

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Penelitian Relevan

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil beberapa referensi yang relevan dan masih berkaitan dengan topik penelitian yang bersumber dari jurnal, paper, buku, baik dari dalam negeri maupun luar negeri, sebagai berikut:

- 1) Penulis: Muhammad Ruspinuji, dan Nani Kurniati

Judul: Analisis *Interval General Overhaul* (GOH) pada *Highway Truck Caterpillar 773E*

Studi Kasus: Strategi perawatan truk off-road Caterpillar 773E. Menganalisis *Interval General overhaul* (GOH) untuk ketersediaan peralatan.

Metode: Mengumpulkan komponen GOH dan data biaya perbaikan. Analisis karakteristik data kegagalan dan pemeliharaan.

Hasil: Mengoptimalkan waktu *Interval General overhaul* (GOH) Caterpillar 773E. Mengidentifikasi komponen penting yang memengaruhi biaya perawatan

- 2) Penulis: Edilson Machado de Assis, Celso Luiz Santiago Figueirôa Filho, dkk.

Judul: *Machine Learning and q-Weibull Applied to Reliability Analysis in Hydropower Sector*.

Studi Kasus: Sistem PLTA di Brasil, yang dianalisis untuk menentukan pola kegagalan dan meningkatkan akurasi prediksi keandalan peralatan.

Metode: Penelitian ini menggunakan distribusi q-Weibull yang dikombinasikan dengan pendekatan machine learning untuk analisis keandalan komponen pembangkit.

Hasil: Hasil menunjukkan bahwa pendekatan q-Weibull mampu meningkatkan akurasi prediksi keandalan dan mendukung penentuan strategi pemeliharaan berbasis data.

- 3) Penulis: William M. Bassin

Judul: Model *Interval Overhaul Optimal Bayesian* untuk Kasus Proses Restorasi Weibull [*A Bayesian Optimal Overhaul Interval Model for the Weibull Restoration Process Case*]

Studi Kasus:

Metode: Estimasi *Bayesian* dari parameter Weibull untuk interval perbaikan.

Eksperimen simulasi untuk mengevaluasi potensi pengurangan biaya.

Hasil: Model *Bayesian* menghasilkan penghematan biaya sebesar 10-13% dibandingkan Model Naif. Bias dalam estimasi *Bayesian* memengaruhi efisiensi biaya secara signifikan.

- 4) Penulis: A. Singh, B. K. Tiwari

Judul: *Review of Reliability and Availability Evaluation of MPPGCL Sirmour Hydropower Station using Markov Modelling.*

Studi Kasus: PLTA Sirmour, yang dianalisis untuk menentukan tingkat keandalan dan ketersediaan sistem pembangkit.

Metode: Penelitian menggunakan model Markov untuk menganalisis keandalan dan ketersediaan sistem pembangkit listrik tenaga air.

Hasil: Hasil menunjukkan bahwa pendekatan Markov efektif dalam mengevaluasi performa keandalan dan ketersediaan PLTA.

- 5) Penulis: Ilyas Ruchiyat, Endang Prassetyaningsih, Chaznin R.

Judul: Penentuan Interval Waktu Perawatan Mesin Blowing dan Mesin Filling Menggunakan Teori Reliability dan Model Age Replacement (Studi Kasus pada PT. XYZ)

Studi Kasus: Studi kasus pada perawatan lini produksi PT. XYZ.

Fokus pada keandalan mesin Blowing dan Filling.

Metode: Teori Keandalan untuk penentuan interval perawatan mesin. Model Penggantian Usia untuk penjadwalan perawatan preventif.

Hasil: Interval pemeliharaan yang baru mampu meningkatkan keandalan mesin.

Pengurangan downtime meminimalkan kerugian dan biaya produksi.

- 6) Penulis: Muhammad Arizki Zainul Ramadhan, Tedjo Sukmono

Judul: Penentuan Interval Waktu Preventive Maintenance Pada Nail Making Machine Dengan Menggunakan Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) II

Studi Kasus: Studi perawatan mesin pembuat paku PT. Surabaya Wire.

Fokus pada metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) II.

Metode: Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) II

Perhitungan *Failure Modes and Effect Analyze* (FMEA)

Hasil: Interval perawatan: Poros sampling 63jam, poros engkol 81 jam, motor listrik 374jam.

- 7) Penulis: Auditia Yudha Jiwantoro, M. Adha Ilhami, Evi Febianti
Judul: Usulan Strategi Perawatan dengan Mempertimbangkan Reliability Block Diagram Pada Mesin Crane Ship Unloader (Studi Kasus di PT.XYZ)
Studi Kasus: Studi kasus dilakukan di PT.XYZ. Fokus pada keandalan alat pembongkar muatan kapal jenis crane.
Metode: Metode RBD (Reliability Block Diagram) digunakan untuk analisis keandalan sistem. Pemeliharaan preventif diterapkan untuk mencapai keandalan sistem sebesar 85%.
Hasil: Komponen penting diidentifikasi dengan persentase keandalan dan periode pemeliharaan yang diusulkan. Keandalan sistem aktual sebesar 61,91%, diusulkan untuk mencapai 85% dengan pemeliharaan.
- 8) Penulis: Deden Ibnu Sahid, Minto Yuwono
Judul: Implementasi Metode *Life Cycle Cost Analysis* dalam Strategi Perbaikan Blade Cooling Tower di PLTP
Studi Kasus: Blade cooling tower pada PLTP, yang dianalisis untuk menentukan strategi perbaikan dan penggantian komponen paling ekonomis selama umur operasional pembangkit.
Metode: Penelitian ini menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dengan menghitung biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta biaya penggantian komponen selama umur teknis sistem.
Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode LCCA mampu menentukan strategi perbaikan yang paling ekonomis dan efektif, serta menurunkan total biaya siklus hidup komponen cooling tower.
- 9) Penulis: Reza Firdian Mardiansyah, Elisa Kusrini, Faisal RM
Judul: Analisa Ekonomis Peralatan Pulverizer untuk Optimalisasi Keandalan PLTU dengan Simulasi Monte Carlo dan Pendekatan Analisa Biaya Siklus Hidup
Studi Kasus: Peralatan pulverizer PLTU, yang dianalisis untuk menentukan strategi pemeliharaan optimal berdasarkan biaya dan keandalan peralatan.

Metode: Penelitian menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) yang dikombinasikan dengan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi ketidakpastian biaya dan keandalan peralatan.

Hasil: Hasil menunjukkan bahwa pendekatan LCCA mampu mengidentifikasi strategi pemeliharaan yang optimal dan menurunkan biaya siklus hidup peralatan pembangkit.

10) Penulis: Dr. B. Padmapriya, M. Ramanathan

Judul: *Life Cycle Costing & Analysis with Special Reference to Hydropower Projects – A Cost Management Tool for Economic Assessment.*

Studi Kasus: Proyek PLTA, yang dianalisis untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dan efisiensi biaya selama umur teknis pembangkit.

Metode: Penelitian menerapkan *Life Cycle Cost Analysis* untuk menghitung total biaya siklus hidup PLTA, meliputi biaya investasi, operasi, pemeliharaan, dan penggantian.

Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa LCCA merupakan alat yang efektif dalam mengevaluasi kelayakan ekonomi proyek PLTA dan mendukung pengambilan keputusan investasi jangka panjang.

11) Penulis: Epari Ritesh Patro, Teegala Srinivasa Kishore, Ali Torabi Haghighi

Judul: *Levelized Cost of Electricity Generation by Small Hydropower Projects under Clean Development Mechanism in India.*

Studi Kasus: PLTA skala kecil, yang dianalisis untuk menentukan biaya pembangkitan listrik sepanjang umur proyek.

Metode: Penelitian menggunakan *Life Cycle Cost Analysis* untuk menghitung *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) berdasarkan biaya investasi dan operasi selama umur proyek.

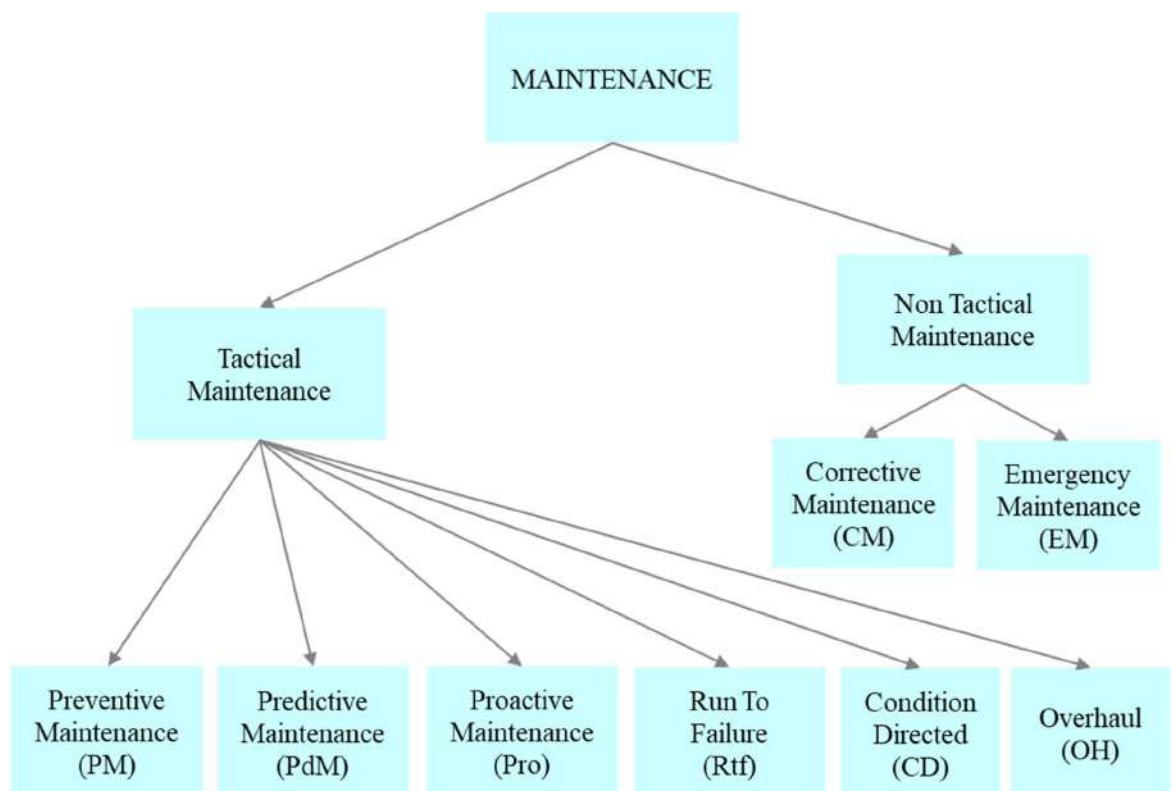
Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTA skala kecil memiliki biaya pembangkitan listrik yang kompetitif dan berpotensi besar sebagai sumber energi berkelanjutan.

Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada aspek keandalan teknis dan peningkatan availability, tanpa mengintegrasikan analisis ekonomi jangka panjang secara komprehensif. Di sisi lain, beberapa studi di bidang *asset management* menunjukkan bahwa keputusan pemeliharaan yang optimal seharusnya tidak hanya

mempertimbangkan aspek reliability, tetapi juga dampaknya terhadap biaya siklus hidup asset (*life cycle cost*). Integrasi antara analisis keandalan dan *life cycle cost analysis* (LCCA) menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa strategi pemeliharaan yang dipilih tidak hanya andal secara teknis, tetapi juga optimal secara ekonomi. Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) dalam penentuan interval major overhaul PLTA yang mengintegrasikan analisis keandalan berbasis reliability $R(t)$ menggunakan distribusi kegagalan (*weibull analysis*), dengan evaluasi ekonomi melalui *life cycle cost analysis* (LCCA).

2.2. Pemeliharaan Pembangkit Listrik

Secara umum tindakan pemeliharaan pembangkit Listrik dapat dibedakan menjadi 2 (dua) yakni tindakan pemeliharaan yang terencana (*tactical maintenance*) dan juga yang tidak terencana (*non tactical maintenance*).



Gambar 1. Jenis-jenis pemeliharaan pembangkit (PT PLN Indonesia Power)

Pemeliharaan taktis (*tactical maintenance*) adalah kegiatan pemeliharaan yang melalui proses perencanaan dan penjadualan berdasarkan Maintenance Strategy (MS)

yang bertujuan mencegah kegagalan dengan intervensi sistematis. Pemeliharaan tidak taktis (*non tactical maintenance*) yaitu pemeliharaan yang tidak terencana yang mencakup *Corrective Maintenance* (CM) dan *Emergency Maintenance* (EM). Identifikasi pekerjaan *Corrective Maintenance* (CM) dimulai dengan pembuatan *Service Request* (SR) oleh operator dan identifikasi pekerjaan *Emergency Maintenance* (EM) dimulai dengan pembuatan *Quick Reporting* (QR).

2.2.1. Preventive Maintenance (PM)

Pemeliharaan atas dasar interval waktu tertentu (*time-based*) baik hari, minggu, bulan, jam operasi yang telah ditetapkan lebih dulu atau kriteria tertentu lainnya, tanpa melakukan shutdown unit pembangkit. Contoh: PM turbin bulanan

2.2.2. Predictive Maintenance (PdM)

Pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based*) menggunakan sensor dan data pengukuran untuk memonitoring kondisi peralatan, mendiagnosa gejala kerusakan peralatan, serta melakukan kajian Failure Analysis secara dini, sehingga tindakan pemeliharaan dilakukan sebelum terjadi kerusakan/kegagalan. Contoh aplikasi: *Infrared Thermography*, *Oil Analysis (Tribologi dan DGA Test)*, *Ultrasonic Analysis*, *Penetrant Test (DT/NDT) Analysis*, *Vibration Analysis*, *Partial Discharge Analysis*.

2.2.3. Proactive Maintenance (Pro)

Pemeliharaan berdasarkan identifikasi akar masalah kegagalan untuk mencegah kejadian berulang. Mengatasi akar penyebab kegagalan peralatan melalui tindakan modifikasi atau penggantian peralatan yang bersifat mengembalikan atau menambah kemampuan & keandalan. Inisiasi oleh System Owner. Contoh: Analisis root cause korosi pada sudu turbin, lalu modifikasi jenis material.

2.2.4. Run To Failure (rtf)

Pemeliharaan dengan metode membiarkan peralatan beroperasi hingga rusak, jika biaya perbaikan lebih murah daripada pemeliharaan rutin. Diberlakukan pada peralatan yang tidak kritis (mengikuti panduan manajemen asset reliability), sehingga peralatan tersebut dibiarkan mengalami kerusakan dan dilakukan penggantian baru. Inisiasi oleh bidang Operasi (SR). Contoh: Lampu indikator panel kontrol yang tidak kritis.

2.2.5. *Condition Directed (CD)*

Pemeliharaan saat parameter melebihi ambang batas. Dilakukan pada peralatan yang memiliki tendensi/indikasi mengalami kegagalan (belum terjadi kegagalan fungsi/kerusakan sebagian). Contoh: Penggantian seal turbin jika terjadi kebocoran.

2.2.6. *Periodic Maintenance (Overhaul)*

Pemeliharaan komprehensif pada interval tetap (minor/medium/major), dilakukan atas dasar interval waktu tertentu sesuai dengan manual pemeliharaan peralatan utama bertujuan untuk mengurangi kemungkinan dari suatu item peralatan mengalami kondisi yang tidak diinginkan. Pemeliharaan Periodik (Overhaul) adalah proses pemeliharaan di mana peralatan atau mesin dibongkar sepenuhnya untuk diperiksa, diperbaiki, dan dikembalikan ke kondisi seperti baru guna memperpanjang masa operasional dan meningkatkan efisiensi (Mobley, 2002).

2.2.7. *Corrective Maintenance*

Perbaikan kerusakan peralatan yang dilakukan tidak terjadwal. Merupakan tindakan pemeliharaan yang dilakukan untuk memperbaiki peralatan setelah terjadi kerusakan atau kegagalan fungsi (Smith dan Hawkins, 2004). Pemeliharaan korektif melibatkan perbaikan atau penggantian komponen setelah terjadi kegagalan untuk mengembalikan sistem ke kondisi operasionalnya (Mobley, 2002). Contoh: Kegagalan sistem control turbin akibat abnormal pada PLC (*Programmable Logic Controller*).

2.2.8. *Emergency Maintenance*

Tindakan pemeliharaan yang harus segera dilakukan untuk mengatasi kegagalan atau kerusakan pada peralatan yang mengancam keselamatan, kesehatan, atau operasional system (Mobley, 2002). Pemeliharaan Emergency harus dilaksanakan paling lambat dalam waktu 1x24 jam, setelah adanya laporan gangguan yang bersifat emergency dari Operator untuk selanjutnya dilakukan penanganan gangguan oleh bidang pemeliharaan. Contoh: Perbaikan bendungan bocor yang mengancam operasi pembangkit.

2.3. Faktor Penentu Interval Overhaul

Penentuan interval overhaul pada pembangkit listrik, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), merupakan proses penting yang mempengaruhi keandalan, efisiensi operasional, serta biaya pemeliharaan jangka panjang. Interval overhaul yang terlalu

sering dapat menyebabkan pemborosan sumber daya dan biaya, sementara interval yang terlalu jarang dapat meningkatkan risiko kerusakan besar dan penurunan performa unit. Oleh karena itu, penjadwalan overhaul perlu mempertimbangkan berbagai faktor yang saling berkaitan, baik dari sisi teknis, operasional, maupun lingkungan. Pemahaman menyeluruh terhadap faktor-faktor ini sangat penting untuk mengoptimalkan jadwal pemeliharaan, meminimalkan *downtime*, dan memaksimalkan keandalan sistem.

2.3.1. Faktor Teknis

Faktor teknis berkaitan dengan kondisi fisik dan kinerja peralatan pembangkit. Beberapa aspek kritis yang perlu dipertimbangkan meliputi:

(a) Rekomendasi Pabrikan (OEM)

Panduan dari *Original Equipment Manufacturer* (OEM) menjadi acuan dasar interval overhaul, seperti siklus 50.000–60.000 jam operasi untuk turbin besar. Contoh: Rekomendasi Siemens untuk overhaul turbin setiap 8 tahun atau 48.000 jam.

(b) Usia Peralatan

Seiring bertambahnya usia peralatan, risiko keausan, degradasi material, dan penurunan performa semakin tinggi. Peralatan yang telah berumur tua cenderung membutuhkan frekuensi overhaul yang lebih sering untuk menjaga keandalannya. Studi Kasus: Turbine berusia 15 tahun di PLTA Mrica menunjukkan peningkatan laju kerusakan bantalan sebesar 20%.

(c) Riwayat Kerusakan / Gangguan Unit

Catatan historis mengenai kerusakan atau gangguan unit menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kesehatan asset (*asset wellness*). Riwayat gangguan berulang atau signifikan dapat mempercepat kebutuhan overhaul untuk mencegah kerusakan yang lebih parah. Sebagai contoh frekuensi kerusakan seal turbin MIV dapat menjadi referensi penyesuaian interval overhaul. Tools: *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk identifikasi pola kegagalan.

(d) Usia Kritisal Part

Beberapa komponen kritis, seperti runner turbin, bearing turbin, bearing generator, dan sistem kontrol, memiliki siklus hidup terbatas. Interval overhaul dapat

ditentukan berdasarkan usia atau jam kerja pada part-part kritis ini. Strategi: Penggantian preemptif berdasarkan *Mean Time Between Failures* (MTBF).

(e) *Condition Monitoring* (Vibrasi, Suhu, NDT dll.)

Pemantauan kondisi secara real-time menggunakan parameter Teknik pengukuran seperti: *vibration analysis, thermography, tribology oil, Non-Destructive Testing/NDT*, dapat memberikan data yang akurat mengenai kondisi aktual peralatan. Pendekatan ini mendukung strategi *condition-based maintenance* (CBM), sehingga overhaul dilakukan ketika benar-benar dibutuhkan. Contoh: Peningkatan vibrasi > 7 mm/s pada bearing turbin menjadi indikator overhaul.

(f) Keandalan Unit (Reliability)

Indikator keandalan seperti *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Reliability Block Diagram* (RBD) dapat digunakan untuk menghitung serta mengevaluasi probabilitas operasi tanpa kegagalan.. Penurunan keandalan menjadi sinyal bahwa interval overhaul perlu diperpendek untuk mencegah kerusakan yang lebih besar.

2.3.2. Faktor Operasional

Kondisi operasi dari unit pembangkit juga sangat mempengaruhi umur pakai dan penjadwalan overhaul, di antaranya:

(a) Pola Operasi (*Peak Load, Intermediate Load, Base Load*)

Unit yang dioperasikan dengan pola beban puncak (peak load) cenderung mengalami frekuensi start-stop yang tinggi, yang mempercepat keausan komponen seperti seal-seal turbin. Sebaliknya, unit base load umumnya memiliki operasi yang lebih stabil, sehingga interval frekuensi start-stop cenderung rendah namun mempercepat keausan pada beberapa part seperti bearing.

(b) Jam Operasi / *Running Hour*

Total jam operasi atau *running hour* menjadi salah satu parameter utama dalam penjadwalan overhaul berbasis waktu. Semakin lama suatu unit beroperasi secara terus menerus, semakin besar kebutuhan untuk dilakukan overhaul. Saat ini PT PLN Indonesia Power menggunakan dasar *running hour* sebagai acuan untuk pengelolaan interval overhaul pembangkit.

(c) Frekuensi Start-Stop

Setiap proses start dan stop unit menimbulkan tekanan termal dan mekanis yang tinggi, terutama pada komponen seperti turbin dan sistem kontrol. Oleh karena itu,

unit dengan frekuensi *start-stop* tinggi memerlukan interval overhaul yang lebih pendek.

2.4. *Mean Time to Repair (MTTR)*

MTTR mengukur rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu peralatan setelah terjadi kegagalan. Metrik ini mencerminkan efisiensi pemeliharaan. dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTTR = \frac{\text{Total Waktu Perbaikan}}{\text{Juml Kegagalan}} \quad (1)$$

2.5. *Mean Time to failure (MTTF)*

MTTF mengukur rata-rata waktu operasi sebelum suatu komponen atau peralatan mengalami kegagalan pertama kali. Biasanya digunakan untuk komponen yang tidak diperbaiki dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTTF = \frac{\text{Total Waktu Operasi sebelumm Kegagalan}}{\text{Jumla Unit yang gagal}} \quad (2)$$

2.6. *Mean Time Between Failure (MTBF)*

Mean Time Between Failure adalah istilah yang digunakan dalam penghitungan keandalan yang mengacu pada waktu suatu perangkat atau asset atau peralatan yang diukur dari saat perangkat tersebut digunakan hingga saat perangkat tersebut rusak. Semakin tinggi MTBF, perangkat tersebut cenderung semakin andal. MTBF adalah kebalikan dari tingkat kegagalan, yang mewakili waktu rata-rata yang diperlukan agar kegagalan terjadi. Perlu dicatat bahwa MTBF ini tidak menunjukkan durasi kegagalan total. MTBF ini merupakan nilai rata-rata waktu pengoperasian antar kegagalan. Dengan kata lain, waktu antar kegagalan bisa lebih kecil atau lebih besar dari nilai MTBF ini. Untuk menghitung MTBF dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTBF = \frac{\text{Total Waktu Operasi (uptime)}}{\text{Jumlah Kegagalan}} \quad (3)$$

2.7. *Laju Kegagalan (Failure Rate)*

Laju kegagalan adalah jumlah kegagalan dalam suatu selang waktu. Laju kegagalan (λ) adalah nilai laju kegagalan yang dapat dinyatakan sebagai perbandingan waktu kegagalan yang terjadi dengan waktu total saat operasi dari suatu peralatan (O'Connor,

1987). Nilai laju kegagalan untuk sebuah sistem yang memiliki laju kegagalan konstan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini (O'Connor, 1987):

$$\lambda = \frac{f}{T} = \frac{1}{MTBF} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

Dimana:

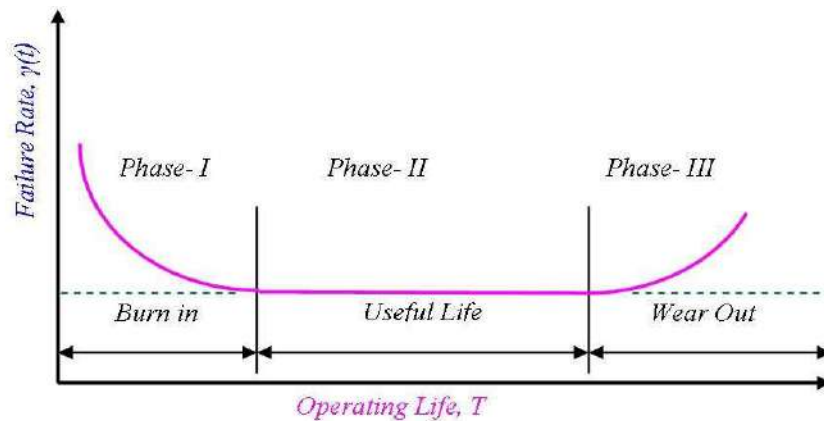
λ =laju kegagalan (*failure rate*)

f = banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

T = total waktu operasi

2.8. Karakteristik Kegagalan

Kurva tingkat kegagalan menunjukkan karakteristik laju kegagalan peralatan sebagai fungsi waktu. Pada kurva laju kegagalan (Gambar 2), terdapat tiga tahap kegagalan: kegagalan awal, kegagalan normal (masa manfaat), dan kegagalan akhir (keausan). Tahap kegagalan awal ditandai dengan laju kegagalan yang tinggi akibat kesalahan dalam proses produksi atau pengendalian kualitas. Interval normal menunjukkan tingkat kegagalan yang rendah dan konsisten selama periode waktu tertentu. Tahap lanjutan merupakan tahap dimana laju kegagalan produk kembali tinggi akibat keausan peralatan akibat penggunaan.



Gambar 2. Kurva Laju Kegagalan (O'Connor & Kleyner, 2011)

2.8.1. Burn In / Infant mortality

Daerah ini adalah periode dimana sebuah sistem berada pada fase perancangan (*design*) hingga permulaan beroperasinya suatu peralatan atau sistem yang masih baru. Pada kurva ditunjukkan bahwa laju kerusakan yang awalnya tinggi kemudian menurun

dengan bertambahnya waktu, atau diistilahkan sebagai *decreasing failure rate* (DFR). Kerusakan yang terjadi umumnya disebabkan karena proses manufacturing atau fabrikasi yang kurang sempurna.

2.8.2. Useful Life Time Zone

Periode ini mempunyai laju kerusakan yang paling rendah dan hampir konstan, yang oleh sebab itu disebut *Constant Failure Rate* (CFR). Kerusakan yang terjadi bersifat random dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Ini adalah periode dimana sebagian besar umur berada pada masa pakai peralatan atau sistem itu. Dalam analisa, tingkat keandalan sistem yang berada pada periode *useful life time*, akan diasumsikan memiliki *failure rate konstan* terhadap waktu. Asumsi ini digunakan karena pada periode *early life time*, tidak dapat ditentukan apakah sistem tersebut sudah bekerja sesuai dengan standar yang ditentukan atau belum sedangkan pada periode *wear out time*, tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi *failure*.

2.8.3. Wear Out Zone

Periode ini adalah periode akhir masa pakai peralatan atau sistem. Pada periode ini, laju kerusakannya naik dengan cepat dengan bertambahnya waktu, yang disebut dengan istilah *increasing failure rate* (IFR). Periode ini berakhir saat *reliability* peralatan atau sistem ini mendekati nol, dimana kerusakan yang terjadi sudah sangat parah dan tidak dapat diperbaiki kembali.

2.9. Distribusi Weibull (*Weibull Analysis*)

Distribusi Weibull merupakan salah satu metode statistik yang paling luas digunakan dalam *reliability engineering* untuk memodelkan distribusi waktu kegagalan (*time to failure*) suatu komponen atau sistem. Distribusi ini bersifat fleksibel karena mampu merepresentasikan berbagai pola kegagalan, baik kegagalan awal (*infant mortality*), kegagalan acak (*random failure*), maupun kegagalan akibat keausan (*wear-out failure*), melalui pengaturan nilai parameternya (Billinton & Allan, 1996; ReliaSoft, 2015).

Distribusi Weibull umumnya dinyatakan dengan dua parameter utama, yaitu *shape parameter* (β) dan *scale parameter* (η) (Pham, 2003).

Nilai parameter β (beta) menunjukkan karakteristik pola kegagalan sebagai berikut:

- $\beta < 1$: *Infant mortality failure* (kegagalan awal)
- $\beta = 1$: *Random failure* (laju kegagalan konstan / distribusi eksponensial)
- $\beta > 1$: *Wear-out failure* (kegagalan akibat keausan)

(Nelson, 2004; ReliaSoft, 2015)

Parameter η (eta) sebagai *scale parameter* atau *characteristic life* menyatakan waktu di mana sekitar 63,2% populasi komponen diperkirakan telah mengalami kegagalan (Billinton & Allan, 1996). Data yang digunakan dalam analisis Weibull berupa pasangan *time to failure*, yang dapat mencakup data kegagalan aktual maupun data tersensor (*censored data*) dari riwayat pemeliharaan dan perbaikan (Pham, 2003). Jika waktu kegagalan suatu komponen mengikuti distribusi Weibull, maka fungsi kepadatan peluangnya dirumuskan sebagai berikut (Nelson, 2004; ReliaSoft, 2015):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (5)$$

dengan:

- β : shape parameter, $\beta > 0$
- η : scale parameter, $\eta > 0$

Fungsi distribusi kumulatif Weibull menyatakan probabilitas suatu komponen mengalami kegagalan sebelum waktu (t) tertentu, yang dinyatakan sebagai (Billinton & Allan, 1996):

$$f(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad (6)$$

Fungsi keandalan (*reliability function*) menyatakan probabilitas bahwa suatu komponen atau sistem masih berfungsi hingga waktu t . Untuk distribusi Weibull, fungsi keandalan dirumuskan sebagai (Pham, 2003; ReliaSoft, 2015):

$$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right] \quad (7)$$

Fungsi laju kegagalan (*hazard rate*) menyatakan laju kegagalan instan pada waktu t , dengan asumsi komponen masih beroperasi hingga waktu tersebut. Untuk distribusi Weibull, laju kegagalan dinyatakan sebagai (Nelson, 2004):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

Nilai *Mean Time Between Failure (MTBF)* pada distribusi Weibull dihitung menggunakan fungsi Gamma sebagai berikut (Billinton & Allan, 1996; Pham, 2003):

$$MTBF = \eta \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (9)$$

2.10. Reliability

Fungsi keandalan atau *reliability function* $R(t)$ merupakan salah satu konsep fundamental dalam *reliability engineering*. Secara umum, fungsi keandalan $R(t)$ didefinisikan sebagai probabilitas bahwa waktu kegagalan T lebih besar dari waktu operasi t , yang dinyatakan sebagai (Billinton & Allan, 1996):

$$R(t) = \Pr(T > t) \quad (10)$$

di mana T adalah variabel acak yang merepresentasikan waktu kegagalan (*time-to-failure*) atau waktu hingga terjadinya kegagalan. Fungsi keandalan memiliki sifat monoton menurun, artinya nilai $R(t)$ tidak pernah meningkat terhadap waktu, melainkan hanya tetap atau menurun seiring bertambahnya usia operasi. Hubungan antara fungsi keandalan $R(t)$, fungsi distribusi kegagalan $F(t)$, dan fungsi laju kegagalan $\lambda(t)$ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R(t) = 1 - f(t) \quad (11)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (12)$$

Dalam praktik keandalan pembangkit listrik, salah satu distribusi yang paling sering digunakan adalah distribusi Weibull. Pada distribusi ini, fungsi keandalan dituliskan sebagai berikut (Pham, 2003):

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right], t > 0 \quad (13)$$

Secara teoritis, batas nilai keandalan $R(t)$ adalah $0 \leq R(t) \leq 1$. Nilai $R(t) = 1$ menunjukkan kondisi sistem sepenuhnya andal (belum mengalami kegagalan), sementara $R(t) = 0$ menunjukkan bahwa sistem dipastikan gagal pada waktu tertentu. Namun dalam

konteks pembangkit listrik, reliabilitas tidak pernah mencapai 100% karena adanya faktor penuaan peralatan, variasi beban operasi, serta pengaruh lingkungan.

Secara umum, industri ketenagalistrikan menetapkan target keandalan yang relatif tinggi untuk operasi normal pembangkit, biasanya berada pada kisaran di atas 0,90, guna menjamin kontinuitas pasokan energi listrik dan menjaga stabilitas sistem tenaga. Namun demikian, nilai keandalan yang digunakan sebagai ambang batas perencanaan pemeliharaan (*planning threshold*) tidak selalu identik dengan target operasi harian. Dalam konteks ini, nilai reliability pada level tertentu dimanfaatkan sebagai indikator bahwa sistem telah mendekati akhir umur andalnya (*useful life*) dan memerlukan intervensi strategis (Pham, 2003).

Tabel 3. Interpretasi praktis dari nilai $R(t)$ dalam konteks pembangkit listrik

Nilai $R(t)$	Tingkat Keandalan	Interpretasi	Aplikasi di Powerplant
$\geq 0,95 - 1,00$	Baik (Good)	Kondisi sangat andal, operasi normal tanpa intervensi besar	Target operasi jangka panjang sesuai standar industri (misalnya NERC, CEA)
$0,80 - 0,94$	Cukup (Fair)	Masih andal, namun perlu mulai monitoring ketat dan inspeksi rutin	Perlu strategi pemeliharaan preventif agar tidak jatuh ke zona kritis
$0,70 - 0,79$	Rendah (Poor)	Mulai mendekati batas bawah. Rekomendasi untuk persiapan overhaul	Digunakan sebagai threshold perencanaan <i>major overhaul</i> .
$< 0,70$	Sangat Rendah (Unacceptable)	Tidak andal, berisiko tinggi kegagalan; harus dilakukan overhaul segera	Tidak dapat diterima. Berisiko tinggi terhadap sistem

Sejalan dengan hal tersebut, O'Connor dan Kleyner (2011) menyatakan bahwa nilai keandalan $R(t)$ tidak ditetapkan sebagai angka baku yang seragam, melainkan harus ditentukan berdasarkan konsekuensi kegagalan, tingkat risiko yang dapat diterima, serta pertimbangan biaya siklus hidup. Untuk sistem yang bersifat kritikal, target reliability umumnya ditetapkan pada tingkat tinggi, sedangkan untuk sistem pendukung dapat diterapkan nilai ambang yang lebih rendah sepanjang masih berada dalam batas risiko yang dapat diterima. Pada penelitian ini ditetapkan batas minimum nilai reliability $R(t)$

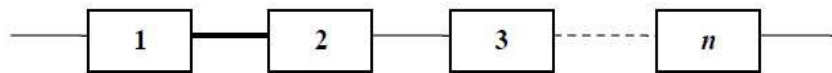
sebesar 0,70 sebagai acuan perencanaan major overhaul terhadap keberlangsungan operasi sistem secara keseluruhan.

2.11. *Reliability Block Diagram*

Reliability Block Diagram digunakan untuk memodelkan hubungan antar komponen dalam menjalankan fungsinya. Terdapat dua struktur umum yang menggambarkan sistem, yaitu struktur seri dan paralel (Ebeling 1997). *Reliability Block Diagram* (RBD) adalah analisis keandalan dan *availability* dari suatu sistem, baik untuk sistem besar dan kompleks yang digambarkan dalam diagram blok untuk menjelaskan hubungan antar sistem (ITEM Software, 2007). *Reliability Block Diagram* (RBD) merupakan salah satu metode *Reliability Analysis* yang menggambarkan hubungan antar sistem, sub-sistem, dan komponen. Dalam *Reliability Block Diagram* (RBD) setiap komponen atau subsistem digambarkan sebagai blok, dan hubungan antara blok ini diwakili oleh penghubung yang menunjukkan bagaimana satu komponen mempengaruhi lainnya. Sistem dapat dianalisis untuk mengevaluasi kemungkinan kegagalan sistem secara keseluruhan berdasarkan kinerja individual komponen.

2.11.1. *Reliability Series System*

Sistem seri dapat melaksanakan fungsinya atau beroperasi jika semua komponen dalam sistem tersebut beroperasi. Jika salah satu komponen mengalami kegagalan, maka secara keseluruhan sistem mengalami kegagalan. Sistem seri dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3. Model Keandalan Sistem Seri

Jika keandalan masing-masing komponen adalah $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$, maka keandalan sistem seri adalah (ebeling, 1997):

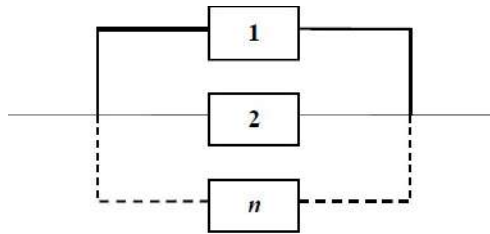
$$R_S = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_N$$

$$R_S = \prod_1^n R_N \quad (14)$$

2.11.2. *Reliability Paralel System*

Susunan paralel jika seluruh komponen yang berada dalam sistem mengalami kerusakan. Artinya jika terdapat dua komponen yang disusun secara paralel akan

mengalami kegagalan jika kedua komponen tersebut mengalami kegagalan. Sistem paralel dapat melaksanakan fungsinya jika minimal satu komponen dari penyusunnya beroperasi. Sistem paralel gagal bila seluruh komponen penyusunnya gagal. Sistem paralel dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4. Model Keandalan Sistem Paralel

Jika keandalan masing-masing komponen adalah $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$, maka keandalan sistem paralel adalah (ebeling, 1997):

$$R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)$$

$$R_p = 1 - \prod_1^n (1 - R_n) \quad (15)$$

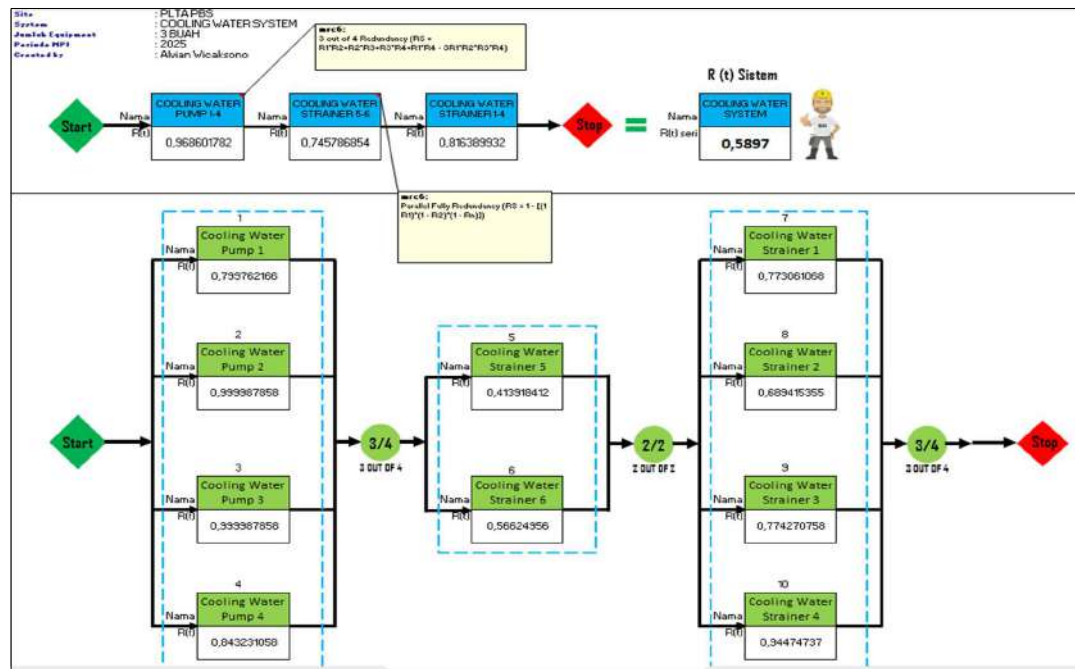
Dimana:

R_s adalah *reliability system*

R_n adalah *reliability* pada urutan ke n

2.11.3. Pemodelan RBD di PLTA

Pemodelan sistem menggunakan *Reliability Block Diagram* (RBD) dilakukan untuk memvisualisasikan hubungan antar asset utama pembangkit dalam rangkaian keandalan. Diagram ini membantu menganalisis seberapa besar peran masing-masing asset terhadap keberlangsungan fungsi sistem secara keseluruhan. Pada sistem pembangkit listrik tenaga air, model RBD digunakan untuk mewakili aliran logika mulai dari *power intake* hingga *generator output*, termasuk sistem kontrol dan peralatan pendukung lainnya. Pemodelan dilakukan berdasarkan data teknis struktur sistem pembangkit yang diperoleh dari dokumen *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID), *Single Line Diagram* (SLD), *Wiring Kontrol System Diagram*, serta hasil survei lapangan. Setiap sistem dimodelkan dalam konfigurasi seri, paralel, maupun gabungan, sesuai dengan karakteristik fungsional komponen.



Gambar 5. Pemodelan RBD System

Dari hasil pemodelan, diperoleh nilai *reliability* ($R(t)$) untuk setiap system dan subsystem. Nilai-nilai ini digunakan untuk:

- Mengidentifikasi titik lemah (*bottleneck*) dalam sistem
- Menentukan unit dengan keandalan tertinggi dan terendah
- Menjadi dasar dalam evaluasi *Maintenance Priority Index* (MPI) dan rekomendasi strategi O&M

Di lingkungan pembangkitan, penerapan RBD dapat dilakukan untuk menganalisis dan meningkatkan keandalan unit pembangkit listrik, termasuk di PLTA.

❖ Analisis Keandalan Unit Pembangkitan

RBD digunakan untuk memodelkan hubungan antara berbagai komponen dalam sistem pembangkit, seperti turbin, generator, boiler, sistem kontrol, dan pompa. Dengan memodelkan sistem menggunakan RBD, kita dapat memahami bagaimana kegagalan satu komponen dapat memengaruhi kinerja keseluruhan unit pembangkit.

❖ Identifikasi Titik Kritis dan Kegagalan

Dengan menganalisis RBD, dapat diidentifikasi komponen atau subsystem yang paling kritis dan rentan terhadap kegagalan. Misalnya, kegagalan turbin atau

generator dapat menyebabkan penghentian operasi pembangkit, sementara kegagalan komponen lain mungkin tidak berdampak langsung.

❖ **Perencanaan Pemeliharaan Berdasarkan Keandalan**

RBD membantu dalam merencanakan pemeliharaan preventif dan prediktif berdasarkan keandalan komponen. Dengan mengetahui titik-titik kritis dalam sistem, pemeliharaan dapat difokuskan pada komponen yang memiliki kemungkinan kegagalan tinggi, untuk mengurangi downtime yang tidak direncanakan.

❖ **Simulasi dan Evaluasi Performa**

RBD memungkinkan simulasi kinerja sistem pembangkit dalam berbagai kondisi, termasuk kegagalan komponen. Hal ini membantu dalam mengevaluasi dan merencanakan perbaikan untuk meningkatkan keandalan unit pembangkit.

2.12. Life Cycle Cost (LCC)

2.12.1. *Fixed Cost Capital*

Fixed Cost Capital merupakan biaya tetap yang berkaitan dengan investasi awal pembangunan pembangkit listrik, jaringan transmisi, dan distribusi. Biaya ini tidak tergantung pada jumlah listrik yang dihasilkan atau dikonsumsi. Adapun komponen utamanya sebagai berikut:

- ❖ *Biaya Investasi Awal*. Termasuk pembangunan infrastruktur pembangkit, pembelian tanah, dan konstruksi fasilitas.
- ❖ *Biaya Depresiasi*. Penyusutan nilai asset selama masa operasionalnya.
- ❖ *Biaya Pembiayaan*. Meliputi bunga dan pembayaran pokok pinjaman

2.12.2. *Fixed Cost O&M*

Fixed Cost Operation & Maintenance merupakan biaya operasional dan pemeliharaan yang tidak bergantung pada jumlah listrik yang dihasilkan. Adapun komponen utamanya sebagai berikut:

- ❖ *Gaji dan Tenaga Kerja*. Biaya untuk staf operasi dan pemeliharaan.
- ❖ *Pemeliharaan Rutin*. Termasuk inspeksi berkala dan penggantian kecil komponen.
- ❖ *Biaya Administrasi*. Manajemen fasilitas, pengawasan, dan dokumentasi.

Fixed Cost Operation & Maintenance bersifat tetap konstan dalam jangka pendek, tetapi dapat meningkat dalam jangka panjang karena inflasi atau kebutuhan pemeliharaan lebih kompleks.

2.12.3. *Net Present Value (NPV)*

Net Present Value (NPV) merupakan metode analisis finansial yang mengukur selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk (benefit) dengan nilai sekarang dari arus kas keluar (cost) selama siklus hidup proyek. Konsep NPV didasarkan pada time value of money yang menyatakan bahwa nilai uang saat ini lebih berharga daripada nilai uang di masa depan akibat adanya inflasi, biaya oportunitas, dan risiko ketidakpastian (Brealey et al., 2020). Dalam konteks penentuan interval overhaul PLTA, NPV digunakan untuk mengevaluasi kelayakan finansial dari berbagai skenario interval overhaul dengan mempertimbangkan biaya pemeliharaan, penghematan biaya downtime, dan peningkatan produktivitas energi.

Rumus NPV:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (16)$$

Dimana:

- CF_t = Arus kas bersih pada periode t
- r = Tingkat diskonto (discount rate)
- n = Umur ekonomis proyek (tahun)
- C_0 = Investasi awal (biaya overhaul)

Interpretasi dan Kriteria Keputusan

- $NPV > 0$: Strategi interval overhaul layak secara finansial karena memberikan nilai tambah ekonomis
- $NPV = 0$: Strategi interval overhaul mencapai titik impas (break-even)
- $NPV < 0$: Strategi interval overhaul tidak layak secara finansial

2.12.4. *Internal Rate of Return (IRR)*

Internal Rate of Return (IRR) didefinisikan sebagai tingkat diskonto yang membuat nilai sekarang dari arus kas masuk sama dengan nilai sekarang dari arus kas keluar, atau

dengan kata lain tingkat diskonto yang menghasilkan $NPV = 0$ (Ross et al., 2019). IRR merepresentasikan tingkat pengembalian efektif dari suatu investasi.

Dalam analisis interval overhaul, IRR digunakan untuk mengukur efisiensi investasi pemeliharaan dan membandingkan dengan minimum acceptable rate of return Perusahaan yang disebut *Weighted Average Cost of Capital* (WACC).

IRR merupakan nilai r yang memenuhi persamaan:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (17)$$

Interpretasi dan Kriteria Keputusan

- $IRR > WACC$: Investasi overhaul layak dilakukan
- $IRR = WACC$: Investasi overhaul mencapai titik impas
- $IRR < WACC$: Investasi overhaul tidak layak dilakukan

2.12.5. *Benefit Cost Ratio (BCR)*

Benefit-Cost Ratio (BCR) merupakan rasio yang membandingkan nilai sekarang dari manfaat (benefit) terhadap nilai sekarang dari biaya (cost) suatu proyek. Metode ini banyak digunakan dalam evaluasi proyek publik dan investasi infrastruktur (Boardman et al., 2018). Dalam konteks overhaul PLTA, BCR mengkuantifikasi efisiensi alokasi anggaran pemeliharaan dengan mempertimbangkan benefit tidak langsung seperti peningkatan keandalan sistem dan penurunan risiko kegagalan.

Rumus BCR:

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (18)$$

Dimana:

- B_t = Benefit pada periode t
- C_t = Cost pada periode t
- r = Tingkat diskonto
- n = Umur analisis

Interpretasi dan Kriteria Keputusan

- $BCR > 1$: Manfaat melebihi biaya, proyek layak
- $BCR = 1$: Manfaat sama dengan biaya, titik impas
- $BCR < 1$: Biaya melebihi manfaat, proyek tidak layak

2.12.6. *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

Life Cycle Cost Analysis (LCCA) adalah pendekatan sistematis untuk mengevaluasi total biaya suatu proyek, asset, atau produk sepanjang siklus hidupnya. Metode ini mempertimbangkan semua biaya yang terkait dengan pengadaan, operasi, pemeliharaan, dan pembuangan, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang dampak finansial jangka panjang dari keputusan tertentu. LCCA digunakan untuk memilih opsi yang paling hemat biaya di antara beberapa alternatif dengan mempertimbangkan biaya selama siklus hidup suatu asset, bukan hanya biaya awalnya.

Berikut komponen biaya pada *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA):

- (i) *Biaya Awal (Initial Costs)*
- (ii) *Biaya Operasi (Operating Costs)*
- (iii) *Biaya Pemeliharaan (Maintenance Costs)*
- (iv) *Biaya Tidak Langsung*. (biaya downtime atau gangguan operasi)
- (v) *Biaya Eksternal*.
- (vi) *Biaya Residual*. Nilai sisa (salvage value).

Rumus LCCA:

$$LCCA = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (19)$$

dimana:

- C_t : Biaya total pada tahun t , meliputi: biaya investasi awal, biaya operasional & pemeliharaan (o&m), serta biaya akhir masa pakai
- r : Tingkat diskonto (discount rate)
- n : Umur proyek atau siklus hidup asset (dalam tahun)
- t : Tahun ke- t dalam analisis

2.12.7. *The Levelized Cost of Electricity (LCOE)*

Levelized Cost of Electricity (LCOE) adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi biaya total produksi energi listrik dibagi dengan total energi yang dihasilkan (rupiah/MWh) selama umur operasional sebuah pembangkit listrik. *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) digunakan untuk membandingkan biaya antar jenis pembangkit listrik yang berbeda (fosil, nuklir, atau energi terbarukan) dalam jangka panjang dengan mempertimbangkan faktor teknis dan finansial. LCOE mencerminkan biaya total proyek, termasuk investasi awal, operasi, dan perawatan, dibandingkan dengan total energi yang dapat dihasilkan selama umur pembangkit.

Berikut komponen utama biaya *Levelized Cost of Electricity (LCOE)*:

- (i) *Biaya Investasi Awal (Capital Expenditure/CapEx)*
- (ii) *Biaya Operasional dan Pemeliharaan (Operational and Maintenance/O&M)*
- (iii) *Biaya Bahan Bakar*
- (iv) *Faktor Kapasitas (Capacity Factor)*
- (v) *Tingkat Diskonto (Discount Rate)*

Rumus LCOE:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (20)$$

dimana:

- C_t : Biaya total pada tahun ke- t (termasuk investasi awal, operasi, pemeliharaan, bahan bakar, dan dekomisioning)
- E_t : Energi yang dihasilkan pada tahun ke- t (biasanya dalam kWh atau MWh)
- r : Diskonto (discount rate) atau tingkat pengembalian modal.
- n : Umur ekonomis pembangkit listrik (biasanya dalam tahun)

2.13. Gambaran Umum Proses Overhaul PLTA

Proses overhaul merupakan pemeliharaan besar untuk memastikan PLTA dapat beroperasi secara optimal dan andal. Kegiatan overhaul melibatkan aktivitas berupa pembongkaran, inspeksi, pengukuran/pengujian, pemeliharaan, serta perbaikan atau penggantian komponen utama pada asset pembangkit. Tujuan utama overhaul adalah mengembalikan unit ke performansi awal, mengurangi *maintenance cost* rutin, mengurangi unit *breakdown*, menaikkan keandalan dan ketersediaan, serta menjamin keamanan peralatan saat dioperasikan (Obiajunwa, 2012). Lima kunci sukses yang diterapkan oleh PT PLN Indonesia Power yaitu 5-ON:

- (i) *On Safety*. Fokus pada keselamatan kerja selama proyek berlangsung. Menjamin keamanan bagi pekerja, lingkungan, dan masyarakat sekitar proyek.
- (ii) *On Scope*. Mengacu pada cakupan proyek yang harus dicapai sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Mencegah scope creep (penambahan ruang lingkup tanpa perencanaan).
- (iii) *On Quality*. Berfokus pada kualitas hasil proyek yang sesuai dengan standar atau spesifikasi. Memberikan hasil proyek yang memenuhi atau melampaui ekspektasi. Meminimalkan kegagalan dalam pelaksanaan dan hasil proyek.
- (iv) *On Cost*. Mengacu pada pengelolaan biaya proyek agar tetap sesuai dengan anggaran yang telah disetujui. Mencegah pemborosan atau biaya tambahan yang tidak direncanakan. Mengoptimalkan penggunaan sumber daya untuk efisiensi biaya.
- (v) *On Time*. Fokus pada penyelesaian proyek tepat waktu sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan. Menghindari keterlambatan yang dapat meningkatkan biaya atau mengurangi kepuasan stakeholder. Memastikan selesai sesuai milestone.

2.13.1. Jenis-Jenis Overhaul PLTA

Pada PLTA terdapat tiga jenis overhaul (*inspection*) sesuai dengan tata Kelola proses bisnis manajemen pembangkitan PT PLN Indonesia Power, diantaranya yaitu:

1. *Annually Inspection* (AI)

Annual Inspection adalah inspeksi rutin yang dilakukan setiap tahun untuk memastikan kondisi operasional peralatan pembangkit listrik tetap dalam keadaan baik. Tujuan Annual Inspection yaitu mengidentifikasi kerusakan kecil atau potensi kerusakan dan memastikan keandalan, serta keselamatan operasi. Adapun kegiatan

umum pada Annual Inspection yaitu pengecekan visual pada komponen utama (generator, turbin, transformator, dll.), pengukuran dan analisis parameter operasional seperti suhu, getaran, dan kebisingan; dan pelumasan ulang serta penggantian part-part kecil jika diperlukan.

2. *General Inspection (GI)*

General Inspection adalah inspeksi yang lebih mendalam dibandingkan Annual Inspection dan biasanya dilakukan dalam interval beberapa tahun sekali (3-5 tahun). Tujuan *General Inspection* yaitu memastikan komponen dalam kondisi baik dengan analisis yang lebih detail dan mencakup bagian internal peralatan. Adapun kegiatan umum pada General Inspection yaitu membongkar sebagian komponen penting untuk inspeksi lebih menyeluruh, melakukan pengujian non-destruktif (Non-Destructive Testing/NDT) pada bagian yang kritis, serta pembersihan dan penggantian komponen yang aus, termasuk pengecekan kelistrikan dan mekanis yang lebih komprehensif.

3. *Major Inspection (MI)*

Major Inspection atau dikenal juga sebagai *Overhaul* adalah inspeksi besar yang mencakup pembongkaran total komponen utama pembangkit untuk perawatan menyeluruh dan penggantian komponen besar jika diperlukan. Tujuan Major Inspection yaitu mengembalikan performa mesin mendekati kondisi aslinya, dan mengurangi risiko kegagalan total pada peralatan yang beroperasi. Adapun kegiatan umum pada *Major Inspection* yaitu membongkar semua komponen utama (turbin, generator, governor, dll.), Mengganti atau memperbaiki komponen utama seperti baling-baling turbin, bantalan (bearing), atau kumparan generator; serta Pengujian pasca-perbaikan untuk memastikan seluruh sistem bekerja optimal.

2.13.2. **Framework Outage Pembangkit Listrik**

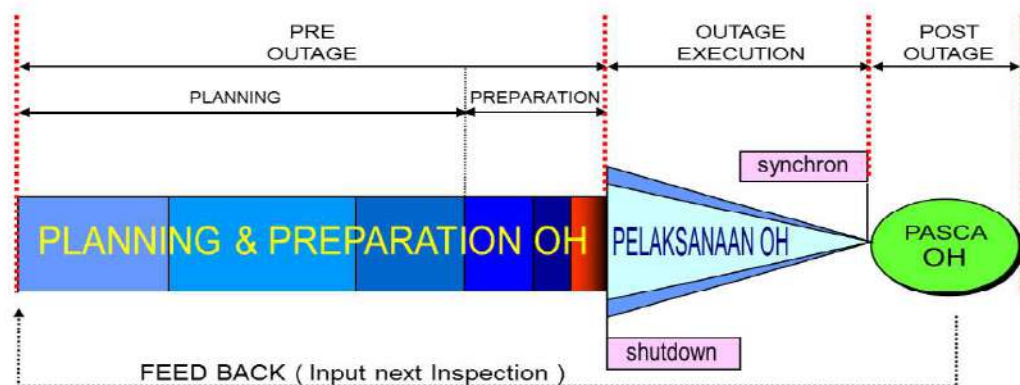
Proyek pemeliharaan pembangkit *Overhaul* atau *Outage Management* adalah suatu proyek yang berisi aktifitas pemeliharaan menyeluruh terhadap peralatan pembangkit listrik bertujuan untuk mengembalikan pembangkit listrik pada kondisi semula. Didalam pelaksanaan proyek pemeliharaan pembangkit listrik di PT. PLN Indonesia Power menggunakan sistem yang bernama *Framework Outage Management*. *Framework Outage Management* merupakan penggabungan proses perencanaan, persiapan, pelaksanaan, pengendalian, monitoring, evaluasi dan rencana tindak lanjut pada suatu project. *Framework Outage Management* mengakomodir seluruh pekerjaan project

outage, seperti: lingkup pekerjaan (*scope of work*), penjadwalan (*project schedule*), task eksekusi (*work package*), kebutuhan sumber daya (*resources*), identifikasi risiko (*risk identification & contingency*), standar kualitas (*quality control & quality assurance*); sasaran hasil pekerjaan (*expectation sheet*), anggaran dan biaya (*cost control*), metode/standar prosedur (SOP/IK); pelaksanaan overhaul (*execution*); dan pelaporan hasil overhaul (*project reporting*), dan evaluasi hasil overhaul (*evaluation*).

Tujuan *Outage Management* adalah mengoptimalkan overhaul dengan menerapkan kaidah – kaidah sebagai berikut:

- *Right Problem*. Permasalahan/problem unit diidentifikasi dengan benar dan tujuan yang jelas.
- *Right Solution*. Penentuan penanganan permasalahan dilakukan untuk memperoleh solusi yg tepat
- *Right Design* Penjadwalan / *scheduling*, metode dan cara kerja dibuat secara lengkap dan jelas.
- *Right Implementation*. Pelaksana OH bekerja sesuai metode dan cara kerja yang baku serta berdasarkan *Schedule* yang telah dibuat dan anggarannya.

Frame Work Outage Management dapat digambarkan seperti pada skema berikut:



Gambar 6. Framework Outage Management PT. PLN Indonesia Power

Seperti terlihat pada skema, Framework Outage Management terbagi menjadi tiga tahapan besar, yaitu:

a. *Pre-Outage*

Tahap *Pre-Outage* meliputi kegiatan Perencanaan (R) dan Persiapan (P) Overhaul.

1. Tahapan Perencanaan (R) meliputi kegiatan koordinasi dan meeting, dan dibagi menjadi:

Meeting R1: Meeting perencanaan 18 bulan sebelum pelaksanaan Overhaul

Meeting R2: Meeting perencanaan 12 bulan sebelum pelaksanaan Overhaul

Meeting R3: Meeting perencanaan 6 bulan sebelum pelaksanaan Overhaul

2. Tahapan Persiapan (P) meliputi kegiatan koordinasi dan meeting, dan dibagi menjadi:

Meeting P1: Meeting persiapan 3 bulan sebelum pelaksanaan Overhaul

Meeting P2: Meeting persiapan 1 bulan sebelum pelaksanaan Overhaul

Meeting P3: Meeting persiapan 1 minggu sebelum pelaksanaan Overhaul

b. Outage Execution

Tahapan *Outage Execution* adalah tahapan pelaksanaan Overhaul, meliputi:

1. Tahapan Shutdown
2. Tahapan Dissassembly
3. Tahapan Inspection
4. Tahapan Assembly
5. Tahapan Individual Test & Interlock
6. Tahapan Start Up and Synchron
7. Tahapan Performance Test Post Overhaul

c. Post Outage

Tahapan Post Outage adalah tahapan evaluasi hasil pelaksanaan Overhaul, meliputi:

1. Meeting presentasi dan laporan pelaksanaan overhaul, dilaksanakan 1 minggu setelah synchron
2. Meeting evaluasi dan rekomendasi pelaksanaan overhaul, dilaksanakan 4 minggu setelah synchron
3. Meeting rencana tindak lanjut untuk overhaul berikutnya, dilaksanakan 6 minggu setelah synchron