuk Mendeteksi dan memperbaiki masalah atau kegagalan segera setelah terjadi maupun sebelum terjadinya gangguan.

Kegiatan PDM bisa berupa pemantauan kondisi dengan sensor atau alat pemantauan, analisis data, dan perbaikan segera setelah adanya indikasi masalah

Manfaat dari Predictive Maintenance (PdM) :

- Mengurangi downtime dengan mendeteksi masalah sebelum menyebabkan kegagalan besar
- Memperpanjang umur pakai peralatan dengan tindakan perbaikan dini.

$$= ((\text{PdM Plant Cost} * (\text{Cap Equipment} / \text{Cap Plant})) / 2)$$

Dimana :

PdM Plant Cost : Biaya Pemeliharaan Predictive pembangkit pertahun

Cap Equipment :Capital Cost Peralatan Kondenser

Cap Plant : Capital Cost Pembangkit

2 : Jumlah Unit pembangkit

Biaya yang ditimbulkan dari Pemeliharaan ini disebut dengan **Biaya Predictive Maintenance (PdM COST)**

## D. Corrective Maintenance (CM)

Pemeliharaan yang bertujuan untuk memperbaiki peralatan setelah terjadi kegagalan atau kerusakan.

Kegiatan CM bisa berupa Identifikasi masalah, perbaikan atau penggantian komponen yang rusak, dan pengujian kembali fungsi peralatan.

Manfaat dari Corrective Maintenance (CM) :

- Menangani kegagalan peralatan dengan cepat.
- Mengurangi downtime dan kerugian produksi.

**Corrective Maintenance** adalah Biaya biaya yang dikeluarkan untuk memperbaiki atau memulihkan peralatan atau sistem setelah terjadi kegagalan atau kerusakan. Biaya ini mencakup semua pengeluaran yang terkait dengan pemulihan fungsi normal dari peralatan atau sistem yang tidak beroperasi dengan baik. Corrective maintenance biasanya dilakukan setelah peralatan gagal berfungsi, dan bertujuan untuk mengembalikan peralatan ke kondisi operasi yang memadai.

$$= F(t) \times ((CM \text{ Plant Cost } * (Cap \text{ Equipment}/Cap \text{ Plant})) / 2)$$

Dimana :

CM Plant Cost : Biaya Pemeliharaan Corrective pembangkit setahun

Cap Equipment :Capital Cost Peralatan Kondenser

Cap Plant : Capital Cost Pembangkit

F (t) : Intensitas Kegagalan

2 : Jumlah Unit pembangkit

Biaya yang ditimbulkan dari Pemeliharaan ini disebut dengan **Biaya Corrective Maintenance (CM COST)**

#### E. Overhaul Maintenance

Pemeliharaan yang bertujuan untuk perawatan menyeluruh, perbaikan, dan penggantian komponen besar untuk memulihkan peralatan ke kondisi seperti baru.

Kegiatan Overhaul bisa berupa pemeriksaan mendalam, penggantian komponen yang aus, dan perbaikan menyeluruh.

Manfaat dari Overhaul :

- Memperpanjang umur pakai peralatan secara signifikan.
- Membawa peralatan kembali ke kondisi operasional optimal.

$$= (OH \text{ Plant Cost per unit } * Cap \text{ Equipment}/Cap \text{ Plant})$$

Dimana :

OH Plant Cost : Biaya Pemeliharaan Overhaul pembangkit rutin Tahunan

Cap Equipment :Capital Cost Peralatan Kondenser

Cap Plant : Capital Cost Pembangkit

Biaya yang ditimbulkan dari Pemeliharaan ini disebut dengan **Biaya Overhaul Maintenance (OH COST)**

Jenis jenis mode Overhaul Rutin tahunan yang ada pada pembangkit yaitu :

- First Year Inspection (Hanya dilakukan pada saat 1 tahun setelah komisioning)
- Simple Inspection (SI)
- Mean Inspection (ME)
- Serious Inspection (SE)

Dalam pengelolaan pembangkitan, Penjadwalan Mode Overhaul adalah sebagai berikut  
FYI - SI – ME – SI – SE. Dalam setiap 5 tahun sekali dilakukan OH SE.

### 1.3. Pengertian Kondisi Keandalan Pembangkit

Keandalan pembangkit listrik didefinisikan sebagai peluang peralatan untuk beroperasi sesuai fungsinya dalam kondisi dan selang waktu tertentu. Keandalan pembangkit listrik dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti: Jumlah unit pada pusat pembangkit, Besarnya keluar paksa tiap unit dalam satu tahun, Kerusakan, Pemeliharaan rutin

Dalam mengoperasikan dan mengelola pembangkit, harus dioperasikan secara handal dan efisien. Indeks dari pengoperasian pembangkit yang handal adalah sebagai berikut :

- **Derating** : Kondisi pembangkit listrik yang tidak mampu mencapai 98% dari Daya Mampu Netto (DMN) selama lebih dari 30 menit. Derating atau gangguan pada pembangkit listrik dapat berdampak signifikan terhadap sistem kelistrikan
- **Maintenance Outage (MO)** : Pembangkit listrik keluar untuk pemeliharaan preventif, korektif, pengujian, perbaikan, atau penggantian part/material
- **Forced Outage (FO)** : Pembangkit listrik keluar akibat adanya gangguan yang tidak diantisipasi sebelumnya atau kondisi emergensi

**Derating dan Outage** pada pembangkit ini disebabkan oleh adanya kerusakan atau gangguan peralatan – peralatan pembangkit baik peralatan utama maupun peralatan pendukung, salah satunya adalah peralatan **Kondenser**, Gangguan yang sering terjadi pada peralatan kondenser adalah adanya penurunan **Vacuum Kondenser**.

$$\sum \text{Consequential Cost} = \sum \text{Loss Output} \times \text{Energy Price}$$

Dimana :

$\Sigma$  Loss Output : Total Kehilangan energy akibat Outage dan Derating  
Energy Price : Harga Jual Listrik

Ketika terjadi gangguan tentunya menyebabkan kerugian energy produksi listrik pembangkit dan berdampak pada kerugian finansial dari pembangkit di sisi produksi listrik.

#### **1.4. Konsep Penggantian Peralatan**

Salah satu keputusan besar yang seringkali dihadapi oleh sebuah perusahaan pembangkit adalah mengenai keputusan dalam menentukan kapan suatu alat atau asset pada pembangkit tersebut harus diganti. Sebagai suatu masalah optimasi, keputusan dalam menentukan penggantian pada suatu peralatan bergantung pada ekpektasi mengenai bagaimana perubahan biaya operasi pada peralatan lama dan baru seiring dengan berjalannya waktu dan juga ekspektasi terhadap biaya kapital dan nilai sisa (salvage value) di masa yang akan datang [Financial Management, 1986].

Dari sisi perspektif financial, penggantian peralatan bertujuan untuk menyediakan layanan yang dibutuhkan dalam suatu perencanaan dengan cara yang paling ekonomis [John D. Campbell, 2011]. Penggantian peralatan (Replacement) dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu [Ron Galisky, 2008] :

##### **➤ Penurunan Performa Peralatan**

Seiring dengan berjalannya waktu beroperasi pembangkit, sebuah peralatan pembangkit tersebut akan menjadi semakin tua dan efisiensi operasionalnya juga akan menurun akibat dari meningkatnya jumlah perawatan rutin dan biaya perbaikan. Selain itu, konsumsi bahan bakar dan kerugian panas juga meningkat seiring dengan bertambah tuanya peralatan.

##### **➤ Teknologi**

Perubahan teknologi membuat peralatan lama menjadi usang (tidak dipakai lagi karena terlalu tua atau dapat dikatakan ketinggalan teknologi). Hal ini menyebabkan waktu penggantian menjadi lebih cepat oleh karena pengurangan biaya kapital atau peningkatan jumlah pendapatan yang dapat dihasilkan oleh peralatan dengan teknologi baru.

##### **➤ Perubahan Lingkungan kerja**

Perubahan kondisi lingkungan operasi, jika pada pembangkitan kondisi pengoperasian kondenser juga dipengaruhi adanya perubahan bahan bakar yang digunakan pada saat komisioning dengan kondisi aktual yang sekarang, kondisi bahan bakar yang digunakan

jauh berbeda kualitas.

➤ **Keuangan**

Faktor keuangan (Financial) memegang peranan yang sangat penting karena dalam hal pembelian sebuah peralatan baru melibatkan *opportunity cost* yang terpisah dari kegiatan operasi dan pemeliharaan sehari-hari peralatan tersebut.

Dengan bertambahnya usia dari peralatan, maka biaya operasi dan pemeliharaan pada peralatan tersebut (Biaya material, biaya bahan bakar dan biaya pemeliharaan PM, PdM, CM dan OH) akan terus meningkat. Pada suatu waktu, biaya operasi akan menjadi tinggi sehingga akan lebih menguntungkan apabila peralatan lama diganti dengan peralatan yang baru. Berdasarkan *Capital Replacement Model*, umur ekonomis dapat ditentukan dengan menghitung nilai aliran biaya equivalent (Equivalent Costflow atau Equivalent Annual Cost, EACmin) yang paling minimal pada suatu peralatan.

Pada dasarnya umur suatu peralatan dapat dibedakan menjadi 3, yaitu [Ron Galisky, 2008] :

- Umur fisik (*Physical Life*) adalah interval waktu dalam jam atau tahun, antara tahun waktu pembelian peralatan sampai dengan waktu peralatan tersebut tidak dapat digunakan lagi.
- Umur Fungsional (*Useful Life*) adalah total waktu beroperasinya suatu peralatan, tidak termasuk waktu waktu peralatan tersebut rusak atau sedang tidak dioperasikan, dapat diukur dalam satuan jam atau tahun.
- Umur Ekonomis (*Economic Life*) adalah interval waktu, dalam jam atau tahun, antara waktu pembelian peralatan sampai dengan waktu pada kurva total EAC (*Equivalent Annual Cost*) minimumnya.

Permasalahan penggantian peralatan ini dapat diselesaikan dalam kerangka maksimalisasi profit (***Profit-Maximizing***) atau minimalisasi biaya (***Cost-Minimizing***). Dalam kerangka minimalisasi biaya, biaya terkecil dapat ditemukan melalui metode perhitungan total biaya kini (*Net present Value*) maupun dalam biaya ekuivalen tahunan (*Equivalent Annual Cost*) [Agus Wibawa et, al .2021].

## **1.5. Life Cycle Cost Management (LCCM)**

### **1.5.1. Pengertian Tentang Life Cycle Cost Management (LCCM)**

Life Cycle Cost Management (LCCM) adalah metode yang mempertimbangkan biaya total kepemilikan selama siklus hidup suatu peralatan, termasuk biaya langsung dan tidak langsung.

Definisi lain tentang LCCM adalah pendekatan terintegrasi yang mempertimbangkan seluruh biaya yang terkait dengan suatu sistem atau aset dari awal hingga akhir siklus hidupnya

Sehingga dengan kata lain dapat dikatakan bahwa Integrasi Simple LCCM dalam pengambilan keputusan perawatan memungkinkan evaluasi biaya efektifitas dari berbagai opsi perawatan, membantu mengoptimalkan keputusan yang diambil

#### **1.5.2. Elemen Elemen Biaya pada Metode Life Cycle Cost**

Dalam menganalisis Life Cycle Cost Management (LCCM) diperlukan beberapa elemen biaya yang harus dianalisis yaitu :

- Biaya Operasional
- Biaya Pemeliharaan
- Biaya Akuisisi (Capital Cost)

#### **1.5.3. Manfaat Life Cycle Cost**

Beberapa manfaat dari penerapan metode Life Cycle Cost :

- Optimisasi Keputusan : Membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik dengan mempertimbangkan semua konsekuensi finansial sepanjang siklus hidup suatu aset.
- Perencanaan Strategis : Mendukung perencanaan jangka panjang dan pengelolaan risiko dengan memahami dampak finansial jangka Panjang

#### **1.5.4. Pengertian Tentang Umur Ekonomis (*Economic Life*)**

Umur ekonomis dari suatu peralatan adalah jangka waktu peralatan tersebut beroperasi pada tingkat biaya ekuivalen tahunan yang minimum [10]. Biaya tersebut pada dasarnya terdiri dari dua komponen yaitu biaya kapital dan biaya Operasi. Komponen pertama, yaitu biaya kapital adalah biaya ekuivalen tahunan dari keseluruhan biaya yang harus dikeluarkan untuk membeli suatu asset. Biaya ini ditentukan dengan membagi harga beli asset dengan suatu faktor bunga yang sesuai kemudian mengubahnya menjadi nilai ekuivalen tahunan. Semakin lama perusahaan menggunakan sebuah asset maka biaya kapital tahunan dari asset tersebut akan semakin kecil. Karena biaya kapital yang terus menurun ini maka setiap perusahaan cenderung untuk menggunakan peralatan lebih lama daripada yang semestinya.

Komponen kedua adalah biaya operasi yaitu biaya ekuivalen tahunan yang dikeluarkan untuk pengoperasian suatu asset, dua elemen yaitu deteorisasi dan keusangan (*Obsolescence*) menyebabkan biaya operasi terus naik seiring dengan semakin lamanya suatu perusahaan menggunakan sebuah

peralatan. Biaya Operasi dari suatu peralatan terus meningkat seiring berjalannya waktu karena adanya penurunan performa (*Efficiency*) dengan bertambahnya umur. Peningkatan pada biaya aktual ini lebih disebabkan karena depreciasi. Ada juga beberapa kemungkinan timbulnya biaya oportunitas apabila dipusukan untuk terus menggunakan peralatan lama daripada menggantinya. Biaya ini muncul karena pada saat itu telah diluncurkan sebuah peralatan dengan teknologi baru yang memungkinkan adanya pengurangan biaya operasi apabila dibandingkan dengan peralatan yang lama. Kenaikan biaya aktual akibat depreciasi dan kenaikan biaya oportunitas akibat keusangan menyebabkan adanya kecenderungan dari setiap perusahaan untuk mengganti peralatannya berulang kali.

Economic Life mengacu pada periode waktu di mana suatu aset dianggap ekonomis dan memberikan nilai maksimal sebelum perlu diganti atau ditingkatkan

Faktor-faktor yang mempengaruhi Economic Life :

- Teknologi: Kemajuan teknologi dapat membuat aset usang atau tidak efisien lebih cepat.
- Perubahan Kebutuhan dan Permintaan: Perubahan dalam kebutuhan pasar atau permintaan konsumen dapat mempengaruhi relevansi dan nilai suatu aset.
- Regulasi: Perubahan dalam peraturan atau regulasi dapat mempengaruhi kepatuhan aset terhadap standar baru.
- Biaya Pemeliharaan dan Operasional: Biaya yang meningkat seiring waktu dapat mempengaruhi keekonomian suatu aset.

Hubungan antara *Life Cycle Cost Management* dengan *Economic Life* adalah :

- Optimalisasi Total Biaya: Economic Life mempertimbangkan keseimbangan antara biaya akuisisi, pemeliharaan, dan penggantian untuk mengoptimalkan total biaya kepemilikan.
- Integrasi dengan LCCM: Economic Life menjadi faktor penting dalam LCCM, di mana perencanaan dan keputusan diambil dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidup aset

Perhitungan *Economic Life*, dalam menganalisis Economic Life diperlukan Analisis Teknik (**Engineering**) dan analisis Biaya (**Financial**), Integrasi dari kedua analisis tersebut yang dapat dijadikan sebagai dasar dalam menentukan dan memprediksi waktu peralatan kapan yang paling optimal dipelihara (Maintenance Repair), kapan yang paling optimal peralatan diganti (Replace),

maupun kapan yang paling optimal peralatan tersebut diganti (Replace).

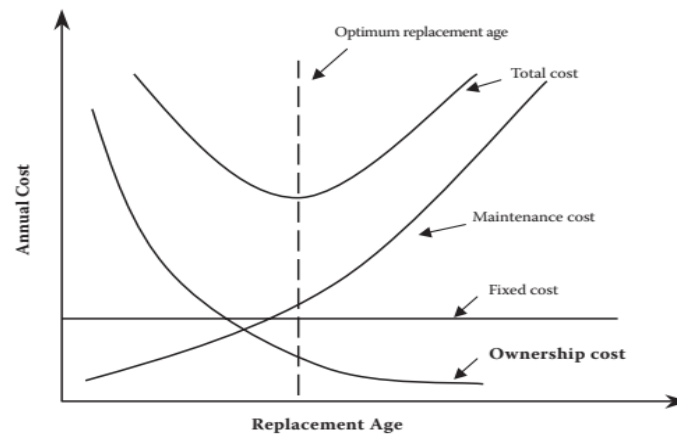


FIGURE 12.23 Economic life problem.

© 2011 by Taylor and Francis Group, LLC

Gambar 1. Economic Life Method [John D. Campbell. 2011]

Dengan kata lain analisis Umur Ekonomis (*Economic Life*) peralatan ini dapat digunakan untuk menentukan titik manfaat tambahan dari penggunaan asset tersebut tidak sebanding lagi dengan total biayanya serta tanpa menunggu peralatan tersebut mengalami kerusakan dan kerugian yang besar [John D. Campbell. 2011], analisis perhitungan total biaya tersebut dinamakan sebagai **Total EAC Cost (Equivalent Annual Cost)** peralatan.

#### 1.5.5. Depresiasi Aset

Depresiasi Aset adalah Penyusutan nilai asset sebuah peralatan selama suatu periode tertentu. Atau bisa juga disebut dengan penurunan nilai asset tetap karena faktor penggunaan, keusangan atau kemajuan teknologi. Nilai Depresiasi asset ini dapat mempengaruhi nilai dari sebuah perusahaan karena akumulasi depresiasi untuk setiap asset ini dapat mengurangi nilai buku pada sebuah neraca.

$$A = \frac{\text{Capital Cost}}{\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}}$$

Dimana :

Capital Cost : Nilai Perolehan peralatan pada tahun awal

i : Interest Rate

n : Number of Years

Faktor faktor yang mempengaruhi depresiasi adalah :

- Harga Perolehan Awal : Harga awal yang didapatkan dari harga beli asset diawal, semakin tinggi harga asset, semakin besar juga biaya depresiasi yang harus diakui pada setiap tahunnya.
- Nilai Residu : Perkiraan nilai yang masih bisa diperoleh dari aset tersebut setelah tidak digunakan lagi, atau di akhir masa manfaatnya. Semakin tinggi nilai residu, semakin rendah depresiasi tahunan yang perlu diakui.
- Usia Manfaat : Estimasi berapa lama asset tersebut akan produktif sebelum menjadi tidak efektif digunakan atau menjadi using. Usia manfaat ini sangat berpengaruh dalam menghitung depresiasi, terutama menggunakan metode depresiasi asset garis lurus.
- Pola Pemakaian : Intensitas dan pola penggunaan asset ini juga mempengaruhi tingkat penyusutan. Contohnya seperti sebuah peralatan yang digunakan atau dioperasikan selama 24 jam non stop dalam sehari akan lebih cepat menyusut nilainya dibandingkan dengan yang hanya dioperasikan beberapa waktu dalam sehari.
- Kemajuan Teknologi dan Perubahan Pasar : Jaman masa kini yang semakin maju, teknologi baru sebuah industry juga bermunculan sehingga membuat mesin yang masih menggunakan teknologi lama menjadi tidak relevan lagi.

Dalam menentukan Depresiasi asset terdapat beberapa metode perhitungan sesuai dengan akuntansi bisnis yaitu :

- Metode Garis Lurus
- Metode Saldo Menurun
- Metode Jumlah angka tahun
- Metode Unit Produksi

Manfaat dari perhitungan Depresiasi Aset ini sangat berperan penting dalam pengelolaan keuangan dan strategi bisnis perusahaan, tentunya dalam asset manajemen. Beberapa manfaat utama dari perhitungan depresiasi asset ini adalah :

- Alokasi Biaya yang lebih akurat
- Pengurangan Pajak Penghasilan
- Pengelolaan Arus kas yang efektif
- Pengambilan Keputusan Investasi yang lebih baik, seperti halnya pengambilan keputusan dalam penggantian maupun perbaikan sebuah peralatan.

- Peningkatan Akuntabilitas dan Kontrol.

#### **1.5.6. Nilai Inflasi (Inflation Rate)**

Inflation Rate (Nilai Inflasi) adalah tingkat persentase yang mengukur kenaikan harga barang dan jasa secara umum dalam suatu ekonomi selama periode tertentu, biasanya per tahun. Inflasi mencerminkan penurunan daya beli uang, yang menyebabkan setiap unit mata uang mampu membeli lebih sedikit barang atau jasa dibandingkan sebelumnya (Mankiw, 2014). Salah satu indikator utama yang digunakan untuk mengukur inflasi adalah Consumer Price Index (CPI), yang menghitung perubahan harga rata-rata barang dan jasa yang dikonsumsi oleh rumah tangga (Blanchard et al., 2017).

Inflasi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

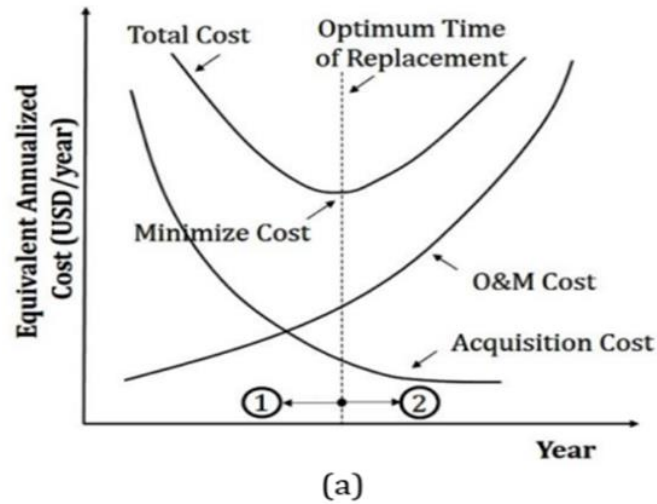
- Demand-Pull Inflation: Terjadi ketika permintaan barang dan jasa melebihi kapasitas produksi yang ada (Mankiw, 2014).
- Cost-Push Inflation: Inflasi ini disebabkan oleh kenaikan biaya produksi, seperti kenaikan harga bahan baku atau upah (Samuelson & Nordhaus, 2010).
- Kebijakan Moneter: Jumlah uang yang beredar mempengaruhi tingkat inflasi. Peningkatan signifikan dalam jumlah uang dapat menyebabkan inflasi (Blanchard et al., 2017).
- Imported Inflation: Inflasi yang disebabkan oleh kenaikan harga barang impor, baik karena kenaikan biaya produksi di luar negeri maupun perubahan nilai tukar (Dornbusch et al., 2018).

#### **1.5.7. Nilai Suku Bunga (Discount Rate)**

Discount Rate (Nilai Suku Bunga) adalah tingkat bunga yang digunakan untuk mendiskonto nilai masa depan dari aliran kas menjadi nilai saat ini. Ini merupakan konsep fundamental dalam analisis investasi dan keuangan, yang membantu investor dan perusahaan untuk mengevaluasi kelayakan proyek atau investasi dengan membandingkan nilai sekarang dari aliran kas yang diharapkan dengan biaya awal dari investasi tersebut (Brealey et al., 2014).

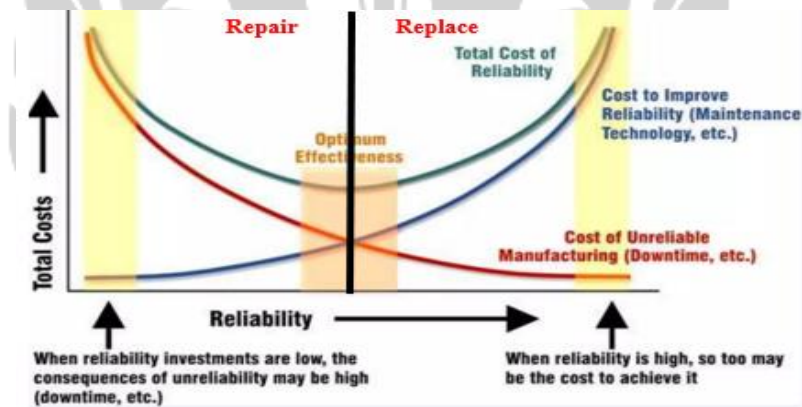
#### **1.5.8. Pengertian dan Perhitungan Equivalent Annual Cost (EAC)**

*EAC Cost (Equivalent Annual Cost)* besarnya biaya yang harus dikeluarkan setiap tahun untuk Investasi dan O&M selama umur peralatan yang ditetapkan.



Gambar 2. Equivalent Annual Cost vs Year [John D. Campbell. 2011]

Menganalisis dan menghitung menggunakan Equivalent Annual Cost (EAC) pada sebuah peralatan untuk mendapatkan pengambilan keputusan (Decision Making) perlakuan pada peralatan (Keep, Improve or Replace) [John D. Campbell. 2011]



Gambar 3. Repair or Replace based on Total Cost [12]

EAC dibagi menjadi 2 model, yakni  $EAC_{min/eco}$  (Economic) dan  $EAC_{design}$  (Design).  $EAC_{min/eco}$  adalah EAC untuk suatu equipment yang dioperasikan sampai dalam waktu periode tertentu yang dapat menghasilkan nilai minimum/ekonomis. Sedangkan  $EAC_{design}$  adalah EAC untuk suatu equipment yang dioperasikan sampai dalam waktu periode Design Manufaktur dari equipment tersebut [Agus Wibawa et, al .2021]

Perhitungan EAC ini meliputi Annualized O&M Cost dan Annualized Acquisition Cost.

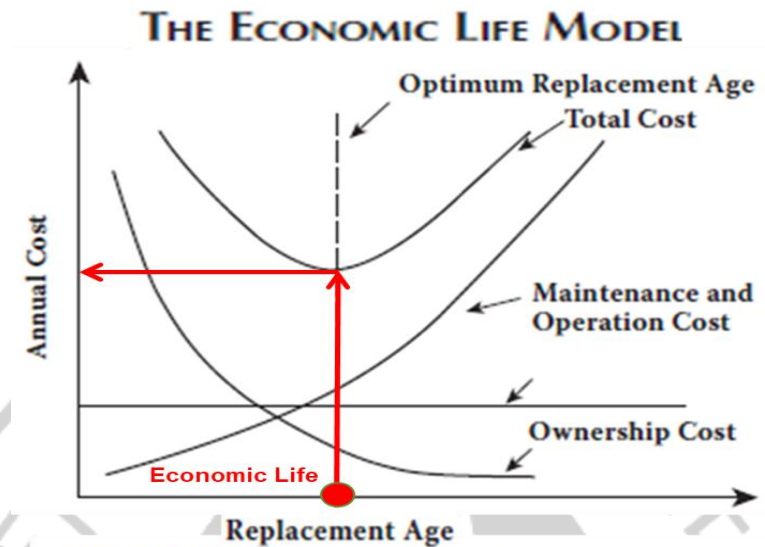


FIGURE 12.23 Economic life problem.

© 2011 by Taylor and Francis Group, LLC

Gambar 4. Equivalent Annual Total Cost vs Year [John D. Campbell. 2011]

$$\sum \text{Maintenance Cost} + \sum \text{Operational Cost} + \sum \text{Consequential Cost}$$

Annualized O&M Cost ini meliputi perhitungan dari Total Maintenance Cost, Total Operational Cost dan Total Consequential Cost.

- **Total Maintenance Cost** dalam analisis ini adalah biaya yang digunakan untuk melakukan pemeliharaan dari sebuah peralatan tersebut, yang meliputi biaya pemeliharaan Preventive, Corrective, Proaktif, Predictive maupun total biaya Overhaul, baik secara biaya material (Material Cost) maupun biaya tenaga kerja (Labour Cost).

$$\bullet \sum \text{Maintenance Cost} = \sum \text{Material} + \sum \text{Labour}$$

$$\bullet \sum \text{Material} = F(t) \times \left( \frac{\text{Cost}}{\text{Failure}} \right)_{\text{material}} + PM.\text{Cost}_{\text{material}} + PdM.\text{Cost}_{\text{material}} + OH.\text{Cost}_{\text{material}}$$

Dimana :

$F(t)$  : Intensitas Kegagalan

$(\text{Cost/failure})_{\text{mat}}$  : Biaya material dari kegiatan Corrective maintenance

$PM.\text{Cost}_{\text{material}}$  : Biaya material dari kegiatan Preventive maintenance

$PdM.\text{Cost}_{\text{material}}$  : Biaya material dari kegiatan Predictive maintenance

$OH.\text{Cost}_{\text{material}}$  : Biaya material dari kegiatan Overhaul

$$\bullet \sum Labour = (F(t) \times t_{repair} \times n_{operator}) + (PM_{interval} \times PM_{duration} \times PM_{operator}) + (PD_{duration} \times PD_{interval} \times PD_{operator}) + (OH_{duration} \times OH_{interval} \times OH_{operator}) \times \frac{Rp}{Hour}$$

Dimana :

F(t) : Intensitas Kegagalan

T<sub>repair</sub> : Durasi kegiatan corrective maintenance

n<sub>operator</sub> : Jumlah operator kegiatan corrective maintenance

PM.interval : Interval kegiatan preventive maintenance dalam 1 tahun

PM.duration : Durasi kegiatan preventive maintenance

PM.operator : Jumlah operator kegiatan preventive maintenance

PdM.interval : Interval kegiatan predictive maintenance dalam 1 tahun

PdM.duration : Durasi kegiatan predictive maintenance

PdM.operator : Jumlah operator kegiatan predictive maintenance

OH.interval : Interval kegiatan overhaul maintenance dalam 1 tahun

OH.duration : Durasi kegiatan overhaul maintenance

OH.operator : Jumlah operator kegiatan overhaul maintenance

Rp/hour : Rate Gaji Operator

- **Total Operation Cost** dalam analisis ini adalah biaya yang digunakan untuk mengoperasikan peralatan tersebut, yang meliputi biaya gaji dari pegawai di unit (Total Salary Cost), Rasio nilai peralatan terhadap nilai total pembangkit, biaya penggunaan energi listrik (Total Electricity Cost), dan kerugian biaya akibat efisiensi peralatan (Total Efficiency Cost).

$$\bullet \sum Operational Cost = \sum Salary \times \left( \frac{Capital_{equipment}}{Capital_{plant}} \right) + \sum Electricity Cost + \sum Efficiency Cost$$

Dimana :

E salary : Total gaji pegawai di unit

Cap equip/Cap Plant : Rasio nilai peralatan terhadap nilai total pembangkit

E Electricity Cost : Biaya penggunaan energi listrik

E Efficiency Cost : Kerugian Biaya akibat efisiensi peralatan

- **Total Consequential Cost** dalam analisis ini adalah biaya yang digunakan atau dialami oleh pembangkit unit pada saat kehilangan energy akibat adanya gangguan Outage maupun Derating (Total Loss Output) dan Harga Jual Listrik (Energy Price).

$$\bullet \sum \text{Consequential Cost} = \sum \text{Loss Output} \times \sum \text{Energy Price}$$

Dimana :

E Loss Output : Total Kehilangan energy akibat Outage dan Derating

Energy Price : Harga Jual Listrik

Loss Output dipembangkit listrik berasal dari dua faktor utama yaitu :

- Outage : Kegagalan Total peralatan atau shutdown
- Derating : Pengurangan kapasitas pembangkit listrik untuk memproduksi listrik

Total MWh loss dapat diprediksi dengan menganalisis data historis mengenai outage dan derating, serta mengaitkannya dengan faktor operasional seperti usia peralatan, kondisi operasional, dan jadwal pemeliharaan (Smith et al., 2021)

Dalam perhitungan Loss Output ini diperlukan beberapa parameter yang meliputi :

- **Outage atau Derating Events** : Waktu, durasi, dan kehilangan daya dalam MWh selama kejadian ini.
- **Variabel Operasional** : Usia peralatan, jam operasi, suhu, Pressure dan status pemeliharaan. (Meyer, 2019)
- **MWh yang Diproduksi** : Laju produksi normal untuk menghitung pengurangan MWh akibat outage atau derating.

#### 1.5.9. Penjelasan dan Perhitungan Rekomendasi Decision Analisis EAC

EAC (Equivalent Annual Cost) adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi biaya peralatan atau investasi dengan mempertimbangkan biaya tahunan yang ekuivalen. Ini membantu dalam membandingkan biaya berbagai alternatif berdasarkan masa pakai dan biaya mereka, untuk membuat keputusan pengelolaan aset atau investasi.

Penjelasan masing – masing komponen EAC adalah sebagai berikut :

##### 1. EAC Design Life (Eksisting) :

**EAC Design life eksisting** adalah biaya tahunan ekuivalen dari peralatan yang sudah ada (eksisting) berdasarkan umur desain atau masa pakai peralatan tersebut. Umur desain mengacu pada umur peralatan yang diharapkan berdasarkan spesifikasi teknis atau

rancangan awal pabrikannya. **Park, C. S. (2011),**

Rumus:

$$EAC = \frac{CAPEX_{\text{eksisting}}}{A_{n,r}} + OPEX_{\text{eksisting}}$$

Di mana:

- CAPEX: Biaya modal untuk peralatan eksisting.
- OPEX: Biaya operasional tahunan untuk peralatan eksisting.
- $A_{n,r}$ : Faktor anuitas, yang dihitung dengan rumus:

$$A_{n,r} = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n}$$

$$A_{n,r} = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n}$$

Di mana  $n$  adalah umur desain (tahun) dan  $r$  adalah tingkat diskonto.

Contoh Perhitungan:

- CAPEX eksisting = Rp 500 juta.
- OPEX eksisting = Rp 50 juta per tahun.
- Umur desain = 10 tahun.
- Tingkat diskonto = 5%.

Menghitung faktor anuitas:

$$A_{10,0.05} = \frac{(1+0.05)^{10} - 1}{0.05(1+0.05)^{10}} = 7.7217$$

EAC Design Life Eksisting:

$$EAC = \frac{500,000,000}{7.7217} + 50,000,000 = 64,754,174 + 50,000,000 = 114,754,174$$

## 2. EAC Design Life (Kandidat) :

*EAC Design life kandidat* adalah biaya tahunan ekuivalen dari peralatan kandidat (peralatan baru yang dipertimbangkan untuk menggantikan peralatan eksisting)

berdasarkan umur desain atau masa pakai dari peralatan kandidat tersebut, **Park, C. S.** (2011),

Rumus:

$$EAC = \frac{CAPEX_{\text{kandidat}}}{A_{n,r}} + OPEX_{\text{kandidat}}$$

Contoh Perhitungan:

- CAPEX kandidat = Rp 400 juta.
- OPEX kandidat = Rp 40 juta per tahun.
- Umur desain = 15 tahun.
- Tingkat diskonto = 5%.

Menghitung faktor anuitas:

$$A_{15,0.05} = \frac{(1 + 0.05)^{15} - 1}{0.05(1 + 0.05)^{15}} = 10.3797$$

EAC Design Life Kandidat:

$$EAC = \frac{400,000,000}{10.3797} + 40,000,000 = 38,545,446 + 40,000,000 = 78,545,446$$

### 3. EAC Economic Life (Eksisting) :

**EAC Economic life eksisting** adalah biaya tahunan ekuivalen dari peralatan eksisting berdasarkan umur ekonomis, yaitu usia peralatan yang secara ekonomis masih layak digunakan. Umur ekonomis biasanya lebih pendek daripada umur desain, karena mempertimbangkan penurunan efisiensi, peningkatan biaya operasional, atau teknologi yang ketinggalan zaman.

Rumusnya sama dengan EAC design life, hanya saja umur ekonomis (economic life) digunakan sebagai parameter waktu (n). **Park, C. S.** (2011),

Contoh Perhitungan:

- CAPEX eksisting = Rp 500 juta.
- OPEX eksisting = Rp 60 juta per tahun.
- Umur ekonomis = 7 tahun.
- Tingkat diskonto = 5%.

Menghitung faktor anuitas:

$$A_{7,0.05} = \frac{(1 + 0.05)^7 - 1}{0.05(1 + 0.05)^7} = 6.4632$$

EAC Economic Life Eksisting:

$$EAC = \frac{500,000,000}{6.4632} + 60,000,000 = 77,335,447 + 60,000,000 = 137,335,447$$

#### 4. EAC Economic Life (Kandidat) :

**EAC Economic life kandidat** adalah biaya tahunan ekuivalen dari peralatan kandidat berdasarkan umur ekonomisnya, yang mungkin lebih pendek dari umur desain. Ini mempertimbangkan bahwa peralatan baru mungkin akan diganti sebelum mencapai umur desain karena alasan seperti inovasi teknologi atau penurunan efisiensi.

Rumusnya sama dengan EAC design life, hanya saja umur ekonomis (economic life) digunakan sebagai parameter waktu (n). **Park, C. S. (2011),**

Contoh Perhitungan:

- CAPEX kandidat = Rp 400 juta.
- OPEX kandidat = Rp 50 juta per tahun.
- Umur ekonomis = 12 tahun.
- Tingkat diskonto = 5%.

Menghitung faktor anuitas:

$$A_{12,0.05} = \frac{(1 + 0.05)^{12} - 1}{0.05(1 + 0.05)^{12}} = 9.954$$

EAC Economic Life Kandidat:

$$EAC = \frac{400,000,000}{9.954} + 50,000,000 = 40,197,181 + 50,000,000 = 90,197,181$$

Secara ringkas penjelasan dari ke 4 EAC tersebut adalah :

- **EAC Design Life Eksisting** dan **EAC Economic Life Eksisting** memberikan gambaran tentang biaya tahunan peralatan yang sudah ada berdasarkan umur desain dan umur ekonomisnya. **Park, C. S. (2011),**
- **EAC Design Life Kandidat** dan **EAC Economic Life Kandidat** memberikan gambaran tentang biaya tahunan peralatan baru yang diusulkan, juga berdasarkan umur desain dan umur ekonomisnya. **Park, C. S. (2011),**

Dalam konteks peralatan industri, kita sering memiliki tiga rekomendasi yang didasarkan pada perbandingan EAC dari peralatan yang ada (eksisting) dan peralatan kandidat yang potensial untuk menggantikan peralatan tersebut:

**1. Keep as it is** (Pertahankan peralatan sebagaimana adanya). **Park, C. S. (2011),**

- Rekomendasi ini diberikan jika EAC design life dan EAC economic life peralatan eksisting lebih rendah dibandingkan dengan EAC economic life dari peralatan kandidat.
- Artinya, peralatan eksisting lebih murah untuk tetap digunakan tanpa penggantian atau perbaikan signifikan

Kondisi:

$$EAC_{\text{design life (eksisting)}} < EAC_{\text{economic life}}$$

**2. Keep and improve** (Pertahankan peralatan, tetapi lakukan perbaikan). **Park, C. S. (2011),**

- Jika EAC design life peralatan eksisting lebih tinggi dari EAC design life peralatan kandidat, tetapi ada peluang untuk melakukan perbaikan, maka rekomendasi ini diberikan.
- Ini berarti peralatan eksisting masih lebih murah untuk dipertahankan, tetapi perlu dioptimalkan dengan investasi perbaikan untuk menjaga kinerjanya.

Kondisi:

$$EAC_{\text{design life (eksisting)}} > EAC_{\text{design life (kandidat)}} \text{ dan perbaikan diperlukan.}$$

**3. Replace** (Ganti peralatan dengan peralatan baru). **Park, C. S. (2011),**

- Jika EAC design life dan EAC economic life dari peralatan eksisting lebih tinggi dibandingkan dengan EAC design life dan economic life dari peralatan kandidat,

maka peralatan eksisting sebaiknya diganti dengan peralatan baru.

- Dalam hal ini, peralatan kandidat menawarkan biaya yang lebih rendah untuk masa pakainya dan lebih ekonomis untuk penggantian.

Kondisi:

$$EAC_{\text{design life (eksisting)}} > EAC_{\text{design life (kandidat)}} \text{ dan } EAC_{\text{economic life (eksisting)}} > EAC_{\text{economic life (kandidat)}}$$

Berdasarkan referensi **Park, C. S. (2011)**, dalam menganalisa pengambilan keputusan (Decision) 3 acuan diatas adalah dengan membandingkan EAC peralatan eksisting dengan EAC Design yang dihitung.

### 1.6. Condenser

Peralatan *Condenser* pada pembangkitan sangat mempengaruhi terhadap faktor efisiensi dan kesiapan kehandalan (Availability). Banyak diantara dari riset penelitian yang telah dilakukan baik pada pembangkit listrik batubara menyimpulkan bahwa faktor peralatan yang paling mempengaruhi kinerja pembangkit adalah Condenser [S. Laković,2011].

#### 1.6.1. Condenser Back Pressure

Indikator performa dari sebuah Condenser adalah dapat dilihat dari **High Condenser Backpressure**. Pengertian dari **Condenser Backpressure** adalah tekanan di sisi keluaran turbin uap yang menuju kondenser. Tekanan ini biasanya rendah, dan semakin rendah tekanan tersebut, semakin baik efisiensi turbin dalam mengonversi energi uap menjadi energi mekanik. Jika tekanan balik meningkat, efisiensi turbin menurun. Tekanan ini sangat penting untuk efisiensi dan kinerja keseluruhan pembangkit listrik.

##### ➤ Aspek Utama dari Condenser Back Pressure:

- **Efisiensi Termal:** Tekanan balik yang lebih rendah biasanya menunjukkan efisiensi termal yang lebih tinggi dalam siklus Rankine. Ini berarti lebih banyak energi yang dapat diekstraksi dari uap sebelum dikondensasikan.
- **Kinerja Turbin:** Tekanan balik yang tinggi dapat mengurangi efisiensi turbin karena turbin harus bekerja lebih keras untuk mendorong uap keluar melawan tekanan yang lebih tinggi.
- **Kondisi Pendinginan:** Kinerja kondensor sangat bergantung pada kondisi pendinginan. Faktor-faktor seperti suhu dan laju aliran air pendingin dapat mempengaruhi tekanan balik. Suhu air pendingin yang lebih tinggi atau laju aliran yang

rendah dapat menyebabkan peningkatan tekanan balik.

- **Desain dan Kapasitas Kondensor:** Desain dan kapasitas kondensor, termasuk luas permukaan untuk perpindahan panas dan efisiensi perpindahan panas, berperan penting dalam menentukan tekanan balik.
- **Aspek Operasional dan Pemeliharaan:** Operasi dan pemeliharaan kondensor yang tepat sangat penting untuk mengelola tekanan balik. Masalah seperti fouling, scaling, atau kebocoran udara dapat meningkatkan tekanan balik dan perlu segera ditangani.

➤ **Implikasi dari Condenser Back Pressure:**

- **Efisiensi:** Tekanan balik yang lebih rendah membantu meningkatkan efisiensi pembangkit listrik dengan memungkinkan turbin mengekstraksi lebih banyak kerja dari uap.
- **Konsumsi Bahan Bakar:** Dengan efisiensi yang lebih tinggi, pembangkit listrik dapat menghasilkan jumlah listrik yang sama dengan konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit, yang menghasilkan penghematan biaya.
- **Umur Peralatan:** Mengelola tekanan balik secara efektif dapat mengurangi stres pada turbin dan kondensor, sehingga memperpanjang umur operasional mereka.

Dengan mengelola dan mengoptimalkan Condenser Back Pressure, pembangkit listrik dapat meningkatkan kinerja, mengurangi biaya operasional, dan memperpanjang usia peralatan penting.

### 1.6.2. Condenser Performance Indicator

Berdasarkan [Palo Alto, 1998] EPRI, penyebab yang sering terjadi dari defect **High Condenser Backpressure** adalah :

- High Inlet CW (Cooling Water) Temperature
- Low Cooling Water Flow
- Partially Filled Waterbox
- Excessive Heat Load
- Fouled Tubes
- Excessive Air in-Leakage/Air Ingress
- Vacuum Equipment Problem
- Tube Bundle Design Problem

$$\text{Condenser Back Pressure} \\ \text{CBP} = (101.325 - (\text{Cond Vacuum} * -1))$$

Dari beberapa penyebab *High Condenser Backpressure* diatas, untuk faktor *High Inlet Cooling Water Temperatur* dan *Excessive Heat Load* tidak dapat dikontrol (Uncontrollable).

Performa dari sebuah Condenser sangat penting untuk dijaga, pada subbab ini menjelaskan parameter kinerja yang mempengaruhi performa dari Condenser, yaitu :

➤ ***CW Inlet temperature***

Temperatur tinggi pada air pendingin masuk meningkatkan suhu kondensasi, sehingga mengurangi efisiensi termal [Church, et al., 2011].

➤ ***CW Outlet Temperature***

Temperatur air pendingin pada saluran keluar kondensor bertingkat karena variasi spasial laju kondensasi di dalam kondensor.

➤ ***Tube Cleanliness***

Faktor kebersihan tabung ( $F_c$ ) adalah perbandingan koefisien perpindahan panas rata-rata tabung dalam kondensor dengan koefisien perpindahan panas rata-rata tabung baru yang telah dibersihkan dengan asam. Tentu saja, ini merupakan parameter yang sangat penting, terutama pada tabung yang rentan terhadap pengotoran, baik di bagian luar maupun di dalam. Akumulasi fouling atau scaling pada permukaan tube mengurangi efisiensi perpindahan panas, [Mueller, et al., 2019].

$$CF = \frac{UA_{actual}}{UA_{design}} \cdot 100\%$$

Dimana :

$U A_{actual}$  : Koefisien perpindahan panas aktual (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

$U A_{design}$  : Koefisien perpindahan panas desain (kcal/m<sup>2</sup>h °C)

➤ ***Condenser Pressure***

Tekanan yang paling penting adalah pada saluran masuk uap kondensor. Bidang yang sama harus digunakan untuk mengukur tekanan kondensor dan tekanan balik turbin. Dengan kondensor yang digantung di bawah, pesawat dapat dengan mudah diidentifikasi

➤ ***Overall Heat Transfer Coefficient (U)***

Parameter yang menggambarkan kemampuan perpindahan panas melalui lapisan-lapisan material dan media dalam sebuah sistem termal. Pada kondensor,  $UUU$  digunakan untuk mengevaluasi efisiensi perpindahan panas dari uap ke air pendingin melalui dinding tube

kondensor. Nilai U memperhitungkan semua resistansi termal yang terjadi, baik pada sisi uap, material tube, maupun sisi air pendingin.

$$U = \frac{Q_c}{A \cdot \Delta T_{lm}}$$

Dimana :

A : Area perpindahan panas (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{lm}$  : Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Q : Laju perpindahan panas

*Log Mean Temperature Difference (LMTD)* atau Selisih Suhu Logaritmik adalah parameter penting dalam analisis perpindahan panas, khususnya untuk sistem pertukaran panas seperti kondensor. LMTD digunakan untuk menghitung perbedaan suhu rata-rata logaritmik antara dua fluida yang mengalir melalui permukaan perpindahan panas, yaitu uap yang mengalami kondensasi dan air pendingin. Persamaan LMTD dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

Dimana :

$\Delta T_{LM}$  : Selisih suhu logaritmik (K)

$\Delta T_1$  : Selisih suhu di satu ujung pertukaran panas (K)

$\Delta T_2$  : Selisih suhu di ujung lainnya (K)

Dalam konteks kondensor, LMTD bergantung pada suhu masuk dan keluar dari uap dan air pendingin.

#### ➤ **Condenser Heat Rejection (Q)**

Condenser Heat Rejection (**Q**) adalah jumlah energi panas yang dilepaskan oleh uap (steam) yang mengembun di dalam kondensor. [Wang, T., 2021]

$$= \text{CW Flow} \times (968.2 \times (\text{CWOut} - \text{CWin})) / 1000$$

Dimana :

CW Flow : Jumlah Air Pendingin

CW In : Temperatur Masuk Air Pendingin

CW Out : Temperature Keluar Air Pendingin

### **Faktor-Faktor yang Memengaruhi Q:**

**Laju Aliran Massa Uap (m<sub>steam</sub>):** Semakin tinggi laju uap yang mengembun, semakin besar Q.

**Perbedaan Suhu (T<sub>out</sub>–T<sub>in</sub>):** Kenaikan perbedaan suhu air pendingin meningkatkan efisiensi perpindahan panas, sehingga Q<sub>QQ</sub> menjadi lebih besar.

**Kondisi Operasional:** Fouling pada tube kondensor atau air ingress (udara masuk) dapat mengurangi efisiensi perpindahan panas dan menurunkan Q<sub>QQ</sub>

#### ➤ **Air Ingress Resistance**

Air ingress adalah masuknya udara atau gas non-kondensasi ke dalam sistem vakum kondensor. Fenomena ini biasanya terjadi melalui kebocoran di seal, gasket, atau sambungan casing kondensor. Kehadiran udara dalam kondensor mengurangi efektivitas proses kondensasi karena meningkatkan tekanan parsial gas non-kondensasi dan menghambat perpindahan panas antara uap dan permukaan tube kondensor, [Wang, et al., 2019].

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{steam}} + R_{airingress} + \frac{\delta}{k}}$$

Dimana:

$h_{steam}$  : Koefisien perpindahan panas uap

$R_{airingress}$  : Resistansi termal akibat keberadaan udara

$\delta$  : Ketebalan tube

$k$  : Konduktivitas termal material tube

**Resistansi Air Ingress** adalah ukuran hambatan termal yang ditimbulkan oleh keberadaan gas non-kondensasi. Hal ini dipengaruhi oleh:

**Konsentrasi Udara** : Semakin tinggi konsentrasi udara, semakin besar resistansi termal.

**Lokasi Kebocoran** : Kebocoran pada area dengan tekanan tinggi cenderung memperburuk efek air ingress.

**Efisiensi Sistem Ekstraksi Udara** : Sistem ekstraksi udara yang tidak optimal memungkinkan akumulasi gas non-kondensasi.

Rumus resistansi termal akibat udara dapat dinyatakan sebagai:

$$R_{airingress} = \frac{P_{air}}{k_{air} \cdot A}$$

Dimana:

Pair: Tekanan parsial udara (Pa)

Kair: Konduktivitas termal udara (W/m·K)

A: Area perpindahan panas (m<sup>2</sup>)

### Strategi Pengendalian Air Ingress

- **Penyegelan Sistem Vakum** : Pemeliharaan seal dan gasket untuk mencegah kebocoran udara.
- **Optimalisasi Sistem Ekstraksi Udara**: Memastikan ejector atau pompa vakum bekerja secara optimal untuk menghilangkan udara yang terperangkap.
- **Penggunaan Sensor Kebocoran Udara**: Menggunakan teknologi prediktif untuk mendeteksi keberadaan dan lokasi kebocoran udara secara dini.

### ➤ *Tidal Impact of CW Flow*

CW Flow pada kondenser pembangkit yang menggunakan media air laut sebagai pendingin, dipengaruhi oleh adanya pasang surut air laut. Pasang surut air laut ini dibentuk menjadi sebuah pola berdasarkan gaya gravitasi bulan dan Matahari. Setiap konstituen memiliki periode dan pengaruh yang berbeda dalam siklus pasang surut harian. Secara umum pola pasang surut terdiri dari tiga konstituen utama yaitu :

- **Principal Lunar Semi-Diurnal (M2)**
  - Konstituen ini berasal dari pengaruh gravitasi Bulan dan memiliki periode sekitar **12,42 jam**.
  - Biasanya merupakan komponen utama dalam banyak sistem pasang surut.
  - Amplitudonya berbeda-beda tergantung lokasi dan karakteristik geografis pantai.
- **Solar Semi-Diurnal (S2)**
  - Konstituen ini disebabkan oleh pengaruh gravitasi Matahari dan memiliki periode tepat **12,00 jam**.

- Biasanya amplitudonya lebih kecil dibandingkan M2, tetapi tetap berperan dalam membentuk pola pasang surut harian.

#### - Lunar Diurnal (O1)

- Konstituen ini berkaitan dengan siklus harian pasang surut akibat pengaruh Bulan, dengan periode sekitar **25,82 jam**.
- Konstituen ini menyebabkan ketidakseimbangan pasang surut harian, yang membuat tinggi air pasang dan surut bisa berbeda dalam sehari.

Tipe pasang surut di pesisir selatan Jawa, termasuk Jawa Tengah, **bervariasi antara semi-diurnal dan campuran**. Ini berarti ada dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari, tetapi dengan tinggi yang bisa berbeda-beda. Untuk mengetahui **amplitudo spesifik** dari setiap konstituen ini di wilayah tertentu di Jawa Tengah, diperlukan **pengukuran langsung** menggunakan alat seperti **tide gauge** dan analisis harmonik terhadap data pasang surut dalam periode waktu tertentu. Data ini berguna untuk berbagai keperluan, termasuk **perencanaan infrastruktur pesisir, navigasi kapal, perikanan, dan mitigasi dampak perubahan iklim** di daerah pesisir.

### 1.7. Peluang Penghematan Energi

Penghematan energi adalah Tindakan menggunakan energi secara optimal sesuai dengan kebutuhan. Tindakan penghematan energi dapat dilakukan dengan tidak menggunakan energi secara cuma-cuma. Dengan adanya penghematan energi, sumber daya alam yang digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik dapat dihemat sehingga dapat mengurangi biaya yang dikeluarkan.

Peluang dalam penghematan energi dapat ditilik berdasarkan harga intensitas konsumsi energinya. Yang mana semakin jauh besar harga intensitas energi yang didapat terhadap target intensitas energinya maka peluang akan semakin tinggi. Target yang diinginkan haruslah sesuai standarisasi. Jadi, potensi hemat energi adalah hasil analisa Intensitas Konsumsi Energi yang setelah itu dilakukan perbandingan terhadap standar yang ada baik berupa ASME PTC, Heat Rate Handbook, SNI atau BSN.

#### 1.7.1. Heat Rate Loss Analysis Condenser

Definisi dari **Heat Rate** adalah Jumlah energi yang dibutuhkan untuk membangkitkan energi

listrik pada system pembangkit. Heat Rate didefinisikan dalam satuan kCal/kWh.

Definisi dari **Heat Rate Loss** adalah Besar kerugian/kehilangan (Loss) energi yang disebabkan oleh peralatan pembangkit.

Metode yang digunakan dalam Heat Rate Analysis ini, mengacu pada dokumen best practice EPRI (**Heat rate reference improvement manual**) dan Southern Company (**Heat rate handbook**). Pengelompokkan point heat loss sebagai berikut :

| Parameter       | Units      | MW Change   |
|-----------------|------------|-------------|
| HP Efficiency   | -1%        | -.28%       |
| IP Efficiency   | -1%        | -.17%       |
| LP Efficiency   | -1%        | -.45%       |
| Superheat Temp  | -10 DegF   | +10%        |
| Reheat Temp     | -10 DegF   | -.50%       |
| Superheat Spray | +1% of MSF | +0.08%      |
| Reheat Spray    | +1% of MSF | +0.02%      |
| Cond. Pressure  | 1"HG       | Thermal kil |
| Final FW Temp   | -5 DegF    | +0.4%       |

| Parameter       | Units      | MW Change   |
|-----------------|------------|-------------|
| HP Efficiency   | -1%        | -.18%       |
| IP Efficiency   | -1%        | -.17%       |
| LP Efficiency   | -1%        | -.45%       |
| Superheat Temp  | -10 DegF   | -.15%       |
| Reheat Temp     | -10 DegF   | -.14%       |
| Superheat Spray | +1% of MSF | -.02%       |
| Reheat Spray    | +1% of MSF | -.20%       |
| Cond. Pressure  | 1"HG       | Thermal kil |
| Final FW Temp   | -5 DegF    | -.10%       |

Tabel 2.1. Tabel Perubahan heat rate Loss dari EPRI [Palo Alto, 1998]

Nilai Heat Rate dapat berubah berdasarkan kondisi dari peralatan maupun kondisi pengoperasian pembangkit. Perubahan Heat Rate menurut EPRI [8] dapat didefinisikan dalam beberapa level dari kerugian/losses yang terjadi pada peralatan maupun pengoperasian.

- **As-Designed Heat Rate** : Heat Rate yang dijadikan sebagai acuan referensi dalam membandingkan kondisi aktual Heat Rate yang aktual, dapat dikatakan Heat Rate ini adalah Heat Rate yang berasal dari pabrikan maupun dari komisioning awal sebelum pembangkit beroperasi.
- **Operating Actual Heat Rate** : Heat Rate yang didefinisikan sebagai Nilai Heat Rate pada kondisi aktual tanpa memperhatikan status pengoperasian. Hal ini bisa dikarenakan oleh adanya ketidak akuratan dalam pembacaan jumlah batubara yang berasal dari stockpile yang digunakan pada boiler, selain itu adanya ketidak akuratan dalam merata-rata heating values pada bahan bakar karena adanya bermacam-macam variasi pemasok batubara

yang digunakan.

### **1.7.2. Biaya Kwh Pemakaian Sendiri**

Untuk menentukan biaya Pemakaian Sendiri pada Condenser Back Pressure, dilakukan dengan perhitungan berdasarkan Pemakaian Sendiri pada Pembangkit sebagai berikut :

Capital Aset/Capital plant : 0.0136

PS (Pemakaian Sendiri) : 15.63 Mw = 15632 kW

$$\text{PS Equipment} = \text{Capital Aset/Capital plant} \times \text{PS (Pemakaian Sendiri) kW}$$

$$\text{Total PS Equipment /Tahun} = \text{PS Equipment} \times 24 \text{ Jam} \times 365 \text{ Hari}$$

$$\text{kWh Cost} = \text{Total PS Equipment /Tahun} \times \text{Harga Listrik (Rp/Kwh)}$$

## **1.8. Metode Prediksi Peralatan Berbasis Excel**

Prediksi peralatan adalah suatu pendekatan yang digunakan untuk memperkirakan kondisi atau kinerja suatu peralatan di masa depan, berdasarkan data historis dan variabel yang relevan. Pendekatan ini sangat penting dalam pemeliharaan prediktif, karena membantu dalam mengurangi downtime, merencanakan perawatan dengan lebih efektif, serta memperpanjang umur peralatan. Prediksi peralatan dapat dilakukan dengan berbagai metode, mulai dari yang sederhana seperti peramalan (forecasting) hingga metode yang lebih kompleks seperti prediksi multivariat dan pembelajaran mesin (machine learning).

### **1.8.1. Dasar Teori Forecasting (Prediksi)**

Peramalan (forecasting) adalah teknik yang digunakan untuk memperkirakan nilai atau kondisi masa depan suatu variabel berdasarkan analisis data masa lalu. Teknik ini banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk manajemen peralatan, untuk memprediksi kebutuhan pemeliharaan, stok suku cadang, dan umur peralatan. Dalam Microsoft Excel, metode peramalan sering kali diterapkan menggunakan teknik regresi linier, eksponensial, serta analisis tren untuk memproyeksikan variabel di masa depan

### **1.8.2. Regresi Linier**

Regresi linier adalah metode statistik yang memodelkan hubungan antara variabel dependen  $YYY$  dengan satu atau lebih variabel independen  $XXX$ . Dalam konteks peramalan, regresi linier sederhana dapat digunakan untuk memodelkan hubungan linier antara waktu sebagai variabel independen dan variabel yang akan diprediksi sebagai

variabel dependen. Persamaan dasar dari regresi linier sederhana adalah:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

Di mana :

- Y adalah nilai yang diprediksi.
- X adalah variabel independen (contohnya, waktu).
- $\beta_0$  adalah konstanta atau intercept.
- $\beta_1$  adalah koefisien yang mengukur dampak X terhadap Y.
- $\epsilon$  adalah kesalahan atau residu antara nilai aktual dan prediksi.

### 1.8.3. Regresi Linier Berganda

Apabila terdapat lebih dari satu variabel independen yang berpengaruh terhadap variabel dependen, digunakan regresi linier berganda. Ini memungkinkan model untuk menangkap efek dari berbagai faktor yang mempengaruhi hasil prediksi. Persamaan untuk regresi linier berganda adalah:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$$

Di mana  $X_1, X_2, \dots, X_n$  adalah variabel independen yang berbeda.

### 1.8.4. Metode Prediksi Multivariat

Prediksi multivariat merupakan metode yang melibatkan penggunaan beberapa variabel independen untuk memperkirakan nilai dari variabel dependen. Metode ini lebih kompleks dibandingkan prediksi univariat karena mempertimbangkan interaksi antar variabel yang mempengaruhi hasil akhir. Teknik ini sangat relevan dalam manajemen peralatan, di mana berbagai faktor seperti suhu, kelembapan, dan tekanan bersama-sama mempengaruhi kinerja peralatan.

### 1.8.5. Metode ARIMA Multivariat

Model Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) adalah metode prediksi deret waktu yang menggabungkan konsep autoregressive (AR), differencing untuk menjadikan data stasioner (I), dan moving average (MA) untuk menangkap noise dalam data. Dalam konteks multivariat, ARIMA dapat diperluas menjadi Vector Autoregression (VAR), yang memperhitungkan interaksi antara beberapa deret waktu yang saling terkait.

#### 1.8.6. Neural Networks untuk Prediksi Multivariat

Jaringan saraf tiruan (neural networks), khususnya model Long Short-Term Memory (LSTM), adalah metode yang efektif untuk menangani prediksi multivariat, terutama ketika hubungan antar variabel bersifat non-linier dan kompleks. LSTM adalah jenis jaringan saraf berulang (RNN) yang dirancang untuk memproses data sekuensial dan mampu mengingat informasi dalam jangka waktu yang panjang. Ini menjadikannya ideal untuk aplikasi prediksi deret waktu multivariat seperti kondisi peralatan

#### 1.9. Fitur Forecast Sheet di Excel

**Forecast Sheet** adalah fitur yang tersedia di Microsoft Excel yang memungkinkan pengguna untuk membuat peramalan (forecast) berdasarkan data historis dengan cara yang mudah dan cepat. Fitur ini menggunakan algoritma *Exponential Smoothing* atau *Triple Exponential Smoothing* (ETS) untuk memprediksi nilai masa depan, serta untuk memberikan interval kepercayaan bagi prediksi tersebut. Fitur ini sangat bermanfaat bagi pengguna yang memerlukan peramalan sederhana tanpa perlu melakukan penghitungan rumit secara manual [Winston, W. L. 2016].

##### 1.9.1. Metode Exponential Smoothing

*Exponential Smoothing* adalah teknik peramalan deret waktu yang memberikan bobot lebih besar pada data terbaru, sehingga perubahan terbaru lebih banyak memengaruhi hasil peramalan. Teknik ini efektif untuk memodelkan data yang tidak memiliki tren yang kuat atau pola musiman yang jelas. Ada beberapa varian dari metode *Exponential Smoothing* [Makridakis, S., et al, 1998]

##### 1.9.2. Single Exponential Smoothing (SES):

Cocok untuk data tanpa tren atau musiman. Rumus dasar untuk SES adalah:

$$S_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) S_t$$

Di mana :

$S_{t+1}$  adalah nilai peramalan untuk periode berikutnya.

$Y_t$  adalah nilai aktual pada waktu  $t$ .

$S_t$  adalah nilai peramalan pada waktu  $t$ .

$\alpha$  adalah faktor smoothing antara 0 dan 1.

### 1.9.3. Double Exponential Smoothing (DES):

Digunakan untuk data dengan tren linier. DES memperkenalkan komponen tren dalam perhitungannya, dengan dua parameter smoothing untuk level dan tren [Makridakis, S., et al, 1998]

### 1.9.4. Triple Exponential Smoothing (TES) atau Holt-Winters:

Cocok untuk data dengan pola musiman. TES menambahkan komponen musiman pada peramalan dan digunakan dalam Excel's *Forecast Sheet* untuk menangkap tren dan musiman dalam data.

**Forecast Sheet** bekerja dengan baik untuk memprediksi penjualan, permintaan, atau kinerja peralatan yang berfluktuasi berdasarkan waktu. Algoritma ETS yang digunakan oleh Excel memastikan bahwa pola musiman dan tren dalam data historis diambil ke dalam perhitungan untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat. [Winston, W. L. 2016].

Fitur ini juga memungkinkan pengguna untuk memodifikasi pengaturan prediksi, seperti panjang musim, tingkat kehalusan (smoothing factor), dan periode prediksi.

## 1.10. Metode Prediksi Peralatan Berbasis Machine Learning

Teknologi masa kini yang semakin canggih, sudah terdapat sebuah metode dan fasilitas dalam melakukan peramalan atau prediksi (Forecasting), dengan menggunakan AI (Artificial Intelligent), atau biasa disebut dengan metode Machine Learning. Metode ini mempermudah kita dalam melakukan sebuah peramalan, dengan beberapa aplikasi yang mudah diakses yaitu dengan menggunakan aplikasi Google Collabs, Jupiter Notebook dan lain sebagainya. Dimana didalam aplikasi ini sudah terdapat library database teori yang diperlukan dalam melakukan peramalan atau prediksi (Forecasting) yang mudah digunakan bagi semua kalangan. Adapun beberapa metode yang biasa digunakan dalam peramalan atau prediksi (Forecasting) berbasis Machine Learning ini yaitu :

### 1.10.1. Metode Random Forest

Random Forest adalah metode ensemble yang menggabungkan prediksi dari beberapa pohon keputusan untuk meningkatkan akurasi dan mengurangi overfitting. Dalam konteks prediksi peralatan, Random Forest dapat digunakan untuk memodelkan hubungan kompleks antara berbagai variabel input dan output, serta memberikan

estimasi yang lebih akurat dari variabel dependen.

#### **1.10.2. Metode Support Vector Machines (SVM)**

SVM adalah metode yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi. Dalam prediksi peralatan, SVM dapat digunakan untuk memprediksi kemungkinan kegagalan peralatan berdasarkan sejumlah fitur tertentu, dengan memaksimalkan margin antara kelas yang berbeda.

#### **1.10.3. Metode ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)**

ARIMA adalah salah satu model prediksi deret waktu yang paling umum digunakan. Model ini mampu menangkap tren, musiman, dan noise dalam data, dan sering diterapkan dalam prediksi penjualan, cuaca, serta kondisi peralatan. [Box, G. E. P. Et al, 2015]

#### **1.10.4. Metode SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average)**

SARIMA adalah ekstensi dari ARIMA yang mempertimbangkan pola musiman dalam data. Ini sangat penting dalam prediksi peralatan yang dipengaruhi oleh faktor musiman, seperti perubahan suhu musiman yang dapat mempengaruhi kinerja sistem HVAC, [Box, G. E. P. Et al, 2015].

#### **1.11. Metode Validasi Model Prediksi**

Dalam memvalidasi model prediksi dibutuhkan beberapa parameter score yang digunakan sebagai acuan tingkat akurasi validitas dari model tersebut. Salah satunya adalah R<sup>2</sup> Score. R<sup>2</sup> Score adalah ukuran statistik yang menunjukkan seberapa baik variabel prediktor dalam model dapat menjelaskan variabilitas dalam variabel target

- **R<sup>2</sup> = 1** berarti model menjelaskan 100% variabilitas data, yang berarti prediksinya sangat akurat.
- **R<sup>2</sup> = 0** berarti model tidak menjelaskan variabilitas data sama sekali.
- **R<sup>2</sup> = 0,993** berarti 99,3% dari variabilitas data target dapat dijelaskan oleh model. Dengan kata lain, hanya 0,7% dari variabilitas yang tidak dijelaskan oleh model, menunjukkan bahwa model tersebut sangat baik dalam memprediksi output berdasarkan input yang diberikan.

### BAB III

