

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis melakukan tinjauan terhadap sejumlah penelitian terdahulu yang relevan dengan topik optimasi sistem pendingin, analisis termodinamika, serta manajemen perawatan komponen pembangkit listrik. Tinjauan ini bertujuan untuk memetakan posisi penelitian penulis (*state of the art*) serta mengadopsi metode analisis yang teruji.

Penelitian mendasar mengenai evaluasi kinerja sistem pendingin dilakukan oleh Adelia Febrina dkk. (2022) pada turbin jenis *Francis Horizontal*. Penelitian ini menjadi referensi utama bagi penulis karena kesamaan objek studi, yaitu Turbin *Francis*. Dalam studinya, Adelia menggunakan pendekatan termodinamika untuk menghitung nilai efektivitas (ϵ) pendingin *bearing* berdasarkan data temperatur masuk dan keluar fluida. Metode ini akan penulis adopsi untuk mengukur keberhasilan modifikasi sistem *flushing* secara kuantitatif.

Pentingnya sistem pendingin terhadap performa pembangkit secara keseluruhan dibahas oleh Keumala Hayati Azizah dkk. (2021). Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa gangguan atau penurunan kinerja pada sistem pendingin utama akan berdampak langsung pada penurunan efisiensi termal unit pembangkit. Hal ini memperkuat urgensi penelitian penulis untuk menjaga keandalan *cooling water system* agar efisiensi PLTA Tonsealama tetap optimal.

Dari sisi teknis solusi, Shafa Yuniar Yasmin (2023) meneliti penerapan sistem *backwash* pada instalasi pompa sentrifugal. Yasmin membuktikan bahwa metode *backwash* efektif untuk membersihkan kotoran yang menyumbat aliran tanpa perlu membongkar peralatan secara manual. Temuan ini memvalidasi rancangan modifikasi penulis yang akan menerapkan prinsip *flushing/backwash* untuk mengatasi endapan lumpur pada pendingin *bearing*.

Aspek manajemen perawatan disoroti oleh Rozy (2020) dalam studinya mengenai *Cooling Water Strainer*. Ia menemukan bahwa penyumbatan pada saringan air pendingin merupakan penyebab dominan terjadinya *overheating*, sehingga perawatan preventif mutlak diperlukan. Penelitian ini sejalan dengan latar belakang masalah di PLTA Tonsealama yang sering mengalami gangguan akibat sampah dan lumpur.

Terakhir, penelitian terbaru oleh Bagus Adi Pratama dkk. (2023) menganalisis secara spesifik mengenai kenaikan temperatur pada *Turbine Guide Bearing* (TGB) di PLTA Maninjau. Penelitian ini sangat relevan karena membahas dampak fatal dari kenaikan suhu *bearing* (mencapai 77–78°C) yang mengharuskan dilakukannya pemeliharaan periodik maupun korektif. Pratama menekankan bahwa monitoring suhu dan tindakan perbaikan sistem pendingin sangat krusial untuk mencegah kerusakan material *bearing* dan menjaga ketersediaan unit. Hal ini mendukung hipotesis penulis bahwa modifikasi sistem *flushing* adalah langkah preventif yang tepat untuk mengendalikan temperatur *bearing*.

Tabel 2 1 Matriks Penelitian Relevan

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode & Hasil	Relevansi
1	Adelia Febrina dkk. (2022)	Analisis Sistem Pendingin <i>Bearing</i> Turbin Francis Horizontal...	Metode: Analisis termodinamika (LMTD & Efektivitas). Hasil: Efektivitas pendinginan 75,75%.	Rujukan utama metode perhitungan efektivitas <i>Heat Exchanger</i> .
2	Keumala H. Azizah dkk. (2021)	Hubungan Antara Sistem Pendingin Utama dengan Nilai Efisiensi...	Metode: Analisis korelasi efisiensi termal. Hasil: Kinerja pendingin berbanding lurus dengan efisiensi unit.	Landasan teoretis pengaruh pendingin terhadap performa unit.
3	Shafa Y. Yasmin (2023)	Sistem <i>Backwash</i> Pada Filtrasi Sistem	Metode: Eksperimen sistem <i>backwash</i> .	Validasi teknis metode <i>flushing</i> yang diusulkan penulis.

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode & Hasil	Relevansi
		Pengolahan Air Minum...	Hasil: <i>Backwash</i> efektif membersihkan sumbatan filter.	
4	Rozy (2020)	Perawatan Cooling Water Strainer PT. Indonesia Power Mrica...	Metode: Evaluasi perawatan <i>strainer</i> . Hasil: Perawatan rutin mencegah <i>trip</i> akibat suhu tinggi.	Konfirmasi bahwa isu sumbatan/sampah adalah masalah kritis.
5	Bagas A. Pratama dkk. (2023)	Analisis Kenaikan <i>Temperature</i> pada <i>Turbine Guide Bearing</i> ... PLTA Maninjau	Metode: Analisis akar masalah (<i>RCPS</i>) kenaikan suhu. Hasil: Kenaikan suhu <i>bearing</i> memerlukan perbaikan sistem pendinginan segera.	Studi kasus sejenis yang memperkuat urgensi pengendalian suhu <i>bearing</i> .

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit listrik merupakan bagian dari sistem industri energi yang dirancang untuk mengubah energi primer menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Komponen utama dalam suatu pembangkit listrik adalah generator, yaitu mesin listrik berputar yang berfungsi mengubah energi mekanis menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Energi mekanis tersebut diperoleh dari berbagai sumber energi, seperti air, uap, gas, maupun bahan bakar fosil, tergantung pada jenis pembangkit yang digunakan.

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah jenis pembangkit yang memanfaatkan energi potensial air akibat perbedaan ketinggian (*head*) untuk menghasilkan energi listrik. Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik melalui aliran air yang diarahkan ke turbin, kemudian energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanis berupa putaran poros turbin. Selanjutnya, energi mekanis dari poros turbin digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Proses konversi energi pada PLTA relatif ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang dan memanfaatkan sumber energi terbarukan.

Kinerja suatu PLTA sangat dipengaruhi oleh efisiensi setiap komponen utama dan pendukung, seperti turbin, generator, sistem transmisi mekanik, serta sistem penunjang lainnya. Turbin air yang umum digunakan pada PLTA antara lain turbin *Francis*, *Pelton*, dan *Kaplan*, yang pemilihannya disesuaikan dengan karakteristik *head* dan debit air. Turbin tipe *Francis* banyak digunakan pada PLTA dengan *head* menengah karena memiliki efisiensi yang tinggi dan rentang operasi yang luas.

Unit pembangkit PLTA umumnya terdiri dari turbin, poros, dan generator yang terhubung secara mekanis. Poros berfungsi meneruskan energi mekanis dari turbin ke generator dan ditumpu oleh *bearing*. Sehingga berperan penting dalam menopang beban aksial dan radial poros, menjaga keseimbangan putaran, serta meminimalkan gesekan selama operasi. Oleh karena itu, keandalan *bearing* sangat menentukan kontinuitas operasi unit pembangkit.

Kinerja dan umur pakai *bearing* sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem pelumasan dan sistem pendinginan. Sistem pelumasan berfungsi mengurangi gesekan antar permukaan *bearing*, sedangkan sistem pendinginan bertugas menjaga temperatur *bearing* agar tetap berada dalam batas aman operasi. Peningkatan temperatur yang berlebihan dapat menyebabkan degradasi material *bearing* tersebut, penurunan kualitas pelumas, serta berpotensi menimbulkan gangguan operasi hingga terjadinya penghentian unit pembangkit. Oleh karena itu, sistem pendingin *bearing* menjadi salah satu sistem pendukung yang memiliki peranan vital dalam menjaga keandalan dan efisiensi operasi PLTA.

2.2.2 Prinsip Dasar Sistem Pendingin dan Keseimbangan Energi

Sistem pendingin merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian suatu mesin atau peralatan industri, termasuk turbin dan generator, karena berfungsi untuk menjaga temperatur komponen agar tetap berada dalam batas operasional yang diizinkan (*nominal kerjanya*). Kegagalan dalam mengendalikan panas dapat menyebabkan *thermal stress*, penurunan kekuatan material, hingga kerusakan permanen pada peralatan.

Prinsip dasar kebutuhan pendinginan dapat dijelaskan melalui konsep keseimbangan energi atau (*heat balance*) pada mesin kalor. Dalam mesin kalor (seperti motor bakar atau turbin), energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar atau dari gesekan mekanis didistribusikan secara proporsional. Distribusi energi pada umumnya adalah sebagai berikut:

1. Hanya sekitar 25% hingga 35% dari total energi panas yang berhasil dikonversikan menjadi tenaga putar (kerja efektif).
2. Sebagian besar, sekitar 45% hingga 50%, hilang bersama gas buang, radiasi, atau gesekan mekanis.
3. Sisa energi panas, sekitar 20% hingga 30%, diserap oleh komponen mesin itu sendiri, seperti dinding silinder, kepala silinder, atau dalam kasus turbin, pada *bearing* dan *seal* oli akibat gesekan .

Panas yang diserap oleh komponen mesin ini harus segera dikeluarkan (*dikeluarkan ke udara sekeliling*) atau ditransfer ke media pendingin. Jika panas ini

tidak dikeluarkan secara efisien, akan terjadi kondisi *overheating* (kelebihan panas) yang mengakibatkan pemuaian berlebih, hilangnya sifat pelumasan oli, hingga rusaknya komponen kritis seperti *bearing*. Dengan demikian, sistem pendingin dipasang pada mesin untuk membuang panas yang diserap tersebut, menjaga integritas struktur mesin, dan menjamin efisiensi termal dan mekanis tetap tinggi.

2.2.3 Klasifikasi Sistem Pendingin Air

Sistem pendingin dapat diklasifikasikan berdasarkan media pendingin yang digunakan (udara atau air). Meskipun pendinginan udara lebih sederhana, pendinginan air (atau fluida) memiliki keunggulan, terutama pada unit berdaya besar seperti PLTA. Keuntungan pendinginan air meliputi kontrol suhu yang lebih stabil dan seragam, kemampuan meredam suara, dan efisiensi penyerapan panas yang lebih tinggi.

Pada umumnya, mesin menggunakan sistem pendingin air. Sistem pendingin air lebih sulit dan mahal daripada sistem pendingin udara, akan tetapi sistem pendinginan dengan air mempunyai beberapa keuntungan, yaitu air pendingin lebih aman sebab ruang pembakaran dikelilingi oleh air pendingin (air ditambah macam-macam aditif), yang juga berfungsi sebagai peredam suara.

Dalam skala industri dan pembangkit listrik, sistem pendingin air diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan siklus aliran media pendinginnya:

1. Sistem Pendingin Terbuka (*Open-Loop Cooling System*) Sistem pendingin terbuka (disebut juga *Once-Through Cooling System* atau Sistem Pendinginan Langsung) adalah sistem yang menggunakan air dari sumber alami hanya untuk satu kali proses pendinginan. Air pendingin diambil dari sumber (sungai, danau, atau laut) dan langsung dialirkan untuk mendinginkan komponen (misalnya oli pelumas melalui *heat exchanger*), setelah itu air pendingin tersebut langsung dibuang kembali ke lingkungan.
 - a) Mekanisme: Sistem ini paling sederhana karena air laut atau air dari danau/sungai langsung masuk untuk mendinginkan komponen, kemudian dibuang. Daya yang diperlukan untuk sirkulasi air lebih kecil karena tidak

memerlukan sirkulasi tertutup.

- b) Kelebihan: Konstruksi sederhana, biaya investasi awal yang rendah, dan media pendingin (air sumber) selalu tersedia.
- c) Kekurangan: Sistem ini sangat rentan terhadap kualitas air sumber. Jika sumber air mengandung sedimen, lumpur, atau sampah, maka akan terjadi kontaminasi, korosi, dan pembentukan kerak (*scaling*) atau pengotoran (*fouling*) pada dinding pipa dan *heat exchanger*. Hal ini berakibat pada penurunan efisiensi perpindahan panas dan memerlukan pemeliharaan rutin yang intensif, seperti *flushing* dan *backwash*.

2. Sistem Pendingin Tertutup (*Closed-Loop Cooling System*) Sistem pendingin tertutup (disebut juga *Recirculation Cooling System* atau Sistem Pendinginan Tidak Langsung) menggunakan dua media pendingin dalam dua sirkuit terpisah:

- a) Sirkuit Primer (Tertutup): Menggunakan air tawar (atau air suling/glikol) dalam siklus tertutup untuk mendinginkan bagian-bagian mesin (misalnya jaket air, oli pelumas, atau udara bilas).
- b) Sirkuit Sekunder (Terbuka/Semi-Tertutup): Menggunakan air dari sumber luar (air laut atau air menara pendingin) untuk mendinginkan air tawar di sirkuit primer melalui alat penukar kalor (*Cooler* atau *Central Heat Exchanger*).
- c) Mekanisme: Air tawar dalam sirkuit tertutup akan menyerap panas dari mesin, kemudian panas tersebut ditransfer ke air sekunder melalui *cooler*. Air tawar yang sudah didinginkan kembali bersirkulasi ke mesin.
- d) Kelebihan: Resiko korosi, kerak, dan *fouling* pada komponen mesin dapat dicegah dan dihindari karena air pendingin yang bersentuhan langsung dengan mesin adalah air tawar dengan kualitas yang dikontrol. Pengaturan suhu lebih mudah dilakukan.
- e) Kekurangan: Konstruksi sistem lebih kompleks, memerlukan biaya yang lebih tinggi, dan membutuhkan lebih banyak komponen (seperti tangki ekspansi, *cooler*, dan *cooling tower*).

Aplikasi di PLTA Tonsealama Unit 2, yang menghadapi masalah penyumbatan, mengadopsi Sistem Pendingin Terbuka. Kondisi sumber air yang rentan terhadap sedimen menjadikan sistem ini mudah mengalami *fouling* pada *cooler bearing*. Oleh karena itu, modifikasi sistem *flushing* yang memungkinkan pembersihan saluran secara *online* menjadi upaya penting untuk mengatasi kelemahan mendasar dari sistem terbuka ini dan meningkatkan keandalan unit.

2.2.4 Perhitungan Kinerja Sistem Pendingin

Analisis kinerja sistem pendingin, khususnya pada alat penukar kalor (*Heat Exchanger*), sangat penting untuk menentukan efisiensi pembuangan panas dari oli pelumas ke air pendingin. Perhitungan ini menjadi landasan untuk membandingkan performa sistem sebelum dan sesudah modifikasi sistem *flushing* diterapkan.

Parameter utama yang diukur dan dihitung untuk mengevaluasi kinerja *HE* adalah Laju Perpindahan Kalor (Q), Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (U), dan Efektivitas (ϵ).

1. Laju Perpindahan Kalor (*Heat Transfer Rate*), Q

Laju perpindahan kalor (Q) adalah besarnya energi panas yang dilepaskan oleh fluida panas (oli pelumas) dan energi yang diterima oleh fluida dingin (air pendingin) per satuan waktu. Dalam sistem pendingin, Q dihitung menggunakan persamaan kapasitas kalor fluida:

$$M \times c_p \times \Delta T \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

- Q = Laju perpindahan kalor (Watt atau J/s)
- m' = Laju aliran massa fluida (kg/s)
- c_p = Kapasitas panas spesifik fluida (J/kg K)
- ΔT = Perbedaan suhu antara fluida masuk dan keluar ($T_{in} - T_{out}$) (K atau $^{\circ}C$)

Laju perpindahan kalor yang sebenarnya terjadi (Q_{actual}) adalah nilai yang dicapai oleh HE. Nilai ini dihitung untuk fluida panas (Q_h) dan fluida dingin (Q_c). Dalam kondisi ideal, Q_h harus sama dengan Q_c . Namun, dalam praktik, nilai Q_{actual} sering dihitung sebagai nilai rata-rata dari kedua fluida atau berdasarkan fluida dengan Q terkecil.

2. *Log Mean Temperature Difference (LMTD), ΔT_{lm}*

Metode LMTD digunakan untuk menentukan perbedaan suhu rata-rata yang mendorong proses perpindahan kalor di seluruh alat penukar kalor. Karena suhu kedua fluida (panas dan dingin) terus berubah di sepanjang HE, perbedaan suhu rata-rata logaritmik lebih akurat daripada rata-rata aritmetika.

Untuk alat penukar kalor tipe aliran berlawanan (*counter-flow*), yang umum memberikan efisiensi termal tertinggi, ΔT_{lm} dihitung dengan persamaan:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} \quad (2.2)$$

Di mana:

- ΔT_{lm} = *Log Mean Temperature Difference* (K atau °C)
- ΔT_1 = $T_{h,in} - T_{c,out}$
- ΔT_2 = $T_{h,out} - T_{c,in}$
- $T_{h,in}$ = Suhu fluida panas masuk
- $T_{h,out}$ = Suhu fluida panas keluar
- $T_{c,in}$ = Suhu fluida dingin masuk
- $T_{c,out}$ = Suhu fluida dingin keluar

3. *Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (Overall Heat Transfer Coefficient), U*

Koefisien perpindahan kalor menyeluruh U menunjukkan kemampuan total alat penukar kalor dalam mentransfer panas. U mencakup konveksi di sisi fluida panas, konduksi melalui dinding pemisah, dan konveksi di sisi fluida dingin, termasuk resistansi tambahan yang disebabkan oleh fenomena *fouling* (R_f).

Setelah nilai Q dan ΔT_{lm} diketahui, nilai U dapat dihitung menggunakan persamaan dasar laju perpindahan kalor:

$$Q_{actual} = U \times A \times \Delta T_{lm} \quad (2.3)$$

Sehingga:

$$U = \frac{Q_{actua}}{A \times \Delta T_{lm}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Di mana:

- U = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh W/m^2K
- A = Luas area perpindahan panas (m^2)

Penurunan nilai U secara signifikan mengindikasikan adanya peningkatan resistansi termal, yang dalam kasus PLTA Tonsealama, disebabkan oleh akumulasi lumpur dan kotoran (*fouling*). Analisis perubahan nilai U sebelum dan sesudah *flushing* menjadi kunci untuk membuktikan efektivitas modifikasi sistem.

4. Efektivitas (ϵ) Sistem Pendingin

Efektivitas (ϵ) merupakan parameter kinerja yang paling informatif, menunjukkan seberapa baik kinerja *Heat Exchanger* dibandingkan dengan kinerja maksimum yang mungkin dicapai secara teoritis. Semakin besar nilai efektivitas (ϵ), semakin optimal kinerja perpindahan panas yang terjadi.

Efektivitas (ϵ) didefinisikan sebagai rasio antara laju perpindahan kalor yang sesungguhnya terjadi (Q_{actual}) dengan laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin terjadi ($Q_{maksimal}$):

$$\epsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{maksimal}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

Laju perpindahan kalor maksimum ($Q_{masimal}$) dihitung berdasarkan kapasitas panas fluida minimum (C_{min}) dan perbedaan suhu maksimum yang tersedia:

$$Q_{maksimal} = C_{min} \times (T_{h,in} - T_{c,in}) \dots\dots\dots(2.6)$$

Di mana C_{min} adalah nilai terkecil dari kapasitas panas fluida panas (Ch) dan fluida dingin (Cc), dengan $C = \dot{m} \times cp$

Perbandingan nilai ϵ sebelum dan sesudah modifikasi sistem *flushing* akan secara langsung mencerminkan tingkat optimasi yang berhasil dicapai dalam menjaga keandalan sistem pendingin *bearing* turbin.

Pada sistem pendingin *bearing* celup, air pendingin merupakan satu-satunya fluida yang mengalir dan berfungsi sebagai media pengambil panas. Oleh karena itu, besarnya panas aktual yang diserap oleh air dapat dinyatakan sebagai selisih temperatur air keluar dan air masuk, sedangkan panas maksimum yang mungkin terjadi dibatasi oleh selisih temperatur antara *bearing* dan air masuk.

Dengan demikian, efektivitas sistem pendingin *bearing* celup dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{T_{air\ out} - T_{air\ in}}{T_{bearing} - T_{air\ in}} \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan:

- $T_{bearing}$ = temperatur logam *bearing* atau rumah *bearing* (°C)
- $T_{air\ in}$ = temperatur air pendingin masuk (°C)
- $T_{air\ out}$ = temperatur air pendingin keluar (°C)

Rumus tersebut menunjukkan sejauh mana sistem pendingin mampu memanfaatkan perbedaan temperatur yang tersedia antara *bearing* dan air pendingin. Nilai efektivitas mendekati nol menunjukkan bahwa air pendingin hanya sedikit menyerap panas, sedangkan nilai efektivitas mendekati satu menunjukkan bahwa temperatur air keluar hampir menyamai temperatur *bearing*.

2.2.5 Sistem *Flushing* (*Backwash*) pada Sistem Pendingin

Sistem *flushing* atau *backwash* merupakan metode pemeliharaan yang digunakan untuk membersihkan endapan lumpur, partikel padat, pasir halus, serta kotoran organik yang terakumulasi di dalam saluran *fluida*, *strainer*, maupun *heat exchanger* tanpa harus menghentikan operasi sistem secara keseluruhan. Pada sistem pendingin *bearing* turbin, *flushing* berperan penting dalam menjaga kontinuitas aliran air pendingin sehingga proses perpindahan panas dari oli pelumas ke air pendingin

tetap berlangsung secara optimal.

Prinsip kerja sistem *flushing* adalah dengan mengalirkan fluida bertekanan melalui jalur khusus atau jalur *bypass* yang telah dirancang sebelumnya. Aliran fluida ini bertujuan untuk mendorong dan mengeluarkan endapan yang menempel pada dinding pipa atau menyumbat *strainer*. Dengan mekanisme ini, proses pembersihan dapat dilakukan secara *online*, yaitu pada saat mesin pembangkit masih beroperasi dan menghasilkan daya.

Pada sistem pendingin terbuka (*open loop cooling system*), seperti yang diterapkan di PLTA Tonsealama, kualitas air sumber sangat berpengaruh terhadap keandalan sistem. Air pendingin yang berasal dari Daerah Aliran Sungai (DAS) Tondano membawa lumpur, sedimen, serta sampah rumah tangga yang berpotensi menyebabkan *fouling* dan penyumbatan pada saluran pendingin *bearing* turbin. Kondisi ini menyebabkan penurunan debit aliran, peningkatan kehilangan tekanan (*pressure drop*), dan berkurangnya kemampuan sistem dalam menyerap panas dari *bearing*.

Secara teknis, penerapan sistem *flushing* memberikan beberapa fungsi utama, antara lain:

- Menjaga debit aliran air pendingin tetap stabil
- Mengurangi kehilangan tekanan akibat penyumbatan
- Mencegah kenaikan temperatur *bearing* di atas batas normal
- Mempertahankan efektivitas *heat exchanger*
- Mengurangi frekuensi stop unit akibat gangguan sistem pendingin

Selain itu, *flushing* yang dilakukan secara berkala mampu menekan terjadinya *fouling* dan *scaling* pada permukaan *heat exchanger*. *Fouling* akan meningkatkan resistansi termal dan menyebabkan penurunan koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U). Dengan sistem *flushing*, resistansi ini dapat diminimalkan sehingga kinerja termal sistem pendingin tetap terjaga dalam jangka panjang.

Dari aspek manajemen pemeliharaan, sistem *flushing* mendukung penerapan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dengan mengubah pola pemeliharaan dari *offline maintenance* menjadi *online maintenance*. Hal ini berdampak langsung pada

peningkatan keandalan unit, pengurangan *downtime*, dan minimisasi kerugian produksi energi listrik akibat penghentian unit pembangkit.

2.2.6 Teori Material pada Sistem Perpipaan Pendingin

Material merupakan elemen fundamental dalam perancangan sistem perpipaan pendingin karena berhubungan langsung dengan keselamatan, keandalan, dan umur pakai sistem. Material perpipaan harus mampu menahan tekanan fluida internal, temperatur operasi, serta kondisi lingkungan kerja yang berpotensi menyebabkan korosi dan abrasi. Pada sistem pendingin *bearing* turbin PLTA Tonsealama, air pendingin mengandung lumpur, pasir halus, dan material organik yang dapat menyebabkan keausan (*erosion*) pada permukaan dalam pipa. Oleh karena itu, material yang digunakan harus memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap abrasi, serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan perawatan. Secara umum, persyaratan material untuk sistem perpipaan pendingin meliputi:

- Kekuatan mekanik yang cukup terhadap tekanan internal
- Ketahanan terhadap korosi dan abrasi
- Stabilitas dimensi terhadap perubahan temperatur
- Kemudahan proses pengelasan dan perbaikan
- Ketersediaan material dan efisiensi biaya

Baja karbon (*carbon steel*) merupakan material yang paling banyak digunakan pada sistem pendingin industri karena memiliki keseimbangan antara kekuatan, keuletan, dan biaya yang relatif ekonomis. Baja karbon juga memiliki sifat mampu las (*weldability*) yang baik, sehingga memudahkan proses instalasi maupun modifikasi sistem di lapangan.

Dalam aplikasi tekanan rendah hingga menengah, baja karbon dinilai aman apabila digunakan sesuai standar desain dan spesifikasi teknik. Ketebalan pipa menjadi faktor penting karena secara langsung memengaruhi kemampuan pipa dalam menahan tekanan fluida dan mencegah deformasi. Oleh karena itu, pemilihan material dan dimensi pipa pada sistem *flushing* harus mempertimbangkan tekanan kerja, faktor keamanan, serta kondisi operasi pembangkit.

Selain kekuatan mekanik, sifat fisik material juga menjadi pertimbangan penting dalam sistem perpipaan pendingin. Sifat seperti konduktivitas termal, koefisien muai panas, dan ketahanan terhadap perubahan temperatur berulang (*thermal cycling*) berpengaruh terhadap kestabilan dimensi pipa selama operasi jangka panjang. Pada sistem pendingin *bearing* turbin, perubahan temperatur air pendingin dapat menyebabkan pemuaian dan penyusutan material pipa, sehingga material yang digunakan harus memiliki stabilitas termal yang baik untuk mencegah terjadinya retak atau kebocoran pada sambungan.

Di lingkungan pembangkit listrik tenaga air, sistem perpipaan juga sering mengalami getaran mekanis yang berasal dari putaran turbin, aliran fluida bertekanan, serta variasi beban unit. Oleh karena itu, material perpipaan harus memiliki sifat keuletan (*ductility*) yang cukup agar mampu menyerap energi getaran tanpa mengalami kegagalan getas. Baja karbon memiliki karakteristik keuletan yang baik, sehingga mampu menahan beban dinamis dan getaran yang terjadi selama operasi normal pembangkit.

Aspek ketahanan terhadap korosi juga menjadi faktor penting dalam pemilihan material. Air pendingin yang berasal dari lingkungan terbuka mengandung oksigen terlarut dan zat-zat lain yang dapat mempercepat proses korosi. Meskipun baja karbon rentan terhadap korosi, laju korosi masih dapat dikendalikan melalui pemilihan ketebalan pipa yang sesuai, penerapan sistem drain yang baik, serta pemeliharaan rutin. Dengan pengendalian tersebut, baja karbon tetap layak digunakan sebagai material sistem perpipaan pendingin pada pembangkit listrik tenaga air.

Dari sisi standar dan keselamatan kerja, pemilihan material perpipaan juga harus mengacu pada standar teknik yang berlaku, seperti standar ASTM atau ASME, guna menjamin kesesuaian material terhadap tekanan kerja dan kondisi operasi. Penggunaan material yang sesuai standar akan mempermudah proses inspeksi, pemeliharaan, serta penggantian komponen apabila terjadi kerusakan, sehingga mendukung keberlangsungan operasi sistem pendingin secara aman dan andal.

2.2.7 Spesifikasi Material dan Kekuatan Las terhadap Tekanan 5 Bar

Pada modifikasi sistem *flushing* pendingin *bearing* turbin Unit 2 PLTA Tonsealama, material yang digunakan harus mampu menahan tekanan kerja maksimum sebesar 5 bar (0,5 MPa). Tekanan ini tergolong tekanan menengah dan masih berada dalam batas aman untuk sistem perpipaan baja karbon standar. Selain tekanan kerja, material juga harus mampu menahan beban dinamis akibat aliran fluida, getaran mesin, serta perubahan temperatur selama unit beroperasi.

Pemilihan material dan metode penyambungan yang tepat sangat penting untuk mencegah terjadinya kebocoran, kegagalan struktur, maupun gangguan keselamatan kerja. Oleh karena itu, spesifikasi material pipa dan kekuatan sambungan las perlu dianalisis secara teknis agar sistem *flushing* dapat beroperasi secara andal dalam jangka panjang.

a. Spesifikasi Material Pipa

Material pipa yang direkomendasikan adalah Baja Karbon ASTM A106 Grade B, dengan karakteristik sebagai berikut:

- Tegangan luluh (*Yield Strength*) : ± 240 Mpa
- Tegangan tarik maksimum (*Tensile Strength*) : ± 415 Mpa
- Tekanan kerja aman : > 10 bar (tergantung diameter dan tebal pipa)
- Ketahanan terhadap temperatur : hingga $\pm 400^{\circ}\text{C}$

Baja karbon ASTM A106 Grade B banyak digunakan pada sistem perpipaan industri karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, ketahanan terhadap tekanan, serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan pengelasan. Material ini juga memiliki keuletan yang cukup sehingga mampu menahan beban dinamis dan getaran yang muncul akibat operasi turbin dan aliran fluida bertekanan.

Dengan tekanan operasi sistem *flushing* sebesar 5 bar, tegangan yang terjadi pada dinding pipa masih berada jauh di bawah batas luluh material. Hal ini menunjukkan bahwa material pipa memiliki faktor keamanan yang tinggi, sehingga aman digunakan untuk sistem pendingin *bearing* turbin pada PLTA Tonsealama.

b. Kekuatan Sambungan Las

Sambungan las merupakan bagian kritis dalam sistem perpipaan karena menjadi titik konsentrasi tegangan dan berpotensi menjadi lokasi awal kegagalan apabila tidak dikerjakan dengan baik. Oleh karena itu, metode pengelasan dan pemilihan elektroda harus disesuaikan dengan jenis material dan tekanan kerja sistem.

Metode pengelasan yang digunakan pada sistem *flushing* adalah las busur listrik (*Shielded Metal Arc Welding/SMAW*) dengan elektroda tipe E6013 atau E7018, yang memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Kekuatan tarik elektroda E6013 : ± 430 Mpa
- Kekuatan tarik elektroda E7018 : ± 490 Mpa
- Cocok untuk baja karbon tekanan rendah–menengah
- Memiliki ketahanan yang baik terhadap getaran dan tekanan fluida

Elektroda E6013 dan E7018 umum digunakan pada instalasi perpipaan industri karena menghasilkan sambungan las yang kuat dan stabil. Elektroda E7018 khususnya memiliki ketahanan yang baik terhadap beban dinamis dan getaran, sehingga sesuai untuk aplikasi pada sistem pendingin pembangkit listrik.

Secara teoritis, sambungan las dengan elektroda tersebut mampu menahan tekanan jauh di atas 5 bar, selama proses pengelasan dilakukan sesuai prosedur *Welding Procedure Specification (WPS)* dan tidak terdapat cacat las seperti porositas, retak, atau undercut. Pemeriksaan visual dan penerapan prosedur pengelasan yang benar sangat diperlukan untuk menjamin kualitas sambungan.

Dengan demikian, kombinasi material pipa baja karbon dan sambungan las yang sesuai standar mampu menjamin keamanan, keandalan, dan umur pakai sistem *flushing* pada tekanan operasi 5 bar di PLTA Tonsealama.