

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Özcan, E., *A novel approach to optimize the maintenance strategies: a case in the hydroelectric* (2021), Penelitian ini mengembangkan pendekatan sistematis untuk mengoptimalkan strategi pemeliharaan di pembangkit hidro skala besar dengan mempertimbangkan prioritas komponen kritis, analisis biaya manfaat, dan efek pada ketersediaan pembangkit. Metodologi menekankan pemadanan antara *criticality assessment* dan penjadwalan pemeliharaan untuk memaksimalkan *availability* sambil menekan biaya total pemeliharaan. Keterkaitan konsep alokasi sumber daya berdasarkan *criticality* dan analisis biaya manfaat yang dipaparkan dapat langsung diadaptasi untuk menentukan prioritas pemeliharaan komponen *water cooling* (mis. pompa utama, *Heat Exchanger, Valve*) di PLTA Tulungagung guna meningkatkan MTBF dan ketersediaan sistem.
2. Martinez Monseco, F.J. dkk. *Analysis of maintenance optimization in a hydroelectric power plant* (2020), Artikel ini menyajikan panduan Langkah per langkah untuk merancang rencana pemeliharaan pada instalasi hidro, termasuk penggunaan data kegagalan historis, FMEA/RCA, serta skenario optimasi jadwal inspeksi dan *overhaul*. Contoh aplikasinya menunjukkan peningkatan keandalan ketika perencanaan pemeliharaan dibuat berdasarkan analisis risiko dan kinerja nyata peralatan. Keterkaitan metode perancangan rencana pemeliharaan yang berbasis data dan FMEA di artikel ini menjadi landasan metodologis yang relevan untuk analisis kondisi eksisting dan perumusan strategi optimasi pemeliharaan *water cooling* di penelitian.
3. *Application of Machine Learning for Predictive Maintenance Cooling System in Nam Ngum-1 Hydropower Plant* (kasus studi, 2018), Studi kasus ini mengimplementasikan

teknik *machine learning* untuk *predictive maintenance* pada sistem pendingin generator *hidropower* (analisis getaran, suhu, dan parameter operasi) dan menunjukkan bahwa model prediktif mampu mendeteksi anomali lebih awal dibandingkan jadwal *preventive* konvensional. Penerapan tanpa ketergantungan penuh pada SCADA di beberapa versi menyorot fleksibilitas solusi berbasis ML untuk kondisi lapangan terbatas. Keterkaitan hasil studi ini mendukung penerapan *predictive maintenance* berbasis sensor/ML pada water cooling PLTA Tulungagung sebagai strategi untuk memperpanjang interval kegagalan dan menurunkan MTTR, khususnya bila data SCADA lengkap belum tersedia.

4. Taufik, A. *Evaluasi Kinerja Pemeliharaan PLTA dengan Pendekatan Maintenance Scorecard dan Objective Matrix (OMAX)* (Studi Kasus PLTA Maninjau (Indonesia)), Penelitian lokal ini mengevaluasi kinerja pemeliharaan PLTA menggunakan indikator terukur (*maintenance scorecard*) dan OMAX untuk menentukan prioritas perbaikan manajemen pemeliharaan. Temuan menunjukkan bahwa pengukuran kinerja yang terstruktur membantu mengidentifikasi kelemahan dalam perencanaan pemeliharaan dan meningkatkan efektivitas tindakan pemeliharaan. Keterkaitan pendekatan *scorecard*/OMAX dapat diadopsi untuk mengevaluasi efektivitas pemeliharaan *water cooling* di Tulungagung untuk memonitor MTBF, MTTR, frekuensi gangguan filter/pompa sehingga rekomendasi optimasi Pembangkit memiliki metrik kinerja yang terukur.
5. Hidayat, M.N. Polinema, *Perencanaan Control Valve pada Head Tank PLTA Tulungagung Menggunakan PLC* (2023). Studi teknis lokal yang membahas kondisi *Head Tank* PLTA Tulungagung, problematika *valve* manual yang mudah tersumbat oleh sedimen, dan perencanaan automasi *control valve* menggunakan PLC untuk mengurangi intervensi manual. Dokumen ini menyorot masalah nyata terkait sistem aliran dan penyumbatan yang berdampak pada kinerja *water cooling* di PLTA Tulungagung. Keterkaitan temuan lapangan ini relevan dengan masalah *valve*/manual control dan sedimentasi adalah salah satu faktor penyebab rendahnya keandalan sistem pendingin yang perlu dimasukkan ke dalam FMEA, prioritas pemeliharaan, dan usulan

optimasi automasi *valve* dan monitoring kualitas air. Data dan rekomendasinya bisa dijadikan titik awal untuk studi lapangan dan rancangan Solusi pada penelitian.

6. K. Anwar (2021) berjudul “*Open Loop Auxiliary Cooling Water Booster Pump Unit 4B*” membahas sistem pendingin pembantu pada pembangkit listrik yang menggunakan metode *open loop*. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bagaimana sistem pompa pendingin utama (*Circulating Water Pump* atau CWP) bekerja bersama *heat exchanger* untuk menjaga suhu operasi peralatan agar tetap optimal. Masalah yang diangkat berkaitan dengan efisiensi sistem pendinginan dan potensi gangguan operasional akibat tekanan atau aliran air yang tidak stabil. Penelitian ini relevan dengan topik penelitian saat ini karena sama-sama berfokus pada sistem pendingin air (*water cooling system*), khususnya dalam konteks pembangkit listrik. Hasil dan analisis dari penelitian Anwar memberikan dasar pemahaman mengenai karakteristik dan tantangan pada sistem *open loop*, yang dapat menjadi pembanding penting bagi penelitian ini yang mengkaji peningkatan kinerja dan keandalan sistem pendingin pada PLTA melalui pendekatan yang lebih efisien dan terukur.

Berdasarkan ke-enam penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa pendekatan pemeliharaan berbasis risiko, prediktif, dan evaluatif memiliki pengaruh signifikan dalam meningkatkan keandalan serta efisiensi sistem pada pembangkit listrik tenaga air. Hasil penelitian internasional menunjukkan keberhasilan metode prediktif dalam menjaga kestabilan suhu dan mengurangi potensi gangguan operasi, sedangkan penelitian lokal menegaskan pentingnya evaluasi kinerja dan strategi pemeliharaan yang terencana terhadap peningkatan faktor keandalan sistem. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi sangat relevan karena berfokus pada optimalisasi keandalan sistem pemeliharaan *Water Cooling System* di PLTA Tulungagung sebagai langkah konkret dalam mendukung stabilitas operasional dan efisiensi pembangkit.

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	Özcan, Yumuşak, & Eren (2019) “ <i>Risk-Based Maintenance in the Hydroelectric Power Plants</i> ”	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah Belum adanya sistem pemeliharaan berbasis risiko yang optimal pada PLTA, menyebabkan jadwal pemeliharaan tidak efisien.	Penelitian ini menggunakan metode Analisis risiko berbasis FMEA (<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>) dan evaluasi probabilitas kegagalan pada komponen utama PLTA..	Hasil penelitian Menghasilkan model pemeliharaan berbasis risiko yang meningkatkan efisiensi biaya dan keandalan operasi PLTA.	Penelitian belum secara spesifik mengkaji sistem pendingin (<i>water cooling system</i>) sebagai komponen vital dalam keandalan pembangkit.
2.	Thansouphanh et al. (2025) “ <i>Predicting the Temperature Increase Trend of a Generator Using RNN,</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mencari Solusi dari permasalahan dimana Belum ada model prediksi kenaikan suhu generator untuk	Penerapan algoritma pembelajaran mesin (RNN, GRU, dan LSTM) untuk memprediksi suhu berdasarkan	Model LSTM mencapai akurasi 98,60% dalam memprediksi kenaikan suhu generator.	Fokus penelitian hanya pada generator, belum menyentuh sistem pendingin secara menyeluruh

	<i>GRU, and LSTM Algorithms”</i>	mendeteksi dini potensi kerusakan termal.	data sensor historis.		dan aplikasinya di PLTA Indonesia.
3.	Taufik & Afrizal (2015) “ <i>Evaluasi Kinerja Pemeliharaan PLTA dengan Pendekatan Maintenance Scorecard dan Objective Matrix (OMAX)</i> ”	Penelitian ini bertujuan untuk Efektivitas sistem pemeliharaan PLTA belum terukur secara sistematis, mengakibatkan performa operasional menurun.	Menggunakan metode <i>Maintenance Scorecard</i> dan <i>OMAX</i> untuk mengukur 20 KPI pemeliharaan di PLTA Maninjau.	Menemukan bahwa sebagian indikator (produksi listrik, faktor kapasitas) masih dalam zona kuning, butuh perbaikan pemeliharaan.	Tidak meneliti keandalan sistem pendingin secara spesifik fokus hanya pada KPI umum pembangkit.
4.	Lesmana (2023) “ <i>Analisis Kinerja Unit Pembangkit Akibat Outage Berdasarkan</i>	Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis Keandalan sistem menurun akibat seringnya <i>outage</i> pada unit pembangkit.	Analisis data historis EAF (<i>Equivalent Availability Factor</i>) dan NCF (<i>Net Capacity Factor</i>) selama tiga tahun.	Keandalan meningkat dari 38,17% (2020) menjadi 59,84% (2022) setelah penerapan strategi pemeliharaan baru.	Tidak menyoroti faktor sistem pendingin secara langsung, padahal pendinginan berpengaruh

	<i>n EAF dan NCF di PLTA Lamajan”</i>				besar terhadap performa unit.
5.	Hidayat (2023) “ <i>Perencanaan Control Valve pada Head Tank PLTA Tulungagung</i> ”	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menguji Distribusi air belum optimal akibat pengaturan katup manual yang kurang presisi.	Perancangan sistem kontrol otomatis berbasis sensor untuk <i>control valve</i> pada <i>head tank</i> .	Sistem kontrol otomatis mampu meningkatkan efisiensi aliran air dan mengurangi intervensi manual.	Belum mengintegrasikan sistem kontrol tersebut dengan sistem pendingin dan manajemen pemeliharaan secara menyeluruh.

2.2. Landasan Teori

Kata “*Elektric* (Listrik)” berasal dari kata Yunani yaitu *electron* (Tipler, 1996), Muatan zat ini terdiri atas muatan positif (*Proton*) dan muatan negatif (*Elektron*), serta inti atau *Neutron*. *Proton* dan *Elektron* melakukan pergerakan sedemikian rupa sehingga terjadi perubahan. Dalam teori listrik dasar, pergerakan muatan inilah yang menyebabkan pengaliran muatan yang selanjutnya yang dikenal sebagai aliran Listrik. Listrik merupakan energi yang dihasilkan, ditransmisikan dan didistribusikan kepada pelanggan/konsumen dan digunakan untuk segala macam keperluan. Jaringan tenaga listrik adalah seperangkat sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik yang bekerja sama untuk memenuhi kebutuhan listrik seluruh masyarakat.

Menurut F. J Tasiam (2017) pembangkit Listrik (*Power Plant*) merupakan tempat atau sumber energi Listrik dibangkitkan yang didalamnya terdapat generator sebagai pembangkit listriknya dan turbin sebagai penggeraknya (*Prime Mover*). Sistem pembangkit tenaga listrik adalah seperangkat peralatan yang terdiri dari generator dan perangkat lain yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik mengubah energi potensial menjadi energi mekanik, yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Energi potensial menggerakkan turbin, dan putaran turbin yang merupakan energi mekanik digunakan untuk memutar generator. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

2.1.1.1 Pengertian dan Prinsip Kerja PLTA

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah sistem pembangkit energi yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik air untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik melalui generator (Nusantara Power, 2023). Air yang berada pada ketinggian tertentu menyimpan energi potensial, dan ketika dialirkan ke turbin, energi ini berubah menjadi energi kinetik yang memutar turbin. Karena sifatnya yang terus-menerus dapat diperbarui melalui siklus hidrologis, PLTA termasuk salah satu

bentuk pembangkit energi terbarukan yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca selama operasi normal.



Gambar 2. 1 Profile PLTA Tulungagung

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulungagung merupakan salah satu unit pembangkit di bawah naungan PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Brantas, yang berperan penting dalam menjaga pasokan energi listrik di wilayah Jawa Timur bagian selatan. PLTA ini memanfaatkan potensi air dari Bendungan Wonorejo, yang terletak di Kecamatan Pagerwojo, Kabupaten Tulungagung, sebagai sumber utama energi airnya. Bendungan Wonorejo memiliki kapasitas tampung sekitar 122 juta meter kubik, dengan tinggi bendungan mencapai lebih dari 95 meter, sehingga menghasilkan head yang cukup besar untuk menggerakkan turbin air secara efisien. Energi potensial air dari bendungan tersebut dialirkan melalui saluran penstock menuju rumah pembangkit (*powerhouse*) PLTA Tulungagung (Nusantara Power, 2023). Di dalam rumah pembangkit, air tersebut dimanfaatkan untuk memutar dua unit turbin Francis vertikal, masing-masing dengan kapasitas sekitar 18 MW, sehingga total daya terpasang PLTA mencapai 36 MW.

Sebagai salah satu pembangkit yang beroperasi di bawah sistem interkoneksi Jawa – Bali, PLTA Tulungagung memiliki peranan strategis dalam menjaga stabilitas suplai energi listrik, terutama saat beban puncak atau ketika cadangan pasokan energi terbarukan dibutuhkan. Selain menghasilkan energi bersih tanpa emisi, sistem PLTA ini juga mendukung pengelolaan sumber daya air di kawasan sekitar bendungan, baik

untuk irigasi, pengendalian banjir, maupun konservasi lingkungan. Dalam operasionalnya, sistem pendingin (*Water Cooling System*) menjadi salah satu komponen vital di PLTA Tulungagung. Sistem ini berfungsi menjaga suhu optimal pada generator, bearing, dan peralatan mekanik lainnya agar tetap berada pada batas aman. Stabilitas suhu sangat penting untuk mempertahankan keandalan (*reliability*) mesin pembangkit, karena suhu berlebih dapat mempercepat degradasi pelumas, menurunkan efisiensi mekanik, dan bahkan memicu kerusakan permanen pada komponen kritis. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan dan optimasi sistem pendingin memiliki pengaruh langsung terhadap keandalan operasi unit pembangkit secara keseluruhan.

PLTA memiliki prinsip kerja saat beroperasi yaitu mencakup sebagai berikut;



Gambar 2. 2 Prinsip Kerja PLTA

1. Pengumpulan dan penampungan Air, Air dikumpulkan dan ditampung pada waduk atau bendungan, sehingga permukaan air menjadi lebih tinggi. Dengan demikian air memiliki energi potensial yang lebih besar.
2. Aliran Air melalui Saluran *Penstock*, Air kemudian dialirkan dari waduk melalui saluran (*penstock*) menuju ke turbin. Selama aliran tersebut, energi potensial berubah menjadi energi kinetik karena penurunan elevasi dan percepatan aliran.

3. Putaran Turbin, Aliran air dengan kecepatan tinggi mengenai sudu-sudu turbin, menyebabkan turbin berputar. Putaran turbin ini adalah transformasi energi kinetik air menjadi energi mekanik rotasi.
4. Konversi menjadi Energi Listrik oleh Generator, Turbin yang berputar akan menggerakkan rotor generator melalui poros. Generator kemudian mengubah energi mekanik ini menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
5. Penyaluran Listrik ke Jaringan, Listrik yang dihasilkan digerakkan melalui transformator untuk menaikkan tegangan sehingga efisiensi transmisi meningkat, lalu didistribusikan ke konsumen melalui jaringan transmisi.
6. Pengembalian Air, Setelah melewati turbin, sisa aliran air dialirkan kembali ke sungai atau lembah melalui saluran buangan (*tailrace*). Air ini kemudian kembali ke sistem sirkulasi alamiah.

Meskipun PLTA Tulungagung memiliki sistem operasional yang sudah mapan, tantangan tetap muncul seiring waktu, terutama terkait kualitas air pendingin, sedimentasi dari sumber air, serta efektivitas sistem pemeliharaan yang berjalan. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam mengoptimalkan sistem pemeliharaan *Water Cooling System* agar keandalan operasional PLTA dapat terus terjaga dan efisiensi pembangkit meningkat.

2.1.1.2 Komponen Utama dalam Sistem PLTA

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) terdiri dari berbagai komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi listrik. Setiap komponen memiliki fungsi vital dalam menjaga efisiensi dan keandalan sistem pembangkit. Secara umum, sistem PLTA terdiri atas bendungan (dam), saluran pengarah (*penstock*), turbin air, generator, sistem transmisi daya, dan sistem kontrol serta pendingin.



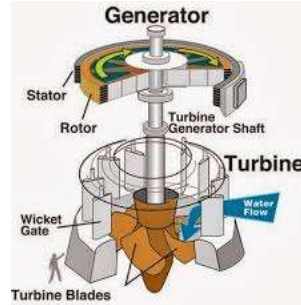
Gambar 2. 3 Bendungan

Bendungan (Dam), Bendungan berfungsi untuk menampung dan mengatur debit air dari sungai atau sumber air lainnya. Dengan adanya bendungan, potensi energi air dapat dikendalikan sehingga menghasilkan perbedaan tinggi muka air (head) yang diperlukan untuk menggerakkan turbin. Bendungan juga berperan sebagai sistem pengendali banjir dan penyedia air untuk keperluan irigasi dan domestik di wilayah sekitar pembangkit (Prasetyo, 2021).



Gambar 2. 4 Saluran Pengarah

Saluran Pengarah (*Penstock*), *Penstock* merupakan pipa besar yang menyalurkan air dari bendungan menuju turbin. Tekanan air dalam *penstock* menjadi energi kinetik yang akan menggerakkan sudu turbin. Kualitas dan kekuatan material *penstock* sangat mempengaruhi performa serta keselamatan sistem pembangkit. Material yang umum digunakan adalah baja karbon atau baja galvanis dengan ketebalan tertentu agar tahan terhadap tekanan air yang tinggi (Suhendra & Malik, 2022).



Gambar 2. 5 Turbin Air

Turbin Air, Turbin merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik rotasi. Jenis turbin yang digunakan bergantung pada ketinggian head dan debit air. Beberapa jenis turbin yang umum digunakan antara lain Pelton, Francis, dan Kaplan. Pada PLTA Tulungagung, digunakan turbin Francis vertikal, yang cocok untuk head menengah (30–300 meter) dan debit air sedang. Turbin ini memiliki efisiensi tinggi dan mampu bekerja stabil dalam kondisi operasi yang bervariasi (PLN Nusantara Power, 2023).

Dasar Teori, cara kerja turbin air didasarkan pada prinsip konservasi energi. Air yang terletak di ketinggian tertentu menyimpan energi potensial. Ketika air tersebut jatuh, energi potensial ini berubah menjadi energi kinetik. Turbin kemudian menangkap energi kinetik dan tekanan air untuk diubah menjadi tenaga putar poros.

Turbin air dapat dikelompokkan berdasarkan dua aspek utama: tinggi jatuh air dan mekanisme kerja.

A. Berdasarkan Karakteristik Aliran

Turbin Impuls, Cara kerja: Mengonversi seluruh energi potensial menjadi energi kinetik melalui nozzle sebelum mencapai sudu turbin, Ciri khas: Cocok untuk head tinggi (>150m) dan debit kecil, Runner beroperasi di udara dengan sistem semprotan jet, dan Tekanan internal setara dengan tekanan atmosfer dengan Contoh: Turbin Pelton dan Turgo

Turbin Reaksi Cara kerja: Memanfaatkan kombinasi energi tekanan dan kecepatan air. Ciri khas: Efektif untuk head menengah-rendah (3-450m) dan debit besar, Seluruh runner terendam air. Dengan Contoh: Turbin Francis, Kaplan, dan Propeller

B. Berdasarkan Pola Aliran

- Aliran Tangensial: air masuk dari sisi runner (contoh: Pelton)
- Aliran Radial: air bergerak secara radial (contoh: Francis)
- Aliran Aksial: air mengalir sejajar poros (contoh: Kaplan)

Ragam Turbin Air

A. Turbin Pelton (Tipe Impuls)

- Identifikasi: Runner berbentuk mangkuk
- Mekanisme: Nozzle menyemburkan air berkecepatan tinggi ke bucket
- Penerapan: Optimal untuk head sangat tinggi (>300m) dengan debit terbatas

B. Turbin Francis (Tipe Reaksi)

- Identifikasi: Runner dengan sudu kompleks yang tertutup
- Mekanisme: Air mengalir melalui spiral casing dan guide vane, menciptakan tekanan diferensial
- Penerapan: Fleksibel untuk head menengah (40-600m)

C. Turbin Kaplan (Tipe Reaksi)

- Identifikasi: Runner mirip baling-baling dengan sudut adjustable
- Mekanisme: Aliran aksial dengan kemampuan adaptasi terhadap perubahan debit
- Penerapan: Ideal untuk head rendah (2-40m) dan debit besar

Elemen Penting Turbin

- A. Runner: Komponen inti yang berputar
- B. Guide Vane: Pengatur arah dan volume aliran (pada turbin reaksi)
- C. Spiral Casing: Saluran distribusi air melingkar
- D. Penstock: Pipa penyalur air bertekanan
- E. Draft Tube: Peningkat efisiensi tekanan (khusus turbin reaksi)
- F. Shaft: Penghubung runner dengan generator
- G. Efisiensi (η): Rasio daya output terhadap input

$$\eta = (\text{Daya Keluar} / \text{Daya Masuk}) \times 100\%$$

- H. Kecepatan Spesifik (N_s): Parameter desain turbin

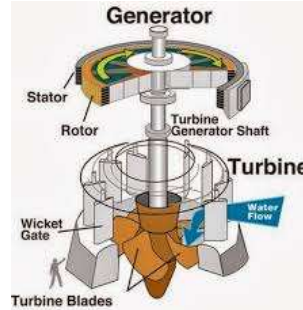
- N_s rendah: Turbin Pelton
- N_s menengah: Turbin Francis
- N_s tinggi: Turbin Kaplan

Panduan Pemilihan Turbin

Tabel 2. 1 Jenis Turbin dan spesifikasi

Jenis Turbin	Tinggi Fall	Volume Air	Mekanisme
Pelton	Sangat Tinggi	Kecil	Impuls
Francis	Sedang-Tinggi	Sedang-Tinggi	Reaksi
Kaplan	Rendah	Besar	Reaksi

Pemilihan jenis turbin yang tepat sangat ditentukan oleh kondisi geografis dan hidrologi lokasi untuk mencapai efisiensi pembangkitan listrik yang optimal.



Gambar 2. 6 Generator

Generator, Generator dikopel langsung dengan turbin untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Ketika rotor generator berputar akibat tenaga turbin, medan magnet yang dihasilkan menyebabkan aliran arus listrik pada stator. Generator yang digunakan di PLTA umumnya adalah *synchronous* generator, karena stabil dalam menjaga frekuensi dan tegangan sistem interkoneksi (Wijaya, 2020).



Gambar 2. 7 Trafo

Sistem Transmisi dan Transformator, Energi listrik yang dihasilkan generator memiliki tegangan relatif rendah, sehingga perlu dinaikkan melalui transformator step-up agar dapat disalurkan ke jaringan transmisi. Sistem transmisi di PLTA juga dilengkapi dengan peralatan proteksi seperti *circuit breaker*, *relay proteksi*, dan sistem grounding, untuk menjamin keselamatan dan keandalan pasokan listrik ke jaringan utama (SNI 04-6958, 2021).

Sistem Kontrol dan Instrumentasi, Sistem kontrol berfungsi untuk mengatur operasi PLTA secara otomatis agar pembangkit dapat bekerja sesuai dengan kondisi beban dan ketersediaan air. Sensor-sensor seperti flowmeter, level sensor, dan pressure sensor digunakan untuk mengawasi variabel penting seperti debit air, tekanan, dan kecepatan turbin. Data dari sensor tersebut kemudian diproses oleh sistem kontrol berbasis *Programmable Logic Controller (PLC)* atau *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* untuk menjaga kestabilan operasi (Hariyanto & Putra, 2022).



Gambar 2. 8 Sistem Pendingin

Sistem Pendingin (*Cooling System*), Sistem pendingin merupakan bagian pendukung penting dalam PLTA yang berfungsi menjaga suhu operasi peralatan, terutama generator, bearing, dan pelumas (*oil cooler*). Pendinginan dapat dilakukan menggunakan air dari sungai atau bendungan yang dialirkan melalui heat exchanger. Kinerja sistem pendingin yang optimal berpengaruh langsung terhadap efisiensi dan umur pakai mesin pembangkit. Pada PLTA Tulungagung, air pendingin diambil dari reservoir khusus dan disirkulasikan melalui sistem pompa serta filter untuk mencegah penyumbatan oleh partikel sedimen (Nusantara Power, 2023).



Gambar 2. 9 Valve system cooling

Pada sistem pendingin PLTA, katup (Valve) berperan sebagai komponen kontrol yang mengatur, mengisolasi, dan mengendalikan aliran fluida pendingin (seperti air atau oli). Peran strategis ini menjadikan katup elemen kunci dalam menjaga stabilitas termal dan keamanan operasional seluruh sistem. Unit pendingin memegang peran vital dengan mencegah overheating pada komponen kritis Generator (stator dan rotor) akibat gesekan mekanis dan arus listrik, Sistem bantalan turbin dan generator, dan Transformator daya. Tanpa pendinginan efektif, risiko kerusakan insulasi, percepatan keausan mekanis, hingga kegagalan operasional meningkat signifikan. Katup berfungsi sebagai regulator aktif dalam ekosistem pendinginan ini. Klasifikasi dan Penerapan Katup sebagai berikut

A. Katup Gerbang (Gate Valve)

- Prinsip: Gerbang vertikal bergerak naik-turun mengontrol aliran
- Spesifikasi: Khusus operasi buka-tutup penuh, minim pressure drop
- Penerapan: Titik isolasi utama untuk pemeliharaan sistem

B. Katup Globe

- Prinsip: Disk menutup aliran secara presisi dengan pola aliran berbelok
- Spesifikasi: Optimal untuk regulasi aliran, pressure drop signifikan
- Penerapan: Kontrol manual/otomatis pada saluran bypass dan inlet cooler

C. Katup Butterfly

- Prinsip: Cakram berputar 90° mengatur laju aliran
- Spesifikasi: Kompak, ekonomis untuk ukuran besar, cocok throttling
- Penerapan: Saluran air pendingin utama dan isolasi cepat

D. Katup Periksa (Check Valve)

- Prinsip: Operasi otomatis mencegah reverse flow
- Spesifikasi: Berbagai varian (swing, lift, wafer)
- Penerapan: Proteksi discharge pompa dan sistem parallel

E. Katup Kontrol

- Prinsip: Aktuator menerima sinyal kontrol untuk operasi presisi
- Spesifikasi: Trim khusus untuk karakteristik aliran spesifik
- Penerapan: Regulasi suhu otomatis pada oli transformator dan bearing

F. Katup Pelepas Udara

- Prinsip: Evakuasi udara otomatis dari sistem pipa
- Spesifikasi: Mencegah kavitasi dan hambatan aliran
- Penerapan: Titik elevasi tertinggi dalam jaringan pipa

G. Parameter Seleksi Katup, Pemilihan katup mempertimbangkan enam aspek kritis:

- Fungsi operasional (isolasi, throttling, anti-backflow)
- Kondisi tekanan dan temperatur operasi
- Karakteristik fluida (air, oli, kondisi fisika-kimia)
- Dimensi pipa
- Mode operasi (manual/otomatis)
- Material konstruksi (bronze, cast iron, stainless steel)

Pemahaman mendalam tentang karakteristik dan aplikasi setiap katup menjadi prasyarat untuk merancang, mengoperasikan, dan memelihara sistem pendingin yang andal sebuah faktor penentu dalam menjaga kontinuitas operasional PLTA.

2.1.1.3 Peran Sistem Pendingin dalam Operasional PLTA

Sistem pendingin (*Cooling System*) merupakan salah satu komponen penunjang vital dalam operasi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Walaupun sistem ini tidak secara langsung berhubungan dengan proses konversi energi air menjadi listrik, fungsi utamanya sangat penting untuk menjaga keandalan, stabilitas suhu, dan umur pakai peralatan utama pembangkit seperti generator, bearing, transformator, dan pelumas (*Oil Cooler*). Pada proses operasional, generator dan komponen mekanik lain akan menghasilkan panas akibat gesekan dan arus listrik yang mengalir dalam kumparan. Jika panas ini tidak dikeluarkan secara efektif, dapat menyebabkan penurunan efisiensi, deformasi mekanik, bahkan kegagalan isolasi listrik. Oleh karena itu, sistem pendingin menjadi bagian penting dalam siklus operasional pembangkit untuk memastikan setiap komponen bekerja pada suhu ideal (Suharto, 2020).

Fungsi Utama Sistem Pendingin di PLTA adalah untuk menjaga suhu kerja generator dan turbin agar berada pada batas aman operasi, Menghindari kerusakan akibat *Overheating* pada komponen seperti *Bearing*, *Oil Seal*, dan gulungan generator, menstabilkan performa sistem pelumasan, karena viskositas pelumas sangat dipengaruhi oleh suhu, mendukung efisiensi energi dengan menjaga rugi panas (*Losses*) pada batas minimum. Air pendingin yang digunakan biasanya berasal dari sumber yang sama dengan air turbin, seperti bendungan atau reservoir, namun melalui jalur dan sistem filtrasi yang berbeda. Air tersebut dialirkan melalui pompa pendingin dan penukar panas (*Heat Exchanger*) sebelum kembali ke sistem atau dibuang ke aliran sungai (PLN Nusantara Power, 2023).

Dalam sistem pembangkit, terdapat dua jenis sistem pendingin utama, yaitu; *Closed Cooling System* dimana air pendingin bersirkulasi dalam sistem tertutup melalui heat exchanger, menjaga efisiensi pendinginan sekaligus mengurangi risiko kontaminasi dan *Open Cooling System* dimana air diambil langsung dari sumber (sungai atau bendungan) dan dibuang kembali setelah proses pendinginan. Sistem ini

sederhana namun membutuhkan pengawasan kualitas air agar tidak terjadi sedimentasi atau fouling pada pipa dan pompa (SNI 04-6498, 2021). PLTA Tulungagung menggunakan sistem pendingin air terbuka (*Open Water Cooling System*) yang mengambil air dari *Reservoir* lokal. Sistem ini memerlukan pemeliharaan rutin pada filter, pompa, dan jalur pipa, karena sedimen dan material terlarut dapat menurunkan performa pendinginan. Masalah kekeruhan air juga menjadi tantangan yang sering muncul saat debit air tinggi atau setelah curah hujan besar (Nusantara Power, 2023).

Pengaruh Sistem Pendingin terhadap Keandalan Pembangkit, Keandalan sistem pendingin berbanding lurus dengan stabilitas operasi pembangkit secara keseluruhan. Jika sistem pendingin bekerja optimal, maka Temperatur generator dan bearing tetap stabil, sehingga umur komponen meningkat, Frekuensi kerusakan akibat panas berlebih dapat ditekan, sehingga mengurangi waktu *Downtime* dan biaya perawatan dan Efisiensi konversi energi tetap terjaga, karena semua komponen bekerja dalam kondisi termal yang ideal. Sebaliknya, jika sistem pendingin tidak berfungsi dengan baik, akan timbul efek domino berupa peningkatan suhu generator, penurunan performa isolasi, hingga potensi *Forced Outage* yang dapat mengganggu kontinuitas pasokan energi listrik ke jaringan Jawa Timur. Oleh sebab itu, optimasi pemeliharaan sistem pendingin menjadi langkah strategis untuk meningkatkan keandalan PLTA secara keseluruhan (Iskandar & Rahman, 2022).

2.1.2 Keandalan Sistem (*System Reability*)

2.1.2.1 Parameter dan Indikator Keandalan Sistem

Keandalan sistem (*System Reliability*) merupakan kemampuan suatu peralatan atau sistem untuk beroperasi sesuai fungsi yang diharapkan dalam jangka waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), keandalan menjadi faktor yang sangat penting karena setiap

gangguan, sekecil apa pun, dapat berdampak pada kontinuitas pasokan energi listrik dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Menurut IEEE Standard 762-2006, keandalan pembangkit diukur melalui kemampuan sistem untuk mempertahankan operasi dalam kondisi normal maupun beban puncak tanpa adanya gangguan signifikan. Dalam hal ini, sistem pendingin (*Water Cooling System*) memiliki peran penting karena kegagalannya dapat menyebabkan kenaikan suhu berlebih yang berdampak langsung pada *Downtime* dan kerusakan komponen vital seperti Generator dan *Bearing* (IEEE, 2006).

Parameter Keandalan Sistem digunakan untuk mengukur sejauh mana sistem mampu bekerja secara konsisten dan tanpa gangguan. Beberapa parameter yang umum digunakan dalam analisis keandalan sistem antara lain:

1. *Mean Time Between Failure* (MTBF), MTBF menunjukkan rata-rata waktu operasi sistem sebelum terjadi kegagalan berikutnya. Semakin tinggi nilai MTBF, semakin andal sistem tersebut. Dalam konteks PLTA, peningkatan MTBF pada sistem pendingin menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja lebih lama tanpa mengalami gangguan akibat sedimentasi, pompa macet, atau *Overheat* pada generator (Iskandar & Rahman, 2022).
2. *Mean Time To Repair* (MTTR), MTTR menggambarkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu sistem setelah terjadi kegagalan. Nilai MTTR yang rendah menandakan efektivitas tim pemeliharaan dalam menangani kerusakan. Optimasi prosedur pemeliharaan *Preventif* dan *Prediktif* dapat menurunkan MTTR secara signifikan (Rahadian, 2021).
3. *Availability* (Ketersediaan Sistem), Ketersediaan merupakan rasio antara waktu operasi sistem dengan total waktu (operasi ditambah perbaikan). Nilai ini sering digunakan sebagai indikator keandalan pembangkit. Dalam PLTA Tulungagung, target ketersediaan sistem pendingin minimal

adalah $\geq 98\%$, untuk menjamin kontinuitas operasi generator tanpa gangguan panas berlebih (PLN Nusantara Power, 2023).

4. *Failure Rate* (Laju Kegagalan), Parameter ini menunjukkan frekuensi terjadinya kegagalan per satuan waktu. Laju kegagalan yang rendah mengindikasikan sistem bekerja secara stabil. Pengawasan rutin terhadap kebersihan filter, debit air pendingin, dan kondisi pompa menjadi faktor kunci untuk menekan nilai *failure rate* (Setiawan & Malik, 2020).

Selain parameter numerik, indikator keandalan juga dapat diidentifikasi melalui aspek operasional dan manajerial. Beberapa indikator utama yang digunakan di lingkungan pembangkit meliputi seperti Stabilitas Temperatur Operasional Suhu komponen utama seperti Generator, *Bearing*, dan minyak pelumas harus tetap dalam batas aman. Fluktuasi suhu yang tinggi menjadi indikator awal adanya penurunan performa sistem Pendingin, Frekuensi Gangguan Sistem Pendingin dimana Jumlah gangguan seperti kebocoran pipa, penyumbatan filter, atau penurunan tekanan air menunjukkan tingkat kesehatan sistem. Frekuensi gangguan yang rendah menunjukkan keandalan yang baik, Efektivitas Jadwal Pemeliharaan dimana pelaksanaan pemeliharaan yang tepat waktu dan berbasis data dapat meningkatkan keandalan sistem. Penerapan predictive maintenance berbasis pemantauan *Real-Time* menjadi salah satu indikator peningkatan keandalan (Hariyanto, 2022).

Dengan memantau parameter dan indikator keandalan secara berkala, operator PLTA Tulungagung dapat melakukan evaluasi terhadap performa sistem pendingin serta menentukan strategi pemeliharaan yang lebih efektif. Pendekatan berbasis data tersebut mendukung pencapaian keandalan tinggi dan operasi berkelanjutan untuk menjaga kestabilan pasokan listrik di wilayah Jawa Timur.

2.1.2.2 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Keandalan

Keandalan sistem dalam pembangkit listrik sangat dipengaruhi oleh kombinasi faktor teknis, lingkungan, operasional, dan manajerial. Dalam konteks

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), faktor-faktor ini saling berkaitan dan dapat berdampak langsung pada stabilitas kinerja peralatan utama, termasuk sistem pendingin. Apabila salah satu faktor tidak terkontrol dengan baik, maka akan terjadi penurunan performa yang dapat mengarah pada peningkatan laju kegagalan (*Failure Rate*).

1. Faktor Teknis, Faktor teknis mencakup desain peralatan, kualitas material, dan teknologi yang digunakan. Misalnya, sistem pendingin dengan desain terbuka (*Open Cooling System*) seperti yang digunakan di PLTA Tulungagung memiliki risiko tinggi terhadap masuknya material asing seperti pasir, lumpur, dan sedimen yang dapat menyebabkan penyumbatan filter dan pompa. Selain itu, umur peralatan, efisiensi pompa, dan kondisi perpipaan menjadi faktor kunci dalam menjaga performa pendinginan (Rahadian, 2021).
2. Faktor Operasional, Prosedur pengoperasian sistem sangat menentukan keandalan. Pengaturan debit air pendingin, kestabilan tekanan, serta pengawasan temperatur secara *Real-Time* akan berpengaruh terhadap stabilitas sistem. Ketidaksesuaian dalam pengoperasian dapat mempercepat keausan komponen atau memicu gangguan tak terduga (Hariyanto, 2022).
3. Faktor Lingkungan, Kondisi lingkungan sekitar PLTA seperti curah hujan tinggi, perubahan debit sungai, dan kualitas air sangat mempengaruhi efektivitas pendinginan. Saat musim hujan, meningkatnya kekeruhan air dan sedimentasi dapat mempercepat penurunan performa sistem pendingin. Faktor lingkungan ini sering kali menjadi tantangan eksternal yang membutuhkan perencanaan pemeliharaan lebih adaptif (Setiawan & Malik, 2020).
4. Faktor Pemeliharaan, Kualitas pemeliharaan menentukan umur pakai dan tingkat keandalan sistem. Jadwal pemeliharaan yang tidak konsisten atau

bersifat reaktif dapat memperbesar risiko *Downtime*. Sebaliknya, pendekatan pemeliharaan *Prediktif* yang terencana dapat memperpanjang umur komponen dan meningkatkan *availability* sistem (Iskandar & Rahman, 2022).

5. Faktor Manajerial dan SDM, Keandalan juga sangat bergantung pada kompetensi operator dan efektivitas manajemen aset. Pelatihan personel, dokumentasi historis perawatan, serta kebijakan *Standard Operating Procedure* (SOP) menjadi elemen penting untuk menjaga konsistensi operasional sistem pendingin dalam jangka panjang (PLN Nusantara Power, 2023).

2.1.2.3 Penerapan Konsep Keandalan pada Sistem Pendingin PLTA

Penerapan konsep keandalan pada sistem pendingin PLTA bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu beroperasi dalam kondisi optimal, berkelanjutan, dan minim gangguan. Di PLTA Tulungagung, penerapan keandalan sistem pendingin menjadi krusial karena perannya langsung memengaruhi temperatur generator, efisiensi konversi energi, serta umur peralatan utama. Pendekatan *Preventive*, *Predictive* sebelum terjadi *Corrective Maintenance* Salah satu penerapan nyata konsep keandalan adalah melalui strategi pemeliharaan yang terencana. *Preventive Maintenance* dilakukan dengan jadwal berkala seperti pembersihan filter, pengecekan pompa, dan inspeksi jalur pipa. Sedangkan *Predictive Maintenance* memanfaatkan data operasional seperti temperatur, tekanan air, dan getaran pompa untuk memprediksi potensi gangguan sebelum terjadi kegagalan (Hariyanto, 2022).

Monitoring Parameter Keandalan Secara Real-Time, Penerapan sistem monitoring berbasis sensor dan *Control Room* memungkinkan operator mendeteksi penurunan performa sistem pendingin sejak dini. Misalnya, jika tekanan air pendingin turun di bawah ambang batas, sistem dapat memberikan peringatan (alarm) sehingga tindakan *Korektif* dapat segera dilakukan. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan nilai MTBF dan penurunan MTTR (Rahadian, 2021).

Optimasi Laju Aliran dan Kualitas Air Pendingin, Kestabilan suhu pendinginan sangat bergantung pada kualitas dan debit air. Dengan menjaga kebersihan saringan, mengontrol laju aliran air pendingin, serta mengelola sedimentasi pada sumber air, sistem pendingin dapat beroperasi dengan lebih stabil dan andal. PLTA Tulungagung telah mulai menerapkan strategi ini untuk mengurangi risiko penyumbatan dan menjaga temperatur operasi generator tetap stabil (PLN Nusantara Power, 2023).

Analisis Keandalan dan Evaluasi Kinerja Sistem, Analisis keandalan dilakukan dengan mengukur parameter seperti MTBF, MTTR, *Failure Rate*, dan *availability*. Evaluasi berkala memungkinkan operator untuk mengidentifikasi titik-titik kritis dalam sistem pendingin dan merumuskan perbaikan yang lebih efektif. Proses evaluasi ini menjadi dasar penting dalam pengambilan keputusan teknis dan manajerial (Iskandar & Rahman, 2022). Penerapan konsep keandalan secara konsisten pada sistem pendingin tidak hanya meningkatkan stabilitas operasional pembangkit, tetapi juga mengurangi potensi gangguan dan biaya pemeliharaan jangka panjang. Hal ini mendukung tercapainya keandalan pembangkit secara keseluruhan serta menjaga kontinuitas pasokan listrik ke jaringan Jawa Timur.

2.1.3 Sistem Pemeliharaan (*Maintenance System*)

Sistem pemeliharaan (*Maintenance System*) merupakan suatu rangkaian kegiatan yang dirancang untuk memastikan seluruh peralatan dan sistem di pembangkit listrik tetap berada dalam kondisi optimal. Tujuannya adalah untuk menjaga keandalan, memperpanjang umur peralatan, serta mengurangi potensi gangguan operasional yang dapat menyebabkan penurunan kinerja atau bahkan penghentian proses pembangkitan listrik. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), sistem pemeliharaan memiliki peran penting mengingat lingkungan operasional yang melibatkan air, kelembapan tinggi, dan beban mekanik besar pada turbin serta generator.

Menurut Mobley (2002), sistem pemeliharaan dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama, yaitu *Preventive Maintenance*, *Predictive Maintenance*, Dan *Corrective Maintenance*. Ketiga pendekatan ini saling melengkapi dalam menjaga stabilitas operasional peralatan di industri energi, termasuk PLTA.

2.1.3.1 *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance adalah kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dan terencana, dengan tujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan sebelum terjadi gangguan yang signifikan. Metode ini biasanya didasarkan pada interval waktu tertentu (harian, mingguan, atau bulanan) atau jam operasi peralatan. Dalam sistem pembangkit, *Preventive Maintenance* mencakup kegiatan seperti pemeriksaan kebocoran pada sistem pendingin air, pembersihan saringan (filter), penggantian oli pelumas, pengecekan kondisi motor pompa, serta kalibrasi sensor suhu dan tekanan. Pemeliharaan jenis ini dilakukan tanpa harus melakukan *Shutdown* pada unit pembangkit secara keseluruhan, kecuali untuk komponen yang membutuhkan penghentian operasi lokal. Pendekatan ini termasuk pemeliharaan rutin jangka pendek, yang bertujuan menjaga kestabilan sistem pendingin agar suhu operasional tetap terkendali dan peralatan tidak mengalami degradasi dini. *Preventive Maintenance* menjadi pondasi penting bagi keberlanjutan operasional PLTA Tulungagung dalam menjaga kontinuitas pasokan energi listrik.

2.1.3.2 *Predictive Maintenance*

Predictive Maintenance merupakan bentuk pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual peralatan. Pendekatan ini menggunakan sensor, data historis, serta analisis getaran, suhu, dan tekanan untuk memprediksi waktu optimal pemeliharaan sebelum kerusakan benar-benar terjadi. Dengan demikian, *Predictive Maintenance* berbeda dari *Preventive Maintenance* karena tidak hanya berdasarkan waktu, tetapi juga pada indikator kondisi peralatan. Misalnya, sistem pendingin air pada PLTA dapat dipantau melalui sensor suhu dan laju aliran air (*Flow Rate Sensor*) yang terhubung ke sistem monitoring IoT. Jika parameter melebihi ambang batas, sistem akan memberikan

sinyal peringatan agar teknisi melakukan perawatan sebelum terjadi *Overheating* atau kegagalan sistem.

2.1.3.3 *Corrective Maintenance*

Corrective Maintenance adalah jenis pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan atau gangguan pada sistem. Tujuannya adalah untuk mengembalikan fungsi peralatan ke kondisi normal secepat mungkin. Meskipun *Corrective Maintenance* seringkali tidak diharapkan terjadi, namun tetap menjadi bagian penting dari strategi pemeliharaan menyeluruh. Dalam sistem pendingin PLTA, *Corrective Maintenance* dapat berupa penggantian pompa air yang rusak, perbaikan katup bocor, atau penggantian pipa pendingin yang tersumbat akibat sedimentasi. Pendekatan ini bersifat reaktif, namun dalam praktik modern sering dipadukan dengan analisis akar penyebab (*Root Cause Analysis*) agar kejadian serupa tidak berulang. Dengan demikian, *Corrective Maintenance* tidak hanya memperbaiki kerusakan, tetapi juga berperan dalam perbaikan berkelanjutan terhadap sistem pemeliharaan itu sendiri.

2.1.3.4 Strategi Optimasi Pemeliharaan Pada Sistem Pendingin

Strategi optimasi pemeliharaan merupakan upaya sistematis untuk meningkatkan efektivitas, efisiensi, dan keandalan sistem pendingin melalui perencanaan, pengawasan, serta penerapan metode pemeliharaan yang tepat. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulungagung, sistem pendingin memiliki peran vital untuk menjaga stabilitas suhu pada komponen utama seperti turbin, generator, serta bearing. Ketidakseimbangan suhu atau penurunan efisiensi pendinginan dapat memengaruhi performa pembangkit secara keseluruhan.

Optimalisasi strategi pemeliharaan tidak hanya berfokus pada kegiatan perbaikan (*Maintenance Activity*), tetapi juga mencakup pendekatan manajerial dan teknologi yang mendukung terciptanya sistem pemeliharaan yang berkelanjutan. Menurut Kelly (2006), strategi pemeliharaan yang optimal harus memadukan unsur

Preventive, Predictive, Dan Corrective Maintenance dalam satu kerangka yang terintegrasi, agar setiap kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara proaktif, tepat waktu, dan berbasis data.

Pada sistem pendingin PLTA, strategi optimasi dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan seperti

1. Integrasi Sistem Monitoring Digital, Penerapan sensor suhu, tekanan, dan aliran air berbasis IoT (*Internet of Things*) memungkinkan pemantauan kondisi sistem pendingin secara *Real-Time*. Data yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk mendeteksi tren penurunan performa, sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan.
2. Analisis Keandalan dan Risiko (*Reliability Centered Maintenance – RCM*), Pendekatan RCM digunakan untuk menentukan prioritas pemeliharaan berdasarkan tingkat kritikalitas komponen terhadap keandalan sistem pembangkit. Dengan metode ini, sumber daya pemeliharaan dapat dialokasikan secara optimal pada komponen yang memiliki dampak besar terhadap kestabilan operasi, seperti pompa pendingin utama dan heat exchanger.
3. Peningkatan Kompetensi dan Standarisasi Prosedur Pemeliharaan, Efektivitas optimasi pemeliharaan juga ditentukan oleh kemampuan sumber daya manusia (SDM). Pelatihan teknisi dan penerapan *Standard Operating Procedure* (SOP) yang terukur dapat meningkatkan akurasi dalam pelaksanaan pemeriksaan dan perbaikan.
4. Evaluasi Kinerja Pemeliharaan Secara Berkala, Setiap kegiatan pemeliharaan perlu dievaluasi untuk menilai efektivitas strategi yang diterapkan. Parameter seperti *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), serta *Availability Ratio* dapat digunakan untuk mengukur peningkatan keandalan sistem pendingin dari waktu ke waktu.

Implementasi strategi optimasi ini diharapkan dapat memberikan manfaat signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional, penghematan biaya perawatan, serta peningkatan umur pakai peralatan. Pada PLTA Tulungagung, langkah ini penting untuk memastikan kinerja sistem pendingin yang stabil sehingga pembangkit mampu menjaga kontinuitas suplai energi listrik secara andal dan berkelanjutan.

2.1.3.5 Evaluasi Efektivitas Pemeliharaan terhadap Keandalan Sistem

Evaluasi efektivitas pemeliharaan merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa strategi pemeliharaan yang diterapkan benar-benar mampu meningkatkan keandalan sistem dan mendukung kinerja operasional pembangkit. Dalam konteks PLTA Tulungagung, evaluasi ini berfungsi untuk menilai sejauh mana sistem pemeliharaan baik *Preventif*, *Prediktif*, dan *Korektif* dapat menjaga stabilitas sistem pendingin dan mencegah terjadinya gangguan yang tidak diinginkan. Kegiatan evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil kinerja aktual sistem dengan target keandalan yang telah ditetapkan, seperti kestabilan suhu operasi, penurunan frekuensi kerusakan, serta peningkatan waktu operasi tanpa gangguan.

Menurut Moubrey (1997), efektivitas pemeliharaan dapat diukur melalui beberapa indikator utama, antara lain *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Availability Ratio*. Nilai MTBF yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi lebih lama tanpa mengalami kegagalan, sedangkan nilai MTTR yang rendah menandakan bahwa proses perbaikan dilakukan dengan cepat dan efisien. Kombinasi dari kedua parameter ini menghasilkan rasio ketersediaan (*availability*) yang menjadi tolak ukur utama dalam menentukan tingkat keandalan sistem. Dengan demikian, evaluasi berbasis indikator ini membantu pihak pengelola pembangkit untuk menilai efektivitas program pemeliharaan dan menentukan area yang masih memerlukan peningkatan.

Selain indikator teknis, evaluasi efektivitas juga mencakup aspek manajerial seperti kepatuhan terhadap *Standard Operating Procedure* (SOP), ketepatan jadwal

pemeliharaan, serta efektivitas komunikasi antara tim operasional dan pemeliharaan. Menurut Dhillon (2006), pendekatan yang menggabungkan analisis teknis dan manajerial mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap performa sistem pemeliharaan. Di PLTA Tulungagung, penerapan metode ini dapat membantu memastikan bahwa seluruh aktivitas pemeliharaan, baik yang bersifat terjadwal maupun reaktif, berjalan selaras dengan tujuan peningkatan keandalan sistem pendingin.

Mean Time Between Failure (MTBF) digunakan untuk menentukan rata-rata waktu antar kerusakan CWP selama periode operasi tertentu. Nilai ini menunjukkan seberapa lama pompa dapat beroperasi tanpa mengalami gangguan. Semakin besar nilai MTBF, maka semakin andal sistem tersebut. Perhitungan dilakukan dengan membagi total waktu operasi dengan jumlah kerusakan yang terjadi selama periode pengamatan, menggunakan rumus:

$$MTBF = \frac{Total\ Waktu\ Operasi}{Jumlah\ Kerusakan}$$

Selanjutnya, *Mean Time To Repair* (MTTR) menggambarkan rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki CWP setiap kali terjadi kerusakan. Nilai ini mencerminkan efisiensi tim pemeliharaan dalam mengembalikan sistem ke kondisi normal. Perhitungan dilakukan dengan membagi total waktu perbaikan dengan jumlah perbaikan, menggunakan rumus:

$$MTTR = \frac{Total\ Waktu\ Perbaikan}{Jumlah\ Perbaikan}$$

Parameter berikutnya adalah *Availability* (A), yang menunjukkan tingkat kesiapan sistem CWP untuk beroperasi dalam kondisi andal. Nilai ini memperhitungkan kombinasi antara MTBF dan MTTR, sehingga dapat menggambarkan seberapa besar proporsi waktu sistem berada dalam kondisi

operasional dibandingkan total waktu siklus operasi dan perbaikan. Rumus yang digunakan adalah:

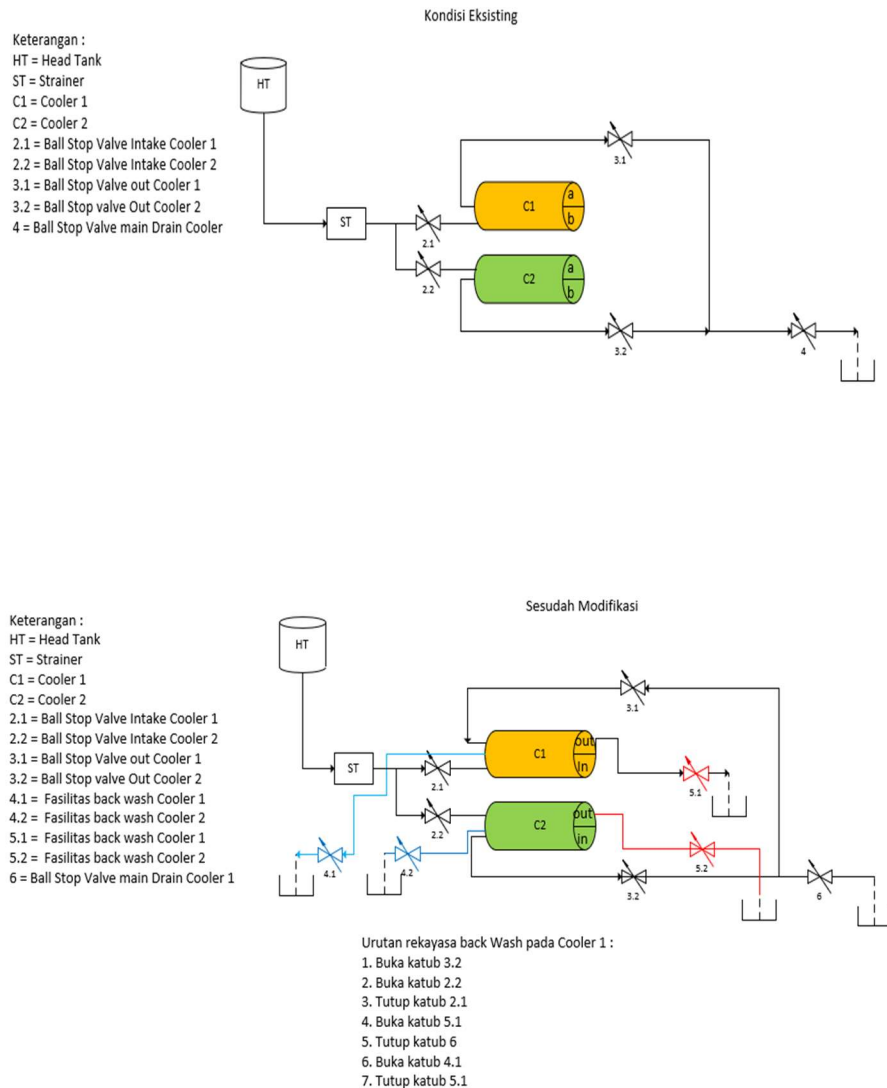
$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Selain itu, *Failure Rate* (λ) digunakan untuk menentukan laju kegagalan komponen pompa per satuan waktu. Nilai λ ini menjadi dasar dalam menentukan fungsi Reliability (R) atau tingkat keandalan sistem selama interval waktu tertentu. Fungsi keandalan ini menggambarkan probabilitas bahwa sistem CWP tidak mengalami kegagalan selama waktu operasi t, dengan persamaan:

$$Reability (R) = e^{-\lambda t}$$

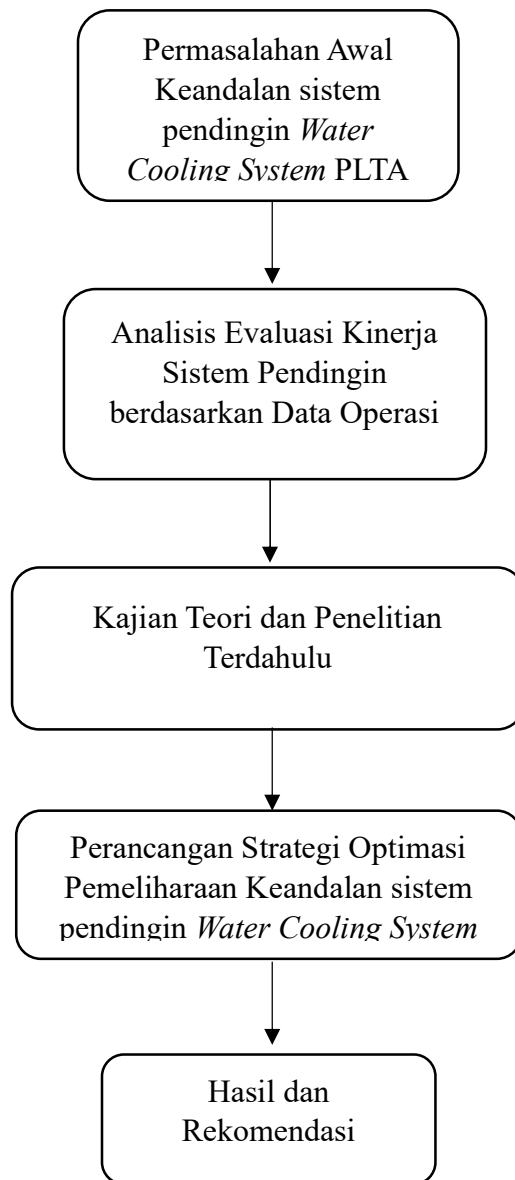
Melalui keempat parameter tersebut, kondisi keandalan sistem Cooling Water Pump dapat dievaluasi secara kuantitatif. Hasil analisis ini selanjutnya digunakan untuk menilai efektivitas strategi pemeliharaan yang diterapkan serta menentukan rekomendasi peningkatan keandalan sistem pendingin di PLTA Tulungagung.

Melalui proses evaluasi yang dilakukan secara berkala dan berbasis data, perusahaan dapat mengidentifikasi pola kerusakan berulang, menentukan langkah perbaikan yang lebih tepat sasaran, serta mengoptimalkan sumber daya yang dimiliki. Hasil dari evaluasi ini tidak hanya meningkatkan keandalan sistem pendingin, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap efisiensi operasional, penghematan biaya, dan stabilitas pasokan energi listrik. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas pemeliharaan menjadi elemen penting dalam menjaga keberlanjutan dan keandalan operasional PLTA Tulungagung sebagai bagian dari sistem tenaga listrik Jawa Timur.



Gambar 2. 9 Back Wash CWS T&LB PLTA

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 10 Kerangka Pemikiran

Penelitian ini berangkat dari permasalahan yang dihadapi pada sistem pendingin (*Cooling Water System*) di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), di mana efisiensi dan keandalan sistem menjadi faktor utama dalam menjaga kestabilan operasi unit pembangkit. Sistem pendingin berperan penting dalam menjaga suhu optimal peralatan, seperti turbin, generator, dan transformator agar tidak mengalami *overheating* yang dapat menurunkan performa dan mempercepat keausan komponen. Dalam konteks ini, pemeliharaan sistem pendingin memiliki kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan keandalan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini menitikberatkan pada penerapan strategi pemeliharaan yang tepat, yaitu melalui kombinasi metode *preventive*, *predictive*, dan *corrective maintenance* untuk memastikan kinerja optimal sistem pendingin tanpa mengganggu kontinuitas operasi pembangkit.

Berdasarkan hasil kajian pustaka dan penelitian terdahulu, diketahui bahwa penerapan pemeliharaan terencana dan prediktif dapat secara signifikan mengurangi potensi kerusakan serta meningkatkan efisiensi pendinginan. Dengan demikian, penelitian ini berupaya menyusun suatu analisis terhadap hubungan antara efektivitas pemeliharaan dan tingkat keandalan sistem pendingin pada PLTA. Secara konseptual, alur pemikiran penelitian ini dimulai dari identifikasi masalah pada sistem pendingin yang berpotensi menurunkan keandalan, dilanjutkan dengan analisis faktor-faktor penyebab dan penentuan strategi pemeliharaan yang optimal. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi teknis untuk meningkatkan performa sistem pendingin dan mendukung keberlanjutan operasi PLTA secara efisien dan andal.