

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

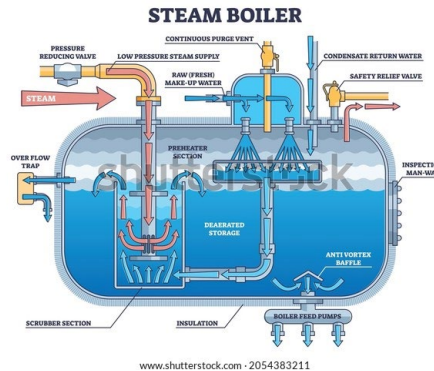
Boiler merupakan bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap, dengan proses pemanasan yang dilakukan dengan menggunakan bahan bakar seperti padat, cair, dan gas. *Boiler* adalah alat yang digunakan sebagai pengering atau pengubah konsentrasi molekul air menjadi molekul uap air, yang 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).



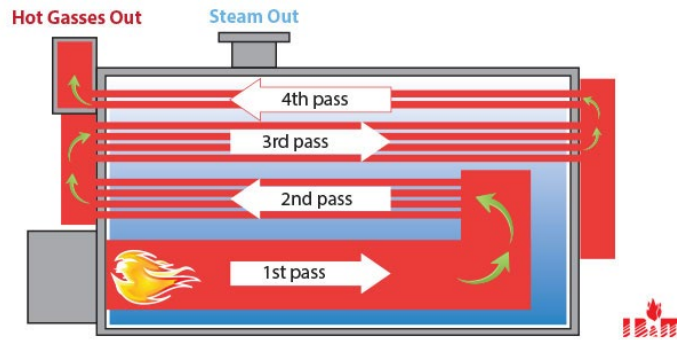
Gambar 2.1 Prinsip kerja *boiler*.

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*)

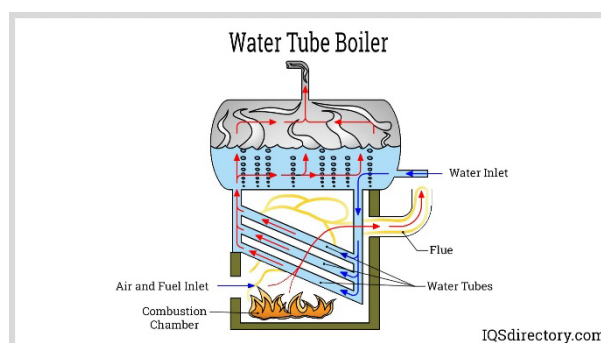
Boiler pipa api adalah jenis *boiler* di mana gas panas melewati satu atau beberapa tabung yang berisi air di sekelilingnya. Panas dari gas tersebut ditransfer melalui dinding tabung ke air, menghasilkan uap. *Boiler* pipa api umumnya digunakan untuk operasi dengan tekanan uap rendah hingga sedang. Kelebihan 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 and Amna, 2023).



Gambar 2.2 Boiler pipa api.

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

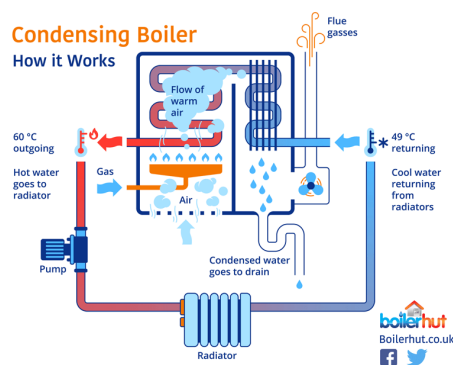
Berbeda dengan *boiler* pipa api, pada *boiler* pipa air, air mengalir di dalam tabung-tabung yang dikelilingi oleh gas panas. Hal ini memungkinkan *boiler* pipa air beroperasi pada tekanan uap yang lebih tinggi dan menghasilkan uap dengan volume yang lebih besar. *Boiler* pipa air lebih disukai untuk 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 and Amna, 2023).



Gambar 2.3 Boiler pipa air.

3. Boiler Combi (*Combination Boiler*)

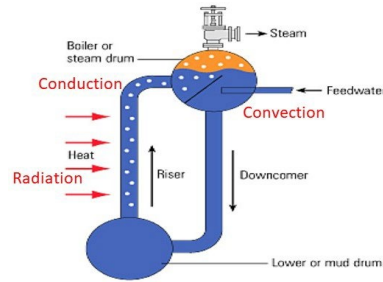
Boiler combi merupakan kombinasi dari *boiler* pipa api dan pipa air, menggabungkan kelebihan dari kedua jenis *boiler* tersebut. *Boiler* ini biasanya memiliki bagian pipa api untuk pemanasan awal air dan bagian pipa air untuk menghasilkan uap pada tekanan yang lebih tinggi. *Boiler* combi menawarkan fleksibilitas dalam operasi dengan efisiensi yang tinggi dan kemampuan untuk merespons dengan cepat terhadap perubahan beban. *Boiler* jenis ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dan fleksibilitas operasional (Bennett, Elwell and Oreszczy, 2018).



Gambar 2.4 *Combi Boiler*.

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 and 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 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%.

2.5 Karakteristik Fluida

2.5.1 Massa Jenis

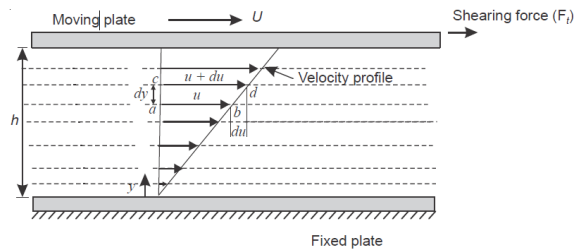
Massa jenis (densitas) adalah massa per unit volume dari fluida, yang mempengaruhi perilaku aliran dan kapasitas fluida untuk menyimpan dan mentransfer energi (Erwin, 2013). Secara umum, massa jenis dapat dirumuskan menurut Persamaan berikut:

$$\rho = m/v \quad (2.1)$$

2.5.2 Viskositas

Viskositas didefinisikan sebagai sifat fluida yang ketahanan terhadap aliran fluida di bawah pengaruh gaya geser. Selama gaya geser ada dalam fluida, fluida mengalami deformasi terus menerus. Laju deformasi tergantung pada besarnya gaya geser. Dengan kata lain, viskositas adalah sifat yang mengontrol aliran cairan pada permukaan horizontal (Kumar, 2023a).

$$\mu = \frac{\tau}{du / dy} \quad (2.2)$$



Gambar 2.6 Distribusi kecepatan dari viskositas fluida di antara dua plat paralel
Sumber : (Kumar, 2023b).

2.5.3 Evaporasi dan *Boiling*

Evaporasi didefinisikan sebagai laju cairan yang keluar dari permukaan bebasnya ketika tekanan uap fluida kurang dari tekanan sekitar (tekanan di atas permukaan fluida) pada suhu tertentu (Kumar, 2023a). Kondisi untuk evaporasi:

$$p_v < p, \text{ at } T = C \quad (2.3)$$

Boiling adalah tingkat evaporasi yang tinggi, ketika tekanan uap lebih besar dari atau sama dengan tekanan di sekitarnya (tekanan di atas permukaan fluida) pada suhu tertentu (Kumar, 2023c). Kondisi untuk *boiling*:

$$p_v > p, \text{ at } T = C \quad (2.4)$$

2.5.2 *Surface Tension*

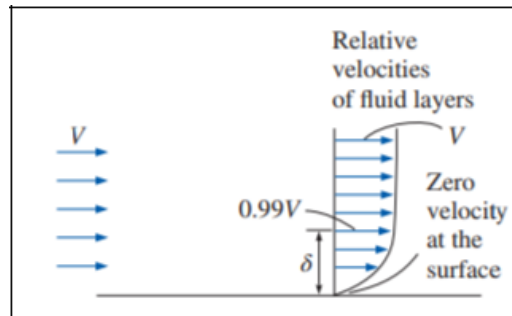
Pada permukaan kontak antara gas dan fluida atau antara dua cairan yang tidak dapat bercampur, *tensile force (tension)* bekerja pada permukaan karena gaya molekul yang tidak seimbang bekerja ke bawah. *tensile force* ini dikenal sebagai *surface tension* (Kumar, 2023a). Ini dilambangkan dengan σ (sigma). *surface tension* adalah sifat permukaan fluida.

$$\sigma = \frac{\text{Surface Energy}}{\text{Surface area}} = \frac{Nm}{m^2} = N/m \quad (2.5)$$

2.5.3 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 and Cimbala, 2017a). Konsekuensi dari

kondisi *no-slip* adalah semua profil kecepatan bernilai nol pada titik kontak antara fluida dengan permukaan solid seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.7.



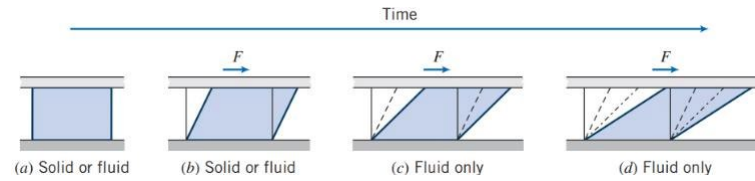
Gambar 2.7 Kondisi *no-slip* pada plat datar.

Pada aliran di atas sebuah plat datar, kecepatan fluida pada lapisan pertama alirandi atas sebuah plat datar, kecepatan fluida pada lapisan pertamayang 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. Dearah 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 $v = 0.99v$.

2.6 Aliran 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 2.8 menunjukkan ilustrasi efek tegangan geser terhadap deformasi yang terjadi pada fasa *solid* dan *fluid*.

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

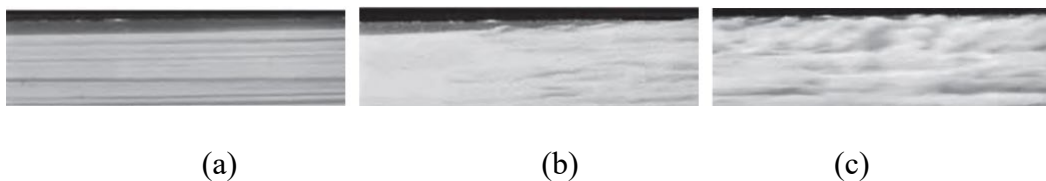


Gambar 2.8 Efek tegangan geser terhadap deformasi pada fasa solid dan fluid.

2.6.1 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 antar lapisan fluida (Rumaherang *et al.*, 2023). 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

$$Re = \frac{\rho v_{avg} D}{\mu} \quad (2.6)$$



Gambar 2.9 Visualisasi aliran (a) laminar, (b) transisi, dan (c) turbulen.

2.6.2 Aliran Steady dan Unsteady

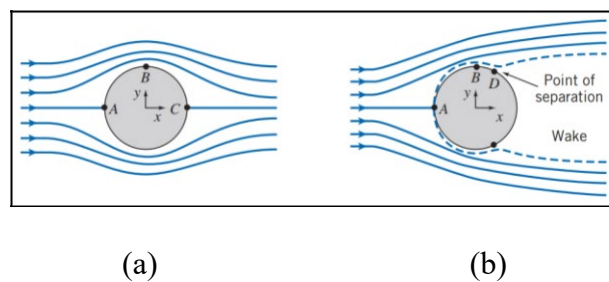
Aliran *steady* (stasioner) adalah aliran di mana kondisi fluida (kecepatan, tekanan, dan karakteristik lainnya) tidak berubah terhadap waktu di setiap titik dalam aliran. Sementara itu, aliran *unsteady* (tidak stasioner) adalah aliran di mana kondisi fluida berubah terhadap waktu (Satiawati *et al.*,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

2.6.3 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).

2.6.4 Aliran Viscous dan Inviscid

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



Gambar 2.10 Aliran (a) *inviscid* dan (b) *viscous*.

2.7 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 optimisasi 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 *et al.*, 2018). Dalam pengoperasian CFD ada tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu: *pre-processing*, *solver*, dan *post-processing* (Biringen and 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 ANSYS Spaceclaim. Kemudian men-*generated mesh* dan menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya.

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.

2.7.1 *Pool Boiling*

Pool boiling proses adalah salah satu mode perpindahan panas paling efektif yang mampu mentransfer panas dalam jumlah besar dengan perbedaan suhu kecil antara permukaan yang dipanaskan dan fluida. Selain itu, pengetahuan dasar tentang proses *pool boiling* adalah titik awal penelitian dan aplikasi *boiling flow*. Oleh karena itu, tidak mengherankan bahwa itu telah, dan masih, menjadi subjek penelitian ekstensif secara global selama beberapa waktu dan analisis kritis sampai sekarang, hal itu diperlukan untuk bergerak maju dengan desain permukaan yang dikembangkan (Mahmoud and Karayiannis, 2021).

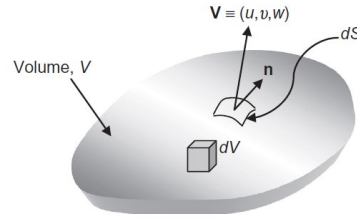
2.7.2 Persamaan Governing (*Governing Equation*)

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

2.7.2.1 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 2.11. Fluida bergerak

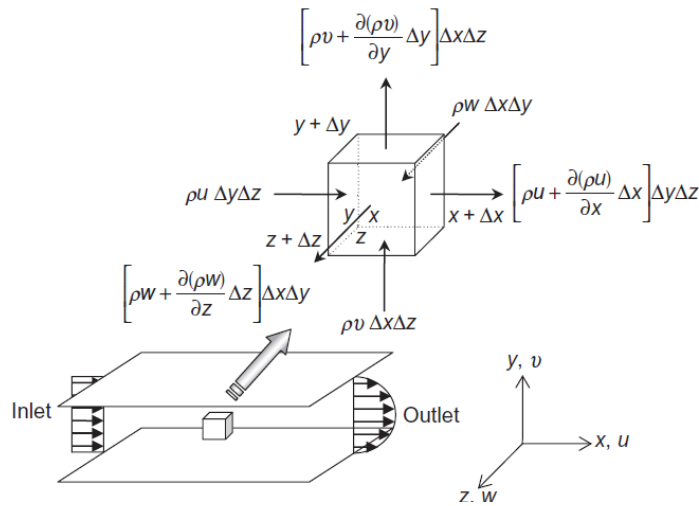
melalui volume kontrol tetap, mengalir melintasi permukaan kontrol. Konservasi massa mengharuskan laju perubahan massa dalam volume kontrol setara dengan fluks massa yang melintasi permukaan S volume V (Tu, Yeoh and Liu, 2018a).



Gambar 2.11 *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) .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$



Gambar 2.12 Konservasi massa dalam *infinitesimal control volume* dari aliran fluida di antara dua plat paralel statis.

2.7.2.2 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 Gambar. 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)–(2.10) disebabkan oleh kombinasi tekanan p dan komponen tegangan kental normal τ_{xx} , τ_{yy} , dan τ_{zz} yang bekerja tegak lurus terhadap volume kontrol (Tu, Yeoh and Liu, 2018a).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + \sum F_x^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + \sum F_y^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \\ = \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \sum F_z^{body\ forces} \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.7.2.3 Persamaan Energi

Persamaan untuk konservasi energi berasal dari pertimbangan hukum pertama termodinamika:

$$\begin{aligned} \text{Time rate of change of energy} &= \text{Net rate of heat added } (\sum \dot{Q}) + \text{Net rate} \\ \text{of work done } (\sum \dot{W}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

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 (Tu, Yeoh and Liu, 2018a).

Bentuk Konservatif dari Persamaan Energi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w E)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\partial(u p)}{\partial x} \\ - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \Phi \end{aligned} \quad (2.12)$$

Bentuk Persamaan Energi untuk aliran *compressible* yang menghasilkan entalpi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} \\ = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \Phi \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.7.3 Skema Diskritisasi

2.7.3.1 Skema *Upwind*

Skema yang membiarkan nilai nominal hanya bergantung pada kondisi *upstream* disebut skema *upwind*.

2.7.3.1.1 *First-order Upwind*

First-order Upwind adalah memiliki keandalan fisik untuk aliran konvektif hanya dengan membiarkan nilai nominal antara dua sel sama dengan nilai untuk sel *upstream* terdekat (Andersson *et al.*, 2012a).

$$[(\rho U \Phi_P) - (\rho U \Phi_W)] = \left[\left(\Gamma \frac{\Phi_E - \Phi_P}{x_E - x_P} \right) - \left(\Gamma \frac{\Phi_P - \Phi_W}{x_P - x_W} \right) \right] \quad (2.14)$$

2.7.3.1.2 *Second-order Upwind*

Second-order Upwind adalah untuk memperkirakan *eastern-face value*, skema ini mengasumsikan bahwa gradien antara *present cell* dan *eastern face* sama dengan gradien antara *western cell* dan *present cell* (Andersson *et al.*, 2012a). Dalam bentuk matematika,

$$\frac{\Phi_E - \Phi_P}{x_E - x_P} = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{x_P - x_W} \rightarrow \Phi_E = \frac{(\Phi_P - \Phi_W)(x_E - x_P)}{x_P - x_W} + \Phi_P \quad (2.15)$$

2.7.3.2 HRIC (*High-Resolution Interface Capturing*)

Skema HRIC terutama digunakan dalam aliran multifase saat melacak *interface* antar fase. HRIC telah terbukti lebih akurat daripada simulasi QUICK untuk VOF. Skema HRIC secara khusus dikembangkan untuk menangani istilah fluks *volume fraction* dalam aliran multifase, memastikan bahwa *interface* fase ditangkap dengan resolusi tinggi dan difusi numerik minimal (Rumaherang *et al.*, 2023).

2.7.3.3 QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics*)

Banyak upaya yang berhasil telah dilakukan untuk membuat skema numerik dengan akurasi yang lebih tinggi daripada second order. Salah satunya akan dibahas secara singkat, yaitu QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective*

Kinetics). QUICK menggabungkan kekuatan skema *angin* dan *central differencing* (Andersson *et al.*, 2012a).

$$\Phi_E = \Phi_E^{QUICK} + O[(\Delta x)^3] \quad (2.16)$$

Dengan demikian, skema QUICK adalah *third order accurate*. Selanjutnya, dapat ditunjukkan bahwa itu adalah *unbounded* tetapi memenuhi kriteria *transportiveness*.

2.7.4 Pemodelan Aliran Turbulen

2.7.4.1 Model $k-\epsilon$ realizable

Model *realizable* berbeda dari model *standard* $k-\epsilon$ karena ia menampilkan batasan realisasi pada tensor tegangan yang diprediksi, sehingga memberinya nama model *realizable* $k-\epsilon$. Perbedaannya berasal dari koreksi persamaan k di mana stres normal bisa menjadi negatif di model *standard* $k-\epsilon$ untuk aliran dengan laju regangan rata-rata yang besar. Hal ini dapat dilihat dengan menganalisis komponen normal tensor tegangan Reynolds:

$$\langle u_i u_i \rangle = \sum_i \langle u_i^2 \rangle = \frac{2}{3}k - 2\nu_T \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} \quad (2.17)$$

Perhatikan bahwa stres normal $\langle u_i u_i \rangle$ harus lebih besar dari nol menurut definisi, karena itu adalah jumlah kuadrat model *realizable* $k-\epsilon$ memastikan bahwa tekanan normal positif, cth. $\langle u_i^2 \rangle \geq 0$. Baik *standard* maupun RNG $k-\epsilon$ model tidak *realizable*. *Realizability* juga berarti bahwa tensor stres memenuhi $\langle u_i^2 \rangle \langle u_j^2 \rangle \geq 0$. Oleh karena itu, model ini cenderung memberikan kinerja yang lebih baik untuk aliran yang melibatkan rotasi dan pemisahan. Ini termasuk aliran dengan kelengkungan dan rotasi ramping yang kuat (Andersson *et al.*, 2012a).

Validasi aliran kompleks, misalnya aliran lapisan batas, aliran terpisah dan aliran geser berputar, telah menunjukkan bahwa model *realizable k-ε* berkinerja lebih baik daripada model *standard k-ε*.

2.7.4.2 Near Wall Treatment

Tidak dapat dihindari bahwa model dekat dinding yang tepat diperlukan untuk menangani masalah aliran turbulen yang terikat dinding. Selain model turbulen yang dapat diterapkan sepanjang dinding, prosedur pemodelan lain yang biasa diadopsi adalah fungsi dinding. Penggunaan fungsi-fungsi ini lazim dalam praktik industri dan dapat ditemukan secara praktis di setiap kode komputer komersial dan internal CFD. Perawatan dinding yang disempurnakan yang menggabungkan model dua lapis dengan fungsi dinding yang ditingkatkan. Dorongan utama dari pendekatan ini adalah untuk mencapai tujuan penerapan pendekatan dua lapis standar untuk jaring halus sementara tidak secara signifikan mengurangi akurasi untuk jaring kasar. Dengan merumuskan hukum dinding sebagai hukum dinding tunggal untuk seluruh wilayah dinding, fungsi dinding yang ditingkatkan memperluas penerapannya di seluruh wilayah dekat dinding. Ini dapat dicapai dengan memadukan hukum linier dan logaritmik dinding sebagai

$$U^+ = e^{\Gamma} U_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} U_{turb}^+ \quad (2.18)$$

Di mana Γ adalah fungsi pencampuran. Demikian pula, persamaan umum untuk $\partial U^+ / \partial y^+$ juga dapat diungkapkan dengan

$$\frac{\partial U^+}{\partial y^+} = e^{\Gamma} \frac{\partial U_{lam}^+}{\partial y^+} + e^{\frac{1}{\Gamma}} \frac{\partial U_{turb}^+}{\partial y^+} \quad (2.19)$$

Persamaan di atas memungkinkan hukum turbulen untuk mudah dimodifikasi dan diperluas untuk memperhitungkan efek seperti gradien tekanan

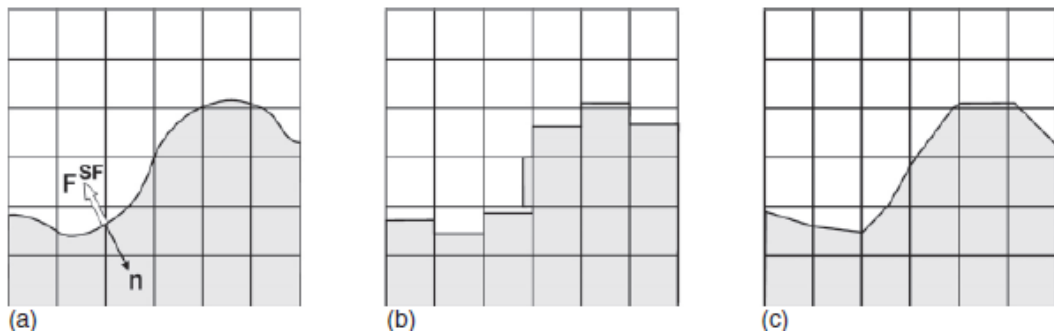
atau sifat variabel. Ini juga menjamin perilaku asimtotik yang benar untuk nilai besar dan kecil dari jarak dinding y^+ dan representasi profil kecepatan yang wajar dalam kasus dimana y^+ terletak di dalam *wall buffer region* ($3 < y^+ < 10$) (Tu, Yeoh and Liu, 2018a).

2.7.5 Pemodelan *Multiphase*: Metode *Volume of Fluid*

Metode *Volume-of-fluid* (VOF) menggunakan nilai fraksi volume berdasarkan sel grid untuk menggambarkan posisi *interface*. Bagian advektif dari persamaan dipecahkan dengan skema adveksi khusus, seperti skema Lagrangian, skema geometris dan skema tekan. Skema ini dapat menangani situasi aliran silang jauh lebih baik, dan cenderung lebih menghemat massa daripada rekan-rekan yang ditetapkan level (Andersson *et al.*, 2012a). Biasanya, gaya tegangan permukaan dimasukkan sebagai istilah sumber momentum tambahan dalam model aliran bertingkat:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + S_{i,s} \quad (2.20)$$

Hanya dalam sel yang dibagi di antara fase, persamaan momentum berbeda dari yang ada dalam model fase tunggal.



Gambar 2.13 Volume-of-fluid (VOF) modelling dari permukaan fluid–fluid: (a) permukaan asli/nyata, (b) volume fraction yang dikalkulasi dengan model VOF (c) rekonstruksi linier dari permukaan.

Arah *surface tension* permukaan tergantung pada normal *interface*, dan besarnya tergantung pada kelengkungan *interface* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13(a). *interface* normal, n , dalam kerangka kontinu sebagian besar diberikan sebagai gradien *volume fraction*,

$$n_i = \frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\sum_j \partial \alpha / \partial x_j|} \quad (2.21)$$

Untuk memasukkan *surface tension* antara dua cairan murni yang tidak dapat bercampur dalam kerangka pelacakan depan, VOF atau metode level-set, biasanya *surface tension* kontinum diterapkan dalam bentuk

$$S_{i,s} = \frac{\sigma \rho \kappa n_i \Gamma}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \quad (2.22)$$

Dimana σ adalah koefisien surface-tension dan biasanya diasumsikan menjadi konstan, Γ adalah fungsi indikator *interface* dan κ adalah *curvature* dari suatu *interface*.