

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

1. Berdasarkan penelitian oleh (Hanan Riswandha A et al ,2022) yang berjudul **“Studi Kasus Boiler CFB: Kenaikan Temperatur Bed”** dari penelitian ini dijadikan referensi untuk dasar melakukan modifikasi *nozzle furnace*.
2. Berdasarkan jurnal oleh (E Susanto et al , 2024) yang berjudul **“Influence of Fossil Fuel Prices on Fossil and Renewable Electricity Consumptions, GDP, Inflation and Greenflation: A Case Study in the Asia Pacific Countries”** dari jurnal tersebut sebagai referensi dalam perkembangan konsumsi pembangkit listrik.
3. Berdasarkan Penelitian Oleh (Minghang Tian et al , 2024) yang berjudul **“ Simulation and Analysis of Hydrodynamic Behavior in Different Nozzles and Its Corresponding Fluidized Beds”** dari penelitian ini dijadikan referensi untuk simulation pada desain nozzle furnace PLTU CFB.
4. Berdasarkan jurnal oleh (Mustafa Metin Çam et al. 2023) yang berjudul **“Designing a new bell-type primary air nozzle for large-scale circulating fluidized bed boilers”** dari penelitian ini dijadikan referensi untuk simulation pada desain nozzle furnace PLTU CFB
5. Berdasarkan jurnal oleh (Ishan Kafle et al, 2016) yang berjudul **“ Design and Analysis of Air Distributors and Bed Materials of Fluidized Bed Boiler”** dari jurnal tersebut menjadikan referensi untuk Analisa distribusi udara menuju nozzle furnace.
6. Berdasarkan Jurnal oleh (Zhong Huang et al, 2019) yang berjudul **“ Experimental and CFD Simulation Studies on Bell-Type Air Nozzles of CFB Boilers”** jurnal tersebut menjadikan referensi untuk Analisa desain nozzle furnace.

7. Berdasarkan jurnal oleh (Ariana Dwiputra et al, 2019) yang berjudul “ **Bed Material Flow Modeling in CFB Boiler of Nagan Raya Power Plant**” jurnal tersebut sebagai referensi kondisi boiler di PLTU Nagan Raya.
8. Berdasarkan jurnal oleh (Urip Agus Salim et al, 2017) yang berjudul “**Simulation of Particle Flows of Circulating Fluidized Bed**” jurnal tersebut sebagai referensi terkait partikel di PLTU CFB.
9. Berdasarkan buku karangan (Basu P, 2017) yang berjudul “ **Combustion And Gasification In Fluidized Beds**” buku tersebut sebagai referensi terkait PLTU CFB.
10. Berdasarkan jurnal oleh(Ramos et al, 2025) yang berjudul “ **Microstructure and Mechanical Properties Evolution of Modified Nb-alloyed A297 HH Refractory Austenitic Stainless Steel after Ageing at 1000 °C**” jurnal tersebut sebagai acuan pemilihan material pada nozzle furnace.
11. Berdasarkan Paper oleh (Liu X. et al., 2021) yang berjudul “**The Innovative Design of Air Caps for Improving the Uniformity of Air Flow in Circulating Fluidized Bed Boilers**” Paper tersebut sebagai referensi distribusi udara pada nozzle furnace.
12. Berdasarkan jurnal oleh (Mauk, S.A. et al., 2025) yang berjudul “**The Influence of Operational Conditions on the Cold Test of a Bell-Type Air Cap Nozzle in A CFB Bed System**” Jurnal tersebut sebagai referensi aliran udara pada nozzle.
13. Berdasarkan Jurnal oleh (Marcos V. P. de Araújo et al., 2021) “**Study of monotonic and cyclic mechanical behavior and microstructural evolution at a high temperature of ASTM A297 HP steel modified with niobium**” Jurnal tersebut sebagai pemilihan material yang cocok berdasarkan pengujian.
14. Berdasarkan Jurnal oleh (Nurobiyanto et al,2022) “**PREDIKSI SISA UMUR PAKAI TUBE REFORMER JENIS HP MODIFIED**” Jurnal tersebut sebagai pemilihan material yang cocok berdasarkan pengujian
15. Berdasarkan Jurnal Oleh (Prihatin T et al, 2025) “**Melting dan Pengaruhnya pada Sistem Boiler Circulating Fluidized Bed**” Jurnal tersebut sebagai dasar pengaruh melting sebagai penyumbatan pada nozzle furnace.

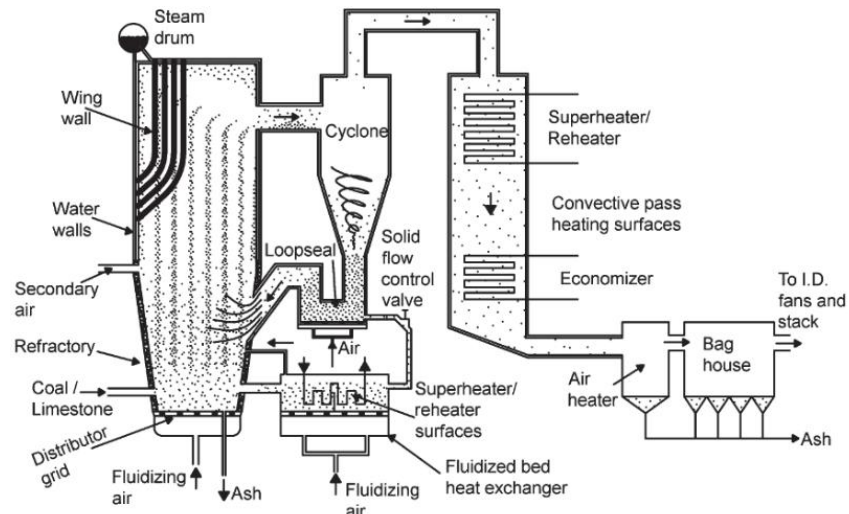
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Boiler Circulating Fluidized Bed (CFB)

PLTU boiler Circulating Fluidized Bed (CFB) pembakaran yang terjadi memanfaatkan proses fluidizing. Dengan mengalirkan sejumlah gas dengan kecepatan fluidised melalui partikel yang ditempatkan pada bed maka suspensi partikel terbentuk dan mulai bertindak seperti cairan. CFB boiler menggunakan prinsip inersia termal dari material yang sengaja dimasukkan kedalam furnace (disebut sebagai bed materials) yang biasanya berupa partikel pasir. Keberadaan material yang berupa partikel-partikel dengan kecepatan tinggi ini dapat mengakibatkan terjadinya erosi pada dinding furnace. Besaran erosi pada dinding furnace dipengaruhi oleh kecepatan dan pola aliran serta bentuk laluan partikel. Untuk menentukan perilaku dan lokasi erosi pada furnace dilakukan pemodelan dan simulasi. Pasir umumnya lebih abrasif dibanding abu di batubara. Oleh karena partikel dalam pemodelan hanya diwakili oleh pasir. Pemodelan didasarkan pada bentuk CFB yang banyak digunakan oleh PLTU di Indonesia. (Urip Agus Salim et al,2017)

Sistem CFB memungkinkan pembakaran berlangsung pada temperatur yang relatif rendah (sekitar 800–900°C) dibandingkan boiler konvensional yang bisa mencapai 1.300°C. Temperatur yang lebih rendah ini menghasilkan pembakaran yang lebih stabil, mengurangi pembentukan gas nitrogen oksida (NO_x), dan memungkinkan penggunaan bahan bakar dengan kualitas rendah seperti batu bara kalori rendah atau dicampur dengan biomassa. Proses pembakaran pada CFB dimulai dengan pengumpanan bahan bakar (batubara) dan material inersia seperti batu kapur ke dalam furnace. Udara primer dihembuskan dari bawah sehingga partikel-partikel tersebut melayang dan bercampur membentuk lapisan fluidisasi. CFB memiliki efisiensi termal yang lebih baik dibanding pembakaran konvensional karena tingkat pembakaran bahan bakar yang tinggi (>95%) dan kemampuan pemanfaatan energi sisa dari partikel tersirkulasi. Pengembangan terkini meliputi Supercritical CFB (SCCFB) yang memungkinkan tekanan dan suhu operasi tinggi untuk mencapai

efisiensi >40%. Studi ekonomi menunjukkan bahwa CFB dapat menurunkan biaya bahan bakar dan emisi total dibanding sistem pulverized coal (PC) tradisional, terutama karena kemampuannya memanfaatkan batubara dengan kadar sulfur tinggi dan kualitas rendah [Wheeldon & Thimsen, 2013]



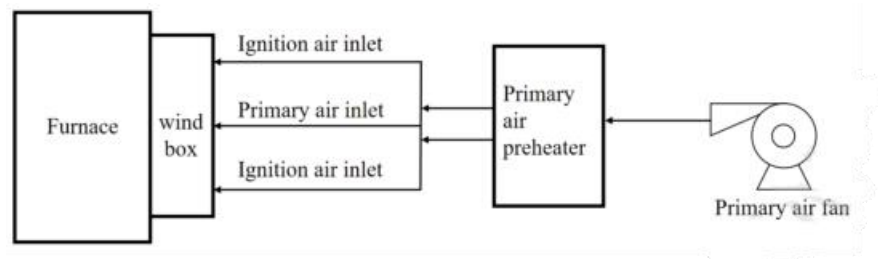
Gambar 2.1 Simulation Boiler CFB

(Sumber : Basu P, 2006)

2.2.2 *Primary Air*

Primary air adalah udara utama yang disuplai dari bawah furnace melalui nozzle atau air distributor untuk menyediakan oksigen awal bagi proses pembakaran bahan bakar, mengangkat dan mempertahankan partikel bed (abu, pasir, dan bahan bakar) agar tetap berada dalam keadaan terfluidisasi serta menjaga kestabilan temperatur bed dan proses perpindahan panas yang merata. Primary air biasanya berasal dari Primary Air Fan (PAF) yang menekan udara dari atmosfer dan memanaskannya melalui air preheater sebelum dialirkan ke furnace. Aliran udara primer dalam boiler CFB termasuk dalam kategori aliran turbulen multiphase gas–solid. Pola jet udara yang keluar dari nozzle menentukan kestabilan lapisan fluidisasi (bed). (Huang et al. 2019).

Primary air yang cukup memastikan bahan bakar dan partikel bed tetap terfluidisasi dan tercampur sempurna dengan oksigen. Hal ini menghasilkan pembakaran yang stabil dan seragam di seluruh volume furnace. Jika jumlah udara primer terlalu kecil, pembakaran tidak sempurna sehingga menurunkan efisiensi termal dan meningkatkan unburned carbon. Sebaliknya, jika terlalu besar, udara berlebih menyerap panas dari bed dan menurunkan temperatur, juga mengakibatkan heat loss pada gas buang.



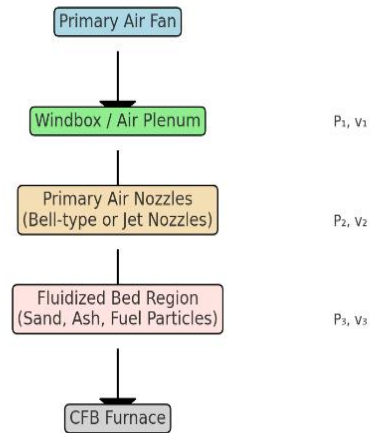
Gambar 2.2 Simulation Primary Air System

(Sumber: Jingqi Sun ,2025)

2.2.3 Wind Box

Windbox adalah ruang atau saluran distribusi udara yang terletak di bawah plat distributor (*air grid*) pada boiler CFB. Komponen ini berfungsi sebagai penampung udara bertekanan tinggi yang disuplai oleh *primary air fan* sebelum dialirkan ke furnace melalui *primary air nozzles*. elemen kunci dalam sistem pembakaran karena berperan dalam mengatur tekanan dan keseragaman distribusi udara ke seluruh area dasar furnace.(Ren et al. 2014). *Windbox* beroperasi berdasarkan prinsip distribusi tekanan konstan. Udara dari primary air fan masuk ke windbox dengan tekanan sekitar 10–30 kPa.

Schematic Diagram of Windbox–Nozzle System in CFB Boiler



Gambar 2.3 Diagram Wind Box system di Boiler CFB

Distribusi tekanan dalam windbox dapat dianalisis menggunakan persamaan kontinuitas dan Bernoulli, dengan asumsi aliran inkompresibe. menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) menunjukkan bahwa pembagian tekanan tidak seragam di windbox menjadi penyebab utama maldistribusi udara primer di furnace. (Zhang et al. 2019). Analisa *fluidodinamik windbox* :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + h_f$$

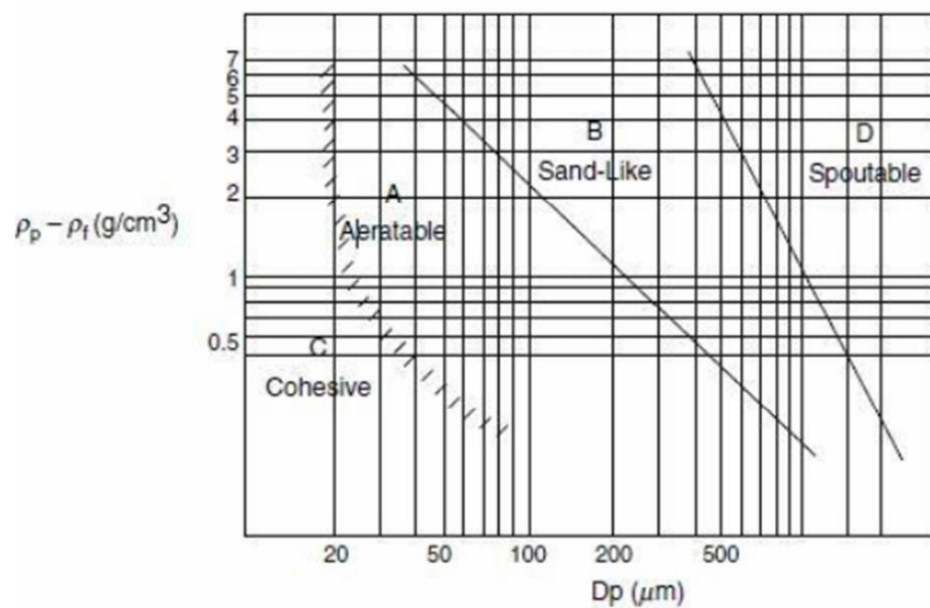
- p_1, p_2 : tekanan statik di inlet dan outlet
- v_1^2, v_2^2 : kecepatan udara
- h_f : kehilangan tekanan akibat gesekan dan turbulensi

2.2.4 Klasifikasi *Bed Material*

Proses pengelompokan atau penentuan karakteristik material padat (biasanya pasir silika, abu, atau limestone) yang digunakan sebagai bed material di boiler tipe CFB pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Klasifikasi ini

penting karena jenis dan karakteristik bed material sangat memengaruhi performa pembakaran, efisiensi boiler, serta umur nozzles. Bed material berfungsi sebagai media untuk Menjaga distribusi panas merata dalam furnace, meningkatkan efisiensi pembakaran melalui pencampuran turbulen antara bahan bakar dan udara. Material ini biasanya berupa pasir silika (SiO_2), limestone (CaCO_3), atau campuran dengan abu sisa pembakaran.

Klasifikasi dilakukan untuk menentukan ukuran partikel, komposisi kimia, dan sifat fisik bed material agar sesuai dengan desain sistem CFB. Sistem pengelompokan partikel berdasarkan Ukuran partikel (particle size, μm) dan Densitas partikel (particle density, kg/m^3). Untuk menjelaskan perilaku fluidisasi partikel padat di gas. Klasifikasi ini penting untuk menentukan apakah material akan mudah ter-fluidisasi, cenderung menggumpal, atau justru tidak bergerak di aliran gas. Ada 4 klasifikasi ukuran bed material antara lain *Aeratable*, *Sand-like*, *Cohesive*, *Spoutable*. (J. R. Howard et al. 1983)



2.4 Powder classification developed by Geldart

(Sumber : Ishan Kafle, 2016)

Tabel 2.1 *Powder classification developed by Geldart*

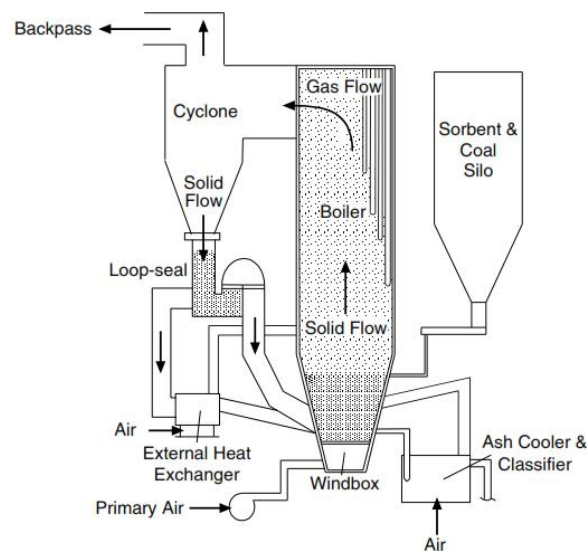
Kelas Geldart	Ukuran Partikel (μm)	Densitas (kg/m^3)	Ciri-ciri Fluidisasi	Contoh Material
Group A <i>(Aeratable)</i>	30 – 100	1,000 – 1,400	Mudah ter-fluidisasi, terjadi ekspansi bed yang baik sebelum bubbling dimulai. Cocok untuk <i>bubbling fluidized bed (BFB)</i> .	<i>FCC catalyst, fine sand, alumina</i>
Group B <i>(Sand-like)</i>	40 – 500	1,400 – 4,000	Terjadi bubbling segera setelah fluidization. Sangat stabil untuk operasi CFB.	<i>Silica sand, limestone, fly ash</i>
Group C <i>(Cohesive)</i>	< 30	-	Sulit ter-fluidisasi karena gaya kohesi antarpartikel tinggi.	<i>Fine powders, cement dust</i>
Group D <i>(Spoutable)</i>	> 600	1,400 – 4,000	Tidak mudah ter-fluidisasi, cenderung “spouting” (terlempar oleh aliran gas).	<i>Pellets, grains, coarse sand</i>

Sumber : Ishan Kafle, 2016

2.2.5 Ruang Bakar Boiler (*Furnace Boiler*)

Ruang bakar (*Furnace*) pada boiler CFB dirancang untuk menciptakan fluidisasi padatan (partikel batubara, abu, dan pasir) dalam aliran udara berkecepatan tinggi, memungkinkan pembakaran homogen pada suhu rendah (850–900°C). Suhu ini mencegah pembentukan NO_x berlebih dan

memungkinkan penyerapan SO_2 oleh batu kapur di dalam bed. Berbeda dengan PLTU konvensional (pulverized coal boiler) yang membakar batubara dalam bentuk serbuk dan nyala api langsung, pada CFB boiler, bahan bakar dibakar dalam lapisan partikel yang tersuspensi dalam aliran udara berkecepatan tinggi bercampur dengan partikel silica. Desain furnace CFB menekankan pada keseimbangan antara kecepatan udara, ukuran partikel, dan sirkulasi padatan, yang dikenal sebagai Fluidization State Specification (FSS). Prinsip ini digunakan dalam desain modern untuk memastikan efisiensi pembakaran dan perpindahan panas optimal. (Cai et al, 2018)



Gambar 2.5 Simulation Furnace CFB

(Sumber : Basu P, 2006)

2.2.6 Nozzle Furnace

Nozzle furnace adalah komponen distributor udara yang terletak di bagian dasar furnace (di atas windbox). Nozzle ini berfungsi untuk mengalirkan udara primary (*Primary Air*) ke bed material sehingga terjadi proses fluidisasi. Udara pembakaran diinjeksi ke dalam furnace pada beberapa lokasi dan

ketinggian yang berbeda. Udara primer masuk ke furnace melalui susunan nozzle (nozzle grid) yang terletak di bagian atas *wind box*. Bentuk nozzle menentukan arah aliran udara dan tekanan udara yang dihembuskan ke furnace.

Di PLTU type CFB jumlah *nozzle furnace* ada ratusan bahkan ada ribuan jumlahnya tergantung daya yang dihasilkan. Untuk menekan bed material supaya dapat bersirkulasi maka desain nozzle berbagai macam dan setiap boiler mempunyai desain masing-masing. Tingkat efisiensi boiler juga ditentukan oleh desain nozzle dan tingkat ketahanan nozzle dalam temperature tinggi dan tekanan tinggi.

Material nozzle pada furnace PLTU CFB harus mampu bekerja pada kondisi operasi yang melibatkan temperatur tinggi (850–900°C) serta paparan partikel abrasif seperti pasir silika dan abu terbang. Oleh karena itu, material yang digunakan harus memiliki ketahanan abrasi yang tinggi, stabilitas struktur pada temperatur operasi, serta ketahanan terhadap korosi kimia akibat sulfur dan klorin dalam batubara. Ada beberapa jenis material yang cocok untuk kondisi tersebut antara lain SS310 dan ASTM A297. Kedua material tersebut mempunyai karakteristik yang cocok karena mempunyai mampu menahan temperatur tinggi dan abrasif,

Nozzle Furnace juga berpengaruh terhadap efisiensi kinerja boiler. Karena sifatnya sangat vital terhadap supply dan tekanan udara di dalam ruang furnace maka pada nozzle furnace di desain agar tidak ada sumbatan atau kerusakan akibat *melting bed*. Penyumbatan nozzle distribusi udara di dasar furnace, yang dapat disebabkan oleh akumulasi partikel halus seperti abumikron ($<75\ \mu\text{m}$) atau pasir silika halus. Material halus ini dapat menumpuk dan terbawa aliran udara, masuk dan menyumbat nozzle, yang menyebabkan penurunan tekanan udara primer (primary air). Hal ini mengganggu aliran udara bawah (underbed air), yang merupakan kunci pembentukan fluidisasi sempurna, serta menyebabkan penurunan kecepatan gas (superficial velocity), dan akhirnya berkontribusi pada peningkatan suhu lokal. (Prihatin et al, 2025)

2.2.7 Pengambilan data dengan 3 Dimensi *Scanning*

3 Dimensi scanning merupakan metode akuisisi data geometri suatu objek fisik yang bertujuan untuk memperoleh model digital tiga dimensi secara akurat dan representatif. Hasil dari proses 3D scanning umumnya berupa point cloud atau mesh surface yang dapat dikonversi menjadi model Computer Aided Design (CAD) untuk keperluan analisis lebih lanjut, seperti reverse engineering, analisis numerik, dan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Dalam bidang keteknikan, metode 3D scanning banyak digunakan untuk komponen industri yang memiliki geometri kompleks. Tingkat akurasi dalam proses 3D scanning sangat kecil 0.02 – 0,1 mm. Ada beberapa metode 3D Scanning antara lain:

a. Laser Scanning

Metode laser scanning menggunakan sinar laser yang diproyeksikan ke permukaan objek. Pantulan sinar laser ditangkap oleh sensor dan digunakan untuk menghitung jarak serta koordinat permukaan. Metode ini memiliki akurasi tinggi dan mampu merekam detail geometri yang kompleks, sehingga banyak digunakan dalam reverse engineering komponen industri berbahan logam.

b. Structured Light Scanning

Structured light scanning bekerja dengan memproyeksikan pola cahaya tertentu (garis atau grid) ke permukaan objek. Distorsi pola tersebut dianalisis oleh kamera untuk menghasilkan model tiga dimensi. Metode ini relatif cepat dan memiliki resolusi tinggi, namun sensitif terhadap kondisi pencahayaan lingkungan.

c. Photogrammetry

Photogrammetry memanfaatkan kumpulan foto objek yang diambil dari berbagai sudut. Foto-foto tersebut diproses menggunakan perangkat lunak khusus untuk membentuk model 3D. Metode ini memiliki biaya relatif

rendah, namun tingkat akurasinya bergantung pada kualitas foto dan pencahayaan.

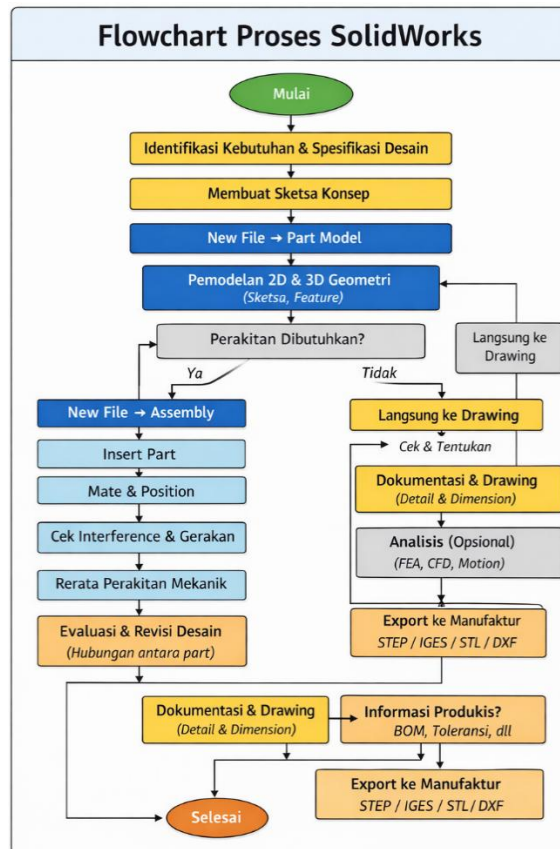
d. Contact Scanning (CMM)

Contact scanning menggunakan probe yang menyentuh langsung permukaan objek. Metode ini memiliki akurasi sangat tinggi, tetapi prosesnya lambat dan kurang efektif untuk objek dengan geometri kompleks.

2.2.8 Proses Drawing Solidwork

Solidworks merupakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) berbasis pemodelan parametrik yang dikembangkan oleh Dassault Systèmes. Salah satu teknologi digital yang penting dalam industri manufaktur adalah software SolidWorks. Ini merupakan software CAD(Computer-Aided Design) yang digunakan untuk mendesain produk 3D. Software ini sangat populer di kalangan industri manufaktur karena kemampuannya yang kuat dan mudah digunakan (Ahmad Saepuddin et al., 2023).

SolidWorks banyak digunakan dalam bidang teknik mesin, manufaktur, otomotif, dan desain produk karena kemampuannya dalam menghasilkan model teknik yang akurat dan mudah dimodifikasi. Pemodelan 3 dimensi dalam SolidWorks dimulai dengan pembuatan sketsa 2D pada bidang kerja tertentu (Front Plane, Top Plane, atau Right Plane). Sketsa tersebut kemudian dikembangkan menjadi model 3D menggunakan fitur pemodelan. Pendekatan ini memudahkan perancang dalam mengontrol dimensi dan bentuk komponen sesuai dengan kebutuhan desain. Assembly merupakan proses perakitan beberapa komponen (part) menjadi satu kesatuan sistem. Dalam Solidworks, proses assembly dilakukan menggunakan fitur Mate, seperti coincident, concentric, parallel, dan distance. Fitur ini berfungsi untuk menentukan hubungan posisi antar komponen.



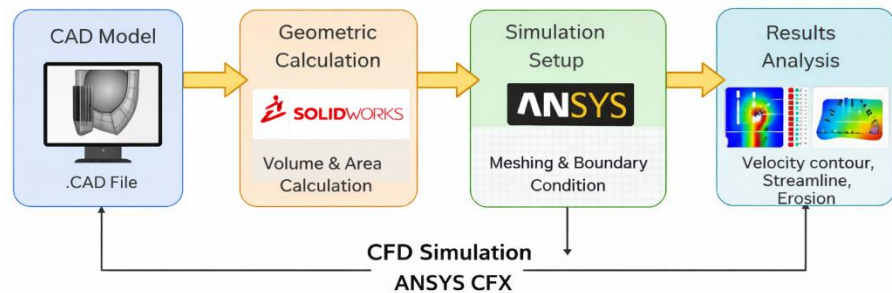
Gambar 2.6 Flowchart Proses Solidwork

(Sumber : Desain Sendiri)

Gambar teknik merupakan representasi dua dimensi dari model 3 dimensi yang berisi informasi ukuran, toleransi, dan keterangan teknis lainnya. Solidworks menyediakan fitur drawing yang memungkinkan pembuatan gambar teknik secara otomatis berdasarkan model 3 dimensi yang telah dibuat. SolidWorks berperan penting dalam proses perancangan teknik karena mampu mengintegrasikan desain, simulasi, dan dokumentasi dalam satu platform. Penggunaan Solidworks membantu meningkatkan efisiensi perancangan, mempercepat proses pengembangan produk, serta meningkatkan kualitas hasil desain.

2.2.9 Proses Simulasi Ansys

ANSYS merupakan perangkat lunak Computer Aided Engineering (CAE) yang digunakan untuk melakukan simulasi dan analisis teknik berbasis Finite Element Analysis (FEA). ANSYS banyak digunakan untuk menganalisis perilaku struktur, panas, fluida, dan dinamika sebelum suatu produk diproduksi secara nyata.



Gambar 2.7 Gambar Diagram Alur Proses Anslys

(Sumber : Dibuat Sendiri)

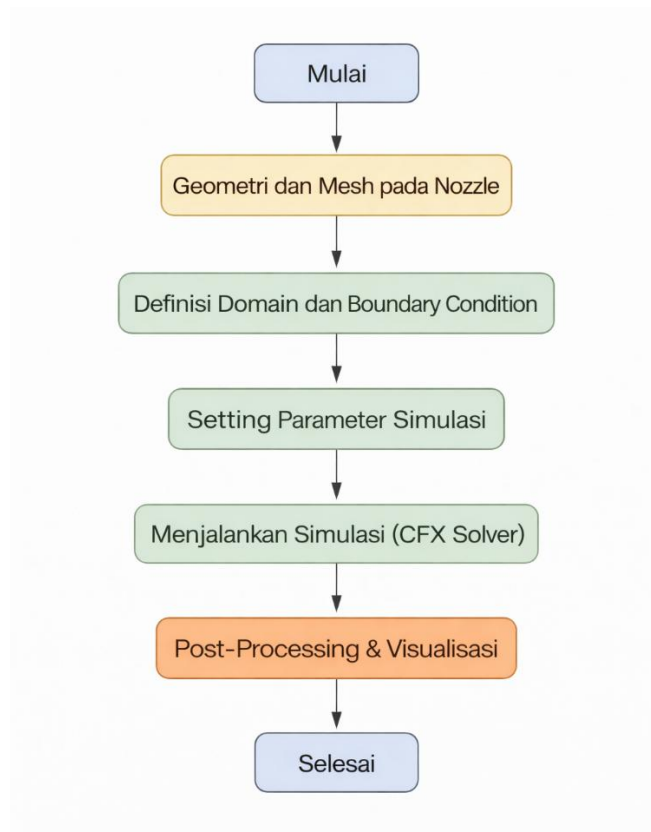
ANSYS Workbench menyediakan platform terintegrasi untuk melakukan analisis struktural, aliran fluida, dan perpindahan panas dengan metode elemen hingga yang kuat dan akurat. Ada tahapan-tahapan pada ANSYS Workbench meliputi :

1. **Pre-processing (Model dan Geometri)** Dalam tahapan awal penelitian, geometri objek yang akan disimulasikan dibuat atau diimpor ke ANSYS. Banyak studi import model ke ANSYS setelah pemodelan di software CAD (misalnya SolidWorks), kemudian dilakukan pemeriksaan dan pembersihan geometri untuk memastikan integritas model sebelum simulasi.
2. **Meshing (Pembagian Elemen)** Setelah geometri siap, model dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut mesh. Kualitas mesh

menjadi krusial karena mesh yang baik dapat meningkatkan akurasi simulasi. Penelitian tentang simulasi elemen hingga menekankan pentingnya mesh dalam mendapatkan hasil numerik yang valid.

3. **Penentuan Material dan Boundary Condition** : Material dengan sifat mekanik seperti modulus elastisitas, massa jenis, dan tegangan luluh dimasukkan dalam simulasi. Selanjutnya, kondisi batas (boundary conditions) ditetapkan, termasuk constraint (penahan/perlakuan tumpuan) dan load (gaya/tekanan). Penentuan ini sangat penting agar simulasi mencerminkan kondisi kerja nyata.
4. **Solving (Penyelesaian Numerik)** Tahapan solving melibatkan pemecahan persamaan numerik dari model FEA. ANSYS menyelesaikan sistem persamaan elemen hingga sesuai dengan beban, material, dan kondisi batas yang ditentukan. Dalam beberapa penelitian, metode ini digunakan untuk menentukan distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keselamatan komponen.
5. **Post-processing (Analisis Hasil)** Hasil simulasi kemudian dianalisis melalui visualisasi kontur tegangan (misalnya Von-Mises), deformasi, dan parameter lain sesuai tujuan penelitian. Hasil ini dapat dibandingkan dengan data eksperimental untuk validasi atau digunakan untuk pengambilan keputusan dalam optimasi desain.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi kecepatan aliran yang tinggi pada outlet nozzle dapat menghasilkan fenomena jet flow yang terfokus. Jet flow ini berpotensi membawa partikel abrasif seperti pasir silika dan abu pembakaran dengan energi kinetik yang tinggi, sehingga mempercepat laju erosi pada permukaan material nozzle. Bentuk lubang outlet yang bersudut tajam, seperti persegi atau segi banyak, cenderung menghasilkan distribusi kecepatan yang tidak seragam dan meningkatkan gradien kecepatan lokal.



Gambar 2.8 Gambar Flowchart Alur Proses Ansys

(Sumber : Dibuat Sendiri)

Dalam kajian rekayasa modern, analisis karakteristik aliran udara dan potensi erosi nozzle banyak dilakukan menggunakan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD). Metode ini memungkinkan visualisasi distribusi kecepatan, tekanan, dan pola aliran secara numerik, sehingga area dengan potensi erosi tinggi dapat diidentifikasi sejak tahap perancangan. Oleh karena itu, simulasi CFD menjadi alat yang relevan untuk mengevaluasi desain nozzle eksisting serta mengkaji efektivitas modifikasi geometri dalam mengurangi potensi kerusakan akibat erosi.

2.2.10 Persamaan Dasar Aliran Fluida dalam Simulasi CFD

Secara teoritis, simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) didasarkan pada hukum konservasi fisika yang diterapkan pada aliran fluida, yaitu konservasi massa, momentum, dan energi. Persamaan-persamaan ini

dikenal sebagai persamaan Navier–Stokes dan digunakan untuk menggambarkan perilaku aliran fluida secara umum. Persamaan konservasi massa (persamaan kontinuitas) untuk fluida inkompresibel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta \cdot \vec{v} = 0$$

di mana:

$\vec{v}$ adalah vektor kecepatan fluida.

Persamaan ini menyatakan bahwa laju massa fluida yang masuk ke dalam suatu volume kontrol sama dengan laju massa fluida yang keluar, sehingga tidak terjadi akumulasi massa di dalam sistem. Persamaan konservasi momentum (persamaan Navier–Stokes) untuk fluida Newtonian dinyatakan sebagai:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}$$

di mana:

$\vec{v}$ adalah vektor kecepatan fluida.

ρ adalah densitas fluida (kg/m³).

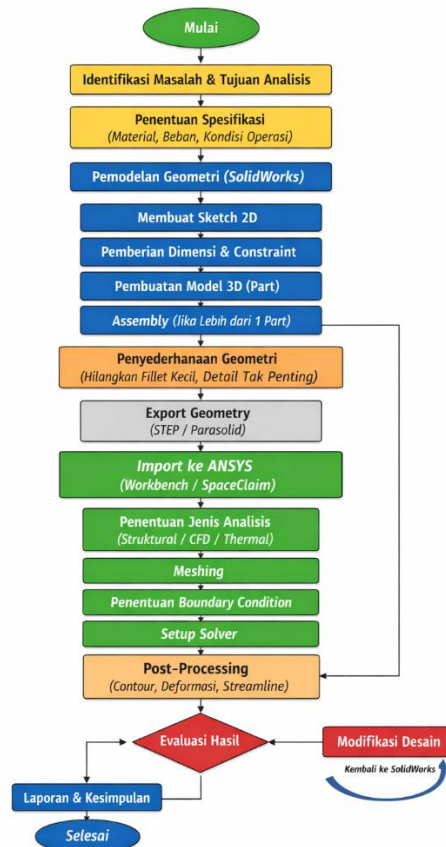
p adalah Tekanan (Pa).

μ adalah viskositas dinamik fluida (Pa·s)

$\vec{g}$ adalah percepatan gravitasi (m/s²).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan momentum fluida dipengaruhi oleh gaya tekanan, gaya viskositas, dan gaya tubuh (body force) seperti gravitasi. Dalam aliran turbulen, seperti aliran udara primer pada boiler Circulating Fluidized Bed (CFB), penyelesaian langsung persamaan Navier–

Stokes secara analitik menjadi sangat kompleks. Oleh karena itu, ANSYS CFX menggunakan pendekatan numerik dengan model turbulensi tertentu untuk memodelkan efek fluktuasi kecepatan aliran. Pendekatan ini memungkinkan prediksi distribusi kecepatan dan tekanan secara realistis tanpa harus menyelesaikan seluruh skala turbulensi secara langsung. Dengan menggunakan pendekatan numerik terhadap persamaan dasar tersebut, simulasi CFD pada penelitian ini mampu memberikan gambaran kecenderungan aliran udara, yang selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi potensi erosi dan efektivitas modifikasi.



Gambar 2.9 Gambar Flowchart Alur Proses Dari Solidwork sampai Ansys

(Sumber : Dibuat Sendiri)