

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

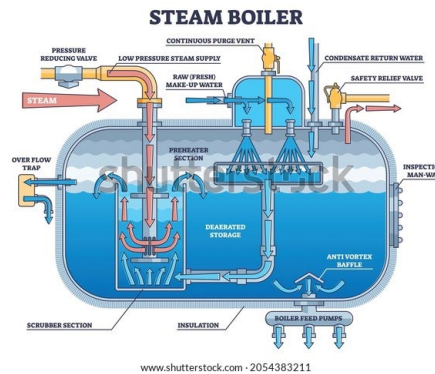
Boiler merupakan bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap, dengan proses pemanasan yang dilakukan dengan menggunakan bahan bakar seperti padat, cair, dan gas. *Boiler* adalah alat yang digunakan sebagai pengering atau pengubah konsentrasi molekul air menjadi molekul uap air, yang akan digunakan dalam berbagai kegiatan sehari-hari maupun industri.

2.1 Pengertian dan Prinsip Kerja *Boiler*

Boiler adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja dan digunakan untuk menghasilkan uap. Uap diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar. Prinsip kerja *boiler* melibatkan perpindahan kalor dari sumber pembakaran, yang biasanya berupa bahan bakar, ke air yang berada di dalam *boiler*. Akibat pemanasan ini, air menjadi panas dan berubah wujud menjadi uap atau uap. Proses ini melibatkan perubahan berat jenis air di dalam *boiler*, di mana air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dan cenderung naik, sedangkan air yang lebih dingin dengan berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar. Proses ini memungkinkan terjadinya sirkulasi air dan distribusi panas yang efisien di dalam *boiler* (Situmorang, 2021).

Boiler berfungsi untuk menghasilkan uap yang akan digunakan untuk kebutuhan proses industri, membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik, atau disalurkan ke perumahan karyawan di sekitar pabrik. Efisiensi termal *boiler* didefinisikan sebagai persen energi (panas) masuk yang digunakan secara efektif

pada uap yang dihasilkan. Efisiensi *boiler* dinyatakan sebagai perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pembentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam dapur (Situmorang, 2021).



Gambar 2. 1 Prinsip kerja boiler

2.2 Klasifikasi *Boiler*

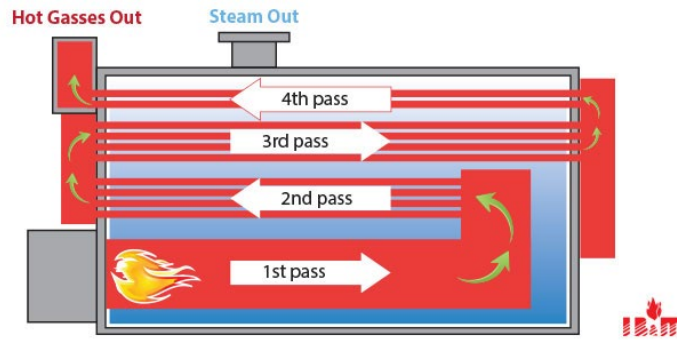
Boiler merupakan peralatan penting dalam industri dan pembangkit listrik untuk menghasilkan uap yang digunakan dalam berbagai aplikasi. Berdasarkan konstruksi dan prinsip kerjanya, *boiler* dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama: *boiler* pipa api, pipa air, dan combi.

1. *Boiler* Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler pipa api adalah jenis *boiler* di mana gas panas melewati satu atau beberapa tabung yang berisi air di sekelilingnya. Panas dari gas tersebut ditransfer melalui dinding tabung ke air, menghasilkan uap. *Boiler* pipa api umumnya digunakan untuk operasi dengan tekanan uap rendah hingga sedang. Kelebihan dari *boiler* pipa api termasuk kemudahan pengoperasian, perawatan yang mudah dan murah, serta biaya awal yang lebih rendah dibandingkan dengan *boiler* pipa air. Namun, *boiler* ini memiliki efisiensi

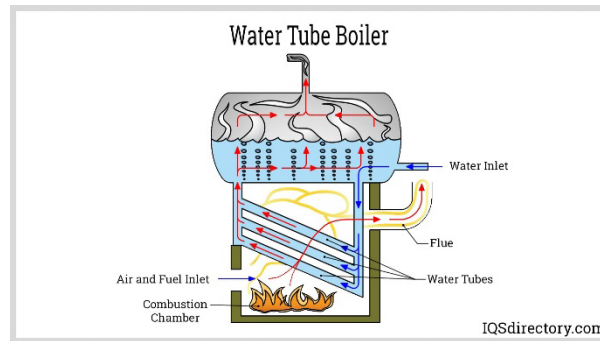
perpindahan panas yang lebih rendah dan waktu yang lebih lama untuk meningkatkan suhu dan tekanan air (Shahab & Amna, 2023).

2. *Boiler* Pipa Air (*Water Tube Boiler*)



Gambar 2. 2 *Boiler* pipa api

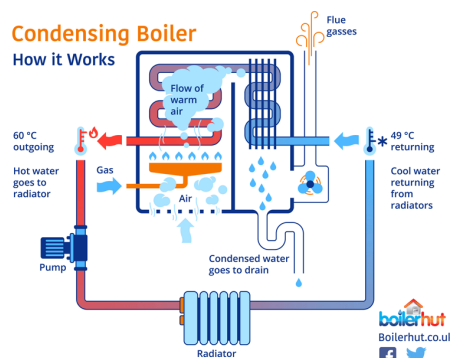
Berbeda dengan *boiler* pipa api, pada *boiler* pipa air, air mengalir di dalam tabung-tabung yang dikelilingi oleh gas panas. Hal ini memungkinkan *boiler* pipa air beroperasi pada tekanan uap yang lebih tinggi dan menghasilkan uap dengan volume yang lebih besar. *Boiler* pipa air lebih disukai untuk aplikasi yang membutuhkan kapasitas uap besar dan tekanan tinggi, seperti di pembangkit listrik tenaga uap. Kelebihan utama dari *boiler* pipa air adalah efisiensi perpindahan panas yang tinggi dan waktu respons yang cepat terhadap perubahan beban. Namun, *boiler* ini memiliki biaya awal yang lebih tinggi dan membutuhkan perawatan yang lebih kompleks dibandingkan dengan *boiler* pipa api (Shahab & Amna, 2023).



Gambar 2.3 Boiler pipa air

3. Boiler Combi (*Combi Boiler*)

Boiler combi merupakan kombinasi dari *boiler* pipa api dan pipa air, menggabungkan kelebihan dari kedua jenis *boiler* tersebut. *Boiler* ini biasanya memiliki bagian pipa api untuk pemanasan awal air dan bagian pipa air untuk menghasilkan uap pada tekanan yang lebih tinggi. *Boiler* combi menawarkan fleksibilitas dalam operasi dengan efisiensi yang tinggi dan kemampuan untuk merespons dengan cepat terhadap perubahan beban.

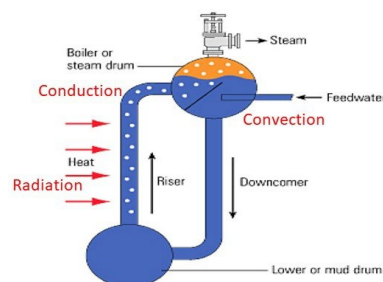


Gambar 2.4 Combi Boiler

Boiler jenis ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dan fleksibilitas operasional (Bennett dkk., 2018).

2.3 Perpindahan Panas pada *Boiler*

Perpindahan panas pada *boiler* merupakan proses kunci yang menentukan efisiensi dan kinerja keseluruhan dari sistem *boiler*. Proses ini melibatkan transfer energi panas dari pembakaran bahan bakar ke air atau fluida lain yang berada dalam *boiler*, sehingga menghasilkan uap atau panas yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi industri atau pembangkitan listrik. Perpindahan panas dalam *boiler* terjadi melalui tiga mekanisme utama: konduksi, konveksi, dan radiasi (Dewanti & Sulaiman, 2019).



Gambar 2. 5 Perpindahan panas pada *boiler*

1. Konduksi adalah proses perpindahan panas melalui bahan padat tanpa adanya pergerakan fisik dari bahan tersebut. Dalam konteks *boiler*, konduksi terjadi di dinding-dinding *boiler* dan tabung-tabung di mana panas dari pembakaran bahan bakar dipindahkan ke air yang berada di dalam tabung.
2. Konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi melalui pergerakan fluida, baik itu gas atau cairan. Dalam *boiler*, konveksi terjadi ketika gas panas dari pembakaran mengalir melewati tabung-tabung *boiler*, memindahkan panas ke air di dalam tabung melalui pergerakan gas tersebut.

3. Radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan medium. Dalam *boiler*, radiasi terjadi dari api pembakaran yang memancarkan energi panas ke dinding *boiler* dan tabung yang berisi air, memanaskan mereka melalui proses radiasi.

2.4 Bahan Bakar *Boiler*

Bahan bakar *boiler* (*boiler*) dapat dibagi menjadi bahan bakar padat, bahan bakar cair, dan bahan bakar gas. Berikut adalah beberapa contoh bahan bakar yang dapat digunakan untuk *boiler*:

1. Bahan Bakar Padat

Contoh bahan bakar padat yang dapat digunakan untuk *boiler* adalah cangkang dan sabut kelapa sawit.

2. Bahan Bakar Cair

Contoh bahan bakar cair yang dapat digunakan untuk *boiler* adalah minyak.

3. Bahan Bakar Gas

Contoh bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk *boiler* adalah gas alam (methane) atau gas bakar (natural gas). Pada pabrik pengolahan kelapa sawit, cangkang dan sabut kelapa sawit digunakan sebagai bahan bakar padat alami untuk *boiler*. Bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk *boiler* uap adalah gas alam (Petrogas), Liquefied Petroleum Gas (LPG), dan gas alam Liquefied Natural Gas (LNG). Gas alam adalah gas yang sebagian besar terdiri dari metana (CH_4), dengan konsistensi yang bervariasi tergantung pada asalnya. Gas alam mengandung konstituen seperti gas inert

(konstituen yang tidak mudah terbakar) dan hidrokarbon berat. Gas alam lebih berat dari gas petroleum, tetapi lebih ringan dari udara. LPG adalah campuran dari propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) atau kombinasi dari keduanya.

2.5 Isolator Panas pada *Boiler Laundry*

Isolator panas pada *boiler laundry* adalah material atau sistem yang digunakan untuk mengurangi transfer panas dari *boiler* ke lingkungan sekitarnya. Isolasi termal ini penting untuk menjaga efisiensi operasional *boiler*, mengurangi kehilangan energi, dan menjaga keamanan di tempat kerja. Isolator panas bekerja dengan membatasi aliran panas antara *boiler* dan lingkungan eksternal. Ini dilakukan melalui beberapa mekanisme:

1. **Konduksi:** Isolator mengurangi transfer panas melalui konduksi dengan menggunakan bahan yang memiliki konduktivitas termal rendah.
2. **Konveksi:** Isolator mengurangi transfer panas melalui konveksi dengan membatasi pergerakan udara di sekitar *boiler*.
3. **Radiasi:** Isolator dapat memantulkan radiasi panas, mengurangi jumlah panas yang hilang melalui radiasi.

2.6 Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah ukuran tanpa dimensi yang menunjukkan performa peralatan termal, seperti mesin pembakaran dalam, *boiler*, dan pembangkit listrik, dalam mengubah energi panas menjadi kerja atau energi lain yang berguna.

Efisiensi termal didefinisikan sebagai rasio antara output energi yang diinginkan (bisa berupa kerja atau panas) terhadap input energi panas yang diterima dari sumber energi. Dalam persentase, efisiensi termal harus berada di antara 0% dan 100%. Namun, karena adanya inefisiensi seperti gesekan, hilangnya panas, dan faktor lainnya, efisiensi termal mesin tidak pernah mencapai 100%. Terdapat dua metode umum dalam perhitungan efisiensi boiler, yaitu:

a. Metode Tidak Langsung (Indirect Method)

Metode ini menghitung semua jenis kehilangan panas yang terjadi pada boiler, seperti:

- Kehilangan panas gas buang
- Kehilangan karena kandungan air dalam bahan bakar
- Kehilangan karena pembakaran tak sempurna
- Kehilangan karena radiasi dan konveksi

Persentase efisiensi kemudian diperoleh dengan:

$$Efisiensi = 100\% - (jumlah\ seluruh\ kehilangan\ panas) \quad (2.6.1)$$

b. Metode Langsung (Direct Method)

Metode ini menghitung efisiensi secara langsung berdasarkan output dan input energi (ASME PTC):

$$\eta = \frac{Q_{uap}}{Q_{boiler}} \times 100 \quad (2.6.2)$$

$$\eta = \frac{m_{uap} \times (h_2 - h_1)}{m_{fuel} \times NHV} \times 100 \quad (2.6.2)$$

m_{uap} = laju aliran massa uap (kg/jam)

m_{fuel} = laju aliran massa lpg (kg/batch)

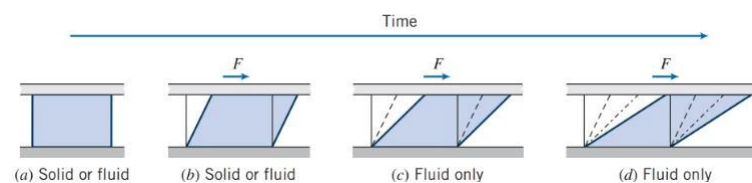
h_2 = entalpi uap keluar (kJ/kg)

h_1 = entalpi air masuk (kJ/kg)

NHV= Nett Heat Value (kJ/kg)

2.7 Fluida

Dalam memahami dinamika fluida, terdapat berbagai jenis aliran dan karakteristik fluida yang memiliki peranan penting dalam berbagai aplikasi teknik, termasuk dalam operasi *boiler*. Berikut ini adalah penjelasan mengenai jenis-jenis aliran dan karakteristik fluida, serta penerapannya dalam *boiler*. Berikut ini adalah penjelasan mengenai jenis-jenis aliran dan karakteristik fluida, serta penerapannya dalam *boiler*. Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi efek tegangan geser terhadap deformasi yang terjadi pada fasa *solid* dan *fluid*.



Gambar 2. 6 Efek tegangan geser terhadap deformasi pada fasa *solid* dan *fluid*

Sumber: (Pritchard, 2011)

Fluida mempunyai berbagai macam jenis aliran. Pada bagian ini akan ditunjukkan jenis jenis aliran fluida yang digunakan pada tugas akhir ini.

2.7.1 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran laminar adalah aliran di mana fluida mengalir dalam lapisan paralel tanpa adanya gangguan antar lapisan, sehingga menghasilkan aliran yang halus. Aliran ini biasanya terjadi pada kecepatan rendah dengan bilangan Reynolds yang rendah ($Re < 2000$). Sebaliknya, aliran turbulen adalah aliran yang tidak teratur dan memiliki gangguan antar lapisan fluida, yang terjadi pada kecepatan tinggi dengan bilangan Reynolds yang tinggi ($Re > 4000$). Aliran turbulen lebih efektif dalam transfer panas dan massa karena adanya pencampuran yang intensif antara lapisan fluida (Rumaherang dkk., t.t.). Parameter untuk membedakan jenis aliran tersebut digunakanlah bilangan Reynold (White, 2011). Bilangan Reynold merupakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya *viscous* yang dirumuskan dengan persamaan

$$Re = \frac{\rho v_{avg} D}{\mu} \quad (2.8.1)$$

(a)

(b)

(c)

2.7.2 Aliran *Steady* dan *Unsteady*

Aliran *steady* (stasioner) adalah aliran di mana kondisi fluida (kecepatan, tekanan, dan karakteristik lainnya) tidak berubah terhadap waktu di setiap titik dalam aliran. Sementara itu, aliran *unsteady* (tidak stasioner) adalah aliran di mana kondisi fluida berubah terhadap waktu (Satiawati dkk., 2022).



Gambar 2. 7 Visualisasi aliran (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen

2.7.3 Aliran *Compressible* dan *Incompressible*

Aliran *compressible* adalah aliran di mana densitas fluida berubah signifikan akibat perubahan tekanan dan suhu. Aliran ini penting dalam studi gas pada kecepatan tinggi. Aliran *incompressible* adalah aliran di mana perubahan densitas fluida sangat kecil dan sering diabaikan, umumnya berlaku untuk cairan dan gas pada kecepatan rendah (Ahmad, 2013).

Ketika menganalisis roket, pesawat angkasa, dan sistem lain dengan kecepatan tinggi, kecepatan fluida biasanya dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Mach (Ma) (Cengel & Cimbala, 2017). Bilangan Mach dapat dinyatakan menurut persamaan

$$Ma = \frac{v}{c}; c = \sqrt{kRT} \quad (2.8.2)$$

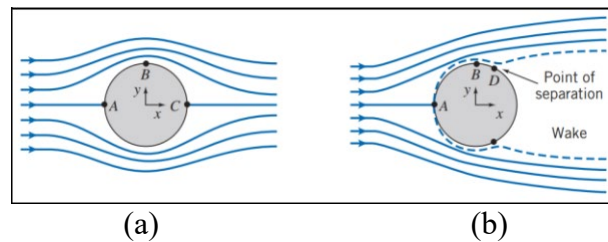
Dimana :

- Ma = Bilangan Mach
- v = Kecepatan fluida (m/s)
- c = Kecepatan suara (m/s)
- k = Rasio panas spesifik
- R = Konstanta gas ideal ($\text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$)
- T = Temperatur (K)

Aliran gas dapat dianggap sebagai aliran *incompressible* ketika perubahan densitas yang terjadi kurang dari 5% dimana nilai $Ma < 0,3$. Oleh karena itu, aliran fluida dengan kecepatan kurang dari 100 m/s dapat dianggap sebagai aliran *incompressible* (Cengel & Cimbala, 2017).

2.7.4 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*

Aliran *viscous* adalah aliran yang mempertimbangkan viskositas fluida, yang merupakan ukuran resistansi internal fluida terhadap aliran. Aliran *inviscid* adalah aliran ideal di mana viskositas diabaikan, memudahkan analisis matematis tetapi kurang realistis (Deswita, 2017).



Gambar 2. 8 Aliran (a) inviscid dan (b) viscous.

2.7.5 Aliran Vortex

Aliran vortex adalah aliran di mana partikel fluida bergerak dalam lintasan melingkar atau spiral. Fenomena ini sering terjadi di sekitar objek yang tenggelam dalam aliran atau di dalam aliran yang berputar (Ahmad, 2013).

Dalam *boiler*, transfer panas yang efisien dari gas pembakaran ke air atau uap sangat penting. Aliran turbulen di dalam tabung *boiler* meningkatkan transfer panas karena pencampuran intensif antara lapisan fluida. Aliran steady memastikan operasi yang stabil dan efisien, sementara pemahaman tentang aliran compressible dan incompressible membantu dalam desain sistem ventilasi dan pengendalian emisi. Viskositas fluida mempengaruhi perpindahan panas dan tekanan drop, sedangkan kondisi no slip mempengaruhi perpindahan panas di dekat dinding tabung *boiler*.

Dalam konteks *boiler*, pemahaman mendalam tentang dinamika fluida dan karakteristik fluida memungkinkan desain yang lebih efisien dan operasi yang

lebih aman, dengan memaksimalkan transfer panas dan meminimalkan kerugian energi. Terdapat dua bentuk dasar *swirling flow* berdasarkan distribusi kecepatan tangensial, yaitu:

a) *Forced vortex flow*

yaitu aliran berputar yang memiliki distribusi kecepatan tangensial yang sama seperti pada *solid-body rotation*.

b) *Free vortex flow*,

yaitu berputarnya suatu aliran tanpa adanya gesekan yang terjadi. Kecepatan tangensial dalam aliran ini memiliki momen dari

Jika aliran yang berputar memiliki viskositas yang tidak terbatas (seperti pada benda padat) sehingga tidak ada pergeseran gerakan diantara lapisan fluida pada radius yang berbeda. Dalam kasus ini, elemen fluida pada posisi radial dipaksa untuk memiliki kecepatan sudut (ω) yang sama. Dimana kecepatan sudut (ω) sama dengan v_θ/r dengan v_θ adalah kecepatan tangensial. Persamaan *forced vortex flow* dijelaskan dalam persamaan 2.17 berikut ini (Swastika & Nugroho, 2024).

$$v_\theta = \omega r \quad (2.8.3)$$

Pada keadaan lain, jika aliran yang berputar tidak memiliki viskositas maka gerakan elemen fluida tidak dipengaruhi oleh elemen-elemen terdekatnya pada radius yang lebih kecil dan lebih besar. Pada kasus fluida ini, apabila elemen tersebut diarahkan pada radius yang lebih kecil maka kecepatan tangensialnya akan meningkat, karena momen dari momentum fluida ($mv_\theta r$) akan terkonservasi. Aliran pusaran ini disebut *free* atau *frictionless vortex*. Aliran

semacam ini dijelaskan $rv = c$ (Swastika & Nugroho, 2024), dengan c adalah konstan, sehingga

$$v_{\theta} = \frac{c}{r} \quad (2.8.3)$$

2.9 Combustion Model

Dalam Ansys Fluent, pembakaran (combustion) dapat disimulasikan menggunakan Species Transport Model dengan berbagai model reaksi turbulen, salah satunya adalah Eddy Dissipation Model (EDM).

Species Transport Model

Species Transport Model adalah pendekatan numerik yang digunakan untuk mensimulasikan reaksi kimia dengan menghitung distribusi spesies dalam aliran fluida. Model ini memecahkan persamaan transportasi untuk setiap spesies kimia yang terlibat dalam reaksi pembakaran (Md. Amzad Hossain, 2022).

Persamaan umum untuk spesies i:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (2.8.3)$$

Di mana:

- Y_i = fraksi massa spesies iii
- ρ = densitas fluida
- v = kecepatan aliran
- J_i = fluks difusi spesies iii
- R_i = laju produksi spesies iii akibat reaksi

- S_i = sumber tambahan spesies i

Eddy Dissipation Model (EDM)

EDM (Eddy Dissipation Model) adalah model reaksi turbulen yang berbasis pada asumsi bahwa laju reaksi dalam pembakaran turbulen dikendalikan oleh mixing turbulen atau eddy mixing (Md. Amzad Hossain, 2022).

Laju reaksi dalam EDM ditentukan oleh:

$$R_i = A \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_r}{\tau}, \frac{Y_p}{\tau} \right) \quad (2.8.3)$$

Di mana:

- A = konstanta empiris
- ϵ = laju disipasi turbulen
- k = energi kinetik turbulen
- Y_R = fraksi massa reaktan
- Y_P = fraksi massa produk
- τ = skala waktu turbulen

2.10 Air-Fuel Ratio (AFR) Teoritis untuk LPG (Propana-Butana)

AFR teoritis merupakan perbandingan massa udara terhadap massa bahan bakar yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna, di mana semua bahan bakar dikonversi menjadi CO_2 dan H_2O tanpa sisa bahan bakar atau oksigen bebas. Untuk LPG, yang umumnya terdiri dari campuran propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}), nilai AFR teoritis bervariasi tergantung pada komposisi campurannya. Secara umum, propana memiliki AFR teoritis sekitar 15,7:1 dan butana sekitar 15,4:1. Maka, jika

LPG terdiri dari campuran 60% propana dan 40% butana, AFR teoritis LPG secara keseluruhan berada di kisaran 15,6:1. Ini berarti bahwa untuk setiap 1 kg LPG, dibutuhkan sekitar 15,6 kg udara untuk pembakaran sempurna (Mamidi., 2012).

Pengetahuan mengenai AFR teoritis sangat penting dalam desain sistem pembakaran karena mempengaruhi efisiensi energi, pembentukan emisi, dan kestabilan nyala api. Jika AFR aktual lebih rendah dari nilai teoritis (kondisi kaya), maka pembakaran bisa menghasilkan CO dan hidrokarbon tak terbakar. Sebaliknya, jika AFR terlalu tinggi (kondisi miskin), pembakaran bisa menjadi tidak stabil dan suhu nyala lebih rendah, yang dapat mengurangi efisiensi termal. Oleh karena itu, menjaga AFR mendekati nilai teoritis sangat penting dalam pengaturan suplai udara dan bahan bakar, terutama dalam sistem pembakaran LPG yang digunakan untuk aplikasi industri dan domestik.

$$\dot{m}_{Air} = AFR \times \dot{m}_{LPG} \quad (2.8.8)$$

2.11 Model Radiasi: Discrete Ordinates (DO) Radiation Model

Dalam simulasi perpindahan panas yang melibatkan radiasi termal, Discrete Ordinates (DO) Radiation Model dipilih karena kemampuannya menangani geometri kompleks dan variasi suhu yang signifikan. Model ini menyelesaikan persamaan transport radiasi (Radiation Transport Equation / RTE) untuk sejumlah arah diskrit pada seluruh domain, yang dikenal sebagai ordinat diskrit. Setiap arah dianalisis secara eksplisit untuk menentukan intensitas radiasi, sehingga memberikan hasil distribusi fluks radiasi yang lebih akurat dibandingkan pendekatan simplistik lainnya.

Secara matematis, DO model menyelesaikan bentuk berikut dari RTE:

$$\begin{aligned} \vec{s} \cdot \nabla I(\vec{r}, \vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) \\ = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}', \vec{s}) d\Omega' \end{aligned} \quad (2.8.9)$$

Model ini cocok untuk domain 3D, media partisipatif (absorpsi dan emisi), serta kasus dengan interaksi kuat antara gas panas dan dinding (seperti pembakaran gas LPG dalam burner). Selain itu, DO model kompatibel dengan model pembakaran dan dapat diintegrasikan dengan solusi energi untuk memperhitungkan kontribusi radiasi dalam total perpindahan panas.

2.12 Karakteristik Fluida

2.12.1 Massa Jenis

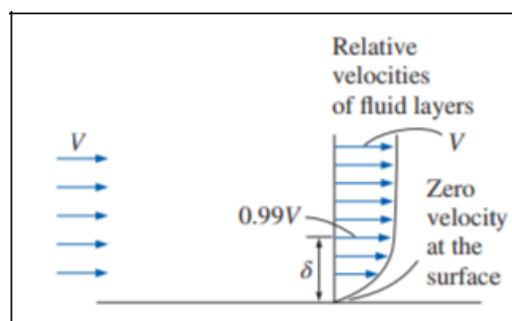
Massa jenis (densitas) adalah massa per unit volume dari fluida, yang mempengaruhi perilaku aliran dan kapasitas fluida untuk menyimpan dan mentransfer energi (Erwin, 2013). Secara umum, massa jenis dapat dirumuskan menurut Persamaan berikut:

$$\rho = m/v \quad (2.8.9)$$

2.12.2 Kondisi No Slip

Kondisi no slip adalah asumsi bahwa kecepatan fluida relatif terhadap permukaan padat adalah nol. Ini berarti bahwa fluida yang bersentuhan langsung dengan permukaan padat tidak bergerak, yang penting dalam analisis aliran dekat dinding (Erwin, 2013). Fluida yang memiliki kontak langsung terhadap permukaan solid akan menempel pada permukaan tersebut akibat adanya efek

viskos. Hal ini disebut sebagai kondisi *no-slip* (Cengel & Cimbala, 2017). Konsekuensi dari kondisi *no-slip* adalah semua profil kecepatan bernilai nol pada titik kontak antara fluida dengan permukaan solid seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Kondisi *no slip* pada plat datar.

Sumber: (Cengel & Cimbala, 2017)

Pada aliran di atas sebuah plat datar, kecepatan fluida pada lapisan pertama aliran di atas sebuah plat datar, kecepatan fluida pada lapisan pertama yang berdekatan dengan pelat akan bernilai nol karena kondisi *no-slip*. Lapisan yang tidak bergerak ini memperlambat lapisan yang berikutnya akibat adanya gesekan antara lapisan fluida, begitu seterusnya hingga mencapai suatu jarak dari plat (δ) dimana nilai kecepatan *free-stream* hampir tidak berubah. Daerah aliran di sekitar dinding dimana efek viskos dan juga gradien kecepatan signifikan disebut lapisan batas atau *boundary layer*. Tebal lapisan batas didefinisikan sebagai jarak antara permukaan pelat hingga profil kecepatan dengan nilai $v = 0.99v$.

2.13 Penelitian Sebelumnya

2.13.1 Aliran Luar (*external flow*)

Dari penelitian zainuri menunjukkan bahwa di area bawah boiler pipa air, terjadi stagnasi gas dan vortex aliran gas. Kehadiran daerah stagnasi gas menyebabkan peningkatan suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah

lainnya. Hasil perhitungan menggunakan Ansys Fluent menunjukkan bahwa suhu di daerah vortex gas berkisar antara 1.164 °C hingga 1.236 °C (Zainuri dkk., 2020).

Asumsi dasar dan perhitungan dalam model matematis yang digunakan dalam penelitiannya adalah:

- Steady-state model dari proses perpindahan panas dan massa gabungan;
- Semua tes dilakukan di Ansys Fluent pada 3ddp (*3D double precision*);
- Combustion dan turbulent model digunakan adalah transportasi spesies dan model K-epsilon;
- Analisis perpindahan panas didasarkan pada persamaan energi.

2.14 Simulasi CFD

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode yang digunakan untuk menganalisis dan memecahkan masalah yang melibatkan aliran fluida dan perpindahan panas menggunakan pemodelan numerik dan algoritma komputasi. CFD memungkinkan para insinyur dan ilmuwan untuk melakukan simulasi aliran fluida dalam lingkungan virtual, memungkinkan analisis yang lebih mendalam tentang fenomena kompleks yang sulit atau tidak mungkin diukur secara eksperimental.

Dalam konteks *boiler* industri, seperti yang dijelaskan dalam jurnal yang disediakan, CFD digunakan untuk memahami fenomena pembakaran dan aliran fluida di dalam *boiler*. Simulasi CFD menyediakan informasi rinci tentang karakteristik lokal aliran fluida dan perpindahan panas, seperti distribusi suhu, kecepatan, dan densitas. Ini sangat berguna untuk mengoptimalkan desain *boiler*, meningkatkan efisiensi pembakaran, dan mengurangi kerugian energi.

Simulasi CFD juga memungkinkan optimasi parameter geometris dan kondisi operasi untuk meningkatkan reaksi pembakaran dan efisiensi *boiler*, dengan kerugian yang lebih rendah. Dengan menggunakan kode komersial seperti ANSYS FLUENT, peneliti dapat mengembangkan model numerik yang validasi hasilnya dengan data eksperimental untuk memastikan keakuratan simulasi (Echi dkk., 2018). Dalam pengoperasian CFD ada tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu: *pre-processing*, *solver*, dan *post-processing* (Biringen & Chow, 2011).

a) Pre-processing

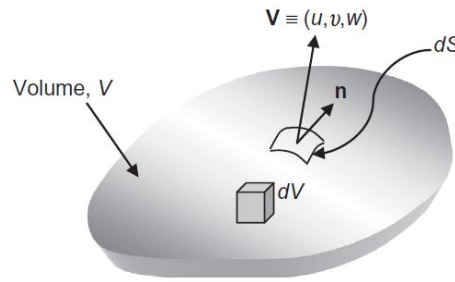
merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam paket CAD (*Computer Aided Design*) seperti SOLIDWORKS, CATIA, maupun melalui DM (*Design Modeler*) melalui ANSYS. Kemudian *men-generated mesh* dan menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya.

Persamaan Governing (*Governing Equation*)

CFD pada dasarnya didasarkan pada *governing equation* dari dinamika fluida. Mereka mewakili pernyataan matematis dari hukum konservasi fisika.

Persamaan Kontinuitas

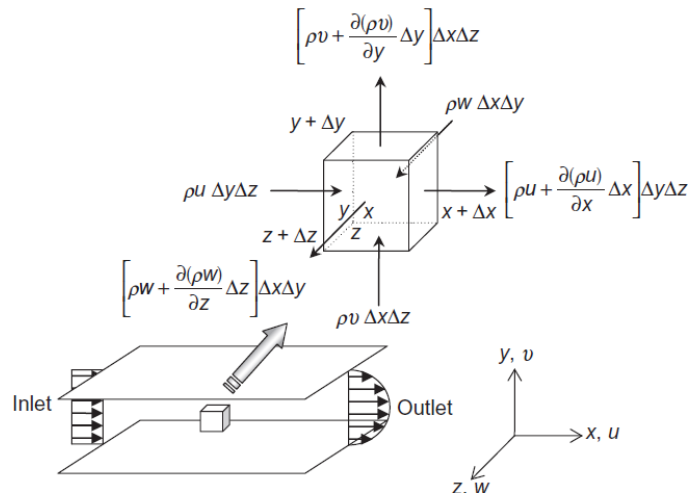
Salah satu hukum konservasi yang berkaitan dengan aliran fluida adalah materi tidak boleh diciptakan atau dihancurkan. Pertimbangkan volume kontrol V arbitrer yang tetap dalam ruang dan waktu pada Gambar 3.1. Fluida bergerak melalui volume kontrol tetap, mengalir melintasi permukaan kontrol. Konservasi massa mengharuskan laju perubahan massa dalam volume kontrol setara dengan fluks massa yang melintasi permukaan S volume V .



Gambar 2. 10 Volume Control Fixed in Space

Dalam sistem koordinat Cartesian, dapat dinyatakan sebagai di mana kecepatan fluida V pada titik mana pun dalam medan aliran dijelaskan oleh komponen kecepatan lokal u , v , dan w , yang, secara umum, merupakan fungsi lokasi (x, y, z) dan waktu (t) .

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.8.8)$$



Gambar 2. 11 Konservasi massa dalam *infinitesimal control volume* dari aliran fluida di antara dua plat paralel statis.

Persamaan Momentum

Jenis gaya benda yang dapat mempengaruhi laju perubahan momentum fluida adalah gaya gravitasi, sentrifugal, Coriolis, dan elektromagnetik. Efek ini biasanya dimasukkan dengan memperkenalkannya ke dalam persamaan

momentum sebagai istilah sumber tambahan untuk kontribusi gaya permukaan. Gaya permukaan untuk komponen kecepatan u seperti yang terlihat pada Gbr. 2.12 yang mengubah bentuk unsur fluida disebabkan oleh tegangan normal σ_{xx} dan tegangan tangensial τ_{yx} dan τ_{zx} yang bekerja pada permukaan unsur fluida. Tegangan normal σ_{xx} , σ_{yy} , dan σ_{zz} dalam Persamaan (2.8.8)–(3.18) disebabkan oleh kombinasi tekanan p dan komponen tegangan kental normal τ_{xx} , τ_{yy} , dan τ_{zz} yang bekerja tegak lurus terhadap volume kontrol.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + \sum F_x^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + \sum F_y^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \sum F_z^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

Persamaan Energi

Persamaan untuk konservasi energi berasal dari pertimbangan hukum pertama termodinamika:

$$\begin{aligned} \text{Time rate of change of energy} = \text{Net rate of heat added } (\sum \dot{Q}) + \text{Net} \\ \text{rate of work done } (\sum \dot{W}) \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

Laju kerja yang dilakukan pada volume kontrol dalam arah x setara dengan produk antara gaya permukaan (disebabkan oleh tegangan *viscous* normal σ_{xx} dan tegangan *viscous* tangensial τ_{yx} dan τ_{zx}) dengan komponen kecepatan u .

Rumus untuk pekerjaan laju bersih yang dilakukan ke arah ini dan untuk arah koordinat lainnya karena kontribusi gaya permukaan normal dan tangensial.

Bentuk Konservatif dari Persamaan Energi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w E)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\partial(u p)}{\partial x} \\ - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \Phi \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

Bentuk Persamaan Energi untuk aliran *compressible* yang menghasilkan entalpi

:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \Phi \end{aligned} \quad (2.8.8)$$

Skema Diskritisasi

b) Solver (program inti pencari solusi) CFD

berguna untuk menerapkan model fisik suatu permasalahan dan menghitung berdasarkan kondisi-kondisi yang diterapkan (model turbulensi, persamaan reaksi, model aliran).

c) Post-processing

merupakan langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD yang bisa berupa gambar, kurva dan animasi.