

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, akan dijabarkan secara deskriptif hasil penelusuran pustaka mengenai topik yang dikaji, yakni mengenai CFD dan turbin air. Bab ini membahas teori-teori yang relevan dengan penelitian, menjabarkan formula-formula yang digunakan, serta mendefinisikan variabel atau parameter yang terkait dengan penelitian. Bab II ditulis dengan merujuk pada sumber-sumber yang kredibel atau terpercaya seperti buku, artikel, maupun penelitian terdahulu dengan menggunakan berbagai database.

2.1 Turbin Air

Turbin air merupakan komponen utama dalam sistem pembangkitan listrik tenaga air yang bekerja dengan memanfaatkan energi mekanik aliran fluida untuk menghasilkan daya. Pemahaman mengenai dasar kerja turbin air sangat penting sebagai landasan dalam perancangan dan analisis performa sistem turbin. Dalam kajian dasar ini, Dietzel (1988) dalam bukunya menjabarkannya sebagai berikut:

2.1.1 Teori Dasar Aliran (Hidrodinamika)

Air yang mengalir mempunyai energi yang dapat dimanfaatkan untuk memutar roda turbin. Oleh karena itu pusat tenaga air umumnya dibangun di sungai-sungai maupun di daerah pegunungan yang memiliki sumber air melimpah. Berdasarkan karakteristik tekanan air yang dimanfaatkan, pusat tenaga air dapat dibedakan menjadi dua golongan, yaitu pusat tenaga air tekanan tinggi dan pusat tenaga air tekanan rendah.

2.1.1.1 Beberapa Bentuk Persamaan Bernoulli

Pada suatu aliran air di dalam pipa terdapat berbagai bentuk energi yang bekerja pada fluida. Apabila pada aliran tersebut diambil suatu selisih ketinggian antara permukaan air atas dan permukaan air bawah yang dinyatakan dengan z , maka menurut prinsip Bernoulli besar energi aliran tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut.

Persamaan Energi

$$W = m \cdot g \cdot z + m \cdot \frac{p}{\rho} + m \cdot \frac{c^2}{2} \text{ Nm} \quad 1)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan energi dari suatu aliran fluida.

Keterangan notasi:

- W : Energi total fluida (Joule)
- m : Massa fluida (kg)
- g : Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- z : Ketinggian fluida dari titik acuan (m)
- p : Tekanan fluida (Pascal / N/m²)
- ρ : Massa jenis fluida (kg/m³)
- c : Kecepatan aliran fluida (m/s)

Dalam persamaan Bernoulli terdapat tiga komponen energi yang dinyatakan sebagai berikut:

- a. Energi Potensial:

$$E_p = m \cdot g \cdot z \quad 2)$$

- b. Energi Aliran:

$$E_f = m \cdot \frac{p}{\rho} \quad 3)$$

c. Energi Kinetik:

$$E_k = m \cdot \frac{c^2}{2} \quad 4)$$

Ketiga komponen tersebut menggambarkan total energi yang dimiliki oleh aliran fluida pada suatu titik tertentu. Secara prinsip, persamaan Bernoulli menyatakan bahwa pada setiap titik dalam suatu aliran fluida yang tidak mengalami gesekan dan berada dalam keadaan tunak, jumlah energi ketinggian tempat, energi tekanan, dan energi kecepatan akan selalu bernilai konstan.

Apabila pada aliran tersebut diambil sejumlah air untuk setiap satu kilogram massa fluida, maka besaran energi tersebut dinamakan spesifik energi dengan satuan Nm/kg. Dengan membagi persamaan energi dengan massa fluida m , diperoleh persamaan berikut.

Persamaan Spesifik Energi

$$w = g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} = \text{konstan. Nm/kg} \quad 5)$$

Persamaan tersebut disebut persamaan spesifik energi. Dengan,

w : Energi spesifik fluida (J/kg)

Apabila persamaan spesifik energi tersebut dibagi lagi dengan percepatan gravitasi g , maka diperoleh bentuk lain dari persamaan Bernoulli yang menyatakan besaran energi dalam bentuk ketinggian.

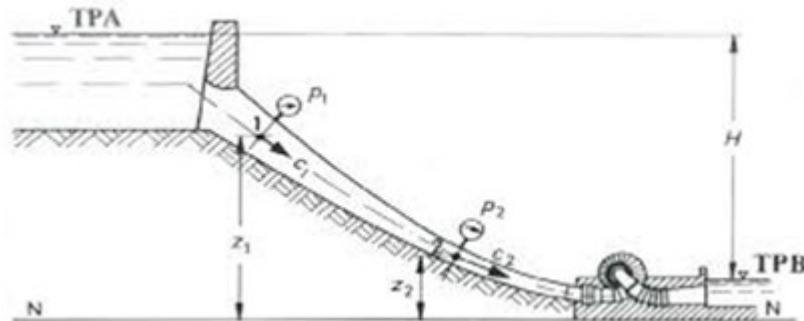
Persamaan Ketinggian Atau Head Pada Aliran

$$H = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{c^2}{2g} = \text{konstan. } m \quad 6)$$

Dengan,

H : Head total / tinggi energi (m)

Secara umum Dietzel (1988) menjabarkan persamaan Bernoulli dalam bentuk sebagai berikut.



Gambar 2.1 Bentuk Energi Pada Aliran Air

(Sumber: Dietzel (1988))

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad 7)$$

Keterangan notasi:

- z_1 : ketinggian aliran pada titik 1 (m)
- z_2 : ketinggian aliran pada titik 2 (m)
- p_1 : tekanan fluida pada titik 1 (N/m²)
- p_2 : tekanan fluida pada titik 2 (N/m²)
- ρ : kerapatan fluida (kg/m³)
- c_1 : adalah kecepatan aliran pada titik 1 (m/detik)
- c_2 : adalah kecepatan aliran pada titik 2 (m/detik)
- g : percepatan gravitasi (m/detik²)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan bentuk energi dapat terjadi sepanjang aliran fluida. Sebagai contoh, apabila luas penampang saluran diperkecil maka kecepatan aliran akan meningkat. Akibatnya energi kecepatan bertambah, sedangkan energi tekanan akan berkurang.

2.1.1.2 Daya yang Dihasilkan Turbin

Daya yang dihasilkan turbin dapat ditentukan dari kapasitas air yang mengalir dan tinggi jatuh air yang tersedia. Hubungan antara parameter tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad 8)$$

Keterangan notasi:

- P : daya yang dihasilkan turbin (W)
- \dot{V} : kapasitas atau debit air yang mengalir (m³/detik)
- ρ : kerapatan atau massa jenis air (kg/m³)
- g : percepatan gravitasi (m/detik²)
- H : tinggi jatuh air (m)
- η_T : adalah randemen atau efisiensi turbin

Apabila yang diketahui adalah massa aliran air, maka daya turbin dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P = \dot{m} \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad 9)$$

Keterangan notasi:

- \dot{m} : massa air yang mengalir (kg/detik)

Hubungan antara kapasitas aliran dan massa aliran dinyatakan sebagai berikut.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad 10)$$

atau

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v \quad 11)$$

Keterangan notasi:

v : volume spesifik (m^3/kg)

Besarnya nilai kerapatan dan volume spesifik untuk zat cair relatif tidak berubah, sedangkan pada gas dan uap nilainya sangat dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur. Pada aliran fluida yang tidak termampatkan, jumlah debit yang mengalir melalui setiap penampang pipa adalah sama. Hubungan antara debit aliran, luas penampang, dan kecepatan aliran dinyatakan dengan persamaan:

$$\dot{V} = A \cdot c \quad 12)$$

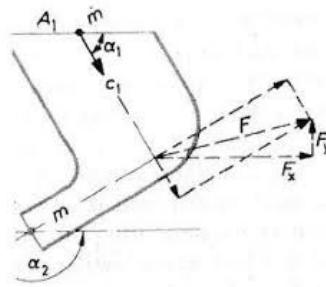
Dengan.

A : luas penampang turbin (m^2)

Persamaan ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran berbanding terbalik dengan luas penampang pipa. Apabila luas penampang pipa diperkecil, maka kecepatan aliran akan meningkat. Sebaliknya, jika luas penampang diperbesar maka kecepatan aliran akan menurun.

2.1.2 Gaya, Daya yang Dihasilkan Turbin, Rumus Euler, dan Bentuk Sudu

Aliran air yang mengenai suatu permukaan atau saluran dapat mengalami perubahan arah dan kecepatan. Perubahan ini menyebabkan perubahan momentum aliran yang menghasilkan gaya pada permukaan tersebut. Pada turbin air, gaya ini dimanfaatkan untuk memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya mekanik.



Gambar 2.2 Gaya Pada Pembelokan Aliran Air

(Sumber: Dietzel (1988))

Merujuk pada Gambar 2.2 di atas, apabila suatu aliran air dengan kecepatan c_1 masuk ke suatu saluran atau sudu dengan sudut α_1 , kemudian keluar dengan kecepatan c_2 dan sudut α_2 , maka perubahan momentum aliran akan menimbulkan gaya. Menurut kaidah impuls dalam buku Dietzel (1988) gaya yang bekerja ialah sebagai berikut:

$$F \cdot t = m \cdot c_1 - m \cdot c_2 \quad 13)$$

Untuk waktu $t = 1$ detik diperoleh:

$$F = m \cdot c_1 - m \cdot c_2 \quad 14)$$

Apabila dinyatakan berdasarkan kapasitas aliran:

$$F = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_1 - \dot{V} \cdot \rho \cdot c_2 \quad 15)$$

Dengan,

F : gaya (N)

t : waktu (detik)

Komponen Gaya

Komponen gaya arah x:

$$F_x = \dot{V} \cdot \rho \cdot (c_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_2 \cdot \cos \alpha_2) \quad (16)$$

Komponen gaya arah y:

$$F_y = \dot{V} \cdot \rho \cdot (c_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \sin \alpha_2) \quad (17)$$

Dengan,

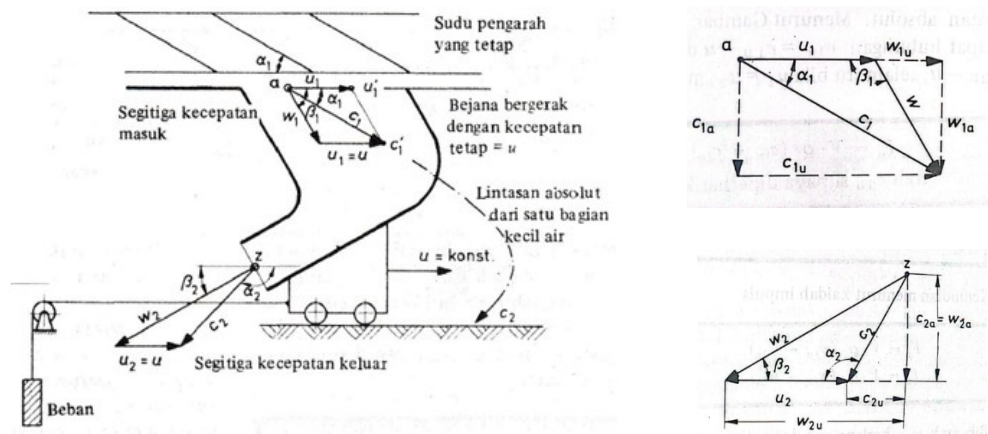
F_x : komponen gaya arah x (N)

F_y : komponen gaya arah y (N)

α_1 : sudut aliran masuk (derajat atau radian)

α_2 : sudut aliran keluar (derajat atau radian)

2.1.2.1 Pemindahan Gaya ke Turbin



Gambar 2.3 Gaya Gaya Pada Turbin Air

(Sumber: Dietzel (1988))

Dalam analisis aliran pada turbin digunakan tiga jenis kecepatan yaitu kecepatan mutlak, kecepatan relatif, dan kecepatan tangensial. Dietzel (1988) menjabarkan hubungan antara ketiga kecepatan tersebut sebagai berikut:

$$w = c - u \quad (18)$$

$$c = u + w \quad (19)$$

Keterangan notasi,

c : kecepatan mutlak fluida terhadap kerangka diam (m/detik)

w : kecepatan relatif fluida terhadap sudu (m/detik)

u : kecepatan tangensial roda turbin (m/detik)

Komponen Kecepatan

Komponen kecepatan tangensial:

$$c_u = c \cdot \cos \alpha \quad 20)$$

$$w_u = w \cdot \cos \beta \quad 21)$$

Keterangan notasi

c_u : komponen tangensial kecepatan mutlak (m/detik)

w_u : komponen tangensial kecepatan relatif (m/detik)

α : sudut kecepatan mutlak

β : sudut kecepatan relatif

Gaya Tangensial

Menurut kaidah impuls oleh Dietzel (1988):

$$F_u = \dot{V} \cdot \rho \cdot (w_{1u} - w_{2u}) \quad 22)$$

Jika arah w_{2u} berlawanan dengan w_{1u} :

$$F_u = \dot{V} \cdot \rho \cdot (w_{1u} + w_{2u}) \quad 23)$$

Dengan hubungan:

$$w_{1u} = c_{1u} - u \quad 24)$$

$$w_{2u} = c_{2u} - u \quad 25)$$

Jika $u_1 = u_2$ maka:

$$F_u = \dot{V} \cdot \rho \cdot (c_{1u} - c_{2u}) \quad (26)$$

Dengan,

F_u : gaya tangensial pada sudu turbin (N)

c_{1u} : komponen tangensial kecepatan masuk (m/detik)

c_{2u} : komponen tangensial kecepatan keluar (m/detik)

w_{1u} : komponen tangensial kecepatan relatif masuk (m/detik)

w_{2u} : komponen tangensial kecepatan relatif keluar (m/detik)

Momen Puntir pada Turbin

Momen puntir pada poros turbin:

$$M_t = F_u \cdot r \quad (27)$$

Dengan komponen kecepatan:

$$M_t = \dot{V} \cdot \rho \cdot (r_1 \cdot w_{1u} - r_2 \cdot w_{2u}) \quad (28)$$

atau

$$M_t = \dot{V} \cdot \rho \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u}) \quad (29)$$

Keterangan notasi,

M_t : momen puntir turbin (N·m)

r : jari-jari roda turbin (m)

r_1 : jari-jari pada sisi masuk (m)

r_2 : jari-jari pada sisi keluar (m)

Daya yang Dihasilkan Turbin

Dietzel (1988) menuliskan gaya daya turbin sebagai berikut:

$$P = M_t \cdot \omega \quad (30)$$

Dengan memasukkan momen puntir:

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot \omega \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u}) \quad (31)$$

Karena:

$$\omega \cdot r = u \quad (32)$$

maka:

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \quad (33)$$

Daya turbin juga dapat dinyatakan sebagai:

$$P = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (34)$$

Keterangan notasi,

ω : kecepatan sudut turbin (rad/detik)

Rumus Euler Turbin

Dengan menyamakan kedua persamaan daya:

$$\dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T = \dot{V} \cdot \rho \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}) \quad (35)$$

Sehingga:

$$H = \frac{u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (36)$$

Dengan komponen kecepatan relatif:

$$H = \frac{u_1 \cdot w_{1u} - u_2 \cdot w_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (37)$$

Hubungan Tinggi Air Jatuh dan Bentuk Sudu

Untuk tinggi air jatuh kecil:

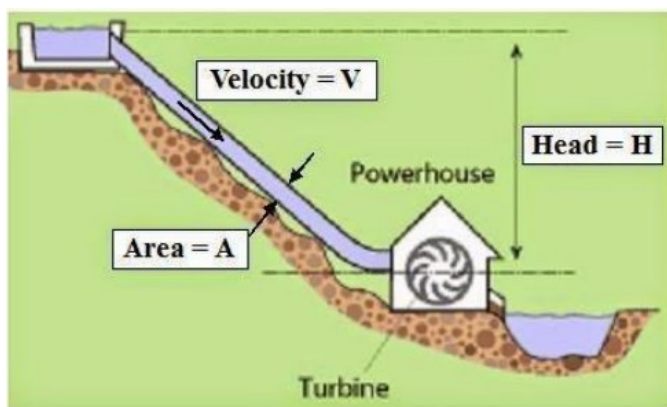
$$H = \frac{u_1 \cdot w_{1u} - u_2 \cdot w_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (38)$$

Untuk tinggi air jatuh besar:

$$H = \frac{u_1 \cdot w_{1u} + u_2 \cdot w_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (39)$$

2.1.3 Prinsip Kerja Turbin Air

Alfarizi dkk. (2024) dalam penelitian mereka menyatakan bahwa prinsip operasional turbin air melibatkan interaksi antara air dan bilah turbin (*runner*). Saat air mengalir melalui turbin, ia memberikan gaya pada bilah, menyebabkan mereka berputar. Gerakan rotasi ini kemudian diubah menjadi energi mekanik, yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk pembangkit listrik. Efisiensi konversi energi ini dipengaruhi oleh beberapa parameter desain, termasuk konfigurasi bilah turbin dan sudut baling-baling pemandu, yang mengarahkan aliran air ke bilah.



Gambar 2.4 Instalasi Turbin Air

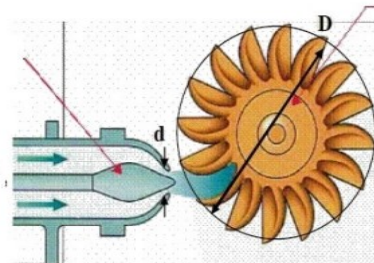
(Sumber: Rahmawan (2024))

2.1.4 Klasifikasi Turbin Air

2.1.4.1 Berdasarkan Perubahan Tekanan Fluida

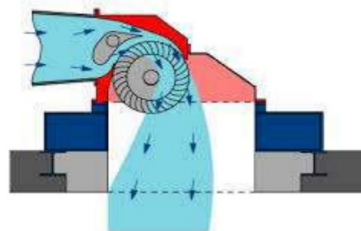
1. Turbin Impuls (Turbin Aksi)

Turbin impuls menggunakan energi kinetik *nozzle* untuk mengubah seluruh energi potensial air guna menghasilkan kecepatan air yang tinggi, dan diarahkan untuk menggerakkan sudu (*runner*). Karena bentuk *runner*, tekanan pada sisi masuk dan keluar dari *runner* tetap konstan dan biasanya sama dengan tekanan atmosfer selama beroperasi. Perubahan momentum aliran fluida menyebabkan *runner* menerima gaya dorong sebagai akibat dari konversi momentum aliran fluida. Hal ini menyebabkan *runner* berputar, yang kemudian memutar poros turbin. Turbin Pelton dan Banki adalah contoh turbin impuls (Haurissa, 2022).



Gambar 2.5 Turbin Pelton









(Sumber:Rayyadi et al. (2020))



Gambar 2.6 Turbin Banki atau *Cross flow*

(Sumber:Kosjoko (2015))

Tabel 2.1 Turbin Impuls

impuls turbine			
The acts only on a part of the runner. All hydraulic energy is converted into kinetic energy before entering the runner. The fluid does not change pressure on its way through the runner			
NAME		RUNNER	GUIDE VANE
PELTON TURBINE		numerous double buckets The water jet enters the runner tangentially 	1 to 6 adjustable spear valves 
TURGO IMPULSE		numerous double bended buckets The water jet enters the plane of the runner at an angle of 20° 	1 to adjustable spear valves
CROSS FLOW		cylindrical runner with 	one adjustable profiled 

(Sumber: PPPPTK (2015))

2. Turbin Reaksi

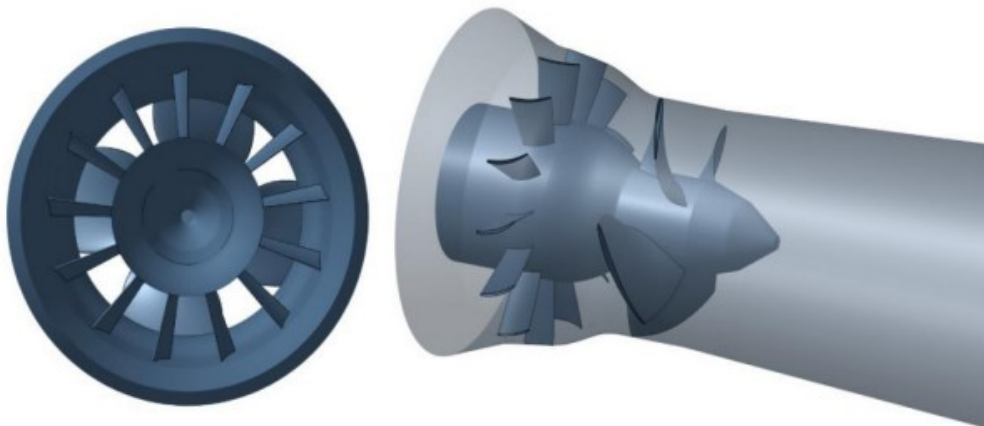
Pada turbin tipe ini energi yang masuk diubah menjadi energi tekan. Tekanan pada sisi masuk *runner* lebih besar daripada tekanan sisi keluar. Tekanan ini dimanfaatkan, dengan mengubah tekanan menjadi kecepatan. Akibatnya, kecepatan relatif air keluar dari *runner* lebih besar daripada kecepatan relatif air

masuk ke *runner*. Turbin Francis dan Kaplan adalah contoh turbin reaksi (Haurissa, 2022).



Gambar 2.7 Turbin Francis

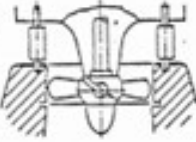


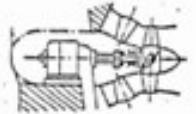
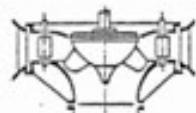
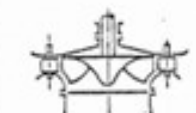

(Sumber: Zhang et al. (2023))



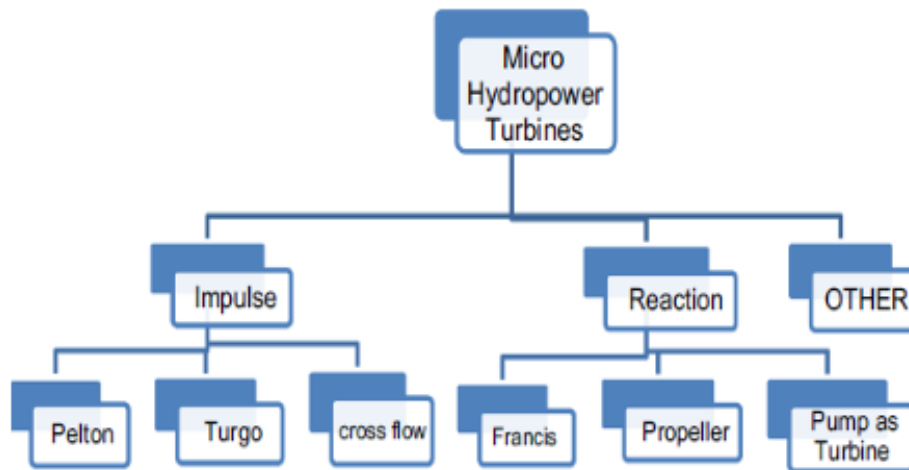
Gambar 2.8 Turbin Kaplan

(Sumber: Barsi et al., (2023))

Tabel 2.2 Turbin Reaksi

<i>Reaction turbine</i>			
The turbine runner is totally submerged in the water. There is a higher pressure at the runner inlet than at the outlet			
NAME		RUNNER	DISTRIBUTOR
AXIAL FLOW KAPLAN TURBINE		propeller with profiled, adjustable blades 	adjustable or fixed, radial guide vanes 
TUBE TURBINE (S-TURBINE)		like KAPLAN	adjustable or fixed semi axial guide vanes
SEMI AXIAL FLOW DERIAZ TURBINE		semi axial runner with adjustable blades	adjustable, radial guide vane
RADIAL FLOW FRANCIS TURBINE		radial runner 	adjustable, radial guide vane

(Sumber: PPPPTK (2015))



Gambar 2.9 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Perubahan Tekanan Fluida

(Sumber: Mafruddin & Irawan (2020))

2.1.4.2 Berdasarkan Arah Aliran Air

1. Arah aliran radial

Turbin aliran radial adalah turbin yang arah alirannya tegak lurus dengan arah putaran poros turbin. Turbin aliran radial digunakan untuk laju alir (aliran fluida kerja) rendah dan perbedaan tekanan (*difference pressure*) tinggi. Turbin tipe ini paling sering digunakan pada aliran fluida kompresible

2. Arah aliran aksial

Turbin dengan aliran axial yang sejajar dengan arah poros turbin Turbin aliran aksial digunakan untuk alir laju alir tinggi dan perbedaan tekanan rendah mulai dari 1 hingga 40 bar. Sebagian besar, *axial flow turbine* digunakan dalam aplikasi yang melibatkan fluida kompresibel. Dalam banyak kasus, *axial flow turbine* lebih efisien daripada turbin radial *inflow* (Mafruddin & Irawan, 2020).

2.1.4.3 Berdasarkan Arah Tembakan Fluida

Klasifikasi turbin atau kincir air berdasarkan arah tembakan fluida menggambarkan bagaimana aliran air diarahkan ke sudu (*blade*) untuk menghasilkan gaya gerak. Tim PPPPTK (2015) dalam buku yang ditulis oleh

mereka, menjabrkan jika dalam kategori ini terdapat tiga jenis utama kincir air dalam klasifikasi ini, yaitu:

1. Turbin Tipe *Undershot*

Ada tipe ini, aliran air diarahkan dari bagian bawah kincir. Kincir ini bekerja optimal pada sungai dengan aliran cepat dan elevasi rendah. Efisiensinya tergolong rendah, sekitar 25%, namun bisa ditingkatkan hingga 70% dengan modifikasi seperti desain Poncelet. Arah tembak fluida bersifat horizontal dari bawah kincir, dan cenderung mengandalkan energi kinetik air.

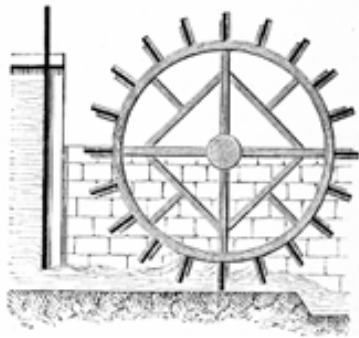
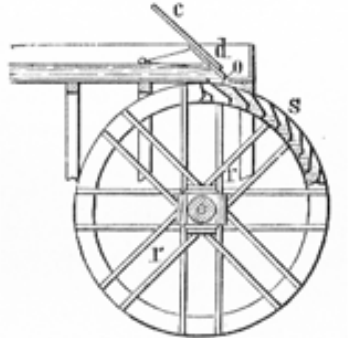
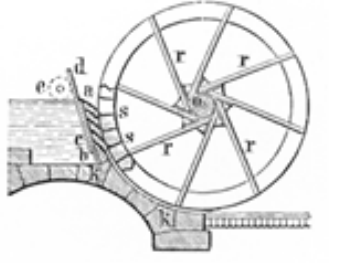
2. Turbin Tipe *Overshot*

Pada tipe *overshot*, air diarahkan dari atas kincir, memanfaatkan energi potensial air yang jatuh. Aliran fluida menyuplai air ke ember-ember di tepi kincir sehingga memberikan momen puntir lebih besar. Efisiensinya tinggi, berkisar antara 75% hingga 80%. Tipe ini cocok untuk lokasi dengan perbedaan elevasi tinggi dan debit air yang lebih kecil.

3. Turbin Tipe *Breastshot (Middle-shot)*

Aliran air diarahkan ke bagian tengah kincir, sehingga memanfaatkan kombinasi energi potensial dan energi kinetik. Tipe ini lebih efisien dibandingkan *undershot* (sekitar 45–75%) dan cocok untuk lokasi dengan *head* sedang. Fluida mengenai *blade* secara tegak lurus atau miring, memberikan distribusi gaya yang lebih seimbang.

Tabel 2.3 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Arah Tembakan Fluida

	<p>Kincir air tipe <i>undershot</i></p> <p>Tipe ini adalah yang tertua. Vitruv membuat tipe kincir air ini pada abad pertama sebelum masehi. Kincir air ini dapat digunakan di sungai dengan aliran yang cepat. Efisiensinya sekitar 25%. Pada abad ke-19, tipe kincir ini menjadi lebih berkembang. Terutama yang didisain oleh Poncelet yang mencapai efisiensi sebesar 70%.</p>
	<p>Kincir air tipe <i>overshot</i></p> <p>Kincir air tipe overshot sudah digunakan sejak abad ke-14. Jika kincir ini dibuat dengan baik dan ketinggian reservoir air bagian atas memperbolehkan diameter kincir yang besar, efisiensinya mencapai 75% atau bahkan kadangkala mencapai 80%.</p>
	<p>Kincir ini adalah tipe kincir yang paling terbaru, yang dikembangkan pada abad ke-16. Kincir ini adalah gabungan antara dua buah konstruksi dasar. Versi terdahulunya dapat mencapai efisiensi sebesar 45%, tipe-tipe modern dapat mencapai efisiensi sebesar 75%.</p>

(Sumber: PPPPTK (2015))

2.1.4.4 Berdasarkan Kapasitas Daya Yang Dihasilkan

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dapat diklasifikasikan berdasarkan kapasitas daya listrik yang dihasilkannya. Klasifikasi ini penting untuk menentukan skala pembangunan, kebutuhan infrastruktur, hingga potensi integrasi dengan jaringan listrik nasional maupun sistem *off-grid*. Berikut adalah klasifikasi jenis pembangkit listrik tenaga air berdasarkan kapasitas daya:

1. *Picohydro* (<5 kW)

Merupakan sistem pembangkit tenaga air berskala sangat kecil, umumnya digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga atau komunitas kecil di daerah terpencil. Instalasi *picohydro* sangat sederhana, biaya rendah, dan memanfaatkan aliran sungai kecil.

2. *Microhydro* (5–100 kW)

Skala ini cocok untuk desa atau kelompok komunitas dengan kebutuhan daya lebih besar, termasuk fasilitas umum kecil. Sistem *microhydro* banyak digunakan dalam program elektrifikasi pedesaan, khususnya di wilayah dengan akses terbatas terhadap jaringan listrik nasional.

3. *Minihydro* (100 kW – 1 MW)

Digunakan untuk keperluan komersial skala kecil atau sebagai sumber daya alternatif bagi industri ringan. *Minihydro* dapat terhubung ke jaringan listrik lokal dan sering menjadi pilihan utama untuk pengembangan energi terbarukan berbasis komunitas.

4. *Smallhydro* (1 – 10 MW)

Pembangkit jenis ini sudah memasuki kategori komersial skala menengah. Dapat melayani jaringan listrik daerah dan sangat bermanfaat dalam pengembangan sistem *hybrid* dengan sumber daya lainnya seperti solar PV.

5. *Mediumhydro* (10 – 100 MW)

Diperuntukkan bagi sistem kelistrikan regional atau sebagai bagian dari pembangkit utama dalam sistem interkoneksi listrik nasional. Instalasi *mediumhydro* membutuhkan infrastruktur yang lebih kompleks dan biaya investasi yang cukup besar.

6. *Largehydro* (>100 MW)

Merupakan pembangkit listrik tenaga air berskala besar, sering kali dijadikan tulang punggung sistem kelistrikan nasional. PLTA jenis ini melibatkan pembangunan bendungan besar dan reservoir yang berdampak signifikan terhadap lingkungan dan sosial-ekonomi.

Klasifikasi ini menunjukkan bahwa teknologi hidroelektrik memiliki fleksibilitas tinggi dalam penerapan, mulai dari kebutuhan rumah tangga hingga penyediaan listrik skala nasional.

Tabel 2.4 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Kapasitas Daya Yang Dihasilkan

Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Air	Kapasitas
<i>Picohydro</i>	Kurang dari 5 kW
<i>Microhydro</i>	5 – 100 kW
<i>Minihydro</i>	100 kW – 1 MW
<i>Smallhydro</i>	1 – 10 MW
<i>Mediumhydro</i>	10 – 100 MW
<i>Largehydro</i>	Lebih dari 100 MW

(Sumber: Saputraa et al. (2024))

2.1.4.5 Aplikasi Turbin Berdasarkan *Head*

Turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan tinggi jatuhnya air (*Head*) menjadi tiga kategori utama, yaitu:

1. *Head* Tinggi (*High Head* > 50 m)

Digunakan pada daerah dengan perbedaan ketinggian yang besar, biasanya di pegunungan. Turbin yang umum digunakan adalah Pelton, Turgo, dan Multi-jet Pelton, karena mampu mengubah energi potensial menjadi energi kinetik secara efisien pada tekanan tinggi.

2. *Head* Menengah (*MediumHead* 10–50 m)

Cocok untuk daerah dengan aliran air sedang dan kontur tanah berbukit. Jenis turbin yang digunakan antara lain Francis (Spiral Case), Cross-flow, dan Turgo. Turbin-turbin ini menawarkan keseimbangan antara efisiensi dan kebutuhan infrastruktur.

3. *Head* Rendah (*LowHead* < 10 m)

Digunakan di daerah dataran rendah dengan perbedaan ketinggian kecil namun debit air besar. Turbin yang sesuai adalah Kaplan, Propeller, Francis tipe standar, dan *Cross-flow*, karena mampu beroperasi optimal dalam tekanan rendah dan aliran besar.

Tabel 2.5 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Head

Tipe Turbin	Klasifikasi Head		
	<i>High</i> > 50 m	<i>Medium</i> 10-15 m	<i>Low</i> < 10 m
Impuls	Pelton	<i>Cross flow</i>	
	Turgo	Turgo	<i>Cross flow</i>
	<i>Multi Jet Pelton</i>	<i>Multi Jet Pelton</i>	
Reaksi		Francis	Francis
		(<i>Spiral Case</i>)	Propeler
			Kaplan

(Sumber : Mafruddin & Irawan (2020))

2.1.5 Komponen Utama Turbin Air

Turbin air memiliki komponen yang dibagi menjadi dua klasifikasi utama. Kedua komponen utama ini adalah rotor dan stator. Mafruddin & Irawan (2020) dalam buku yang mereka tulis menjabarkannya sebagai berikut ini:

1. Rotor

Rotor adalah komponen turbin yang bergerak memutar serta memiliki fungsi sebagai penerima momentum atau tekanan air. Rotor sendiri terdiri atas beberapa bagian yakni:

a. Sudu Turbin

Sudu atau yang biasa disebut dengan *runner* adalah komponen turbin air yang berfungsi menerima beban aliran air yang dikeluarkan oleh nosel. Sudu turbin akan bergerak memutar sebagai dan menghasilkan torsi akibat dari tekanan air dan mengonversi energi yang dihasilkan dan menyalurkannya melalui poros turbin.

b. Poros Turbin

Poros turbin adalah komponen yang difungsikan untuk menyalurkan aliran energi mekanik dari sudu turbin pada generator untuk dikonversi menjadi energi listrik.

c. Bantalan

Komponen ini berfungsi untuk mengurangi gesekan antara rumah turbin atau casing dengan poros.

2. Stator

Stator adalah bagian turbin yang bersifat statis atau diam pada sistem turbin. Stator masih terbagi dalam beberapa komponen, yakni:

a. Nosel

Nosel berguna untuk menyalurkan aliran air agar kecepatan fluida sebelum masuk turbin menjadi lebih tinggi. Nosel juga difungsikan guna mengarahkan aliran fluida

b. Casing

Casing atau rumah turbin berfungsi sebagai ruang atau kedudukan dari komponen turbin lain sebagaimana rotor dan lain-lain.

2.1.6 Sudu Turbin Air

Sudu turbin, atau yang dikenal sebagai bilah turbin, merupakan komponen esensial dalam sistem turbin yang berfungsi mengubah energi fluida menjadi energi mekanik. Dalam konteks turbin air, sudu menerima aliran air bertekanan tinggi dan mengubahnya menjadi gerakan rotasi pada poros turbin, yang selanjutnya dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui generator. Efisiensi konversi energi dipengaruhi oleh desain, bentuk, dan jenis sudu yang digunakan (Putri, 2016)

2.1.6.1 Fungsi Sudu Turbin

Sudu turbin memiliki peran utama dalam mengarahkan dan mengontrol aliran fluida untuk menghasilkan torsi yang memutar rotor turbin. Dalam turbin impuls, sudu berfungsi mengubah energi kinetik fluida menjadi energi mekanik melalui gaya dorong langsung. Sementara itu, pada turbin reaksi, sudu tidak hanya mengarahkan aliran tetapi juga memanfaatkan perubahan tekanan fluida untuk menghasilkan gaya reaksi yang menyebabkan rotor berputar (Kurniady et al., 2019).

2.1.6.2 Jenis-Jenis Sudu Turbin

Merujuk pada buku yang ditulis oleh Mafruddin & Irawan (2020), sudu turbin dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja dan desainnya:

1. Sudu Impuls

Digunakan dalam turbin impuls seperti turbin Pelton, sudu ini menerima aliran fluida berkecepatan tinggi yang diarahkan oleh *nozzle*. Energi kinetik fluida diubah menjadi energi mekanik saat fluida membentur sudu, menyebabkan rotor berputar. Ciri khas sudu impuls adalah bentuknya yang simetris dan dirancang untuk memaksimalkan perubahan momentum fluida.

2. Sudu Reaksi

Diterapkan pada turbin reaksi seperti turbin Francis dan Kaplan, sudu ini bekerja berdasarkan prinsip perubahan tekanan fluida di sepanjang sudu. Desain sudu reaksi biasanya tidak simetris dan dirancang untuk memanfaatkan perbedaan tekanan antara *inlet* dan *outlet* untuk menghasilkan gaya yang memutar rotor.

3. Sudu Tetap dan Sudu Gerak

Dalam beberapa desain turbin, terdapat kombinasi sudu tetap (*stator*) dan sudu gerak (*rotor*). Sudu tetap berfungsi mengarahkan aliran fluida ke sudu gerak dengan sudut dan kecepatan tertentu, sementara sudu gerak mengubah energi fluida menjadi energi mekanik.

Dalam penelitian ini, sudu yang digunakan adalah sudu tipe propeller, yaitu jenis sudu reaksi yang berbentuk menyerupai baling-baling dan umumnya diaplikasikan pada turbin *axial flow* dengan karakteristik *head* rendah dan debit besar. Pemilihan sudu propeller didasarkan pada kemampuannya dalam beroperasi secara efisien pada aliran air dengan energi potensial yang terbatas, seperti pada sistem *picohydro*. Sudu tipe ini dirancang untuk menghasilkan gaya dorong

melalui perbedaan tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet* sudu, sehingga memungkinkan konversi energi fluida menjadi energi mekanik secara efektif meskipun pada kondisi aliran yang relatif lambat.



Gambar 2.10 Contoh Type Sudu Propeller

(Sumber: Rendi et al. (2020))

Dalam konteks penelitian ini, variasi jumlah sudu (tiga, empat, lima, dan enam bilah sudu) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi sudu terhadap efisiensi dan performa turbin secara keseluruhan.

2.1.6.3 Pengaruh Desain Sudu terhadap Kinerja Turbin

Desain sudu, termasuk bentuk dan sudutnya, memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi dan daya *output* turbin. Penelitian menunjukkan bahwa variasi bentuk sudu, seperti sudu semi-lingkaran, eliptik, dan datar, mempengaruhi kecepatan putar, torsi, dan efisiensi turbin. Pemilihan jenis dan desain sudu yang tepat sangat penting dalam perancangan turbin untuk memastikan konversi energi yang optimal sesuai dengan karakteristik aliran fluida yang tersedia (Pradisha et al., 2023).

2.2 Computational Fluid Dynamic

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah bidang penting dalam mekanika fluida yang menggunakan metode numerik untuk memecahkan dan menangani masalah yang melibatkan aliran fluida.

2.2.1 Prinsip Dasar Computational Fluid Dynamic

Prinsip dasar *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melibatkan penggunaan metode numerik untuk menganalisis dan memecahkan masalah aliran fluida. Berikut adalah beberapa komponen kunci yang mencakup prinsip dasar CFD:

1. Sebelum analisis dilakukan, geometri dari daerah aliran harus dibuat. Ini mencakup semua fitur yang relevan dari sistem yang akan dianalisis.
2. Geometri yang dibuat dibagi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut grid atau *mesh*. *Mesh* ini merupakan representasi diskrit dari domain aliran dan merupakan bagian penting dalam simulasi.
3. Menentukan sifat-sifat fisik dari fluida yang akan dianalisis, termasuk densitas, viskositas, dan sifat termal. Ini penting untuk memprediksi bagaimana fluida akan berperilaku di bawah kondisi tertentu.
4. Sebagian besar analisis CFD didasarkan pada persamaan Navier-Stokes, yang menggambarkan konservasi momentum, energi, dan massa dalam aliran fluida.
5. Mengatur kondisi batas yang diperlukan untuk simulasi. Ini berisi informasi tentang kecepatan aliran, tekanan, suhu, dan sifat lainnya di batas-batas domain.

6. *Solver* digunakan untuk memecahkan model aliran dengan metode numerik yang berbeda, seperti metode beda hingga, elemen hingga, atau volume hingga.
7. Setelah solusi dihitung, hasilnya diolah dan divisualisasikan untuk analisis. *Post-processing* mencakup pembuatan grafik, kontur, dan representasi visual lainnya dari aliran fluida dan distribusi suhu.

2.2.2 Persamaan Matematis dalam *Computational Fluid Dynamic*

Menurut Versteeg & Malalasekera (2007), sistem persamaan yang mengatur aliran fluida Newtonian kompresibel tiga dimensi yang bergantung terhadap waktu terdiri dari persamaan kontinuitas, persamaan momentum pada masing-masing arah koordinat, serta persamaan energi. Persamaan-persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut:

2.2.2.1 Persamaan kontinuitas

Persamaan kontinuitas menyatakan hukum kekekalan massa dalam aliran fluida, yaitu massa tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Fox & McDonald (2011) menuliskan bentuk umum persamaan kontinuitas adalah sebagai berikut:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad 40)$$

Keterangan notasi,

ρ = densitas fluida (kg/m³)

\vec{V} = vektor kecepatan (m/s)

t = waktu (s)

Dengan asumsi untuk penelitian ini yakni aliran *steady* dan fluida *incompressible* maka persamaan menjadi:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad 41)$$

Dalam bentuk kartesian,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 42)$$

Keterangan notasi,

u = komponen kecepatan pada sumbu x (m/s)

v = komponen kecepatan pada sumbu y (m/s)

w = komponen kecepatan pada sumbu z (m/s)

2.2.2.2 Persamaan Momentum

Persamaan momentum merupakan penerapan hukum II Newton pada elemen fluida, yang menyatakan bahwa perubahan momentum sama dengan resultan gaya yang bekerja. Bentuk umum persamaan momentum sebagaimana dijabarkan oleh Fox & McDonald (2011) adalah sebagai berikut:

$$\rho \vec{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) \quad 43)$$

Keterangan notasi,

ρ = densitas fluida (kg/m³)

\vec{g} = percepatan gravitasi (m/s²)

$\boldsymbol{\tau}$ = tensor tegangan fluida (Pa)

Bentuk persamaan momentum Navier–Stokes dengan asumsi *incompressible* dan μ konstan:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad 44)$$

Keterangan notasi,

p = tekanan fluida (Pa)

μ = viskositas dinamik (Pa·s)

Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa fluida dalam kondisi kerja *steady incompressible*, maka persamaannya menjadi:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \rho\vec{g} - \nabla p + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (45)$$

Persamaan di atas apabila diaplikasikan dalam bentuk kartesian maka menjadi:

Arah x ,

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (46)$$

Keterangan notasi,

g_x = komponen gravitasi arah x

Arah y ,

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (47)$$

Keterangan notasi,

g_y = komponen gravitasi arah y

Arah z ,

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (48)$$

Keterangan notasi,

g_z = komponen gravitasi arah z

2.2.2.3 Persamaan Energi

Sementara itu Versteeg & Malalasekera (2007) menuliskan persamaan energi dalam *Computational Fluida Dynamics* sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \mathbf{u}) = -p(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_i \quad (49)$$

Dengan

i : energi internal spesifik fluida,

T : temperatur fluida,

k : konduktivitas termal fluida,

Φ : disipasi viskositas,

S_i : sumber energi dalam sistem

Dalam penelitian ini analisis perpindahan panas tidak menjadi fokus kajian, sehingga persamaan energi tidak digunakan dalam model simulasi.

2.2.3 Konsep Domain Aliran Dan Batas-Batas (*Boundary Condition*)

Dalam dinamika fluida komputasi (CFD), konsep domain aliran dan kondisi batas sangat penting untuk mensimulasikan perilaku fluida secara akurat. Versteeg & Malalasekera (2007) dalam bukunya menjabarkan domain aliran dan kondisi batas ini sebagai berikut:

1. Alur Domain

Domain aliran mengacu pada wilayah spesifik di mana aliran fluida dianalisis. Ini mencakup semua batas fisik dan cairan itu sendiri. Karakteristik domain aliran, seperti bentuk dan ukurannya, secara signifikan mempengaruhi pola aliran dan hasil simulasi.

2. Kondisi Batas

Kondisi batas sangat penting untuk menentukan bagaimana fluida berinteraksi dengan batas-batas domain aliran. Kondisi batas ini akan menentukan perilaku fluida di tepi area komputasi. Ada beberapa jenis kondisi batas yang biasa digunakan dalam CFD:

- a. Kondisi batas masuk, ini menentukan bagaimana cairan memasuki domain. Misalnya, menentukan kecepatan atau tekanan fluida yang masuk sangat penting untuk simulasi yang akurat. Saluran masuk fluida primer dan sekunder diatur sebagai saluran masuk tekanan, dengan kondisi spesifik untuk aliran uap air.
- b. Kondisi batas *outlet*, ini menentukan bagaimana fluida keluar dari domain. Biasanya, tekanan relatif tertentu dikenakan di *outlet* untuk memungkinkan keluarnya cairan.
- c. Kondisi batas dinding, ini diterapkan pada permukaan domain aliran. Misalnya, kondisi *non-slip* sering digunakan, artinya kecepatan fluida di dinding adalah nol.
- d. Kondisi batas terbuka, ini memungkinkan cairan mengalir masuk atau keluar domain dengan bebas.

Menetapkan kondisi batas dengan benar sangat penting untuk mencapai hasil yang akurat dan andal dalam simulasi CFD. Ini akan membantu dalam memodelkan fenomena fisik secara akurat dan memastikan bahwa metode numerik menyatu ke solusi yang mencerminkan kondisi kerja di dunia nyata.

2.2.4 Langkah-Langkah Simulasi *Computational Fluid Dynamic*

2.2.4.1 *Pre-processing*

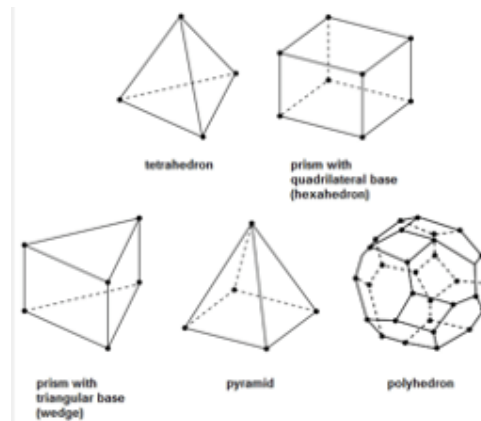
Pre-processing adalah tahap pertama dalam alur kerja CFD yang mencakup persiapan geometri, pembuatan *mesh*, serta pengaturan properti material, kondisi awal, dan kondisi batas. Tahap *pre-processing* pada CFD melibatkan serangkaian langkah sistematis untuk mensimulasikan aliran fluida secara akurat. Berikut adalah ikhtisar terperinci dari langkah-langkah utama yang terlibat dalam simulasi CFD:

1. Pembuatan Geometri

Langkah pertama adalah menentukan geometri domain fluida, yang mencakup batas fisik dan bentuk area di mana aliran fluida akan dianalisis. Langkah ini sangat penting karena menetapkan dasar untuk seluruh proses simulasi. Makalah ini menekankan pentingnya merepresentasikan geometri secara akurat untuk memastikan perilaku aliran yang realistis.

2. *Meshing*

Setelah geometri ditetapkan, langkah selanjutnya adalah membuat *mesh* atau grid yang membagi domain aliran menjadi elemen yang lebih kecil. *Meshing* adalah proses membagi domain menjadi beberapa cell. Sederhananya, semakin kecil ukuran *mesh* akan menghasilkan hasil komputasi yang lebih detail dan akurat, namun akan menambah jumlah elemennya, sehingga akan membutuhkan effort komputasi yang lebih tinggi. Secara garis besar *mesh* dibagi menjadi 2 yaitu *mesh* dengan grid terstruktur dan *mesh* dengan grid tidak terstruktur. Jaringan terstruktur adalah kisi biasa, sedangkan *mesh* tidak terstruktur dapat beradaptasi dengan geometri kompleks.



Gambar 2.11 Jenis-Jenis Meshing

(Sumber: Setaih et al. (2014))

Beberapa hal penting yang harus dipertimbangkan saat akan membuat *mesh* antara lain:

- a. resolusi atau ketelitian dari *mesh*
- b. jenis *mesh* yang akan digunakan
- c. hardware komputer yang kita gunakan

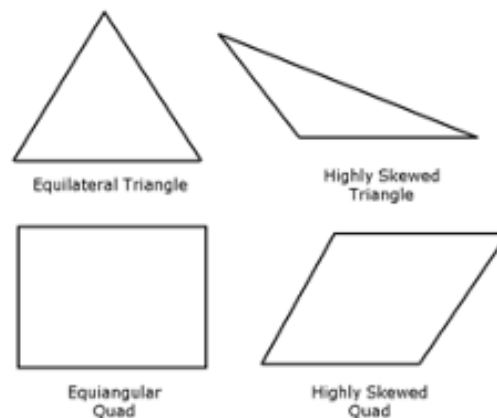
Bentuk dari control volume tergantung kapabilitas dari *Solver* yang kita gunakan, *structured-grid code* menggunakan quadrilateral pada aliran 2D, dan hexahedron pada aliran 3D. Sedangkan unstructured-grid menggunakan segitiga pada aliran 2D dan tetrahedron pada aliran 3D. Kualitas *mesh* sangatlah penting untuk menjamin hasil simulasi yang kita buat sesuai dengan yang diharapkan, visualisasi bagus, atau bahkan pada kondisi tertentu *mesh* yang berkualitas rendah dapat membuat simulasi menjadi divergen.

Secara visual, kita dapat melihat kualitas dari *mesh* tersebut dari proposionalitasnya. Namun, tentu saja hal tersebut sangatlah terbatas pada kemampuan menilai suatu proporsionalitas dan akan sangat rumit untuk dilakukan pada domain 3D yang detail, sehingga pada bab ini akan dibahas beberapa

parameter indikator kualitas *mesh*. Berikut adalah beberapa parameter *mesh* yang umum digunakan:

a. *Skewness*

Skewness atau kemencengan digunakan untuk menunjukkan seberapa miring suatu *mesh* tersebut. Semakin siku sudut suatu elemen, maka transfer data dari elemen satu ke elemen lain akan semakin baik, sehingga ketika bentuk elemen kita menceng, akan membutuhkan cukup banyak koreksi saat proses komputasi yang menurunkan kualitas perhitungan dan memperlambat proses komputasi.



Gambar 2.12 *Skewness* Pada *Mesh*

(sumber: ANSYS workbench help)

Skewness secara matematis didefinisikan sebagai berikut:

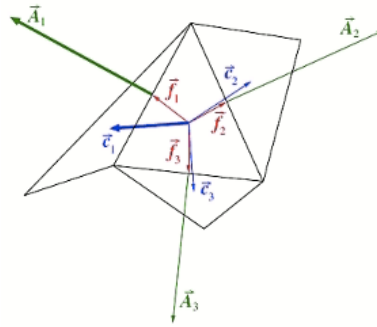
$$\text{Skewness} = \frac{(\text{ukuran optimal elemen} - \text{ukuran elemen})}{(\text{ukuran optimal elemen})} \quad 50)$$

(Sumber: Yudhatama et al. (2018))

b. *Orthogonality*

Orthogonality mendefinisikan orientasi antara satu elemen dengan elemen lain, yang mana semakin sejajar orientasi vector dari pusat ke

pusat suatu elemen mengindikasikan kualitas *mesh* yang bagus karena mempermudah proses transfer data aliran dari elemen satu ke elemen lainnya.



Gambar 2.13 Vektor-Vektor Untuk Penjabaran Orthogonality

(Sumber: ANSYS workbench help)

Berikut adalah tabel standar kualitas *mesh* berdasarkan dua parameter utama yang umum digunakan dalam simulasi numerik:

Tabel 2.6 Standar Kualitas Mesh

Rentang Nilai	Kualitas Mesh	Keterangan
<i>Orthogonal quality</i>		
0.95 – 1.0	Sangat Baik	Mesh sangat ortogonal, hasil simulasi sangat akurat
0.80 – 0.95	Baik	Mesh cukup baik, digunakan dalam sebagian besar simulasi
0.60 – 0.80	Sedang	Dapat diterima, perlu perhatian khusus pada hasil simulasi
< 0.60	Buruk	Mesh harus diperbaiki, dapat menyebabkan ketidakakuratan
< 0.20	Sangat Buruk	Simulasi bisa gagal, mesh tidak layak digunakan
<i>Skewness</i>		
0.25 – 0.50	Baik	Masih layak untuk simulasi teknik
0.50 – 0.80	Cukup / Sedang	Bisa digunakan, namun akurasi mungkin terpengaruh
0.80 – 0.95	Buruk	Harus diperbaiki jika memungkinkan
> 0.95	Sangat Buruk	Mesh tidak layak, simulasi berisiko tidak konvergen

(Sumber: Aqilah et al. (2018))

3. Penentuan *Boundary Condition* dan Inisialisasi:

Mengatur kondisi batas sangat penting untuk menentukan bagaimana fluida berinteraksi dengan tepi domain. Ini termasuk menentukan kondisi di saluran masuk, *outlet*, dan dinding. Inisialisasi melibatkan pengaturan nilai awal untuk variabel aliran, yang secara signifikan dapat mempengaruhi konvergensi solusi. *Boundary Condition* merupakan kondisi yang ditetapkan pada batas-batas suatu *control volume*. Dalam analisis menggunakan metode CFD dengan perangkat lunak seperti Ansys Fluent, seluruh titik di dalam *control volume* akan dihitung nilainya secara rinci dengan memanfaatkan nilai-nilai yang telah ditentukan sebelumnya melalui *Boundary Condition*.

Dalam simulasi, *Boundary Condition* umumnya terdiri atas dua jenis utama, yaitu *inlet* dan *outlet*.

- a. *Inlet* merupakan titik masuk fluida ke dalam *domain* atau wilayah perhitungan (*control volume*), yang diatur berdasarkan kecepatan, tekanan, suhu, komposisi, serta parameter lainnya.
- b. Sementara itu, *outlet* adalah titik keluarnya fluida dari sistem. Biasanya, *outlet* didefinisikan berdasarkan tekanan atau kondisi aliran yang telah diketahui.

Semua variabel yang tidak diketahui dalam sistem akan dihitung berdasarkan nilai-nilai pada titik batas (*boundary*) dan hasil dari perhitungan di titik sebelumnya. Ketika semua kondisi batas telah didefinisikan, variabel-variabel yang diketahui akan dimasukkan ke dalam sistem persamaan, yang kemudian diselesaikan secara numerik.

Selama proses iterasi, sistem persamaan yang mewakili hukum kekekalan akan dihitung secara simultan atau paralel menggunakan perangkat *software* atau komputer. Dengan cara ini, hasil simulasi mendekati kondisi nyata yang diharapkan.

2.2.4.2 Processing

Setelah *pre-processing*, tahap selanjutnya adalah *processing*, di mana parameter numerik untuk penyelesaian masalah disiapkan. Proses ini melibatkan pemilihan *solver* yang sesuai dan pengaturan parameter yang relevan. Pemilihan *Solver* yang tepat sangat penting untuk mendapatkan solusi yang akurat dan efisien. Berbagai jenis *solver* dapat digunakan, tergantung pada jenis simulasi dan sifat aliran yang dipelajari. *Solver* harus dipilih berdasarkan kecocokan dengan karakteristik masalah, misalnya apakah aliran bersifat kompresibel atau inkompresibel, dan apakah turbulensi perlu dipertimbangkan. Pengaturan parameter numerik lainnya mencakup pemilihan skema diskretisasi yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan aliran fluida. Skema ini menentukan cara konversi variabel kontinu menjadi variabel diskret yang dapat dihitung dalam bentuk numerik. Skema ini harus dipilih dengan hati-hati agar konvergensi tercapai tanpa mengorbankan akurasi solusi.

Pada tahap ini, perlu diperhatikan dengan seksama mengenai model turbulensi yang digunakan dalam simulasi. Model simulasi disesuaikan dengan kondisi kerja aktual fluida. Menurut Fridayana et.al. (2022), model turbulensi dalam simulasi aliran fluida dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama berdasarkan pendekatan dan kompleksitas perhitungannya. Berikut ini merupakan klasifikasi serta penjelasan singkat dari masing-masing model tersebut:

1. *Model Reynolds Stress Turbulence (RST)*

Model Reynolds Stress Turbulence (RST) merupakan bentuk asli dari pendekatan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)* yang dikembangkan secara khusus untuk memprediksi fenomena aliran turbulen, terutama dalam kondisi yang melibatkan sifat viskoelastik. Dalam model ini, tegangan turbulen tidak dihitung secara implisit, melainkan secara eksplisit melalui penyelesaian langsung dari persamaan transport untuk setiap komponen tegangan Reynolds. Pendekatan ini memungkinkan representasi yang lebih akurat terhadap anisotropi dalam aliran turbulen.

2. *Model Turbulensi Viskositas Eddy*

Model viskositas eddy berangkat dari asumsi bahwa aliran turbulen terdiri atas pusaran-pusaran kecil atau eddy, yang dapat diamati saat fluida diberi injeksi visual seperti asap atau tinta. Model ini menyederhanakan formulasi tegangan Reynolds dengan memperlakukan gerakan turbulen layaknya gerakan acak partikel dalam fenomena Brownian motion. Pendekatan ini mengandalkan konsep viskositas turbulen untuk mengaproksimasi efek dari turbulensi terhadap momentum fluida.

3. *Model $k-\varepsilon$*

Dikembangkan oleh Harlow dan Nakayama pada tahun 1968, model $k-\varepsilon$ merupakan salah satu model turbulensi dua persamaan yang paling umum digunakan hingga saat ini. Model ini menyelesaikan persamaan tegangan Reynolds dengan menggunakan dua persamaan transport

utama: energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi energi kinetik turbulen (ϵ). Kombinasi kedua parameter tersebut memungkinkan prediksi yang efisien terhadap skala besar dan kecil dari turbulensi.

4. Model $k-\omega$

Model $k-\omega$, yang dikembangkan oleh Wilcox, memanfaatkan dua persamaan transport, yakni energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi energi spesifik (ω). Model ini memberikan keunggulan dalam menangani aliran dengan bilangan Reynolds rendah, karena mencakup modifikasi yang memperbaiki akurasi di wilayah dekat dinding. $k-\omega$ dikenal lebih sensitif terhadap kondisi batas dan memiliki performa baik dalam menangani gradien tekanan tajam.

5. Model *Shear-Stress Transport* (SST) $k-\omega$

Model *SST* $k-\omega$ merupakan pengembangan lanjutan dari model $k-\omega$ yang dirancang untuk meningkatkan akurasi dalam mendeteksi lokasi awal dan karakteristik separasi aliran yang dipengaruhi oleh gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*). Model ini menggabungkan keunggulan dari model $k-\epsilon$ dan $k-\omega$ melalui fungsi blending, di mana $k-\omega$ digunakan untuk wilayah dekat dinding dan $k-\epsilon$ digunakan untuk bagian jauh dari dinding. Formulasi ini membuat model SST sangat andal dalam simulasi aliran kompleks.

6. Model Spalart-Allmaras (SA)

Model Spalart-Allmaras dikembangkan sebagai model turbulensi satu persamaan yang relatif sederhana, dan tidak memerlukan estimasi terhadap panjang skala turbulen. Model ini dirancang untuk efisiensi

komputasi dan cocok digunakan dalam simulasi aliran dengan bilangan Reynolds rendah. Meskipun lebih sederhana dibanding model dua persamaan, model SA tetap mampu memberikan hasil yang baik pada aliran dengan konfigurasi dinding yang dominan.

Pada tahap ini simulasi berjalan dengan beberapa residual yang divisualisasikan mencakup kontinuitas, kecepatan pada arah X, Y, dan Z, serta variabel model turbulensi. Residual ini menjadi indikator seberapa baik persamaan aliran fluida dipenuhi pada setiap iterasi. Masing-masing parameter dalam residul ini, harus mencapai kondisi ambang batas konvergensi, yakni sebesar 10^{-3} . Konvergensi dapat dicapai dalam beragam nilai iterasi. Apabila konvergensi belum didapatkan, maka hasil simulasi tidak dapat diterima.

2.2.4.3 Post-processing

Post-processing adalah tahap akhir dalam alur kerja CFD, setelah proses pemecahan numerik selesai, hasil yang diperoleh berupa data yang perlu diproses lebih lanjut agar bisa dipahami dan dievaluasi.

1. Visualisasi Aliran Fluida

Salah satu metode utama dalam *post-processing* adalah visualisasi aliran fluida. Hasil simulasi dapat dipetakan menggunakan berbagai alat visualisasi, seperti kontur, vektor aliran, atau vortex diagrams, untuk memahami distribusi variabel aliran seperti kecepatan, tekanan, atau suhu dalam domain simulasi.

2. Analisis Hasil

Analisis dilakukan untuk menilai seberapa baik desain atau fenomena yang dianalisis sesuai dengan tujuan awal. Hal ini bisa mencakup evaluasi efisiensi aliran, identifikasi titik-titik masalah (misalnya area dengan turbulensi

tinggi), dan optimasi desain berdasarkan hasil simulasi. Selain itu, perbandingan antara hasil simulasi dengan data eksperimen atau model teoritis sangat penting untuk memvalidasi model CFD yang digunakan.

3. Validasi Simulasi

Validasi dilakukan melalui analisis grid independence test dan meninjau nilai Y^+ pada hasil simulasi. *Grid independence test*, bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah sel (*mesh*) yang digunakan dalam model. Sementara itu nilai Y^+ adalah sebuah parameter tak berdimensi yang digunakan untuk mengukur jarak dari sel/grid pertama di dekat dinding (*wall*) ke dinding itu sendiri, dalam satuan viskositas.

Tabel 2.7 Standarisasi Nilai Y^+

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