

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Untuk menunjang penelitian ini diperlukan berbagai referensi yang berkaitan dengan performa sistem pendingin PLTU, debris filter, serta penerapan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dalam analisis aliran fluida. Beberapa penelitian dan referensi yang relevan dengan penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

Menurut Nag (2014), PLTU merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang digunakan sebagai penggerak turbin. El-Wakil (1984) menjelaskan bahwa PLTU merupakan salah satu jenis pembangkit yang paling banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban dasar (base load) karena mampu menghasilkan daya listrik dalam kapasitas besar dan beroperasi secara kontinu.

Atoni dan Mahmud (2021) meneliti pengaruh kondisi air pendingin terhadap performa kondensor pada PLTU. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kestabilan aliran air pendingin sangat berpengaruh terhadap efektivitas proses kondensasi dan efisiensi operasi pembangkit. Gangguan pada sistem sirkulasi air pendingin dapat menyebabkan penurunan performa kondensor sehingga diperlukan keandalan seluruh komponen pada *Open Cycle Cooling Water System*, termasuk debris filter.

Musrady et al. (2021) menjelaskan bahwa kondensor merupakan salah satu peralatan utama yang mempengaruhi efisiensi termal PLTU. Penurunan performa sistem pendingin akan meningkatkan tekanan kondensor dan menurunkan efisiensi siklus pembangkitan. Penelitian ini menunjukkan pentingnya menjaga kontinuitas suplai air pendingin melalui sistem penyaringan yang andal dan efektif.

Zhang et al. (2023) melakukan analisis numerik terhadap modifikasi geometri bucket menggunakan metode CFD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil bucket yang lebih hidrodinamis mampu mengurangi gaya aksial yang bekerja pada bucket serta meningkatkan gaya tangensial yang mendukung proses rotasi bucket. Selain itu, distribusi aliran menjadi lebih seragam dan intensitas turbulensi berkurang dibandingkan desain konvensional. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi geometri bucket berpotensi meningkatkan performa hidrodinamika sistem debris filter.

Patankar (1980) dalam bukunya *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* menjelaskan metode *Finite Volume Method* sebagai salah satu pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam penyelesaian persamaan konservasi massa dan momentum pada simulasi aliran fluida. Metode ini menjadi dasar dalam pengembangan perangkat lunak CFD modern yang digunakan untuk menganalisis distribusi tekanan dan kecepatan pada geometri yang kompleks.

Versteeg dan Malalasekera (2007) menjelaskan bahwa metode CFD mampu memberikan prediksi karakteristik aliran, distribusi tekanan, dan fenomena turbulensi secara detail dengan tingkat akurasi yang baik. Pendekatan ini banyak digunakan dalam proses evaluasi dan optimasi desain komponen teknik karena mampu mengurangi kebutuhan pengujian eksperimental yang memerlukan biaya dan waktu yang besar.

Berdasarkan penelitian dan referensi yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa keandalan *Open Cycle Cooling Water System* memiliki peranan penting dalam menjaga performa kondensor dan efisiensi operasi PLTU. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa modifikasi geometri komponen yang berinteraksi langsung dengan aliran fluida dapat memperbaiki karakteristik aliran dan mengurangi gaya-gaya yang merugikan. Namun, kajian mengenai modifikasi geometri bucket debris filter pada *Open Cycle Cooling Water System* PLTU Nagan Raya masih belum dilakukan secara

spesifik. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh modifikasi geometri bucket debris filter menggunakan metode CFD sebagai dasar rekomendasi perbaikan desain pada PLTU Nagan Raya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

2.2.1.1 Pengertian PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas untuk menghasilkan energi listrik melalui siklus termodinamika. Sumber panas yang digunakan umumnya berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, atau gas alam yang digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap tersebut kemudian digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik.

PLTU menjadi salah satu jenis pembangkit yang banyak digunakan karena memiliki kapasitas pembangkitan yang besar, efisiensi yang relatif tinggi, serta mampu beroperasi secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan beban dasar (base load) sistem kelistrikan. Dalam operasinya, PLTU menerapkan siklus Rankine sebagai siklus kerja utama yang melibatkan proses pembangkitan uap, ekspansi uap pada turbin, kondensasi uap pada kondensor, dan pemompaan kembali air kondensat menuju boiler (Musrady et al., 2021).

2.2.1.2 Prinsip kerja PLTU

Prinsip kerja PLTU diawali dengan proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler untuk menghasilkan energi panas. Energi panas tersebut digunakan untuk mengubah air umpan (feed water) menjadi uap bertekanan tinggi. Uap yang dihasilkan kemudian dialirkan menuju turbin uap sehingga energi termal dan energi tekan uap diubah menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin.

Poros turbin dihubungkan secara langsung dengan generator sehingga energi mekanik hasil putaran turbin dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Setelah melewati turbin, uap mengalami penurunan tekanan dan temperatur kemudian masuk ke kondensor untuk dikondensasikan menjadi air. Air kondensat selanjutnya dipompa kembali menuju boiler melalui beberapa tahapan pemanasan sehingga siklus dapat berlangsung secara berulang dan kontinyu.

Keberhasilan proses kondensasi sangat dipengaruhi oleh kinerja sistem pendingin yang menyuplai air pendingin ke kondensor. Oleh karena itu, sistem pendingin memiliki peranan penting dalam menjaga efisiensi dan keandalan operasi PLTU (Atoni & Mahmud, 2021).

2.2.1.3 Komponen utama PLTU

Secara umum PLTU terdiri dari empat komponen utama yang saling terintegrasi dalam proses pembangkitan energi listrik, yaitu:

1. Boiler
Boiler berfungsi sebagai peralatan pembangkit uap yang mengubah energi panas hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi panas pada fluida kerja berupa air dan uap.
2. Turbin Uap
Turbin uap berfungsi mengubah energi termal dan energi tekanan uap menjadi energi mekanik berupa putaran poros.
3. Generator
Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran turbin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
4. Kondensor
Kondensor berfungsi mengubah uap bekas turbin menjadi air kondensat dengan memanfaatkan media pendingin. Kondensor memiliki peranan penting dalam menjaga tekanan vakum di sisi keluaran turbin sehingga efisiensi siklus pembangkitan dapat dipertahankan.

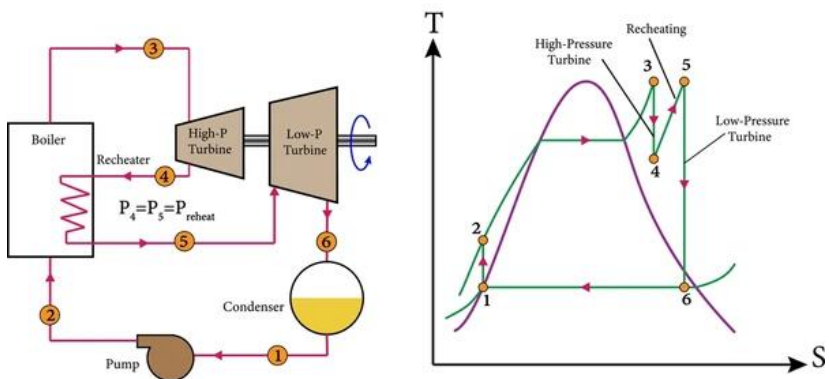
Selain komponen utama tersebut, terdapat beberapa sistem pendukung seperti sistem bahan bakar, sistem udara pembakaran, sistem air umpan, sistem pendingin (*cooling water system*), dan sistem pengolahan air yang mendukung keberlangsungan operasi PLTU.

2.2.1.4 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus termodinamika yang menjadi dasar operasi PLTU. Siklus ini terdiri dari empat proses utama, yaitu proses pemompaan air oleh pompa, proses penambahan kalor di dalam boiler, proses ekspansi uap pada turbin, dan proses pelepasan kalor di dalam kondensor.

Pada proses pertama, air kondensat dipompa sehingga tekanannya meningkat sebelum masuk ke boiler. Selanjutnya air menerima energi panas dari proses pembakaran hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut kemudian diekspansikan di dalam turbin untuk menghasilkan kerja mekanik. Setelah keluar dari turbin, uap memasuki kondensor dan melepaskan kalor ke media pendingin sehingga berubah kembali menjadi air kondensat.

Reheat Rankine cycle



Sumber :

https://www.researchgate.net/figure/deal-Reheat-Rankine-Cycle-18_fig7_348295259

Gambar 2.1 Siklus Rankine pada PLTU

Efisiensi siklus Rankine sangat dipengaruhi oleh kinerja kondensor dan sistem pendingin. Penurunan performa sistem pendingin dapat meningkatkan tekanan kondensor sehingga mengurangi efisiensi turbin dan menurunkan performa pembangkit secara keseluruhan. Oleh karena itu, keandalan sistem pendingin, termasuk debris filter yang berada pada jalur masuk air laut menuju kondensor, menjadi aspek penting dalam menjaga performa PLTU.

Analisis siklus Rankine dan performa termodinamika pembangkit banyak dibahas dalam literatur termodinamika teknik, dimana efisiensi siklus sangat dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur pada sisi boiler maupun kondensor (Çengel & Boles, 2019; Moran et al., 2018).

2.2.2 Kondensor

2.2.2.1 Pengertian Kondensor

Menurut Çengel dan Boles (2019), kondensor berfungsi sebagai alat penukar kalor yang melepaskan energi panas dari uap bekas turbin ke media pendingin sehingga uap dapat berubah fase menjadi cairan. Moran et al. (2018) menjelaskan bahwa keberhasilan proses kondensasi berpengaruh langsung terhadap efisiensi siklus Rankine secara keseluruhan. Proses kondensasi dilakukan dengan cara melepaskan kalor dari uap ke media pendingin yang mengalir di dalam pipa-pipa kondensor. Air kondensat yang dihasilkan kemudian digunakan kembali sebagai air umpan (*feed water*) pada siklus pembangkitan sehingga membentuk suatu siklus tertutup (Musrady et al., 2021).



Gambar 2.2 Kondensor pada PLTU

Kondensor memiliki peranan penting dalam menjaga tekanan vakum pada sisi keluaran turbin. Semakin rendah tekanan di dalam kondensor, semakin besar energi yang dapat diekstraksi oleh turbin sehingga efisiensi pembangkitan dapat meningkat. Oleh karena itu, performa kondensor sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan keandalan operasi PLTU secara keseluruhan.

2.2.2.2 Prinsip Kerja Kondensor

Prinsip kerja kondensor didasarkan pada proses perpindahan panas antara uap bekas turbin dengan media pendingin. Uap yang keluar dari turbin memasuki ruang kondensor dan bersentuhan secara tidak langsung dengan pipa-pipa yang dialiri air pendingin. Kalor dari uap berpindah menuju air pendingin sehingga temperatur uap menurun dan berubah fase menjadi air kondensat.

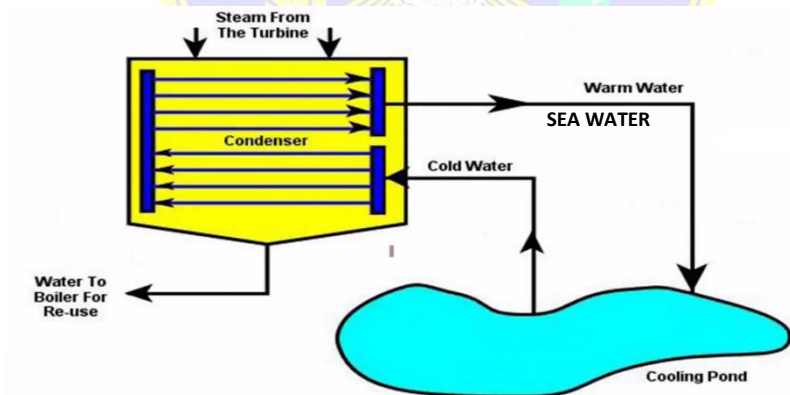
Air pendingin yang digunakan pada PLTU umumnya berasal dari laut, sungai, atau sumber air lainnya yang dialirkan secara kontinu melalui sistem pendingin. Efektivitas proses kondensasi sangat dipengaruhi oleh temperatur, debit aliran, dan kebersihan media pendingin yang digunakan. Apabila

suplai air pendingin terganggu, maka kemampuan kondensor dalam melepaskan kalor akan menurun sehingga tekanan kondensor meningkat dan efisiensi siklus pembangkitan berkurang (Atoni & Mahmud, 2021).

2.2.2.3 Kondensor Sebagai Sistem Pendingin

Kinerja kondensor sangat bergantung pada keberadaan sistem pendingin yang berfungsi menyuplai air pendingin dalam jumlah yang cukup dan berkesinambungan. Pada PLTU yang menggunakan air laut sebagai media pendingin, air dialirkan melalui *Open Cycle Cooling Water System* sebelum memasuki kondensor.

Dalam sistem tersebut, debris filter berfungsi sebagai penyaring terakhir untuk mencegah masuknya sampah, organisme laut, dan material asing lainnya ke dalam kondensor. Apabila debris filter mengalami penyumbatan atau hambatan aliran yang tinggi, debit air pendingin menuju kondensor dapat berkurang sehingga proses perpindahan panas menjadi kurang optimal. Kondisi ini dapat meningkatkan tekanan kondensor dan menurunkan performa pembangkit.



Sumber:

<https://www.ephf.ca/condenser>
Gambar 2.3 Sistem Kerja Kondensor

Oleh karena itu, keandalan debris filter dan komponen-komponennya memiliki hubungan tidak langsung namun sangat penting terhadap kinerja kondensor. Upaya perbaikan desain pada debris filter diharapkan mampu menjaga kontinuitas aliran air pendingin sehingga mendukung operasi kondensor secara optimal.

2.2.3 Open Cycle Cooling Water System

2.2.3.1 Pengertian Open Cycle Cooling Water System

Open Cycle Cooling Water System merupakan sistem pendingin yang menggunakan air dari sumber alami, seperti laut, sungai, atau danau, sebagai media pendingin dan mengembalikannya kembali ke lingkungan setelah digunakan. Pada PLTU yang berlokasi di wilayah pesisir, air laut umumnya dimanfaatkan sebagai media pendingin utama karena tersedia dalam jumlah besar dan mampu menyerap kalor secara efektif.

Sistem pendingin ini berfungsi untuk menyerap kalor yang dilepaskan oleh uap bekas turbin di dalam kondensor. Air pendingin dialirkan secara kontinu menggunakan *Circulating Water Pump* (CWP) menuju kondensor, kemudian dibuang kembali ke laut setelah mengalami kenaikan temperatur. Karena menggunakan air laut secara langsung, sistem ini rentan terhadap masuknya sampah, organisme laut, dan material asing lainnya yang dapat mengganggu operasi peralatan.

Dalam sistem aliran fluida, hambatan aliran akan menyebabkan kehilangan energi yang ditunjukkan oleh penurunan tekanan sepanjang jalur aliran (*pressure loss*). Kehilangan tekanan tersebut dipengaruhi oleh kecepatan aliran, karakteristik fluida, serta geometri saluran yang dilalui fluida (White, 2016)

2.2.3.2 Komponen Open Cycle Cooling Water System

Secara umum, *Open Cycle Cooling Water System* terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara

terintegrasi untuk menjamin kontinuitas suplai air pendingin ke kondensor, yaitu:

1. *Sea Water Intake Canal*
Berfungsi sebagai titik pengambilan air laut yang akan digunakan sebagai media pendingin.
2. *Travelling Bar Screen (TBS)*
Digunakan untuk menyaring sampah berukuran besar seperti kayu, plastik, dan organisme laut sebelum memasuki sistem pendingin.
3. *Circulating Water Pump (CWP)*
Berfungsi memompa air pendingin dari saluran masuk menuju kondensor dengan debit yang sesuai kebutuhan operasi.
4. *Debris Filter*
Merupakan penyaring terakhir sebelum air pendingin memasuki kondensor. Debris filter berfungsi menangkap material asing yang masih lolos dari sistem penyaringan sebelumnya.
5. *Kondensor*
Berfungsi sebagai tempat terjadinya proses perpindahan panas antara uap bekas turbin dan air pendingin.
6. *Discharge Canal*
Berfungsi mengalirkan kembali air pendingin menuju laut setelah digunakan pada proses kondensasi.

Dalam bidang teknik kelistrikan, satuan yang paling sering digunakan adalah Celcius ($^{\circ}\text{C}$) dan Kelvin (K), karena keduanya lebih sesuai untuk analisis ilmiah dan teknis.

2.2.3.3 Debris Filter dalam Open Cycle Cooling Water System

Debris filter merupakan salah satu komponen penting dalam *Open Cycle Cooling Water System* karena berfungsi sebagai perlindungan terakhir sebelum air pendingin memasuki kondensor. Material asing yang tidak tersaring oleh travelling screen masih berpotensi terbawa aliran menuju kondensor dan menyebabkan penyumbatan maupun kerusakan pada pipa-pipa kondensor.



Gambar 2.4 Debris Filter

Untuk mencegah kondisi tersebut, debris filter dilengkapi dengan sistem backwash yang berfungsi membersihkan saringan secara berkala. Sistem ini memanfaatkan perbedaan tekanan untuk menghisap sampah yang menempel pada permukaan saringan dan membuangnya menuju saluran pembuangan. Keberhasilan proses backwash sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran yang terjadi di sekitar bucket debris filter.

2.2.3.4 Dampak Hambatan Aliran terhadap Sistem Pendingin

Hambatan aliran yang terjadi pada debris filter dapat menyebabkan peningkatan differential pressure antara sisi masuk dan sisi keluar sistem. Kondisi ini menunjukkan

adanya penurunan kemampuan aliran untuk melewati media penyaringan sehingga debit air pendingin menuju kondensor berpotensi berkurang.

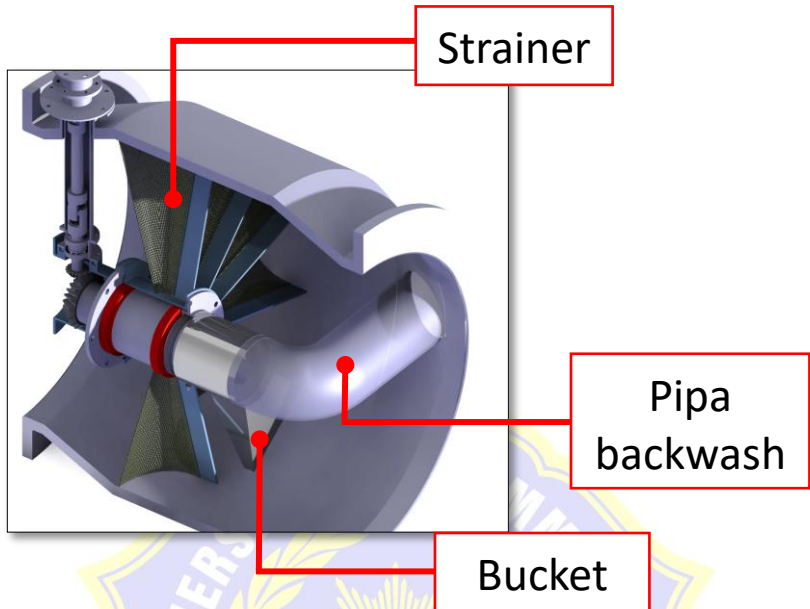
Peningkatan hambatan aliran tidak hanya berdampak pada penurunan performa sistem pendingin, tetapi juga dapat meningkatkan beban kerja pompa dan memperbesar gaya hidrodinamika yang bekerja pada komponen debris filter. Pada kondisi yang lebih serius, gangguan aliran dapat menyebabkan penurunan kapasitas pembangkit (derating) dan meningkatkan risiko gangguan operasi unit.

Oleh karena itu, diperlukan desain debris filter yang mampu menghasilkan karakteristik aliran yang baik dengan rugi-rugi aliran yang minimal. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melalui modifikasi geometri bucket untuk memperbaiki distribusi aliran dan mengurangi turbulensi di sekitar debris filter.

2.2.4 Debris Filter

2.2.4.1 Pengertian dan Fungsi Debris Filter

Debris filter merupakan peralatan penyaringan yang dipasang pada jalur aliran air pendingin sebelum memasuki kondensor. Peralatan ini berfungsi sebagai penyaring terakhir (*final filtration*) untuk mencegah masuknya sampah, organisme laut, dan material asing lainnya yang dapat menyebabkan penyumbatan maupun kerusakan pada sistem kondensor. Pada PLTU yang menggunakan air laut sebagai media pendingin, debris filter memiliki peranan penting karena karakteristik air laut yang mengandung berbagai jenis material tersuspensi dan organisme hidup.



Gambar 2.5 Bagian Utama Debris Filter

Selain melindungi kondensor, debris filter juga berfungsi menjaga kontinuitas aliran air pendingin sehingga proses perpindahan panas dapat berlangsung secara optimal. Kinerja debris filter yang baik akan membantu mempertahankan kapasitas aliran air pendingin dan mengurangi risiko gangguan operasi pada sistem pendingin..

2.2.4.2 Sistem *Backwash*

Debris filter dilengkapi dengan sistem *backwash* yang berfungsi membersihkan permukaan saringan secara berkala tanpa menghentikan operasi unit. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan tekanan antara sisi masuk dan sisi keluar debris filter untuk menghasilkan aliran hisap pada saluran *backwash*.

Saat bucket bergerak melewati area tertentu, aliran bertekanan rendah pada saluran *backwash* akan menghisap

sampah yang menempel pada permukaan saringan. Sampah yang terhisap kemudian dialirkan menuju saluran pembuangan dan dikeluarkan dari sistem. Efektivitas proses *backwash* sangat dipengaruhi oleh distribusi tekanan dan pola aliran yang terjadi di sekitar bucket debris filter.

Apabila sistem *backwash* tidak bekerja secara optimal, sampah akan terus menumpuk pada permukaan saringan sehingga meningkatkan hambatan aliran dan menyebabkan kenaikan differential pressure pada debris filter.

2.2.4.3 Permasalahan Operasional Debris Filter

Dalam operasinya, debris filter menghadapi berbagai permasalahan yang disebabkan oleh kondisi lingkungan dan karakteristik aliran fluida. Salah satu permasalahan yang paling sering terjadi adalah penumpukan sampah pada permukaan saringan yang mengakibatkan peningkatan hambatan aliran.

Peningkatan hambatan aliran ditandai dengan naiknya nilai differential pressure antara sisi masuk dan sisi keluar debris filter. Nilai differential pressure yang tinggi menunjukkan bahwa aliran air pendingin mengalami kesulitan melewati media penyaringan sehingga kapasitas aliran menuju kondensor dapat berkurang.

Selain masalah penyumbatan, komponen debris filter juga mengalami beban hidrodinamika yang cukup besar akibat interaksi langsung dengan aliran air laut. Distribusi tekanan yang tidak merata dan turbulensi yang tinggi dapat menyebabkan meningkatnya gaya yang bekerja pada komponen bucket. Dalam jangka panjang kondisi ini berpotensi menyebabkan deformasi, keausan, maupun kerusakan mekanis pada sistem debris filter.

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa desain geometris komponen debris filter memiliki peranan penting terhadap performa sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi dan pengembangan desain yang mampu menghasilkan karakteristik aliran yang lebih baik sehingga

dapat mengurangi hambatan aliran dan meningkatkan keandalan operasi debris filter.

2.2.5 Bucket Debris Filter

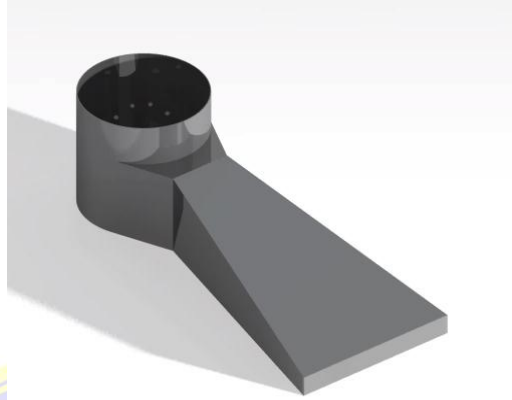
2.2.5.1 Fungsi Bucket

Bucket merupakan salah satu komponen utama pada debris filter yang berfungsi sebagai media pendukung proses pembersihan saringan (screen) melalui sistem backwash. Bucket bergerak secara rotasi mengikuti mekanisme debris filter dan berinteraksi langsung dengan aliran fluida yang melewati sistem penyaringan. Pada saat bucket berada pada posisi backwash, perbedaan tekanan yang terjadi akan menghasilkan gaya hisap yang membantu mengangkat dan membuang material asing yang menempel pada permukaan saringan.

Selain berperan dalam proses pembersihan, bucket juga berfungsi mengarahkan aliran fluida pada area tertentu sehingga distribusi tekanan dan karakteristik aliran di sekitar debris filter sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri bucket yang digunakan. Oleh karena itu, desain bucket memiliki peranan penting terhadap efektivitas sistem *backwash* dan performa debris filter secara keseluruhan.

2.2.5.2 Geometri Bucket Standar

Pada umumnya bucket debris filter menggunakan geometri berbentuk baji (*wedge-shaped bucket*) dengan permukaan relatif datar. Desain ini dipilih karena sederhana dan mudah diproduksi, namun memiliki beberapa keterbatasan dari sisi hidrodinamika.



Gambar 2.6 Bucket Debris Filter Standart

Ketika aliran fluida melewati permukaan bucket yang relatif datar, terjadi perubahan arah aliran secara mendadak yang dapat memicu terbentuknya daerah turbulensi dan aliran resirkulasi (*flow recirculation*). Kondisi tersebut menyebabkan distribusi tekanan menjadi tidak merata dan meningkatkan rugi-rugi aliran (*head loss*) pada sistem. Selain itu, gaya fluida yang bekerja pada bucket menjadi lebih besar sehingga berpotensi meningkatkan beban mekanis pada komponen debris filter.

Dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat mempercepat terjadinya deformasi, keausan, maupun kerusakan pada bucket yang berdampak pada menurunnya keandalan operasi debris filter.

Karakteristik geometri suatu komponen yang berinteraksi dengan aliran fluida memiliki pengaruh langsung terhadap pola aliran, distribusi tekanan, dan rugi-rugi energi yang terjadi dalam sistem (Fox et al., 2015; Munson et al., 2013).

2.2.5.3 Kerusakan yang Sering Terjadi pada Bucket

Dalam operasinya, bucket debris filter menerima beban hidrodinamika akibat interaksi langsung dengan aliran air laut serta beban mekanis yang timbul selama proses rotasi dan backwash. Kondisi tersebut menyebabkan bucket rentan mengalami kerusakan yang dapat mempengaruhi kinerja debris filter secara keseluruhan.

Pada operasional PLTU Nagan Raya, indikasi awal terjadinya gangguan pada debris filter umumnya ditunjukkan oleh meningkatnya nilai *differential pressure* (DP) yang terpantau di *Central Control Room* (CCR). Kenaikan DP menunjukkan adanya peningkatan hambatan aliran pada debris filter sehingga diperlukan pemeriksaan lebih lanjut terhadap kondisi peralatan di lapangan.

Berdasarkan hasil pemeriksaan lapangan, ditemukan bahwa bucket debris filter pada beberapa kondisi mengalami hambatan gerak sehingga putarannya menjadi lebih berat atau bahkan tidak dapat berputar sama sekali. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembersihan saringan (*backwash*) tidak berlangsung secara optimal sehingga sampah dan material asing berpotensi terakumulasi pada permukaan screen. Akumulasi debris yang terus meningkat dapat memperbesar hambatan aliran dan menyebabkan kenaikan DP yang lebih signifikan.

Untuk mengatasi kondisi tersebut, sering kali diperlukan tindakan pemeliharaan yang dapat berupa derating unit, *Maintenance Outage* (MO), maupun *Force Outage* (FO) sesuai tingkat keparahan gangguan yang terjadi. Pada saat pelaksanaan inspeksi selama kegiatan pemeliharaan, ditemukan adanya bekas gesekan antara bucket dan strainer pada beberapa bagian debris filter. Temuan tersebut mengindikasikan adanya kontak mekanis yang dapat menyebabkan peningkatan hambatan gerak bucket selama operasi.



Gambar 2.7 Ditemukan adanya bekas gesekan bucket pada ujung strainer

Selain menyebabkan gangguan pergerakan bucket, kontak mekanis dan distribusi gaya fluida yang tidak merata juga berpotensi mengakibatkan deformasi pada bucket. Perubahan geometri bucket dapat mempengaruhi karakteristik aliran di sekitar debris filter, meningkatkan turbulensi, serta menurunkan efektivitas sistem backwash. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap distribusi tekanan dan gaya hidrodinamika yang bekerja pada bucket untuk memahami pengaruh geometri terhadap kinerja dan keandalan debris filter melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).



Gambar 2.8 Ditemukan tumpukan sampah pada strainer

2.2.5.4 Modifikasi Geometri Bucket

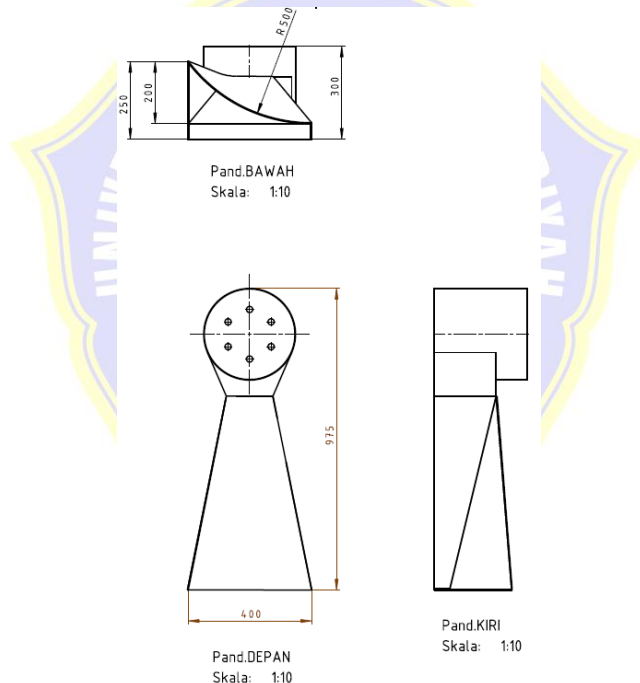
Geometri bucket merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi karakteristik aliran fluida dan distribusi gaya yang bekerja pada debris filter. Bentuk bucket yang kurang hidrodinamis dapat menyebabkan distribusi tekanan yang tidak merata, meningkatkan turbulensi, serta menghasilkan gaya hidrodinamika yang lebih besar pada komponen. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut berpotensi mempengaruhi keandalan operasi debris filter.

Berdasarkan permasalahan yang ditemukan pada debris filter PLTU Nagan Raya, diperlukan kajian terhadap alternatif desain bucket yang mampu menghasilkan karakteristik aliran yang lebih baik dibandingkan desain eksisting. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan memodifikasi geometri bucket dari profil baji datar menjadi profil lengkung (curved profile). Perubahan geometri ini diharapkan dapat mengarahkan aliran fluida secara lebih halus sehingga mengurangi daerah turbulensi dan memperbaiki distribusi tekanan di sekitar bucket.

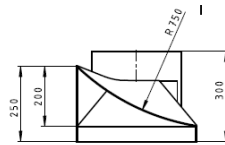
Pada penelitian ini, modifikasi geometri dilakukan dengan menggunakan dua variasi radius kelengkungan, yaitu $R=500$

mm dan $R=700$ mm. Kedua variasi tersebut dibandingkan dengan bucket standar untuk mengevaluasi pengaruh perubahan geometri terhadap distribusi kecepatan, distribusi tekanan, pola aliran, turbulensi, serta gaya hidrodinamika yang bekerja pada bucket.

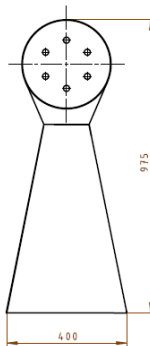
Evaluasi dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sehingga karakteristik aliran pada masing-masing desain dapat dianalisis secara numerik. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi bucket yang paling sesuai untuk direkomendasikan sebagai alternatif perbaikan debris filter pada PLTU Nagan Raya.



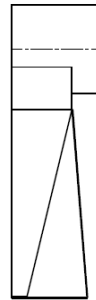
Gambar 2.9 Geometri Bucket Modifikasi $R=500$ mm



Pand.BAWAH
Skala: 1:10



Pand.DEPAN
Skala: 1:10



Pand.KIRI
Skala: 1:10

Gambar 2.10 Geometri Bucket Modifikasi R=700 mm

2.2.6 Differential Pressure

2.2.6.1 Pengertian Differential Pressure

Differential Pressure (DP) merupakan selisih tekanan antara sisi masuk (inlet) dan sisi keluar (outlet) suatu sistem aliran fluida. Pada debris filter, nilai DP digunakan untuk menunjukkan besarnya hambatan aliran yang terjadi ketika air laut melewati media penyaringan. Semakin besar nilai DP, semakin besar pula kehilangan tekanan (*pressure loss*) yang terjadi akibat hambatan aliran pada sistem.

Secara matematis, *differential pressure* dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

dimana:

ΔP = Differential Pressure (Pa)

P_{in} = Tekanan pada sisi masuk (inlet) (Pa)

P_{out} = Tekanan pada sisi keluar (outlet) (Pa)

Nilai DP merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk memantau kondisi operasional debris filter karena dapat memberikan indikasi awal terhadap adanya gangguan aliran maupun penyumbatan pada sistem.

Dalam mekanika fluida, perbedaan tekanan antar dua titik aliran sering digunakan sebagai indikator kehilangan energi akibat gesekan maupun hambatan aliran yang terjadi pada suatu sistem (Streeter et al., 1998).

2.2.6.2 Faktor yang Mempengaruhi Differential Pressure

Besarnya differential pressure pada debris filter dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Akumulasi Sampah dan Material Asing
Sampah yang menempel pada permukaan screen akan memperkecil luas penampang aliran sehingga meningkatkan hambatan fluida yang melewati debris filter.
2. Efektivitas Sistem *Backwash*
Sistem backwash yang tidak bekerja secara optimal dapat menyebabkan penumpukan debris pada screen sehingga nilai DP meningkat secara bertahap selama operasi.
3. Karakteristik Geometri Komponen
Bentuk geometri bucket dan komponen internal debris filter mempengaruhi pola aliran, distribusi tekanan, dan rugi-rugi aliran yang terjadi pada sistem.
4. Debit Aliran Air Pendingin

Peningkatan debit aliran akan meningkatkan kecepatan fluida yang melewati debris filter sehingga berpotensi meningkatkan kehilangan tekanan.

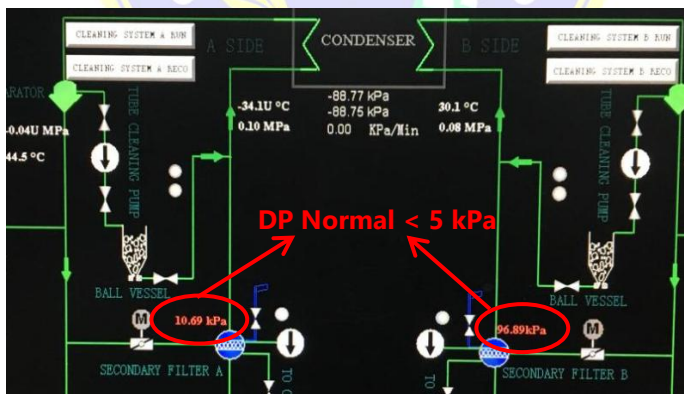
5. Tingkat Turbulensi Aliran

Aliran yang mengalami turbulensi tinggi akan menghasilkan rugi-rugi energi yang lebih besar dibandingkan aliran yang lebih teratur (streamline flow).

2.2.6.3 Dampak *Differential Pressure* terhadap Operasi Debris Filter

Differential pressure merupakan salah satu indikator utama yang digunakan untuk memantau kondisi operasional debris filter. Pada PLTU Nagan Raya, peningkatan nilai DP menjadi salah satu indikasi awal adanya gangguan pada sistem debris filter yang dapat terpantau oleh operator melalui *Central Control Room* (CCR).

Kenaikan DP menunjukkan bahwa hambatan aliran pada debris filter semakin besar sehingga kapasitas aliran air laut menuju kondensor dapat berkurang. Kondisi ini umumnya berkaitan dengan penumpukan sampah pada screen, menurunnya efektivitas sistem *backwash*, atau adanya gangguan mekanis yang mempengaruhi kinerja debris filter.



Gambar 2.11 DP Debris Filter

Berdasarkan hasil pemeriksaan lapangan, peningkatan DP pada beberapa kondisi operasi diikuti dengan ditemukannya bucket yang mengalami hambatan gerak atau tidak dapat berputar secara normal. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembersihan screen menjadi kurang efektif sehingga akumulasi debris semakin meningkat dan nilai DP terus bertambah.

Apabila kenaikan DP tidak segera ditangani, kondisi ini dapat menyebabkan penurunan performa sistem pendingin, meningkatkan risiko derating unit, serta memerlukan tindakan pemeliharaan berupa *Maintenance Outage* (MO) maupun *Force Outage* (FO). Oleh karena itu, pengendalian nilai DP menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga keandalan operasi debris filter dan sistem pendingin secara keseluruhan.

2.2.7 Gaya Hidrodinamika pada Bucket

2.2.7.1 Gaya Hidrodinamika

Gaya hidrodinamika merupakan gaya yang timbul akibat interaksi antara fluida yang mengalir dengan suatu permukaan atau benda yang berada di dalam aliran. Ketika fluida melewati suatu komponen, distribusi tekanan dan gesekan fluida pada permukaan komponen akan menghasilkan gaya yang bekerja pada benda tersebut. Besarnya gaya yang timbul dipengaruhi oleh kecepatan aliran, sifat fluida, luas permukaan, serta bentuk geometri komponen yang berinteraksi dengan fluida (White, 2016).

Pada debris filter, bucket merupakan salah satu komponen yang menerima pengaruh langsung dari aliran air laut. Distribusi tekanan yang terjadi pada permukaan bucket akan menghasilkan gaya hidrodinamika yang mempengaruhi pergerakan bucket dan kinerja sistem backwash. Oleh karena itu, analisis gaya hidrodinamika menjadi penting untuk mengevaluasi pengaruh geometri bucket terhadap karakteristik aliran dan keandalan operasi debris filter.

2.2.7.2 Gaya Aksial (*Axial Force*)

Gaya aksial merupakan komponen gaya yang bekerja sejajar dengan arah utama aliran fluida. Pada bucket debris filter, gaya aksial timbul akibat perbedaan tekanan antara sisi depan dan sisi belakang bucket yang berinteraksi dengan aliran air laut.

Besarnya gaya aksial dipengaruhi oleh distribusi tekanan pada permukaan bucket. Apabila gaya aksial yang bekerja terlalu besar, maka bucket berpotensi mengalami deformasi, defleksi, maupun peningkatan beban mekanis pada sistem penggerakannya. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat mempengaruhi keandalan operasi debris filter dan meningkatkan risiko terjadinya gangguan mekanis.

Oleh karena itu, salah satu tujuan modifikasi geometri bucket adalah mengurangi gaya aksial yang bekerja pada bucket sehingga beban mekanis dapat diminimalkan dan umur pakai komponen menjadi lebih panjang.

2.2.7.3 Gaya Tangensial (*Tangential Force*)

Gaya tangensial merupakan komponen gaya yang bekerja searah dengan arah putaran bucket. Gaya ini berperan dalam membantu pergerakan rotasi bucket selama proses operasi dan backwash.

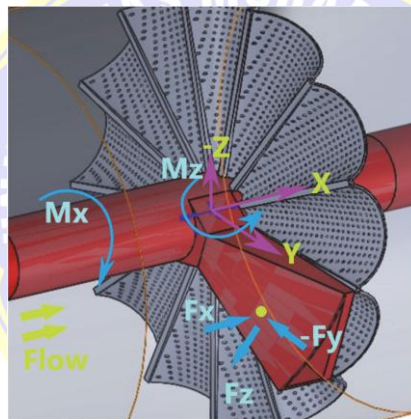
Berbeda dengan gaya aksial yang cenderung memberikan beban tambahan pada struktur bucket, peningkatan gaya tangensial umumnya memberikan efek yang menguntungkan karena dapat membantu bucket bergerak mengikuti arah rotasinya. Distribusi tekanan yang lebih baik pada permukaan bucket dapat meningkatkan komponen gaya tangensial sehingga proses pembersihan screen menjadi lebih efektif.

Dalam penelitian ini, gaya tangensial digunakan sebagai salah satu parameter evaluasi untuk menentukan pengaruh modifikasi geometri terhadap performa bucket debris filter.

2.2.7.4 Torsi pada Bucket

Torsi merupakan momen gaya yang menyebabkan suatu benda berputar terhadap sumbu tertentu. Pada bucket debris filter, torsi dihasilkan oleh gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada permukaan bucket dan memiliki jarak terhadap pusat rotasi.

Besarnya torsi dipengaruhi oleh besar gaya tangensial yang dihasilkan serta posisi gaya tersebut terhadap sumbu putar. Torsi yang lebih besar menunjukkan kecenderungan bucket untuk berputar lebih mudah mengikuti aliran fluida. Oleh karena itu, analisis torsi dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas desain bucket dalam mendukung proses rotasi dan sistem *backwash*.



Gambar 2.12 Distribusi gaya pada bucket akibat aliran air laut

Dalam simulasi CFD, nilai gaya aksial, gaya tangensial, dan torsi digunakan untuk membandingkan performa bucket standar dengan bucket hasil modifikasi sehingga dapat ditentukan desain yang paling sesuai untuk direkomendasikan pada debris filter PLTU Nagan Raya

2.2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)

2.2.8.1 Gaya Hidrodinamika

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis fenomena aliran fluida, perpindahan panas, dan proses fisis lainnya dengan menyelesaikan persamaan konservasi secara komputasi. CFD memungkinkan karakteristik aliran seperti distribusi kecepatan, distribusi tekanan, turbulensi, dan gaya yang bekerja pada suatu komponen untuk diprediksi tanpa harus melakukan pengujian eksperimental secara langsung (Patankar, 1980).

Perkembangan CFD telah memberikan kemudahan dalam proses analisis dan optimasi desain pada berbagai bidang teknik, termasuk sistem perpipaan, turbin, penukar kalor, hingga komponen penyaring seperti debris filter. Dengan menggunakan CFD, karakteristik aliran yang sulit diamati secara langsung dapat divisualisasikan dan dianalisis secara lebih rinci (Versteeg & Malalasekera, 2007).

2.2.8.2 Persamaan Dasar CFD

CFD didasarkan pada hukum konservasi yang terdiri dari konservasi massa, konservasi momentum, dan konservasi energi. Dalam penelitian ini, analisis aliran fluida dilakukan berdasarkan persamaan konservasi massa dan momentum karena fokus penelitian berada pada karakteristik aliran fluida di sekitar bucket debris filter.

Persamaan konservasi massa atau persamaan kontinuitas dapat dituliskan sebagai:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

Sedangkan persamaan konservasi momentum dinyatakan dalam bentuk Persamaan Navier-Stokes:

$$\rho(DV/Dt) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menggambarkan perilaku aliran fluida yang dipengaruhi oleh gaya tekanan, gaya viskositas, dan gaya gravitasi (Versteeg & Malalasekera, 2007).

2.2.8.3 Finite Volume Method (FVM)

Finite Volume Method (FVM) merupakan salah satu metode numerik yang paling banyak digunakan dalam perangkat lunak CFD. Metode ini bekerja dengan membagi domain komputasi menjadi sejumlah volume kontrol (*control volume*) yang lebih kecil. Persamaan konservasi kemudian diterapkan pada setiap volume kontrol sehingga diperoleh solusi numerik pada seluruh domain aliran.

Patankar (1980) menjelaskan bahwa FVM memiliki keunggulan dalam menjaga keseimbangan konservasi massa dan momentum pada setiap elemen perhitungan. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida pada geometri yang kompleks seperti debris filter.

2.2.8.4 Model Turbulensi k- ϵ

Aliran fluida yang melewati debris filter termasuk dalam kategori aliran turbulen karena memiliki bilangan Reynolds yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan model turbulensi untuk memprediksi karakteristik aliran secara numerik.

Salah satu model turbulensi yang paling banyak digunakan adalah model standar k- ϵ yang dikembangkan oleh Launder dan Spalding (1974). Model ini menggunakan dua persamaan transport, yaitu energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ϵ), untuk menggambarkan perilaku aliran turbulen.

Model k- ϵ dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang baik dengan kebutuhan komputasi yang relatif rendah dibandingkan model turbulensi yang lebih kompleks (Wilcox, 2006). Selain itu, model ini banyak digunakan dalam simulasi aliran pada aplikasi teknik dan industri.

2.2.8.5 Meshing Turbulensi k- ϵ

Meshing merupakan proses pembagian domain komputasi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut *mesh* atau grid. Kualitas *mesh* sangat mempengaruhi tingkat akurasi hasil simulasi CFD karena proses perhitungan numerik dilakukan pada setiap elemen *mesh*.

Semakin rapat *mesh* yang digunakan, maka semakin detail fenomena aliran yang dapat ditangkap. Namun demikian, peningkatan jumlah *mesh* juga akan meningkatkan kebutuhan waktu komputasi dan sumber daya komputer. Oleh karena itu, diperlukan pemilihan ukuran *mesh* yang sesuai untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi dan efisiensi perhitungan (Anderson, 2017).

2.2.8.6 Boundary Condition

Boundary condition merupakan kondisi batas yang digunakan untuk mendefinisikan perilaku aliran pada domain simulasi. Kondisi batas diperlukan agar perangkat lunak CFD dapat menyelesaikan persamaan aliran secara numerik.

Dalam simulasi aliran debris filter, kondisi batas yang umum digunakan meliputi:

1. *Inlet*, berupa kecepatan atau debit aliran masuk.
2. *Outlet*, berupa tekanan keluaran.
3. *Wall*, berupa permukaan padat yang berinteraksi dengan fluida.

Penentuan *boundary condition* yang tepat sangat penting karena akan mempengaruhi akurasi hasil simulasi dan representasi kondisi operasi aktual (ANSYS *Fluent Theory Guide*, 2023).

2.2.8.7 Tahapan Simulasi CFD

Secara umum proses simulasi CFD terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu:

1. *Pre-processing*
Tahap pembuatan geometri, penentuan domain fluida, proses meshing, serta penetapan parameter simulasi dan boundary condition.
2. *Solving*
Tahap penyelesaian persamaan numerik menggunakan solver CFD hingga mencapai kondisi konvergen.
3. *Post-processing*
Tahap pengolahan dan visualisasi hasil simulasi berupa distribusi tekanan, distribusi kecepatan, pola aliran, turbulensi, serta gaya yang bekerja pada bucket debris filter.

Ketiga tahapan tersebut digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi geometri bucket terhadap karakteristik aliran dan gaya hidrodinamika yang terjadi pada debris filter PLTU Nagan Raya.

