

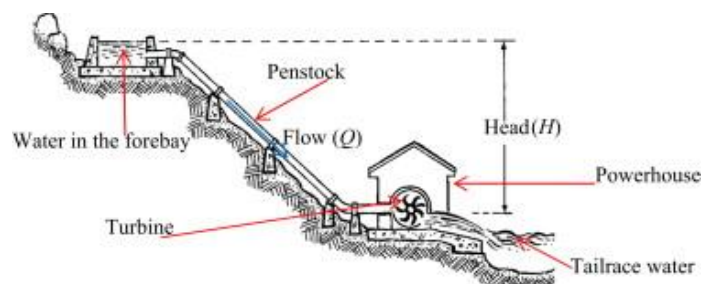
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Air

2.1.1 Prinsip Kerja Turbin Air

Prinsip kerja turbin air melibatkan konversi energi kinetik dan potensial air menjadi energi mekanis untuk menghasilkan listrik. Seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1, proses ini dimulai ketika air dari ketinggian (*Head*) dialirkan melalui Penstock, yang mengubah energi potensialnya menjadi energi kinetik untuk memutar turbin. Air yang memasuki sistem turbin ini diarahkan untuk menabrak bilah-bilah turbin, menyebabkan rotor berputar pada porosnya. Rotasi rotor yang terhubung dengan generator inilah yang kemudian menghasilkan listrik melalui induksi elektromagnetik (Bossinov et al., 2025).



Gambar 2. 1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Air
Sumber : Kaunda et al. (2014)

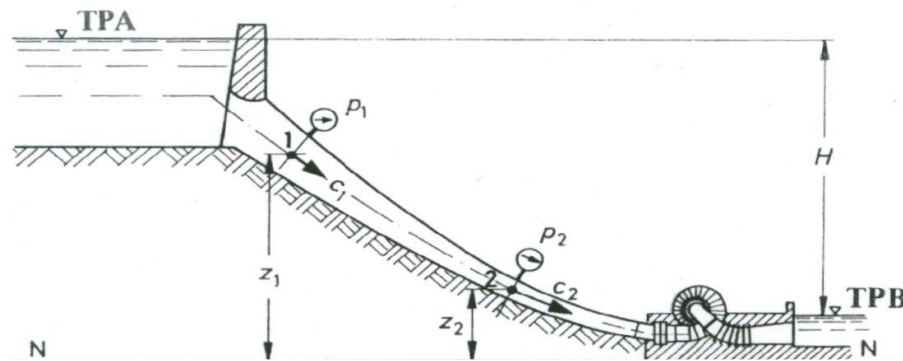
Berdasarkan daya yang dihasilkan, pembangkit tenaga air dapat dibedakan sebagai berikut (Thakur et al., 2024) :

<i>Pico</i>	:	0-5 kW
<i>Micro</i>	:	5-100 kW
<i>Mini</i>	:	100-1 MW
<i>Small</i>	:	1-10 MW
<i>Medium</i>	:	10-100 MW
<i>Large</i>	:	100 MW +

2.1.1.1 Dasar dasar Turbin Air

2.1.1.2 Energi Aliran Air

Aliran air pada turbin air dapat juga digambarkan seperti pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Skema Aliran Turbin Air

Sumber : Dietzel (1990)

Energi mekanis air yang mengalir dari titik 1 ke titik 2 dapat dituliskan

(Dietzel, 1990) :

$$W = \underbrace{\frac{m \cdot g \cdot H}{I}} + \underbrace{\frac{m \cdot \frac{P}{\rho}}{II}} + \underbrace{\frac{m \cdot \frac{c^2}{2}}{III}} \text{ Nm} \quad (1)$$

I : Energi potensial

II : Energi aliran

III : Energi kinetik

Bila dituliskan dalam bentuk energi per satuan massa, akan diperoleh energi spesifik air (Dietzel, 1990) :

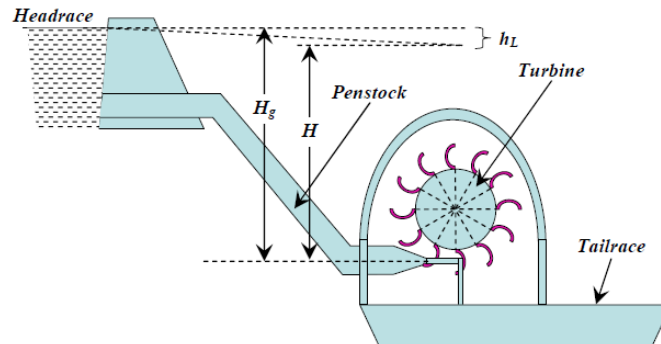
$$w = g \cdot H + \frac{P}{\rho} + \frac{c^2}{2} = \text{konst. Nm/kg} \quad (2)$$

Apabila persamaan diatas dibagi dengan gravitasi akan diperoleh persamaan untuk *head*/ketinggian (Dietzel, 1990) :

$$w = g \cdot H + \frac{P}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} = \text{konst. m} \quad (3)$$

2.1.1.3 Daya Air

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.3, *Head Gross* (H_g), yang merupakan selisih elevasi vertikal total antara *headrace* dan *tailrace*, akan mengalami reduksi energi (*head loss*, H_L) di dalam *penstock* sehingga menghasilkan *Net Head* (H) sebagai *head* efektif yang diterima oleh turbin.



Gambar 2. 3 Definisi *Head* Turbin

Sumber : Yaseen et al. (2020)

Daya kapasitas air $\dot{V}$ dan tinggi air jatuh H dapat diperoleh daya yang dihasilkan turbin (Dietzel, 1990) :

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (4)$$

Dimana :

- P : Daya, kW
- $\dot{V}$: Kapasitas air, m^3/s
- ρ : Massa jenis air, kg/m^3
- g : Gaya gravitasi, m/s^2
- H : Net Head, m
- η_T : Effisiensi Turbin

Bila massa aliran $\dot{m}$ dan tinggi air jatuh telah diketahui, maka daya yang dihasilkan

$$P = \dot{m} \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (5)$$

Dimana :

- P : Daya, kW
- $\dot{m}$: Laju aliran massa, kg/s
- g : Gaya gravitasi, m/s^2
- H : Net Head, m
- η_T : Effisiensi Turbin

2.1.1.4 Persamaan Euler pada Turbin Kaplan

Untuk memahami mekanisme konversi energi dalam turbin air, dapat digunakan pendekatan berdasarkan hukum kekekalan momentum. Model awal yang sering digunakan adalah aliran fluida melalui bejana yang dapat bergerak bebas (idealnya tanpa gesekan). Dalam pendekatan ini, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.4, aliran air dengan massa alir $\dot{m}$ memasuki bejana dengan kecepatan c_1 membentuk sudut α_1 terhadap dinding, lalu keluar dengan kecepatan c_2 pada sudut α_2 . Perubahan momentum menghasilkan gaya F sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (Dietzel, 1990) :

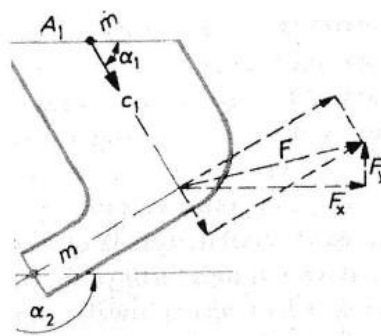
$$F \cdot t = m \cdot c_1 - m \cdot c_2 \quad (6)$$

Untuk interval waktu $t = 1$ detik,

$$F = \dot{m} \cdot c_1 - \dot{m} \cdot c_2 \quad (7)$$

Jika dinyatakan dalam laju aliran volume $\dot{V}$, maka gaya menjadi:

$$F = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_1 - \dot{V} \cdot \rho \cdot c_2 \quad (8)$$



Gambar 2. 4 Gaya Gaya pada Bejana
Sumber : Dietzel (1990)

Gaya ini dapat diuraikan ke dalam komponen arah sumbu x dan y , masing-masing sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_x &= \dot{V} \cdot \rho \cdot (c_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_2 \cdot \cos \alpha_2) \\
 F_y &= \dot{V} \cdot \rho \cdot (c_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \sin \alpha_2)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

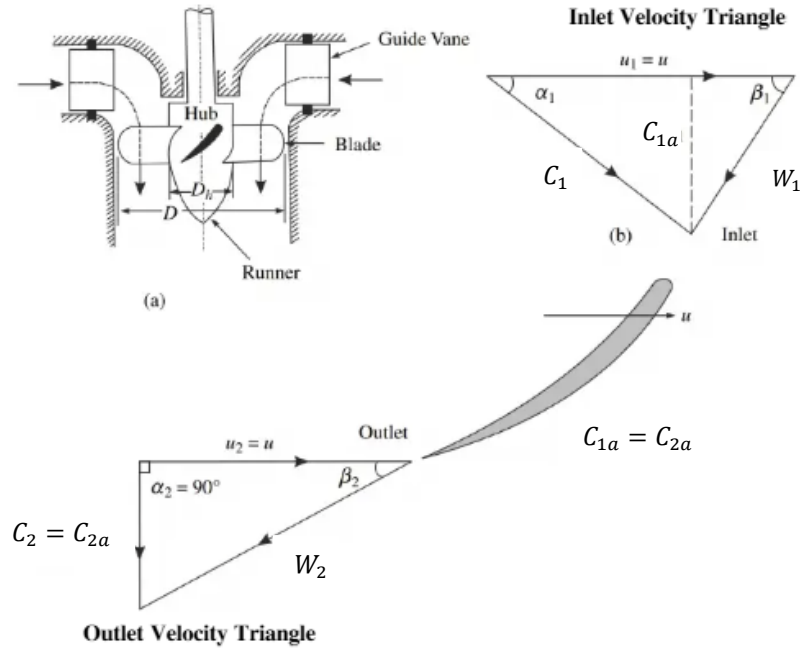
Keterangan:

F	: Gaya	N
t	: Interval waktu	S
c_1	: Kecepatan fluida di penampang masuk	m/s
c_2	: Kecepatan fluida di penampang keluar	m/s
m	: Massa fluida	kg
$\dot{m}$	: Laju aliran massa	kg/s
$\dot{V}$	: Laju aliran volume	m^3/s
ρ	: Massa jenis fluida	kg/m^3
F_x	: Komponen gaya arah x	N
F_y	: Komponen gaya arah y	N
α_1	: Sudut arah kecepatan masuk terhadap sumbu x	$(^\circ)$
α_2	: Sudut arah kecepatan masuk terhadap sumbu y	$(^\circ)$

Dalam konteks turbin Kaplan, pendekatan ini dapat dimodelkan secara lebih nyata melalui sudu turbin yang berputar, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5. Air dialirkan melalui sudu pengarah (*guide vanes*), lalu masuk ke sudu jalan (*runner blades*) dengan kecepatan mutlak c_1 , yang membentuk sudut α_1 terhadap arah tangensial. Air kemudian keluar dengan kecepatan c_2 , membentuk sudut α_2 . Untuk menganalisis interaksi ini secara menyeluruh, digunakan segitiga kecepatan yang menunjukkan hubungan antara:

- Kecepatan mutlak air $\vec{c}$
- Kecepatan relatif terhadap sudu $\vec{\omega}$
- Kecepatan keliling sudu $\vec{u}$

$$\vec{c} = \vec{\omega} + \vec{u}$$



Gambar 2. 5 Segitiga Kecepatan pada Turbin Kaplan

Dari Gambar 2.5 ini, dapat diturunkan komponen kecepatan tangensial dan radial baik dari kecepatan mutlak maupun relatif. Komponen-komponen ini menjadi dasar untuk menghitung gaya tangensial F_u , yang akan memutar poros turbin, serta momen puntir dan daya yang dihasilkan.

$$\begin{aligned}
 c_u &= c \cdot \cos \alpha & F_u &= \dot{V} \cdot \rho \cdot (w_{1u} - w_{2u}) \\
 w_u &= w \cdot \cos \beta & F_a &= \dot{V} \cdot \rho \cdot (w_{1y} - w_{2y})
 \end{aligned} \tag{10}$$

dimana :

- u : Kecepatan keliling (tangensial) sudu turbin (m/s), $u = \omega \cdot r$
- c : Kecepatan mutlak fluida terhadap kerangka diam (m/s)
- w : Kecepatan relatif fluida terhadap sudu turbin (m/s)
- 1 : Property pada sisi masuk
- 2 : Property pada sisi keluar

Jika kecepatan keliling dinyatakan sebagai $u = \omega \cdot r$, maka daya turbin yang dihasilkan adalah

$$P = M_t \cdot \omega = \dot{V} \cdot \rho \cdot (r_1 \cdot w_{1u} - r_2 \cdot w_{2u})$$

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u})$$

Kemudian, daya ini dapat dikaitkan dengan *Head* hidraulik

H menggunakan efisiensi turbin η_T sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P &= m \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \\ \eta \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \dot{V} &= \dot{V} \cdot \rho \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \\ H_{ideal} &= \frac{(u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u})}{g \cdot \eta_t} \rightarrow \text{Persamaan Euler} \end{aligned} \quad (11)$$

2.1.1.5 Putaran Turbin dan Kecepatan Spesifik

Putaran turbin akan berpengaruh terhadap dimensinya. Semakin besar putaran turbin yang dipilih, maka dimensi turbin akan semakin kecil demikian pula sebaliknya. Kecepatan spesifik n_q adalah parameter yang digunakan untuk membedakan jenis roda turbin yang digunakan. Kecepatan spesifik dapat dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \text{ min}^{-1} \quad (12)$$

Dimana

n_q	:	Kecepatan spesifik turbin	
n	:	Putaran turbin	rpm
Q	:	Debit	m^3/s
H	:	<i>Head</i>	m

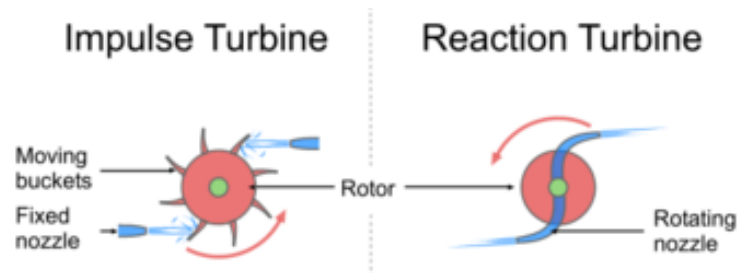
Apabila beberapa turbin memiliki kecepatan spesifik sama, maka secara geometri bentuk roda turbinnya akan mirip/serupa, meskipun beroperasi pada tinggi air jatuh, kapasitas dan putaran yang berbeda. Dimensi roda turbin berbeda, namun bentuk sudu, sudut sudu pengarah dan sudut sudu jalan serta perbandingan diameter roda/lebarnya akan sama.

2.1.2 Klasifikasi Turbin Air

Ada banyak faktor yang dapat menentukan kategori turbin air, seperti:

- a. Berdasarkan prinsip perubahan energinya

Dapat diilustrasikan pada Gambar 2.6 perbedaan mendasar antara cara kerja turbin impuls dan turbin reaksi.



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Turbin Impuls dan Turbin Reaksi
Sumber : Dietzel (1990)

1. Turbin Aksi

Turbin impuls, juga dikenal sebagai turbin aksi, adalah jenis turbin hidrolik di mana energi potensial air pertama-tama diubah menjadi energi kinetik melalui nosel, membentuk semburan kecepatan tinggi yang mengenai bilah turbin. Proses ini menghasilkan perubahan momentum, menciptakan gaya yang menyebabkan turbin berputar. Berbeda dengan turbin reaksi, turbin impuls beroperasi pada tekanan atmosfer yang konstan di seluruh *runner*, karena *runner* tidak terendam dalam air. Desain ini menyederhanakan *casing* turbin, mengurangi biaya produksi, dan membuat turbin impuls lebih ekonomis, terutama dalam kondisi dengan kualitas air yang buruk, karena mereka kurang sensitif terhadap kondisi tersebut (Kaunda et al., 2014). Contoh umum turbin impuls meliputi turbin Pelton, Turgo, dan *Crossflow*, yang biasanya digunakan dalam proyek *micro-hydropower* (MHP).

2. Turbin Reaksi

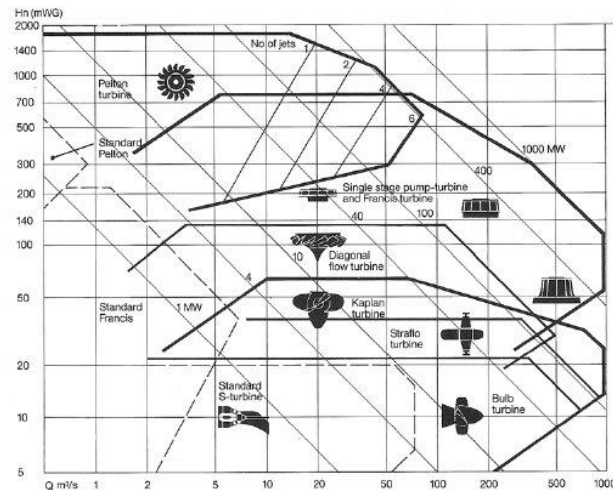
Turbin air reaksi adalah jenis teknologi tenaga air yang beroperasi dengan mengubah energi tekanan air menjadi energi mekanis, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik. Turbin ini sangat efektif di lokasi dengan *Head* rendah dan aliran tinggi, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi, termasuk instalasi *micro-hydropower* (Elbatran et al., 2015). Desain turbin reaksi umumnya melibatkan konfigurasi aliran aksial, seperti turbin propeller atau Kaplan, yang dikenal efisien dan hemat biaya dalam skenario *Head* rendah (Elbatran et al., 2015). Turbin Z-Blade, inovasi terbaru dalam desain turbin reaksi, menunjukkan kesederhanaan dan keterjangkauan sistem ini. Turbin ini dirancang untuk penggunaan skala kecil, memanfaatkan pipa PVC standar dalam konstruksinya, yang mengurangi kompleksitas dan biaya produksi (Rais et al., 2022). Turbin reaksi seperti tipe *Francis* dan Kaplan memiliki kemampuan menangani variasi laju aliran dan *Head*, dengan turbin Francis cocok untuk *Head* menengah hingga tinggi dan turbin Kaplan dioptimalkan untuk *Head* yang lebih rendah (YoosefDoost and Lubitz, 2020).

b. Berdasarkan arah aliran air

1. Turbin aliran aksial
2. Turbin aliran radial
3. Turbin aliran campur
4. Turbin aliran mengerucut
5. Turbin aliran tangensial

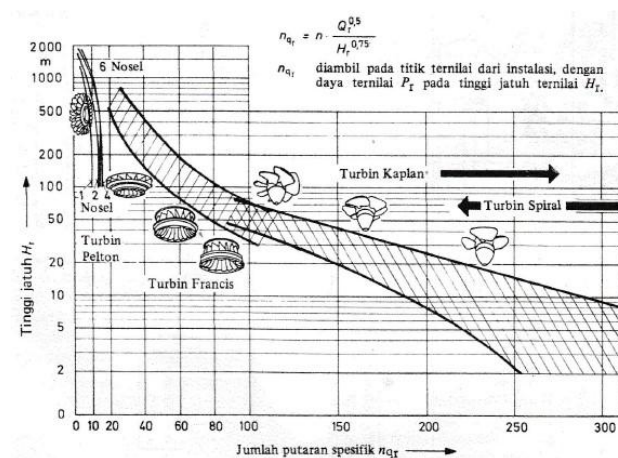
2.1.3 Pemilihan Jenis Turbin

Penentuan jenis turbin yang akan dipasang di suatu tempat sangat bergantung pada *Head* yang tersedia dan kapasitas aliran air. Gambar 2.7 adalah contoh kurva referensi yang memetakan rentang operasi berbagai jenis turbin berdasarkan kedua parameter tersebut.



Gambar 2. 7 Grafik Pemilihan Tipe Turbin Berdasarkan *Head* dan Debit
Sumber : Dietzel (1990)

Sebagai pendekatan alternatif, Gambar 2.8 mempresentasikan kurva pemilihan turbin yang didasarkan pada hubungan antara *Head* dan kecepatan spesifik (N_s)



Gambar 2. 8 Grafik Klasifikasi Turbin Berdasarkan Kecepatan Spesifik
Sumber : Dietzel (1990)

2.1.4 Low Head Turbine

Turbin air diklasifikasikan berdasarkan *head* atau ketinggian jatuh air yang digunakan sebagai sumber energi. Klasifikasi ini menentukan jenis turbin yang paling sesuai dengan kondisi operasional tertentu, baik untuk *high head*, *medium head*, *low head*, maupun *ultra-low head*. Setiap jenis turbin memiliki karakteristik dan efisiensi yang berbeda sesuai dengan rentang *head*-nya. Dapat dilihat pada Tabel 2.1, klasifikasi turbin berdasarkan *head* sesuai dengan referensi yang digunakan.

Tabel 2. 1 Kalsifikasi turbin berdasarkan *Head*

Type of turbine	Klasifikasi <i>Head</i> (H)			
	High Head (> 100 m)	Medium Head (30-100 m)	Low Head (2-30 m)	Ultra-low Head (<2 m)
Impulse	Pelton	Cross flow	Cross flow	
	Turgo	Turgo Multi-jet Pelton	Multi jet Turgo	Water wheel
Reaksi	-	Francis Pump as turbine		Propeller Kaplan

Sumber : Yah et al.,(Yah et al., 2017)

2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) adalah alat yang penting dalam memodelkan dan menyimulasikan aliran fluida, yang diatur oleh *Navier-Stokes equations*. Persamaan ini menggambarkan gerakan zat fluida dan menjadi dasar untuk memahami berbagai fenomena fisik, termasuk aerodinamika dan fisika plasma (Kochkov et al., 2021). Sejarah CFD ditandai oleh pengembangan metode numerik seperti *finite differences*, *finite volumes*, *finite elements*, dan *pseudo-spectral methods*, yang dirancang untuk menyelesaikan persamaan ini dengan mendiskritisasi *fluid domain* ke dalam sebuah *mesh*. Namun, metode klasik ini membutuhkan sumber daya komputasi yang tinggi, terutama untuk aliran turbulen,

di mana fitur terkecil harus diselesaikan untuk memastikan akurasi (Kochkov et al., 2021).

Selama bertahun-tahun, kemajuan dalam CFD didorong oleh kebutuhan untuk menyeimbangkan akurasi dengan kelayakan komputasi, yang mengarah pada pengembangan teknik seperti *Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)* dan *large-eddy simulation (LES)*. Pendekatan RANS lebih sering digunakan karena kemampuannya dalam menggambarkan parameter rata-rata dalam aliran udara turbulen dengan sumber daya komputasi yang wajar, sementara LES menawarkan wawasan yang lebih rinci tentang aliran turbulen yang belum sepenuhnya berkembang atau bersifat anisotropik, meskipun dengan biaya komputasi yang lebih tinggi (Gresse et al., 2024).

Inovasi terbaru dalam CFD melibatkan integrasi *machine learning* untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan simulasi. Model *machine learning* dapat mengaproksimasi dinamika fluida dengan cepat, menawarkan peningkatan kecepatan komputasi yang signifikan sambil mempertahankan akurasi, bahkan untuk aliran kompleks di luar data pelatihan (Kochkov et al., 2021). Integrasi ini menggambarkan bagaimana *scientific computing* dapat memanfaatkan teknik komputasi modern untuk mengatasi keterbatasan tradisional, membuka peluang baru untuk tugas pemodelan fisik skala besar (Kochkov et al., 2021).

Untuk melakukan simulasi dengan CFD, biasanya ada proses yang harus dilewati.

2.2.1 Identifikasi masalah

Pada tahap ini ada dua hal yang harus dilakukan :

- a. Penetapan tujuan dalam *computational fluid dynamics (CFD)* melibatkan pendefinisian sasaran dan parameter yang memandu proses simulasi untuk memastikan hasil yang akurat dan bermakna. Proses ini sangat penting karena menentukan tingkat presisi, sumber daya komputasi, dan metodologi yang digunakan dalam simulasi. Sebagai contoh, pemilihan antara perhitungan presisi tunggal dan ganda dapat secara signifikan mempengaruhi durasi, jumlah iterasi, dan keluaran dari analisis CFD, menyoroti pentingnya menetapkan tujuan komputasi yang tepat (Jarrar Pirzada et al., 2024).
- b. Penentuan *fluid domain* adalah langkah krusial yang melibatkan pendefinisian wilayah spasial di mana aliran fluida akan disimulasikan. Proses ini biasanya dimulai dengan identifikasi batas fisik dari sistem, yang dapat mencakup *inlet*, *outlet*, dan *wall*, serta setiap antarmuka internal yang mungkin ada dalam sistem aliran. Sebagai contoh, dalam simulasi *Francis turbine*, *fluid domain* dibagi menjadi beberapa area spesifik seperti *spiral case*, *runner*, dan *draft tube*, yang masing-masing memerlukan *meshing* yang teliti untuk menangkap dinamika aliran di dalam komponen-komponen ini secara akurat (Jarrar Pirzada et al., 2024).

2.2.2 Pre-processing

Pre-processing adalah tahapan pertama dalam membangun dan menganalisis model CFD. Pada tahap ini, ada empat hal yang harus dilakukan

- a. Pembuatan geometri adalah tugas penting pertama, di mana seseorang dapat memanfaatkan fungsionalitas geometri build yang disediakan oleh perangkat lunak CFD khusus, atau dapat menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) canggih untuk merancang representasi geometris yang diperlukan untuk analisis dengan cermat.
- b. Aspek selanjutnya mencakup meshing, yang berkaitan dengan jenis mesh tertentu yang ingin kami terapkan dalam simulasi CFD, pertimbangan penting yang secara signifikan mempengaruhi resolusi dan akurasi model komputasi.
- c. Selanjutnya, sangat penting untuk memastikan sifat material fluida yang terlibat dalam simulasi, yang mencakup *material properties* dari fluida, *physical models*, *boundary condition*, *turbulent modelling*, dan faktor relevan lainnya yang mempengaruhi perilaku fluida dalam berbagai kondisi.
- d. Terakhir, konfigurasi pengaturan *solver* adalah komponen penting yang memerlukan perhatian cermat; ini termasuk pemilihan *numerical schemes*, *convergence controls*, *convergence monitors*, dan pengaturan terkait lainnya yang secara kolektif berkontribusi pada efektivitas analisis CFD.

2.2.3 Solving

Penyelesaian numerik dari *Navier-Stokes equations* sering kali melibatkan metode seperti *Direct Numerical Simulation (DNS)*, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*, atau *Unsteady RANS (URANS)*, masing-masing dengan tingkat kebutuhan komputasi dan akurasi yang berbeda-beda (Tinoco et al., 2010).

Sebagai contoh, *URANS models* digunakan untuk simulasi bergantung waktu di mana efek turbulensi signifikan, dan model ini memerlukan pertimbangan cermat terhadap *grid resolution* dan pemodelan turbulensi untuk memastikan hasil yang akurat (Tinoco et al., 2010). *Lattice Boltzmann Method (LBM)* menawarkan pendekatan alternatif dengan mensimulasikan dinamika fluida melalui deskripsi mesoscopic, menggunakan langkah-langkah *streaming* dan *collision* berdasarkan persamaan *lattice Boltzmann*, yang sangat efektif untuk simulasi aliran kompleks (Gresse et al., 2024).

Dalam praktiknya, *commercial CFD software* seperti *ANSYS Fluent* menggunakan *finite volume method* untuk menyelesaikan persamaan ini, dengan algoritma seperti *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE)* untuk kopling tekanan-kecepatan dan skema *second-order upwind* untuk diskritisasi spasial (Tantichukiad et al., 2024). Konvergensi simulasi dipantau melalui kriteria seperti *residuals* dari persamaan dasar, memastikan solusi mencapai keadaan stasioner secara statistik sebelum hasil akhir disimpulkan (Tantichukiad et al., 2024).

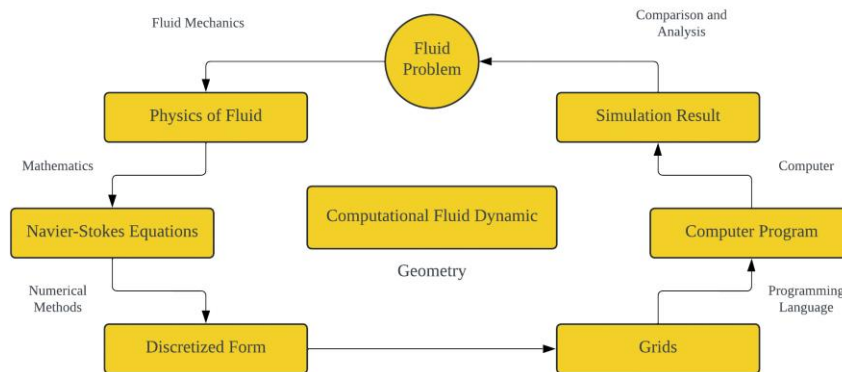
2.2.4 Post-processing

Dalam *computational fluid dynamics (CFD)*, *post-processing* adalah langkah krusial yang melibatkan analisis dan visualisasi hasil yang diperoleh dari simulasi untuk mendapatkan wawasan yang berarti. Proses ini umumnya mencakup pemilihan dan pengolahan data, yang penting untuk memahami karakteristik aliran dan analisis lanjutan. Sebagai contoh, dalam konteks simulasi yang bergantung pada waktu, penting untuk memilih variabel yang tepat untuk disimpan, menentukan lokasi spasial untuk pengambilan sampel, dan memilih tampilan serta gambar tertentu untuk visualisasi. Proses seleksi ini sering kali bersifat iteratif dan bergantung pada hasil simulasi, yang harus diselesaikan sebelum menjalankan simulasi penuh agar kapasitas penyimpanan dapat dikelola dengan efektif (Tinoco et al., 2010).

Dalam aplikasi khusus, seperti analisis dinamika fluida pada turbin, *post-processing* dapat mencakup visualisasi proses *meshing* dan penentuan *simulation domains*, seperti yang terlihat dalam studi *Francis turbines* menggunakan perangkat lunak *ANSYS CFX* (Jarrar Pirzada et al., 2024). Secara keseluruhan, *post-processing* dalam *CFD* adalah langkah yang memiliki banyak aspek dan membutuhkan perencanaan serta pelaksanaan yang teliti untuk memastikan bahwa data simulasi dapat dianalisis dan divisualisasikan dengan efektif, memberikan wawasan berharga mengenai dinamika aliran yang dipelajari.

2.3 Alur Kerja dalam *Computational Fluid Dynamics*

Alur kerja dalam *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dimulai dari perumusan masalah fluida hingga analisis hasil simulasi. Prosesnya ditampilkan pada gambar 2.9



Gambar 2. 9 Proses dari *Computational Fluid Dinamic*

Langkah pertama adalah mendefinisikan *Fluid Problem*, yang menetapkan batasan fisik serta kondisi lingkungan dari aliran yang akan disimulasikan. Setelah itu, prinsip-prinsip dasar *Physics of Fluid*, seperti hukum konservasi massa, momentum, dan energi, diterapkan untuk memahami dinamika aliran yang terjadi. Persamaan dasar yang digunakan, yaitu *Navier-Stokes equations*, kemudian dikonversi ke bentuk matematis sebagai formulasi yang akan didiskritisasi. Persamaan ini sering kali dipecah menjadi subsistem seperti tekanan dan transport-difusi, yang memungkinkan penggunaan teknik diskritisasi seperti *finite volume*, *finite element*, atau *lattice Boltzmann method* untuk mendefinisikan model aliran fluida dalam ruang komputasi. Proses ini menghasilkan bentuk diskrit yang dapat dipecahkan secara numerik pada *computational grid*, yang kemudian diimplementasikan pada program komputer.

Pembuatan *Grids* atau *mesh* digunakan untuk membagi domain komputasi menjadi volume kontrol yang lebih kecil. Bergantung pada kompleksitas geometri, grid dapat berbentuk *structured* atau *unstructured* dan sering kali menggunakan metode seperti *Chimera grids* untuk menangani batas yang bergerak. Model CFD yang telah dikonfigurasi kemudian diimplementasikan dalam program komputer seperti ANSYS atau OpenFOAM, yang berfungsi untuk menyelesaikan persamaan diskrit menggunakan algoritma numerik tertentu. Setelah simulasi dijalankan, hasil simulasi dianalisis dan divalidasi terhadap data eksperimental atau teoretis untuk memastikan akurasi. Hasil ini kemudian dibandingkan dalam proses *Comparison and Analysis*, yang bertujuan untuk memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang perilaku fluida dan memastikan simulasi mencapai tujuan yang diinginkan.

2.3.1 Sifat Fisika pada Fluida

Baik cairan maupun gas dapat diklasifikasikan sebagai bentuk fluida, contohnya adalah zat-zat umum seperti air dan udara yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari. Fluida dicirikan oleh berbagai sifat fisik, termasuk parameter kritis seperti kecepatan, tekanan, suhu, densitas, dan viskositas, yang semuanya berperan penting dalam dinamika fluida dan studi terkait. Konsep kompresibilitas fluida menjadi aspek penting dalam pemahaman mendalam tentang perilaku yang ditunjukkan oleh berbagai jenis fluida, termasuk air dan udara, karena mempengaruhi respons mereka terhadap gaya eksternal dan perubahan kondisi lingkungan.

Air sering dianggap sebagai fluida yang tak terkompresi karena densitasnya yang relatif stabil dan konstan, tanpa fluktuasi yang signifikan. Di sisi lain, udara, meskipun tergolong gas, juga dapat diperlakukan sebagai tak terkompresi dalam

kondisi tertentu, seperti pada aliran dengan kecepatan rendah di mana perubahan densitas sangat kecil dan tidak berdampak secara signifikan terhadap analisis secara keseluruhan. Dalam kasus di mana fluida dapat dianggap tak terkompresi, *governing equation* yang menggambarkan perilaku fluida ini dapat disederhanakan sebagai berikut

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (13)$$

Viskositas adalah ukuran resistensi fluida terhadap aliran, yang timbul dari gesekan internal antar molekulnya dan sangat menentukan perilaku aliran tersebut. Salah satu parameter turunannya yang penting adalah viskositas kinematik, yakni rasio antara viskositas dinamis dan densitas fluida. Parameter ini merupakan kunci dalam berbagai persamaan aliran, khususnya dalam aplikasi pemodelan modern seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Yuan et al., 2020).

Sebagai ilustrasi praktis dari konsep ini, Tabel 2.2 secara kuantitatif memvalidasi pengamatan umum dalam kehidupan sehari-hari. Data tersebut menunjukkan bahwa resistensi internal terhadap aliran (viskositas) pada madu secara fundamental jauh lebih besar dibandingkan dengan air. Perbedaan ekstrem inilah yang menjelaskan mengapa tindakan sederhana seperti mengaduk madu membutuhkan energi yang jauh lebih signifikan.

$$\mu = \left[\frac{N_s}{m^2} \right] = [Posie] \quad (14)$$

Tabel 2. 2 Properti Densitas dan Viskositas dari Udara, Air dan Madu

Properti	Udara (18°C)	Air (20°C)	Madu (20°C)
Densitas $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	1.275	1000	1446
Viskositas (μ)	1.82e-4	1.002e-4	190

2.3.2 Persamaan Umum Computational Fluid Dynamics

2.3.2.1 Hukum Konservasi dalam Fluida

Dalam dinamika fluida, gerakan dan perilaku fluida dijelaskan melalui prinsip-prinsip dasar konservasi:

1. Konservasi massa
2. Konservasi momentum
3. Konservasi energi

Ketiga prinsip konservasi fundamental (massa, momentum, dan energi) menjadi landasan bagi persamaan *Navier-Stokes*, yang diformulasikan sebagai sebuah sistem persamaan diferensial parsial nonlinier. Persamaan yang diturunkan langsung dari hukum kekekalan fisika ini memiliki signifikansi yang luar biasa karena cakupannya yang luas, mampu mendeskripsikan secara akurat perilaku aliran untuk fluida viskos (kental), baik yang bersifat kompresibel maupun inkompresibel.

Sebagai contoh sederhana, prinsip konservasi massa dinyatakan sebagai:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (15)$$

Jika $\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0$ maka

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (16)$$

Yang artinya

$$M = \text{const} \quad (17)$$

2.3.2.2 Persamaan Navier-Stokes

Persamaan Navier-Stokes menyatukan hukum-hukum konservasi ke dalam satu sistem untuk menyelesaikan masalah fluida secara numerik. Secara umum, persamaan ini mencakup:

a. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (18)$$

Untuk fluida inkompresibel ($\rho = \text{konstan}$):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (19)$$

b. Persamaan Momentum

$$\underbrace{\rho \frac{\partial U_j}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{II} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_j}}_{III} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}}_{IV} + \underbrace{\rho g_j}_V \quad (20)$$

dengan tegangan viskos Newtonian:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (21)$$

Makna masing-masing komponen

- | | | |
|-----|---|----------------------------------|
| I | : | Percepatan local |
| II | : | Konveksi momentum |
| III | : | Gaya akibat tekanan |
| IV | : | Difusi momentum (viskositas) |
| V | : | Gaya eksternal seperti gravitasi |

c. Persamaan Energi

$$\underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i}}_{II} = - \underbrace{P \frac{\partial U_i}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}}_{IV} - \underbrace{\tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_V \quad (22)$$

- I : Perubahan energi internal
- II : Kondisi konvektif
- III : Tekanan kerja
- IV : Fluk panas (difusi)
- V : Konversi energi mekanik menjadi panas

Jika fluida menunjukkan karakteristik inkompresibel, persamaan yang mengatur kontinuitas dan momentum dapat diberikan dalam bentuk yang lebih sederhana seperti yang digambarkan di bawah ini:

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (23)$$

Persamaan momentum (Navier-Stokes inkompresibel):

$$\rho \frac{\partial U_j}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} + \rho g_j \quad (24)$$

2.3.2.3 Bentuk Transport Umum dalam CFD

Semua persamaan konservasi (massa, momentum, energi, spesies, turbulensi) dapat dituliskan dalam bentuk umum persamaan transport berikut:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = q_\phi \quad (25)$$

- ϕ : Besaran yang ditransportasikan (misalnya 1, U_j , T)
- Γ_ϕ : Koefisien difusi untuk ϕ
- q_ϕ : Sumber atau hilang dari ϕ

Contoh substitusi:

ϕ	Interpretasi	Persamaan yang dihasilkan
$\phi = 1$	Konservasi massa	Persamaan kontinuitas
$\phi = U_j$	Komponen kecepatan	Persamaan momentum
$\phi = T$	Suhu	Persamaan energi

Ketika $\phi = 1, U_j, T$ kita masing-masing bisa mendapatkan persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi.

2.3.3 Metode Penyelesaian Masalah

Persamaan aliran fluida, seperti persamaan Navier-Stokes, dapat diselesaikan menggunakan berbagai teknik numerik, yang masing-masing memiliki keunggulan serta aplikasi spesifik. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang menerapkan metode numerik dalam algoritma untuk menyelesaikan persamaan konservasi dan persamaan konstitutif pada grid komputasi. Metode ini sangat bermanfaat untuk menganalisis sistem aliran kompleks yang melibatkan perpindahan panas dan reaksi kimia, karena memungkinkan pemodelan rinci dari aliran turbulen melalui teknik seperti *Direct Numerical Simulation* (DNS) dan model *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) (Tinoco et al., 2010). Model *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (URANS) memperluas pendekatan ini dengan memasukkan istilah yang bergantung pada waktu, yang memungkinkan simulasi aliran turbulen dengan lebih akurat untuk berbagai aplikasi industri (Tantichukiad et al., 2024; Tinoco et al., 2010).

Teknik numerik lainnya adalah metode *lattice Boltzmann*, yang semakin populer berkat kesederhanaan serta skalabilitasnya pada komputer paralel. Metode ini sangat efektif dalam menangani geometri kompleks dan dapat disesuaikan untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes tak termampatkan dan hampir tak termampatkan, bahkan jika terdapat istilah sumber dalam persamaan kontinuitas (Yuan et al., 2020). Selain itu, metode *lattice Boltzmann* juga dapat digunakan untuk memodelkan aliran dua fase, menyediakan pendekatan yang lebih umum yang mampu menangani permasalahan aliran satu fase maupun multi-fase (Yuan et al., 2020).

Persamaan aliran fluida dapat diselesaikan dengan beberapa teknik numerik, antara lain:

1. *The finite volume method*
2. *Finite element.*
3. *Spectral methods.*
4. *Boundary element.*
5. *Vorticity based methods.*
6. *Lattice gas/lattice Boltzmann.*

Teknik-teknik numerik ini memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan pemahaman kita terhadap dinamika fluida, dengan memungkinkan simulasi terhadap fenomena yang sulit diteliti secara eksperimental, seperti getaran akibat aliran (*flow-induced vibrations*) dan kelelahan termal dalam sistem industri

(Tinoco et al., 2010). Pemilihan metode numerik sering kali disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari permasalahan yang dihadapi, seperti kebutuhan akan grid beresolusi tinggi atau kemampuan untuk memodelkan aliran tak tunak, yang menyoroti pentingnya memilih teknik yang tepat demi simulasi yang akurat dan efisien.

2.3.4 Metode Finite Volume

Metode *finite volume* (FVM) adalah teknik numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial, khususnya dalam konteks dinamika fluida dan simulasi hidraulik. Metode ini didasarkan pada bentuk integral dari hukum konservasi, yang membuatnya sangat cocok untuk permasalahan yang melibatkan geometri dan kondisi batas yang kompleks. FVM mendiskretisasi domain komputasi menjadi sejumlah volume kontrol terbatas, di mana *governing equation* mengintegrasikan di setiap volume, memastikan konservasi massa, momentum, dan energi di seluruh batas volume tersebut. Metode ini memiliki keunggulan dalam menangani diskontinuitas dan kondisi batas kompleks tanpa memperkenalkan osilasi numerik yang tidak diinginkan, seperti yang terlihat dalam penerapannya pada masalah water hammer di pembangkit listrik tenaga air (Lu et al., 2023).

FVM dapat mencapai tingkat akurasi orde kedua melalui proses rekonstruksi, seperti menggunakan fungsi ruang polinomial Taylor, yang meningkatkan ketepatan solusi numerik (Carlino and Boscheri, 2023). Dalam konteks persamaan *Navier-Stokes* tak termampatkan (*incompressible fluid*), FVM diterapkan untuk mendiskretisasi baik istilah eksplisit maupun implisit, yang

memungkinkan pemisahan skala cepat dan lambat dalam *governing equation* suatu hal yang sangat penting untuk menjaga stabilitas dan akurasi dalam simulasi yang melibatkan geometri yang berkembang, seperti tumpang tindih antara dua *mesh* elemen hingga yang tidak terhubung, biasanya dalam bentuk *semi-terstruktur (mesh Chimera)* (Carlino and Boscheri, 2023). Selain itu, FVM digunakan bersama teknik numerik lainnya, seperti Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE), untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes nonlinier, memastikan konvergensi dan stabilitas dalam simulasi aliran fluida (Darbandi et al., 2021).

a. Pendekatan Metode Finite Volume

Integrasikan bentuk umum persamaan Navier-Stokes pada *finite volume* dan terapkan Teori Gauss

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x_i} \phi dV = \int_S \phi \cdot n_i dS \quad (26)$$

Kita bisa mendapatkan bentuk integral dari persamaan Navier-Stokes

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_S \left(\rho U_i \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \cdot n_i dS = \int_V q_\phi dV \quad (27)$$

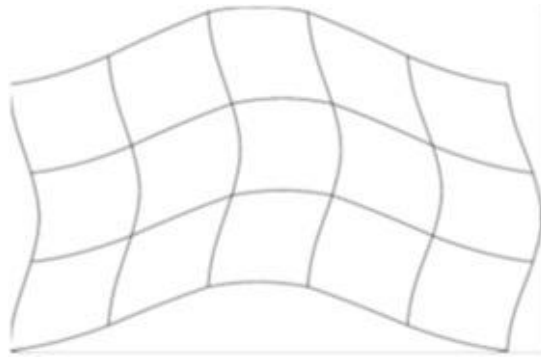
Untuk memperkirakan integral volume, dimungkinkan untuk mengalikan volume total dengan nilai pusat volume kontrol. Misalnya, pertimbangkan domain dua dimensi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.10. Untuk mengevaluasi massa dan momentum yang terkait dengan volume P yang ditentukan, kita peroleh

$$m = \int_V \rho dV \approx \rho_p V, mu = \int_V \rho_i U_i dV \approx \rho_p u_p V \quad (28)$$

Untuk mendekati integral permukaan, misalnya gaya tekanan, kita memiliki:

$$\oint_{S_i} P dS \approx \sum_k P_k S_k \quad k = n, s, e, w \quad (29)$$

Biasanya, variabel diposisikan pada sentroid volume yang ditentukan; dengan demikian, menjadi perlu untuk menggunakan teknik interpolasi untuk memastikan nilai $k P$, yang berada pada batas volume yang ditentukan. Umumnya, dua bentuk utama interpolasi digunakan: satu adalah interpolasi melawan angin (*upwind*) dan yang lainnya adalah interpolasi pusat (*central*).



Gambar 2. 10 2D Structured Grid Domain
Sumber : Caughey, (2003)

Upwind interpolation

$$U_e = \begin{cases} U_p & \text{if } (\vec{U} \cdot \vec{n})_e > 0 \\ U_E & \text{if } (\vec{U} \cdot \vec{n})_e < 0 \end{cases} \quad (30)$$

Central interpolation

$$U_e = U_E \lambda_e + U_p (1 - \lambda_e) \quad \lambda_e = \frac{x_e - x_p}{x_E - x_p} \quad (31)$$

b. Konservasi Metode *Finite volume*

Sifat konservasi dari *finite volume method* adalah aspek kritis dalam penerapannya pada *computational fluid dynamics*, terutama ketika

berurusan dengan *Navier-Stokes equations*. *Finite volume method* dirancang untuk memastikan konservasi massa, momentum, dan energi dengan mengintegrasikan *governing equations* pada *discrete control volumes*, yang secara inheren mematuhi hukum konservasi melalui *divergence theorem* (Girfoglio et al., 2019). Metode ini sangat menguntungkan dalam menangani geometri kompleks dan *boundary conditions*, karena memungkinkan penggunaan *unstructured grids* dan dapat mengakomodasi *evolving mesh configurations*, seperti *Chimera meshes*, yang berguna untuk mensimulasikan *fluid flows* di sekitar *moving bodies* (Carlino and Boscheri, 2023). Pendekatan *finite volume* juga mendukung implementasi *semi-implicit IMEX schemes*, yang memisahkan *explicit* dan *implicit terms* untuk menangani *multi-scale phenomena* secara efisien, memastikan stabilitas dan akurasi bahkan dalam kondisi aliran yang bervariasi (Carlino and Boscheri, 2023).

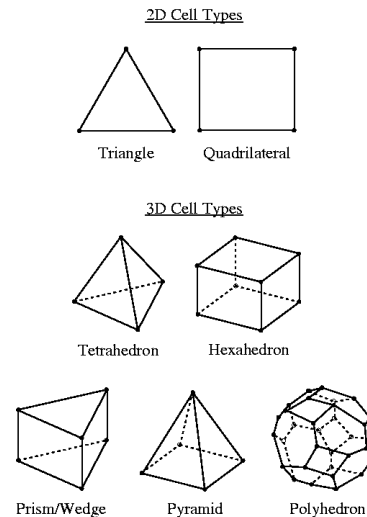
Selain itu, konsistensi metode ini dengan *Geometric Conservation Law (GCL)* sangat penting untuk menjaga akurasi simulasi yang melibatkan *moving meshes*, seperti yang terbukti dalam pengujian yang mempertahankan *free-stream conditions* hingga *machine accuracy* (Carlino and Boscheri, 2023). Kemampuan *finite volume method* untuk menangani *divergence-free constraint* dari *velocity field* melalui *projection methods* semakin menegaskan kapabilitas konservasinya, memastikan bahwa solusi numerik tetap bermakna secara fisik di berbagai skenario aliran (Carlino and Boscheri, 2023). Fitur-fitur ini secara keseluruhan menyoroti ketangguhan dari *finite volume method* dalam mengonservasi kuantitas fisik utama,

menjadikannya pilihan utama untuk mensimulasikan *incompressible fluid flows* dalam berbagai *engineering applications*.

2.3.5 Mesh

Dalam *computational fluid dynamics* (CFD), *grid* atau *mesh* merupakan komponen krusial yang secara signifikan memengaruhi akurasi dan efisiensi simulasi. *Mesh* berkualitas tinggi sangat penting untuk memastikan akurasi simulasi, karena memengaruhi tingkat konvergensi, presisi perhitungan, dan waktu komputasi. Berbagai jenis *mesh*, seperti *structured*, *unstructured*, dan *hybrid meshes*, digunakan tergantung pada kompleksitas geometri dan persyaratan spesifik simulasi. *Structured grids*, yang disusun dalam pola berulang secara teratur, sering digunakan untuk geometri yang lebih sederhana, tetapi dapat menyebabkan penyederhanaan berlebihan ketika menangani bentuk yang kompleks. Sebaliknya, *unstructured grids*, yang lebih mudah disesuaikan dengan geometri kompleks, dihasilkan langsung dari model CAD dan sangat berguna dalam aplikasi industri di mana ketepatan geometri sangat penting (Tinoco et al., 2010; Tran et al., 2021). Teknik *Chimera* atau *overset grid* melibatkan beberapa blok *mesh* yang saling tumpang tindih, memungkinkan adaptasi yang fleksibel terhadap domain komputasi yang berkembang dan kondisi batas yang kompleks. Metode ini menyederhanakan tugas adaptasi *mesh*, terutama dalam skenario yang melibatkan *boundary* bergerak atau masalah tak tunak (*unsteady*), dengan memungkinkan blok *mesh* yang berbeda berkomunikasi melalui zona tumpang tindih (Carlino and Boscheri, 2023).

Berbagai jenis *mesh* yang digunakan dalam *computational fluid dynamics* (CFD) dapat dilihat pada Gambar 2.11, yang mengilustrasikan tipe-tipe sel 2D dan 3D.



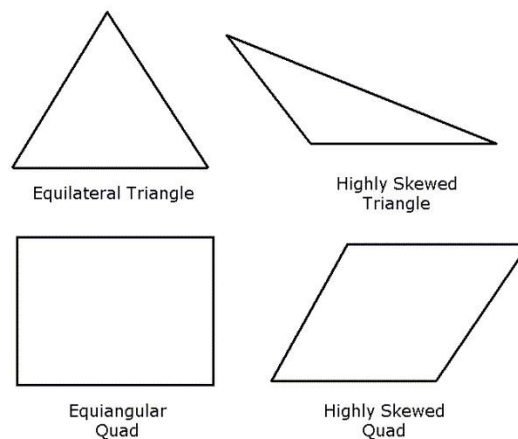
Gambar 2. 11 *Type Mesh*
Sumber : Fluent, I. N. C. (2006)

Gambar tersebut menunjukkan struktur dasar dari masing-masing tipe *mesh*, seperti *triangle* dan *quadrilateral* untuk sel 2D, serta *tetrahedron*, *hexahedron*, *prism/wedge*, *pyramid*, dan *polyhedron* untuk sel 3D. Pemilihan jenis *mesh* ini, sebagaimana diuraikan dalam Gambar 2.11, sangat memengaruhi sumber daya komputasi yang diperlukan. Sebagai contoh, *tetrahedral grids*, meskipun fleksibel dan mudah beradaptasi untuk geometri kompleks, membutuhkan lebih banyak elemen sehingga memerlukan memori dan waktu komputasi yang lebih besar dibandingkan dengan *hexahedral* atau *polyhedral grids* (Tinoco et al., 2010).

Kualitas *computational grid* atau *mesh* sangat penting untuk stabilitas dan akurasi simulasi numerik, karena secara langsung memengaruhi proses iterasi dan efisiensi komputasi. Skewness, salah satu parameter kunci dalam menilai kualitas *mesh*, mengukur tingkat distorsi elemen dari bentuk idealnya, seperti segitiga sama sisi atau tetrahedron reguler. *High skewness* dapat menyebabkan ketidakakuratan

dan ketidakstabilan dalam simulasi, karena memengaruhi distribusi titik nodal dan kelancaran *mesh*. Sebagai contoh, parameter *equiangle skew* digunakan untuk mengevaluasi *skewness*, dengan nilai yang idealnya dijaga di bawah 0,9 untuk memastikan kualitas *grid* yang dapat diterima (Tinoco et al., 2010).

Perbandingan antara struktur *cell* ideal dan non-ideal berdasarkan tingkat *skewness* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Perbandingan Struktur Ideal *Skewness* dan non-Ideal
Sumber : Ansys, (2023)

Dampak *skewness* dan metrik kualitas lainnya, seperti *non-orthogonality* dan *aspect ratio*, telah dibuktikan dalam berbagai studi, di mana *mesh* dengan *low skewness* dan *non-orthogonality* lebih diutamakan dalam metode *finite volume* karena mampu memberikan stabilitas dan akurasi yang lebih baik (Girfoglio et al., 2019). Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3, rentang nilai *skewness* dan *orthogonal quality* diklasifikasikan dalam berbagai kategori, mulai dari *excellent* hingga *unacceptable*, yang membantu dalam menilai dan memastikan kualitas *mesh* dalam simulasi numerik.

Tabel 2. 3 *Skewness dan Orthogonal Quality*

Kriteria skewness					
Excellent 0-0.25	Very good 0.25-0.50	Good 0.50-0.80	Acceptable 0.80-0.94	Bad 0.95-0.97	Unacceptable 0.98-1.00
Kriteria orthogonal quality					
Excellent 0.95-1.00	Very good 0.70-0.95	Good 0.20-0.69	Acceptable 0.15-0.20	Bad 0.001-0.14	Unacceptable 0-0.001

Sumber : Ansys, (2023)

Proses iteratif dalam *grid refinement*, yang sering kali diperlukan untuk menangkap fenomena aliran kompleks seperti *shocks* atau *boundary layers*, semakin menegaskan pentingnya menjaga karakteristik *mesh* berkualitas tinggi untuk menghindari biaya komputasi yang berlebihan serta memastikan hasil simulasi yang akurat (Tinoco et al., 2010).

Lebih lanjut, integrasi model CAD ke dalam proses pembuatan *grid* menyoroti tantangan dalam menjaga ketepatan geometris dan menangani masalah seperti 'dirty geometries,' yang dapat memperburuk *skewness* dan masalah kualitas lainnya (Tinoco et al., 2010). Secara keseluruhan, interaksi antara ukuran *grid*, *skewness*, dan parameter kualitas lainnya merupakan pertimbangan penting dalam *computational fluid dynamics*, yang memengaruhi efisiensi dan keandalan simulasi.

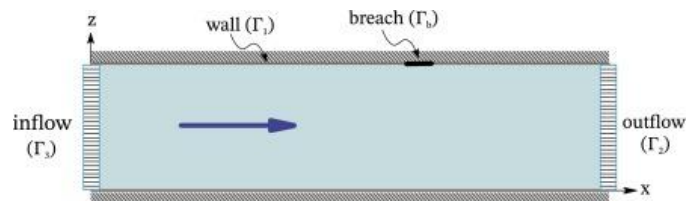
Proses pembuatan *mesh* melibatkan pendefinisian volume fluida dan pembuatan *mesh* untuk setiap domain, seperti yang terlihat dalam desain turbin, di mana domain yang berbeda seperti *spiral case*, *runner*, dan *draft tube* dibuat *mesh* secara terpisah untuk mengoptimalkan kinerja (Jarrar Pirzada et al., 2024). Selain itu, metode *lattice Boltzmann equation* (LBE), yang populer untuk mensimulasikan aliran hampir tak termampatkan, memanfaatkan skema penyempurnaan *grid* yang telah divalidasi dalam berbagai simulasi aliran, menunjukkan pentingnya kualitas *grid* dalam menangkap fenomena aliran kompleks secara akurat (Lallemmand et al.,

2021). Secara keseluruhan, *grid* atau *mesh* dalam CFD merupakan elemen fundamental yang harus dirancang dan diadaptasi dengan cermat sesuai kebutuhan spesifik simulasi untuk memastikan analisis komputasi yang akurat dan efisien.

2.3.6 Kondisi Batas (Boundary Condition)

Boundary conditions memainkan peran krusial dalam simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) karena menentukan bagaimana fluida berinteraksi dengan batas domain komputasi, yang pada gilirannya memengaruhi akurasi dan stabilitas hasil simulasi.

Misalnya, *boundary condition* untuk fluida yang mengalir dari kiri ke kanan melalui saluran ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 *Boundary Condition of Pipe Flow*
Sumber : Katopodes (2019)

Fluida mengalir dari kiri ke kanan melalui saluran seperti pada Gambar 2.17, dengan *inflow* di sisi kiri (Γ_3) dan *outflow* di sisi kanan (Γ_2). Dinding saluran (Γ_1) menerapkan kondisi *no-slip*, sementara *breach* (Γ_4) memungkinkan variasi aliran. Kondisi *outflow* menjaga gradien aliran nol untuk memastikan stabilitas aliran keluar.

Dalam konteks simulasi turbin, berbagai *boundary conditions* diterapkan untuk memodelkan skenario operasional yang berbeda. Sebagai contoh, dalam studi model turbin Kaplan, *boundary conditions* ditetapkan untuk memastikan kondisi aliran stabil dalam berbagai operasi turbin, dengan *net head* sebesar 1,5 m untuk

memenuhi standar pengujian dan mengakomodasi laju aliran tertentu (Krzemianowski and Kaniecki, 2023).

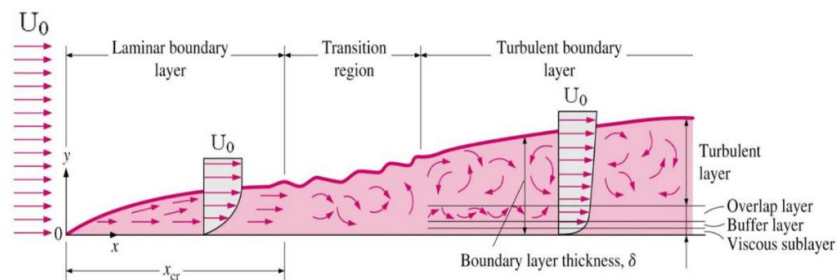
Demikian pula, dalam studi lain, *boundary conditions* untuk simulasi turbin meliputi penetapan tekanan total pada *inlet* yang sesuai dengan *gross head* sebesar 2,5 m, sementara *outlet* didefinisikan berdasarkan laju aliran massa, dengan menggunakan model turbulensi SST untuk menangkap pemisahan aliran pada geometri bilah yang kompleks (Tran et al., 2021). Pada turbin Francis Mikrohidro Anggi, *boundary conditions* ditentukan sebagai bagian dari pengaturan *solver*, yang mencakup konfigurasi sumber daya komputasi dan penetapan kriteria konvergensi (Jarrar Pirzada et al., 2024).

Dalam simulasi aliran internal *supersonic inlet/isolator*, *boundary conditions* bervariasi tergantung pada apakah aliran bersifat subsonik atau supersonik, dengan parameter spesifik ditetapkan untuk kondisi *inlet* dan *outlet*, serta penerapan kondisi *no-slip* pada dinding untuk memperhitungkan aliran viskositas (Liu et al., 2021). Selain itu, dalam studi turbin sekrup, *boundary conditions* melibatkan model multiphase dengan tekanan hidrostatik untuk air dan tekanan lingkungan untuk udara, yang mengintegrasikan gaya apung dan hambatan untuk mensimulasikan interaksi antara udara dan air dalam domain simulasi (Shamsuddeen et al., 2024).

2.3.7 Wall Function

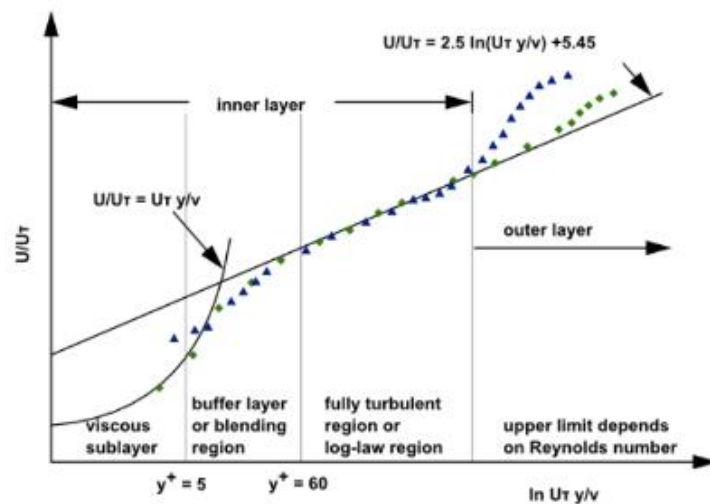
Pemodelan wilayah dinding dalam *computational fluid dynamics* (CFD) sangat penting untuk mencapai akurasi numerik, terutama karena dinamika aliran kompleks di dekat dinding, yang terbagi menjadi tiga lapisan: *viscous sublayer*, *buffer layer*, dan *fully turbulent layer*. *Viscous sublayer*, yang paling dekat dengan

dinding yang dapat ditampilkan pada Gambar 2.14, ditandai oleh aliran laminar di mana viskositas molekuler memiliki pengaruh signifikan terhadap transfer momentum dan panas. Ketebalan lapisan ini sebanding dengan viskositas dinamis fluida dan berbanding terbalik dengan kecepatan aliran bebas (*freestream velocity*), sehingga perlu disimulasikan dengan akurat untuk menangkap fenomena dinding yang tepat (Tinoco, Lindqvist and Frid, 2010; Moore, Nabhani and Askari, 2017).



Gambar 2. 14 Pembagian Zona Turbulensi pada *Boundary Layer*
Sumber : Fatla et al., (2018)

Dapat dilihat pada Gambar 2.15., *Buffer layer*, atau wilayah transisi, terletak di antara *viscous sublayer* dan *fully turbulent layer*, di mana aliran laminar dan turbulen tidak sepenuhnya mendominasi. Pemodelan akurat wilayah ini menantang karena sifat anisotropi aliran, yang sering kali sulit ditangkap oleh model standar seperti model $k-\epsilon$ tanpa penyesuaian tambahan (Moore, Nabhani and Askari, 2017). *Fully turbulent layer*, di mana aliran turbulen mendominasi, membutuhkan pendekatan pemodelan yang berbeda, seperti fungsi dinding (*wall functions*) atau model dinding dekat (*near-wall models*), untuk menjembatani celah antara dinding dan inti turbulen.



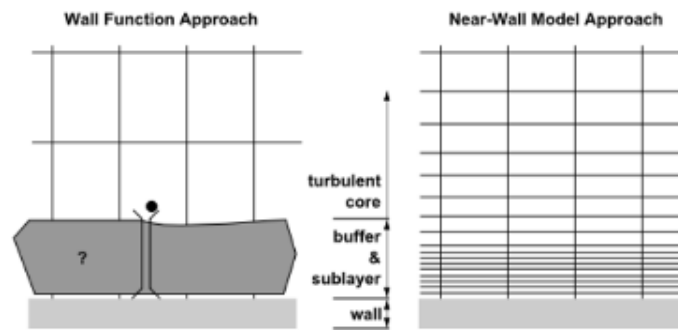
Gambar 2. 15 Nilai Y^+ pada *Boundary Condition*

Sumber : Moore et al., (2017)

Penggunaan parameter non-dimensi seperti y^+ dan U/U_t sangat penting dalam *computational fluid dynamics* (CFD) untuk mengelola kompleksitas simulasi aliran di dekat dinding, khususnya pada *viscous sub-layer*, yang sangat tipis dan memerlukan *mesh* beresolusi tinggi untuk diselesaikan secara akurat. Ketebalan lapisan ini dipengaruhi oleh faktor seperti kecepatan aliran dan viskositas fluida, sehingga simulasi langsung menjadi sangat mahal secara komputasi. Untuk mengatasi hal ini, *wall functions* digunakan sebagai solusi praktis. Persamaan semi-empiris ini menjembatani celah antara dinding dan wilayah turbulen penuh tanpa perlu menyelesaikan *viscous sub-layer* secara detail, sehingga secara signifikan mengurangi beban komputasi (Moore et al., 2017a; Thakur et al., 2022a).

Pendekatan *wall-function* menggunakan resolusi *mesh* yang lebih kasar, yang menyederhanakan pemodelan wilayah dekat dinding dengan menerapkan korelasi dari wilayah turbulen penuh untuk memperhitungkan keberadaan dinding (Thakur et al., 2022a). Metode ini banyak digunakan karena efisiensinya, meskipun mungkin kurang akurat dalam memprediksi tegangan geser dinding (*wall shear stress*) ketika *grid* disempurnakan (Thakur et al., 2022a). Sebagai alternatif, pendekatan model dinding dekat (*near-wall model*) memerlukan *mesh* yang lebih halus daripada *viscous sub-*

layer, yang meningkatkan biaya komputasi tetapi berpotensi memberikan hasil yang lebih akurat (Moore et al., 2017a; Thakur et al., 2022a). Metode ini digambarkan pada Gambar 2.16 di bawah ini:



Gambar 2. 16 Pendekatan *Wall Function* dan *Near-wall Model*

Sumber : Thakur et al., (2022)

Pilihan antara kedua metode ini sering kali bergantung pada persyaratan spesifik simulasi, seperti kebutuhan untuk resolusi detail struktur turbulensi atau keterbatasan sumber daya komputasi. Jarak dinding non-dimensi y^+ sangat berguna dalam menentukan resolusi *grid* yang tepat untuk menangkap fenomena dinding yang diperlukan, karena mencerminkan keseimbangan antara transport viskositas dan turbulen dalam lapisan batas (*boundary layer*) (Tinoco et al., 2010). Pendekatan ini merupakan bagian dari strategi yang lebih luas dalam CFD untuk mengoptimalkan desain *grid* dan efisiensi komputasi sambil menjaga akurasi dalam mensimulasikan perilaku aliran kompleks di dekat dinding (Moore et al., 2017a; Tinoco et al., 2010).

2.3.8 Model Turbulen *K-omega*

Pada tahun 1988, Wilcox membuat model turbulen untuk meningkatkan kemampuan untuk memprediksi aliran pada daerah gradient tekanan negatif dan separasi. Dia mengubah persamaan dissipation rate (epsilon) menjadi persamaan dissipation rate yang spesifik (omega), yang keduanya terhubung dengan nilai

energi kinetik turbulen (κ , atau k). Namun, perubahan yang paling signifikan tidak terjadi pada nilai ω itu sendiri, tetapi pada konstanta empiris yang digunakan.

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]\end{aligned}\quad (32)$$

dan viskositas pusaran turbulen dihitung dari:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (33)$$

Satu-satunya perbedaan adalah pada nilai yang diambil oleh beberapa variabel:

$$\sigma_k = 0.5 \quad \sigma_\omega = 0.5$$

$$\beta^* = 0.09 \quad \beta = \frac{3}{40} \quad \gamma = \frac{5}{9}$$

Perhatikan bahwa koefisien γ (disebut α dalam buku Wilcox) dipilih untuk menghasilkan nilai yang sesuai untuk konstanta Karman ($\kappa \approx 0.408$) melalui ekspresi:

$$\gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\sigma_\omega k^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (34)$$

Aliran pada *adverse pressure gradient* dan aliran separasi dapat dimodelkan dengan cukup akurat oleh model ini. Meskipun demikian, kelemahan model ini adalah bahwa sangat bergantung pada input dari *free stream turbulent condition*; misalnya, jika kita salah menginput nilai k , epsilon, atau ω pada inlet yang biasanya terhubung dengan daerah aliran bebas (*free stream*), hal ini dapat

menyebabkan solusi yang dihasilkan tidak akurat. Oleh karena itu, model ini hanya memiliki keunggulan di daerah yang dekat dengan dinding atau jumlah Reynold number yang rendah.

Sampai saat ini, masih ada banyak spekulasi tentang sensitivitas model ini terhadap kondisi input bebas aliran (*free stream*), seperti menganggap hilangnya persamaan *cross-diffusion* atau konstanta empiris dengan nilai yang tidak sesuai. Namun, pada dasarnya masih belum ada jawaban yang pasti.

2.3.9 Nilai Y^+

Dalam *computational fluid dynamics (CFD)*, nilai *Y plus* (y^+) adalah parameter kritis yang mengukur jarak non-dimensi dari dinding ke sel komputasi pertama, yang sangat penting untuk menangkap efek transport *viscous* dan turbulen di dalam *boundary layer* secara akurat. Parameter ini menjadi sangat signifikan dalam simulasi yang melibatkan aliran terbatas dinding (*wall-bounded flows*), karena memengaruhi resolusi fenomena dinding seperti gesekan, perpindahan panas, dan daya apung (*buoyancy*). Nilai minimum tertentu dari y^+ yang ditampilkan pada Tabel 2.4., diperlukan untuk memastikan bahwa sel komputasi yang berdekatan dengan dinding dapat menangkap fenomena tersebut dengan tingkat akurasi yang diinginkan. Pemilihan model turbulensi sangat menentukan resolusi grid di dekat dinding (*near-wall grid resolution*), dan mencapai nilai y^+ yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan grid melalui proses refinasi iteratif (Tinoco et al., 2010).

Tabel 2. 4 Standar Nilai Y^+

Turbulence Model	Near Wall Treatment	Range of Y-Plus
K-Epsilon	Standard Wall Functions	$30 < Y^+ < 300$
	Non-equilibrium Wall Function	$30 < Y^+ < 300$
	Scalable Wall Function	$Y^+ > 11.225$
	Enhanced Wall Treatment	$Y^+ < 5$
K-Omega SST	-	1
Spalart-Allmaras	-	1

Sumber : Tinoco et al. (2010)

Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.4., rentang nilai y^+ yang sesuai bergantung pada model turbulensi dan pendekatan *near-wall treatment* yang digunakan. Untuk model *K-Epsilon*, pendekatan *Standard Wall Functions* dan *Non-equilibrium Wall Functions* membutuhkan nilai y^+ dalam rentang 30 hingga 300, sedangkan pendekatan *Scalable Wall Functions* digunakan untuk nilai y^+ lebih dari 11,225. Pendekatan *Enhanced Wall Treatment* membutuhkan nilai y^+ kurang dari 5 untuk menangkap fenomena viskos secara akurat. Sementara itu, model *K-Omega SST* dan *Spalart-Allmaras* dirancang untuk bekerja dengan nilai y^+ sekitar 1, memberikan resolusi tinggi pada lapisan dekat dinding (*near-wall region*).

Namun, dalam penelitiannya, Knopp (2006) menunjukkan bahwa prediksi koefisien gesek (cf) dan posisi pemisahan aliran menggunakan model turbulensi SST $k-\omega$ menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dengan solusi referensi *low-Reynolds*, bahkan ketika digunakan grid dengan nilai Y^+ hingga 10. Pada simulasi aliran subsonik di sekitar airfoil dalam konfigurasi *high-lift*, hasil prediksi cf dari grid tipe-O dengan $Y^+(1) = 1, 4, 7$, dan 10 menunjukkan kesesuaian yang signifikan terhadap data eksperimen maupun solusi numerik resolusi tinggi. Hal ini ditunjukkan secara jelas pada Gambar 10 dalam publikasi tersebut, yang memperlihatkan bahwa prediksi cf tetap akurat dan stabil meskipun nilai Y^+ tidak

terlalu kecil. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan grid dengan $Y^+ \leq 10$ tetap dapat menjaga tingkat akurasi yang tinggi dalam menangkap fenomena penting seperti transisi dan pemisahan aliran ketika menggunakan model SST k- ω , asalkan pendekatan numerik dan kondisi batas diterapkan secara konsisten.

Dalam praktiknya, nilai y^+ membantu menentukan jumlah sel yang dibutuhkan untuk mencakup *boundary layer*, dengan rekomendasi menyatakan bahwa jumlah ini sebaiknya melebihi 15, idealnya sekitar 20, untuk memastikan hasil simulasi yang akurat (Moore, Nabhani and Askari, 2017). Nilai Y^+ dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Y^+ = \frac{(\rho \cdot v \cdot \gamma)}{\mu} \quad (35)$$

Sehingga *first layer height thickness* dapat ditentukan dengan rumus:

$$\gamma = \frac{Y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot v}$$

Dimana:

ρ	:	Densitas fluida	kg/m^3
v	:	Kecepatan geser	m/s
γ	:	Tinggi lapisan pertama (<i>first layer height thickness</i>)	m
μ	:	Viskositas	$pa \cdot s$ atau $kg/(m \cdot s)$

Penentuan tinggi lapisan pertama (*first layer height thickness*) dalam *boundary layer* sangat penting, terutama saat proses *meshing*. Oleh karena itu, sangat disarankan untuk menentukan dan menerapkan nilai *first layer height thickness* yang sesuai dengan kebutuhan simulasi.

Pentingnya y^+ semakin ditekankan dalam konteks desain *mesh* dan model yang berbeda, dimana nilai ini digunakan untuk memvalidasi profil kecepatan dan memastikan bahwa pola aliran di sekitar *jets* dan struktur lainnya direpresentasikan secara akurat dalam simulasi CFD (Moore, Nabhani and Askari, 2017). Selain itu, nilai y^+ merupakan ukuran dinamis yang mencerminkan keseimbangan antara gaya *viscous* dan turbulen, yang sangat penting untuk simulasi yang melibatkan geometri kompleks dan angka Reynolds tinggi. Hal ini secara langsung memengaruhi sumber daya komputasi yang diperlukan untuk pemodelan yang akurat (Tinoco et al., 2010). Secara keseluruhan, y^+ berfungsi sebagai parameter fundamental dalam CFD, yang membimbing resolusi grid dan memastikan bahwa simulasi dapat menangkap dinamika fluida yang kompleks di dekat dinding dengan akurasi tinggi.

2.3.10 Parametric

Analisis parametrik menggunakan *ANSYS Fluent* melibatkan penerapan *computational fluid dynamics (CFD)* untuk mengeksplorasi bagaimana berbagai parameter memengaruhi aliran fluida dan fenomena terkait. Pendekatan ini sangat berguna dalam mengoptimalkan desain dan meningkatkan kinerja pada berbagai aplikasi teknik. Sebagai contoh, dalam konteks turbin hidraulik, *ANSYS CFX*, alat CFD serupa, digunakan untuk melakukan analisis aliran tiga dimensi dalam kondisi *steady-state*, yang dapat diadaptasi untuk studi parametrik dengan memvariasikan parameter seperti laju aliran massa (*mass flow rate*), tekanan (*pressure*), dan kecepatan putaran (*rotational speed*) guna menilai dampaknya terhadap kinerja turbin (Nishi et al., 2016).

Proses ini umumnya melibatkan pembuatan model komputasi yang terperinci, seperti yang terlihat dalam studi turbin hidraulik di mana model tersebut disederhanakan dengan menghilangkan komponen tertentu untuk fokus pada karakteristik aliran tertentu (Nishi et al., 2016). Uji *grid independence*, yang sangat penting dalam analisis parametrik, memastikan bahwa hasil tidak terpengaruh secara signifikan oleh densitas *mesh*, sehingga memberikan data yang andal untuk mengevaluasi efek berbagai parameter (Shamsuddeen et al., 2024). Selain itu, penggunaan model turbulensi seperti *Shear Stress Transport (SST)* membantu menangkap dinamika aliran yang kompleks secara akurat, yang penting untuk melakukan analisis parametrik yang bermakna (Nishi et al., 2016).

Analisis ini juga dapat divalidasi dengan data eksperimental untuk memastikan akurasi, seperti yang ditunjukkan dalam studi di mana hasil CFD dibandingkan dengan data eksperimen, menunjukkan kesesuaian yang memadai dan dengan demikian memvalidasi model numerik (Shamsuddeen et al., 2024). Dengan secara sistematis memvariasikan parameter dan menganalisis data yang dihasilkan, para insinyur dapat memperoleh wawasan tentang konfigurasi dan kondisi operasi optimal untuk desain mereka, menjadikan analisis parametrik sebagai alat yang sangat kuat dalam bidang *computational fluid dynamics*.