BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi

Energi dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk melakukan usaha atau menghasilkan kerja. Dalam bidang teknik mesin, energi merupakan besaran utama yang menentukan kapasitas suatu alat atau mesin untuk menghasilkan gerakan, gaya, maupun perubahan bentuk. Energi tidak bisa diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, sesuai dengan prinsip Hukum Kekekalan Energi.

Menurut Nulhakim et al. (2024), mesin konversi energi berfungsi untuk mengubah satu bentuk energi menjadi bentuk energi lainnya. Sebagai contoh, energi listrik yang dihasilkan dari sel surya dapat digunakan untuk mengoperasikan pompa air, yang kemudian aliran airnya dimanfaatkan untuk memutar generator dan kembali menghasilkan energi listrik. Proses berantai ini menunjukkan pentingnya sistem konversi energi dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan penggunaan energi dalam sistem mekanik (Nulhakim et al., 2024). Secara umum, sumber energi dapat dibagi menjadi dua kategori utama:

1. Energi konvensional, yaitu energi yang berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam.
2. Energi terbarukan, yaitu energi yang berasal dari sumber alam yang dapat diperbarui, seperti air, angin, biomassa, dan energi surya.

Kajian yang dilakukan oleh Lubis dan Tambunan (2025) menunjukkan bahwa penggunaan metode *co-firing*—yakni pencampuran batubara dengan biomassa

(serbuk gergaji)—dapat menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil pada pembangkit listrik tenaga uap. Hasil penelitian mereka mengindikasikan bahwa variasi rasio pencampuran bahan bakar tersebut berdampak pada kinerja sistem dalam mengubah energi panas menjadi energi listrik secara lebih efisien (Lubis & Tambunan, 2025).

Perkembangan teknologi energi juga terlihat pada sektor transportasi, khususnya kendaraan listrik. Roza et al. (2025) meneliti konsumsi energi baterai pada sepeda motor listrik konversi dengan motor BLDC tipe *mid drive* 2 kW. Mereka menemukan bahwa kebutuhan energi baterai sangat dipengaruhi oleh kondisi medan serta sistem transmisi yang digunakan. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi konversi energi dalam sistem mekanik dan elektrik perlu diperhatikan dalam perancangan kendaraan listrik modern (Roza et al., 2025).



Gambar 2.1 Sumber Energi
(*Sumber: BisnisUKM.com*)

Dengan memahami berbagai bentuk energi serta cara konversinya, para insinyur mesin dapat merancang sistem yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah

lingkungan. Pemahaman ini menjadi dasar penting dalam pengembangan teknologi modern, mulai dari mesin konvensional hingga sistem energi terbarukan yang mendukung transisi menuju era energi bersih. Berdasarkan sumbernya energi dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu sumber energi konvensional dan sumber energi nonkonvensional (terbarukan), berikut adalah penjelasan mengenai kedua bentuk energi ini.

A. Sumber Energi Konvensional

Sumber energi konvensional merupakan energi yang berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Energi jenis ini telah dimanfaatkan sejak lama karena memiliki ketersediaan yang melimpah serta kerapatan energi (*energy density*) yang tinggi, sehingga efisien untuk menghasilkan tenaga dalam jumlah besar. Namun, ketergantungan terhadap sumber energi fosil memberikan dampak negatif terhadap lingkungan maupun keberlanjutan energi di masa depan.

Menurut Maqdis et al. (2025), tingginya penggunaan energi fosil telah menyebabkan peningkatan signifikan pada emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel PM,yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara di wilayah perkotaan Indonesia. Kondisi ini menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar fosil tidak hanya berdampak pada lingkungan lokal, tetapi juga pada perubahan iklim secara global.

Selain itu, Hanifah dan Purbadharmaja (2025) menjelaskan bahwa dominasi konsumsi energi listrik dan bahan bakar fosil di Indonesia berpotensi memperburuk eksternalitas negatif berupa peningkatan emisi gas rumah kaca. Mereka menekankan

bahwa tanpa adanya transisi menuju energi bersih, laju pertumbuhan ekonomi yang bergantung pada energi fosil akan semakin memperbesar jejak karbon nasional.

Dengan demikian, meskipun sumber energi konvensional memiliki peranan penting dalam menopang kebutuhan energi dan pembangunan industri, penggunaannya perlu dikendalikan melalui kebijakan transisi energi yang berkelanjutan. Pengembangan energi terbarukan menjadi langkah strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya yang tidak terbarukan serta meminimalkan dampak lingkungan yang ditimbulkannya.

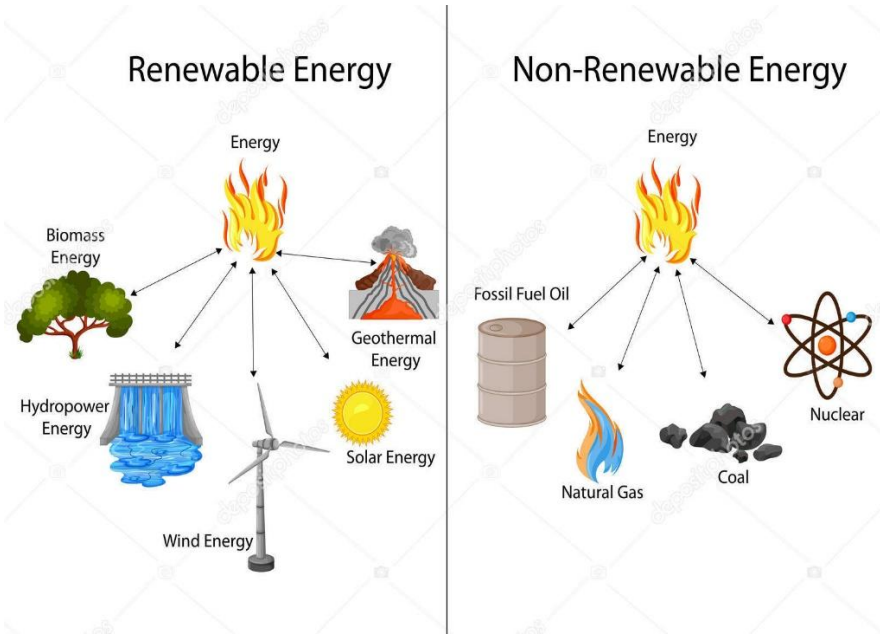
B. Sumber Energi Nonkonvensional (Terbarukan)

Sumber energi nonkonvensional atau terbarukan merupakan jenis energi yang dapat diperbaharui secara alami dan cenderung lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil. Contoh energi terbarukan meliputi energi surya, energi angin, energi air (hidro), energi panas bumi serta. Pemanfaatan energi terbarukan kini menjadi utama dalam pengembangan teknologi modern di bidang mesin untuk mendukung keberlanjutan (*sustainability*) dan efisiensi energi.

Menurut Khoidir, Sartika, dan Raegini Br. Bukit (2025), berkelanjutan menuntut pengelolaan sumber daya yang efisien dan ramah lingkungan. Penelitian mereka menekankan integrasi pembangkit tenaga mikro hidro, pengelolaan air hemat, dan pirolisis sampah rumah tangga sebagai strategis dalam mendukung energi bersih dan efisiensi sumber daya. Hal ini menunjukkan bahwa energi terbarukan tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga dapat diintegrasikan secara efektif dalam mekanik dan rumah tangga.

Selain itu, Hutagalung, Fajar, dan Utomo (2022) menegaskan bahwa energi terbarukan seperti energi, energi angin, dan sumber energi alternatif lainnya menjadi penting untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang berdampak terhadap lingkungan. Penggunaan energi terbarukan ini mendukung transisi menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan, sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca.

Dengan demikian, pengembangan energi terbarukan dalam bidang mesin tidak hanya berfokus pada efisiensi konversi energi, tetapi juga pada pengurangan dampak lingkungan dan peningkatan keberlanjutan sumber daya. Penerapan teknologi ini menjadi strategis untuk menghadapi tantangan energi global serta mendukung energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.



Gambar 2.2 Sumber energi berdasarkan sumbernya
(*Sumber: www.perpusku.com*)

Energi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk dan sifatnya, yang relevan dalam penerapan mesin. Pemahaman mengenai klasifikasi energi penting

untuk menganalisis konversi energi dan efisiensi mekanis. Secara umum, energi dapat dibedakan menjadi beberapa bentuk berikut:

A. Energi Potensial

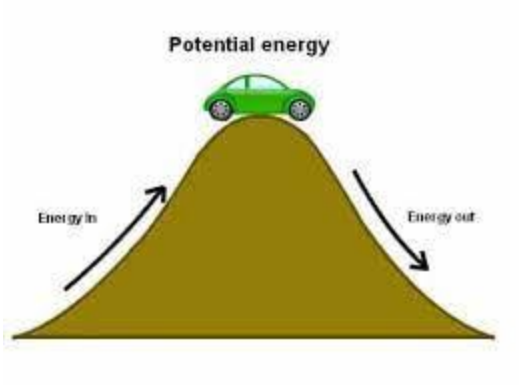
Energi potensial merupakan energi yang tersimpan dalam suatu benda atau sebagai akibat dari posisinya dalam medan gaya atau karena konfigurasi internalnya. Dalam konteks mesin, pemahaman akan energi potensial sangat krusial merancang dan menganalisis mekanik yang memanfaatkan perubahan posisi atau konfigurasi untuk menghasilkan kerja atau mengubah bentuk energi.

Dari penelitian terkini, terdapat studi yang relevan: dalam pengujian material, pengukuran energi yang diperlukan untuk membuat patah dihitung dari perubahan energi potensial pendulum pada posisi awal dan akhir. Hal ini menunjukkan bagaimana konsep energi potensial diaplikasikan dalam konteks mesin dan material. (Rustanto et al., 2024). Dengan demikian, dalam praktik perancangan mesin atau mekanik, memperhitungkan energi potensial baik yang berasal dari medan gaya (seperti gravitasi) maupun dari konfigurasi internal (seperti pegas atau elastis)—menjadi penting untuk memastikan bekerja secara efisien, aman, dan sesuai dengan prinsip kekekalan energi.

Secara matematis, salah satu bentuk paling umum adalah energi potensial gravitasi, yang dirumuskan:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \qquad \text{(2.1)}$$

di mana massa (kg), g percepatan gravitasi (m/s²), dan h ketinggian (m) dari titik acuan.



Gambar 2.3 Energi Potensial
(*Sumber: www.antotunggal.com*)

B. Energi Kinetik

Energi potensial adalah energi yang tersimpan dalam suatu benda atau akibat posisi benda tersebut dalam medan gaya atau konfigurasi internalnya. Dalam bidang mesin, pemahaman mengenai energi potensial menjadi sangat penting, terutama dalam perancangan dan analisis mekanik yang memanfaatkan perubahan posisi atau konfigurasi untuk menghasilkan kerja atau mengubah bentuk energi.

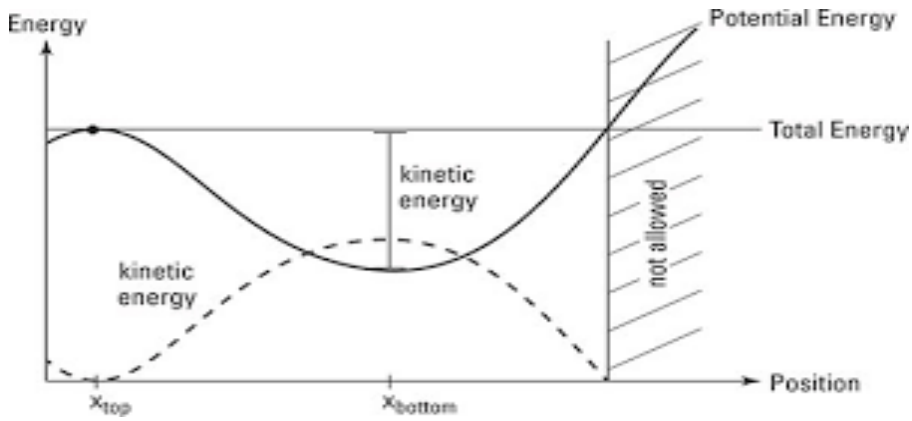
Sebagai contoh, pada yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi, energi potensial suatu benda ditentukan oleh ketinggiannya terhadap suatu titik referensi. Ketika benda dilepaskan, energi potensial tersebut dapat berubah menjadi energi dan kemudian dimanfaatkan untuk melakukan kerja mekanik. Begitu pula pada elastis, seperti pegas, energi potensial elastis tersimpan pegas ditekan atau ditarik, kemudian dilepaskan untuk menghasilkan mekanis. Prinsip ini banyak diterapkan pada turbin, pengangkat, atau berbagai mekanisme yang mengandalkan perubahan posisi untuk menghasilkan kerja.

Penelitian terbaru menunjukkan penerapan konsep energi potensial dalam konteks mekanik. Rumiati, Handayani, dan Mahardika (2024) menganalisis konsep

energi mekanik melalui permainan tradisional egrang dan menemukan bahwa energi potensial muncul dari perubahan posisi pijakan, sementara energi tampak dari egrang itu sendiri, yang menunjukkan hubungan langsung antara energi potensial dan kerja mekanik.

Selain itu, Jurnal ALMIKANIKA (2020) menyatakan bahwa energi potensial adalah energi yang tersimpan akibat massa, posisi dalam medan gaya, atau konfigurasi internal, dan sering diterapkan pada mekanik yang mengalami perubahan posisi atau kondisi internal.

Dengan demikian, perhitungan energi potensial baik dari gaya eksternal seperti gravitasi maupun dari konfigurasi internal seperti elastis merupakan hal yang penting dalam perancangan mesin dan mekanik, guna memastikan efisiensi kerja dan kepatuhan terhadap prinsip kekekalan energi.



Gambar 2.4 Energi Kinetik
(*Sumber: www.steemet.com*)

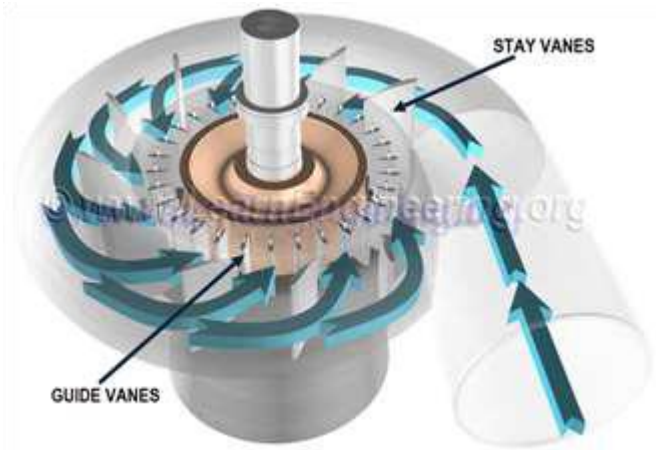
2.2 Turbin

Turbin air adalah perangkat mekanis yang dirancang untuk mengubah energi fluida seperti uap, air, atau udara menjadi energi mekanik putar melalui porosnya. Energi fluida dialirkan melalui sudu atau bilah turbin sehingga rotor berputar, dan

putaran tersebut dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan generator atau peralatan mekanis lainnya. Dalam konteks teknik mesin, turbin menjadi komponen penting dalam sistem konversi energi karena efisiensi dan kinerjanya sangat bergantung pada desain sudu, kecepatan aliran fluida, tekanan masuk dan keluar, serta kondisi operasional.

Manullang dan Lumbantobing (2025) menyatakan bahwa turbin uap mengekstrak energi panas dari uap bertekanan untuk melakukan kerja mekanis pada poros keluarannya, yang menunjukkan prinsip konversi energi dari fluida ke energi mekanik. Penelitian oleh Arib dan Ansori (2025) pada turbin angin sumbu vertikal 5 kW menegaskan bahwa kecepatan angin menjadi faktor utama dalam meningkatkan energi dan daya listrik yang dihasilkan oleh turbin, menunjukkan pentingnya kondisi aliran fluida terhadap performa turbin. Sementara itu, Solihat, Astuti, dan Rudiat (2019) menunjukkan pada turbin air jenis *Cross-Flow* bahwa konstruksi sederhana turbin ini mampu menghasilkan efisiensi sebesar 44,6 % pada debit air 0,000694 m^3/s, menekankan hubungan antara desain turbin, debit fluida, dan efisiensi energi.

Dengan demikian, turbin merupakan komponen kunci dalam perancangan sistem energi, baik pada pembangkit listrik, sistem industri, maupun energi terbarukan. Pemahaman tentang jenis fluida, kondisi aliran, desain sudu, dan parameter operasional menjadi krusial untuk memastikan turbin berfungsi secara efisien dan optimal.



Gambar 2.5 Turbin Francis
(*Sumber: anakteknik.co.id*)

2.3 Prinsip Kerja Turbin

Turbin bekerja berdasarkan konversi energi fluida menjadi energi mekanik melalui interaksi fluida dengan sudu atau baling-baling turbin. Energi fluida yang masuk, berupa tekanan, kecepatan, atau energi potensial, diarahkan melalui nozzle atau saluran khusus untuk meningkatkan energi kinetik fluida. Saat fluida berkecepatan tinggi mengenai sudu turbin, terjadi perubahan arah dan kecepatan aliran, yang menghasilkan perubahan momentum. Perubahan momentum tersebut menimbulkan gaya pada sudu sehingga sudu dan poros turbin berputar dan menghasilkan energi mekanik. Energi kinetik fluida berkurang, sedangkan energi mekanik poros meningkat, yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik atau aplikasi mekanik lainnya.

Prinsip fisika yang mendasari kerja turbin meliputi hukum kekekalan energi, di mana total energi fluida tetap dan hanya mengalami perubahan bentuk dari energi tekanan menjadi energi kinetik lalu menjadi energi mekanik, serta hukum momentum Newton, karena perubahan momentum fluida menimbulkan gaya pada sudu turbin.

Secara umum, energi fluida pertama berubah menjadi energi kinetik fluida, kemudian dikonversi menjadi energi mekanik pada poros turbin.

Beberapa kajian empiris mendukung prinsip ini. Alber, Kiono, dan Harmoko (2023) menyatakan bahwa efisiensi isentropik dan kerja turbin uap dipengaruhi oleh laju aliran massa, tekanan, dan suhu inlet dan outlet turbin, yang menunjukkan hubungan langsung antara energi fluida dan energi mekanik poros. Mulyadi, Rusirawan, dan Novrita (2023) menekankan bahwa prinsip kerja PLTU mengandalkan energi kinetik uap untuk memutar turbin dan menghasilkan energi listrik, memperkuat konsep konversi energi fluida menjadi mekanik. Selain itu, Basori, Setyadi, dan Ferdiana (2022) melaporkan bahwa turbin air pada PLTA mampu mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik melalui sudu, yang sesuai dengan prinsip kerja turbin yang telah dijelaskan.

Dengan demikian, prinsip kerja turbin secara ilmiah dapat disimpulkan sebagai proses konversi energi fluida menjadi energi kinetik dan selanjutnya menjadi energi mekanik melalui interaksi fluida dengan sudu-poros, yang telah didukung oleh berbagai kajian empiris di Indonesia terkait turbin uap maupun turbin air.

2.4 Klasifikasi Turbin

Turbin diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria utama, yaitu jenis fluida kerja, perubahan energi fluida, dan desain sudu. Klasifikasi ini penting untuk memahami karakteristik operasi, efisiensi, dan aplikasi turbin.

A. Berdasarkan Jenis Fluida Kerja

Berdasarkan Jenis Fluida Kerja, turbin uap menggunakan uap sebagai fluida kerja, turbin gas memanfaatkan gas panas hasil pembakaran, turbin air menggunakan

aliran air, dan turbin angin memanfaatkan angin sebagai sumber energi kinetik. Studi mengenai turbin angin vertikal tipe *Savonius* menunjukkan bahwa desain sudu dan kecepatan angin sangat memengaruhi daya keluaran sistem turbin angin (Dewangga, Kholis, Baskoro, & Haryudo, 2022).

1. Turbin Uap

Turbin uap adalah jenis turbin yang menggunakan *steam* sebagai fluida kerja untuk mengubah energi termal menjadi energi mekanik. Turbin ini banyak digunakan pada *power plant* untuk menghasilkan listrik. Prinsip kerja turbin uap didasarkan pada ekspansi *steam* melalui sudu turbin sehingga menghasilkan torsi pada poros.

Berdasarkan *flow type*, turbin uap dapat dibedakan menjadi turbin *impulse* dan turbin *reaction*. Pada turbin *impulse*, *steam* melewati *nozzle* sehingga kecepatannya meningkat sebelum mengenai sudu, sedangkan tekanan *steam* tetap konstan. Contoh turbin *impulse* adalah turbin *Pelton* dan beberapa tahap awal turbin uap *high pressure*. Pada turbin *reaction*, *steam* mengalami penurunan tekanan secara bertahap saat melewati sudu, menghasilkan dorongan akibat perubahan tekanan dan kecepatan. Contoh turbin *reaction* adalah turbin *Francis* dan sebagian besar tahap turbin uap *low pressure* (Alber, Kiono, & Harmoko, 2023).

Turbin uap dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah tahap atau *stage* dan arah aliran *steam*. Turbin *single-stage* memiliki satu tahap ekspansi *steam*, sedangkan turbin *multi-stage* memiliki beberapa tahap ekspansi untuk meningkatkan efisiensi. Aliran *steam* pada turbin dapat bersifat *axial flow*, di mana *steam* bergerak sejajar poros turbin, atau *radial flow*, di mana *steam* bergerak dari luar ke dalam atau sebaliknya (Mulyadi, Rusirawan, & Novrita, 2023).

Efisiensi turbin uap dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kondisi *steam* masuk, desain sudu, dan jumlah tahap ekspansi. *Steam* superpanas cenderung meningkatkan efisiensi karena mengurangi kondensasi dini dalam turbin. Penelitian menunjukkan bahwa perancangan sudu dan konfigurasi tahap turbin berperan penting dalam mengoptimalkan konversi energi termal menjadi energi mekanik dan kemudian listrik (Alber et al., 2023).

Dengan demikian, turbin uap merupakan komponen vital pada *thermal power plant*, dan pemilihan tipe turbin, desain sudu, serta kondisi *steam* masuk harus disesuaikan untuk mencapai efisiensi maksimum dan operasi yang andal.



Gambar 2.6 Turbin Uap
(*Sumber: id.wikipedia.org*)

2. Turbin Gas

Turbin gas adalah jenis turbin yang menggunakan *combustion gas* sebagai fluida kerja untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Turbin ini banyak digunakan pada *power plant* dan *jet engine* karena kapasitas daya yang tinggi dan respons cepat terhadap perubahan beban. Prinsip kerja turbin gas didasarkan pada ekspansi *combustion gas* melalui sudu turbin sehingga menghasilkan torsi pada poros.

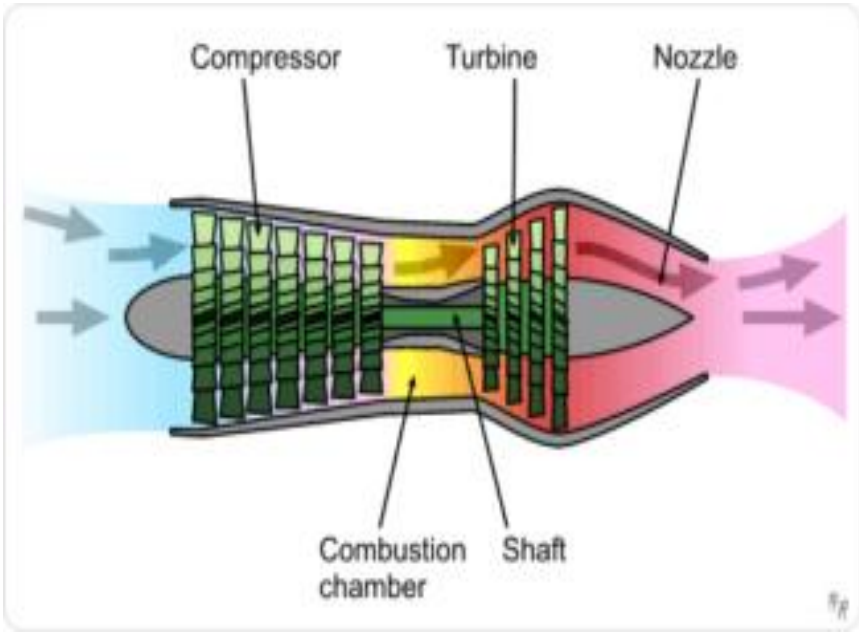
Berdasarkan *flow type*, turbin gas dapat diklasifikasikan menjadi turbin *axial-flow*, turbin *radial-flow*, dan turbin *mixed-flow*. Pada turbin *axial-flow*, *combustion gas* bergerak sejajar poros turbin melalui beberapa tahap sudu, sedangkan turbin *radial-flow* memiliki aliran gas yang bergerak dari arah radial masuk ke poros turbin. Turbin *mixed-flow* menggabungkan aliran axial dan radial untuk meningkatkan efisiensi dan kepadatan daya (Santoso, Wibowo, & Prasetyo, 2022).

Turbin gas juga dapat dikategorikan berdasarkan jumlah tahap atau *stage*. Turbin *single-stage* memiliki satu tahap ekspansi gas, sedangkan turbin *multi-stage* memiliki beberapa tahap ekspansi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi panas menjadi energi mekanik. Efisiensi turbin gas dipengaruhi oleh suhu masuk *combustion gas*, rasio tekanan, dan desain sudu turbin. *High-pressure turbine* memanfaatkan sebagian besar energi panas dari gas hasil pembakaran, sedangkan *low-pressure turbine* memanfaatkan sisa energi untuk menghasilkan torsi tambahan (Hadi, Nugroho, & Fadli, 2023).

Penelitian menunjukkan bahwa desain sudu dan konfigurasi tahap turbin gas sangat memengaruhi efisiensi termal dan performa operasional. Peningkatan rasio tekanan dan penggunaan material tahan panas dapat meningkatkan efisiensi hingga 40–45% pada turbin gas modern. *Combined cycle* yang menggabungkan turbin gas dan turbin uap dapat mencapai efisiensi lebih tinggi dengan memanfaatkan panas buang dari turbin gas untuk menghasilkan uap (Santoso et al., 2022).

Dengan demikian, turbin gas merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik modern dan *propulsion system*, dan pemilihan tipe turbin, desain

sudu, dan kondisi *combustion gas* masuk harus disesuaikan untuk mencapai efisiensi maksimum dan operasi andal.



Gambar 2.7 Turbin Gas
(*Sumber: pttensor.com*)

3. Turbin Air

Turbin air adalah jenis turbin yang memanfaatkan energi kinetik dan tekanan air untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Turbin ini banyak digunakan pada *hydropower plant* untuk menghasilkan listrik secara efisien. Prinsip kerja turbin air didasarkan pada konversi energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik melalui sudu turbin.

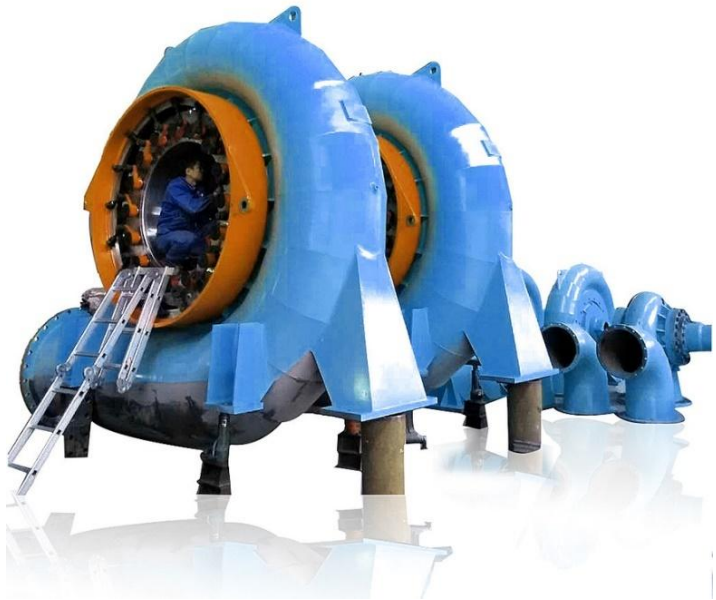
Berdasarkan *flow type*, turbin air dapat diklasifikasikan menjadi turbin *axial-flow*, turbin *radial-flow*, dan turbin *mixed-flow*. Pada turbin *axial-flow*, air mengalir sejajar poros turbin, sedangkan turbin *radial-flow* memiliki aliran air yang bergerak dari luar ke dalam atau sebaliknya. Turbin *mixed-flow* menggabungkan aliran axial

dan radial sehingga memaksimalkan pemanfaatan energi air (Dewangga, Kholis, Baskoro, & Haryudo, 2022).

Turbin air juga dapat dibedakan berdasarkan perubahan energi fluida menjadi turbin *impulse* dan turbin *reaction*. Pada turbin *impulse*, air dialirkan melalui *nozzle* sehingga kecepatannya meningkat sebelum mengenai sudu, sedangkan tekanan air tetap konstan, contohnya turbin *Pelton*. Pada turbin *reaction*, air mengalami penurunan tekanan secara bertahap saat melewati sudu sehingga dorongan dihasilkan melalui kombinasi perubahan tekanan dan kecepatan, contohnya turbin *Francis* dan *Kaplan* (Ariefianto, Hasanah, & Wijono, 2022).

Efisiensi turbin air dipengaruhi oleh desain sudu, jumlah tahap ekspansi air, dan tinggi jatuh (*head*) air. Turbin air modern dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi kinetik dan potensial air, sehingga menghasilkan konversi energi yang tinggi. *Micro-hydro turbine* menunjukkan bahwa optimasi sudu dan konfigurasi aliran sangat penting untuk meningkatkan koefisien daya dan efisiensi turbin (Dewangga et al., 2022).

Dengan demikian, turbin air merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga air (*hydropower*), dan pemilihan tipe turbin, desain sudu, serta tinggi jatuh air harus disesuaikan untuk mencapai efisiensi maksimum dan operasi yang andal.



Gambar 2.8 Turbin Air
(*Sumber: waterturbinegenerator.com*)

4. Turbin Angin

Turbin angin adalah jenis turbin yang memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin, yang kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui *generator*. Prinsip kerja turbin angin didasarkan pada konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik melalui sudu (*blade*) yang berputar.

Berdasarkan arah poros dan aliran angin, turbin angin dapat diklasifikasikan menjadi turbin angin *horizontal-axis* (*HAWT*) dan turbin angin *vertical-axis* (*VAWT*). Pada turbin *horizontal-axis*, poros turbin sejajar dengan arah angin, sedangkan pada turbin *vertical-axis*, poros turbin tegak lurus terhadap arah angin. *HAWT* umumnya digunakan pada skala besar karena efisiensi yang lebih tinggi, sedangkan *VAWT* lebih cocok untuk kondisi angin variabel atau skala kecil (Ariefianto, Hasanah, & Wijono, 2022).

Turbin angin juga dapat diklasifikasikan berdasarkan desain sudu menjadi turbin tipe *Savonius*, *Darrieus*, dan *H-rotor*. Turbin tipe *Savonius* bekerja berdasarkan perbedaan tekanan dan gesekan udara pada sudu sehingga menghasilkan torsi; turbin tipe *Darrieus* memanfaatkan angin yang mengalir tegak lurus ke sudu berbentuk lengkung untuk menghasilkan putaran; sedangkan turbin *H-rotor* adalah varian dari *Darrieus* dengan bentuk sudu lurus untuk mempermudah konstruksi dan pemeliharaan (Ariefianto et al., 2022).

Efisiensi turbin angin dipengaruhi oleh kecepatan angin, desain sudu, dan ketinggian menara (*tower height*). Penelitian menunjukkan bahwa optimasi bentuk sudu dan sudut serang (*angle of attack*) dapat meningkatkan koefisien daya (*power coefficient*) sehingga turbin menghasilkan daya maksimum. Selain itu, konfigurasi *blade pitch* dan jumlah sudu juga menentukan respons turbin terhadap variasi kecepatan angin. *Micro-wind turbine studies* menunjukkan bahwa desain yang tepat dapat meningkatkan efisiensi hingga 40–50% pada skala kecil (Dewangga, Hasan, & Baskoro, 2022).

Dengan demikian, turbin angin merupakan solusi energi terbarukan yang efisien, dan pemilihan tipe turbin, desain sudu, dan tinggi menara harus disesuaikan dengan kondisi angin setempat untuk mencapai performa maksimum.

B. Berdasarkan Perubahan Energi Fluida

Berdasarkan Perubahan Energi Fluida, turbin *impuls* adalah turbin di mana fluida melewati *nozzle* sehingga tekanan turun sebelum mengenai sudu, seperti turbin *Pelton*, sedangkan turbin *reaction* mengalami penurunan tekanan secara bertahap saat melewati sudu sehingga dorongan dihasilkan melalui perubahan tekanan dan

kecepatan, seperti turbin *Francis*. Penelitian pada turbin air menyebutkan bahwa turbin *reaction* memanfaatkan kombinasi energi kinetik dan tekanan, sedangkan turbin *impuls* hanya menggunakan energi kinetik pancaran fluida (Ariefianto, Hasanah, & Wijono, 2022).

1. Turbin Impuls

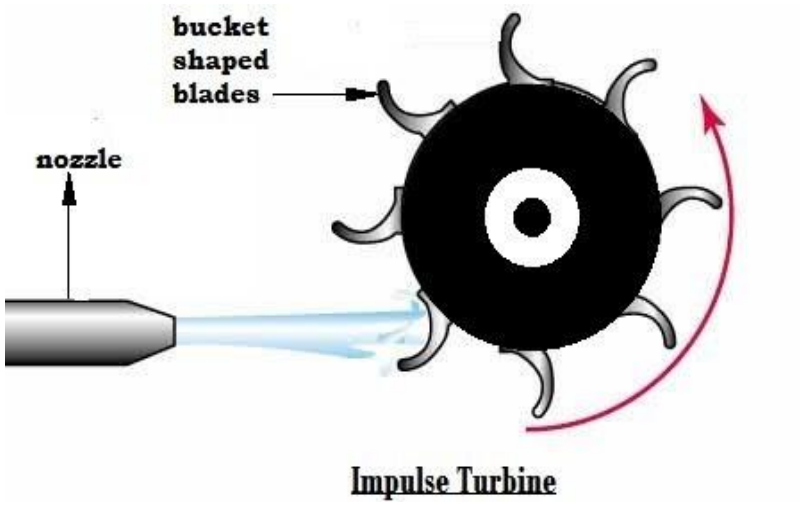
Turbin impuls adalah jenis turbin yang memanfaatkan perubahan energi kinetik fluida untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Prinsip kerja turbin impuls didasarkan pada *impulse* yang diterima sudu turbin dari aliran fluida bertekanan tinggi yang dilewatkan melalui *nozzle*, sehingga fluida keluar dengan kecepatan tinggi dan memberikan torsi pada poros. Tekanan fluida pada sudu dianggap konstan, sehingga perubahan energi terjadi terutama dalam bentuk kecepatan (*kinetic energy*) fluida.

Turbin impuls dapat diterapkan pada turbin uap, turbin air, dan turbin gas. Pada turbin uap, turbin impuls biasanya digunakan pada tahap awal (*high-pressure stage*) untuk memanfaatkan energi kinetik uap superpanas, contohnya turbin *Pelton*. Pada turbin air, turbin impuls seperti turbin *Pelton wheel* memanfaatkan jatuh air (*head*) yang tinggi sehingga air menabrak sudu turbin dengan kecepatan tinggi, sedangkan pada turbin gas, tahap awal turbin impuls memanfaatkan gas hasil pembakaran dengan kecepatan tinggi untuk menggerakkan sudu.

Karakteristik turbin impuls meliputi efisiensi tinggi pada kondisi beban penuh, kemampuan menangani aliran fluida dengan tekanan tinggi, dan desain sudu yang relatif sederhana karena tidak memerlukan perubahan tekanan secara bertahap di sepanjang sudu. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi sudu dan jumlah tahap

(*stage*) turbin impuls dapat meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 85% pada turbin air dan uap modern (Ariefianto, Hasanah, & Wijono, 2022).

Efisiensi turbin impuls dipengaruhi oleh desain *nozzle*, sudu, dan arah aliran fluida. Sudu biasanya dirancang agar arah aliran keluar fluida sesuai dengan arah putaran poros turbin untuk memaksimalkan torsi. Turbin impuls sering digunakan pada kondisi di mana *head* atau tekanan fluida tinggi tetapi aliran fluida relatif kecil, sehingga turbin ini optimal untuk konversi energi kinetik tinggi menjadi energi mekanik.



Gambar 2.9 Turbin Impuls
(*Sumber: gesaintech.com*)

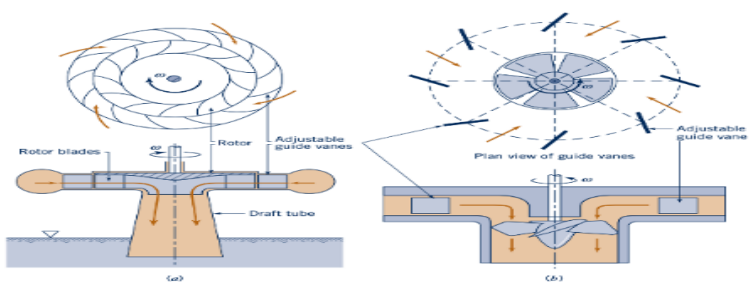
2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi adalah jenis turbin yang memanfaatkan perubahan tekanan fluida secara bertahap sepanjang sudu untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Prinsip kerja turbin reaksi didasarkan pada kombinasi perubahan energi tekanan dan energi kinetik fluida saat melewati sudu turbin. Dengan kata lain, fluida tidak hanya mengubah kecepatannya tetapi juga mengalami penurunan tekanan sehingga mendorong sudu turbin.

Turbin reaksi banyak digunakan pada turbin uap, turbin air, dan beberapa turbin gas. Pada turbin uap, turbin reaksi biasanya diterapkan pada tahap *low-pressure* untuk memaksimalkan pemanfaatan energi uap setelah tahap awal turbin impuls. Contoh turbin reaksi pada turbin uap adalah turbin *Francis* dan sebagian tahap turbin *low-pressure*. Pada turbin air, turbin reaksi digunakan pada turbin *Kaplan* atau turbin *Francis* di mana aliran air mengalami perubahan tekanan saat melewati sudu (*reaction blades*).

Karakteristik turbin reaksi meliputi efisiensi tinggi pada berbagai kondisi beban, desain sudu yang kompleks karena harus menahan perubahan tekanan, serta kemampuan memanfaatkan energi fluida secara bertahap. Penelitian menunjukkan bahwa desain sudu dengan *angle of attack* yang optimal dan konfigurasi tahap (*stage*) yang tepat dapat meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 90% pada turbin air modern (Alber, Kiono, & Harmoko, 2023).

Efisiensi turbin reaksi dipengaruhi oleh geometri sudu, rasio tekanan fluida, dan jumlah tahap turbin. Sudu dirancang agar arah aliran fluida mengikuti poros turbin secara bertahap untuk memaksimalkan torsi. Turbin reaksi umumnya digunakan pada kondisi di mana tekanan fluida cukup tinggi tetapi aliran fluida relatif besar, sehingga cocok untuk konversi energi tekanan menjadi energi mekanik secara efisien.



Gambar 2.10 Turbin Reaksi
(*Sumber: ifistream.com*)

C. Berdasarkan Desain Sudu dan Aliran Fluida

Berdasarkan Desain Sudu dan Aliran Fluida, turbin *radial* memiliki aliran fluida bergerak secara radial (dari luar ke dalam atau sebaliknya), turbin *axial* memiliki aliran sejajar poros, dan turbin campuran atau *mixed flow* memiliki aliran dengan komponen radial dan aksial. Penelitian pada turbin mikro-hidro menunjukkan bahwa karakteristik sudu, termasuk bentuk dan arah aliran fluida, memengaruhi koefisien daya turbin sehingga desain sudu merupakan bagian penting dalam klasifikasi turbin (Dewangga et al., 2022).

1. Turbin Radial

Turbin radial adalah jenis turbin di mana aliran fluida bergerak secara radial, yaitu dari arah pusat (*hub*) menuju tepi (*periphery*) atau sebaliknya, untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Prinsip kerja turbin radial didasarkan pada perubahan energi kinetik dan tekanan fluida saat aliran bergerak secara radial melalui sudu turbin. Pada turbin radial, fluida dapat diarahkan baik ke luar (*radial-outflow*) maupun ke dalam (*radial-inflow*) tergantung desain turbin.

Turbin radial banyak digunakan pada turbin uap, turbin gas, dan turbin air, khususnya pada skala kecil hingga menengah karena desainnya kompak dan mampu menangani perbedaan tekanan yang tinggi. Pada turbin gas, turbin radial sering digunakan pada *micro gas turbine* atau tahap awal turbin untuk pemanfaatan energi gas hasil pembakaran. Pada turbin air, turbin radial digunakan pada turbin *Pelton* atau turbin *radial-inflow* untuk konversi energi potensial air menjadi energi mekanik pada poros (*shaft*).

Karakteristik turbin radial meliputi desain kompak, kemampuan menangani aliran dengan rasio tekanan tinggi, serta efisiensi tinggi pada aliran fluida dengan debit relatif kecil. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi sudu, sudut masuk fluida (*inlet angle*), dan jumlah tahap turbin radial dapat meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 85% pada turbin gas dan turbin air skala menengah (Santoso, Wibowo, & Prasetyo, 2022).

Efisiensi turbin radial dipengaruhi oleh geometri sudu, rasio tekanan, dan arah aliran fluida. Sudu dirancang agar fluida memberikan dorongan maksimal pada poros turbin saat bergerak radial. Turbin radial sering dipilih untuk aplikasi dengan ruang terbatas atau di mana laju aliran fluida relatif kecil tetapi perbedaan tekanan tinggi, sehingga optimal untuk konversi energi kinetik dan tekanan menjadi energi mekanik secara efektif.

2. Turbin Axial

Turbin axial adalah jenis turbin di mana aliran fluida bergerak sejajar dengan poros (*shaft*) turbin untuk menghasilkan energi mekanik. Prinsip kerja turbin axial didasarkan pada perubahan energi kinetik dan tekanan fluida saat melewati sudu turbin yang tersusun secara bertingkat (*multi-stage*), sehingga menghasilkan torsi pada poros. Fluida masuk dari sisi depan turbin dan keluar melalui arah yang sama sejajar dengan poros.

Turbin axial banyak digunakan pada turbin uap, turbin gas, dan beberapa turbin air skala besar karena mampu menangani aliran fluida dengan laju tinggi dan debit besar. Pada turbin gas, turbin axial digunakan dalam tahap *high-pressure* dan *low-pressure* untuk mengubah energi gas hasil pembakaran menjadi energi mekanik.

Pada turbin uap, turbin axial digunakan pada tahap menengah dan akhir untuk memanfaatkan sisa energi uap setelah melewati tahap awal turbin impuls (Hadi, Nugroho, & Fadli, 2023).

Karakteristik turbin axial meliputi efisiensi tinggi pada aliran fluida besar, desain bertingkat (*multi-stage*) untuk meningkatkan konversi energi, serta kemampuan menahan tekanan dan temperatur tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi sudu, *angle of attack*, dan jumlah tahap turbin axial dapat meningkatkan efisiensi hingga 90% pada turbin uap dan turbin gas modern (Santoso, Wibowo, & Prasetyo, 2022).

Efisiensi turbin axial dipengaruhi oleh geometri sudu, rasio tekanan fluida, jumlah tahap (*stage*), dan arah aliran fluida. Sudu turbin dirancang agar aliran fluida memberikan torsi maksimal pada poros saat melewati setiap tahap. Turbin axial cocok digunakan pada kondisi di mana aliran fluida besar dengan perubahan tekanan moderat, sehingga optimal untuk konversi energi kinetik dan tekanan menjadi energi mekanik secara efektif.

3. Turbin *Mix Flow*

Turbin mixed-flow adalah jenis turbin di mana aliran fluida bergerak secara kombinasi antara arah radial dan arah sejajar poros (*axial*), untuk menghasilkan energi mekanik pada poros turbin. Prinsip kerja turbin mixed-flow didasarkan pada konversi energi kinetik dan tekanan fluida saat aliran berubah arah secara bertahap melalui sudu turbin, sehingga fluida memberikan torsi maksimum pada poros. Aliran fluida memasuki turbin dengan arah sebagian radial dan sebagian axial, kemudian keluar dengan arah campuran yang sama.

Turbin mixed-flow banyak digunakan pada turbin air skala menengah hingga besar, terutama pada turbin *Francis* yang memanfaatkan kombinasi aliran radial dan axial untuk memaksimalkan efisiensi konversi energi air. Pada turbin gas dan turbin uap tertentu, turbin mixed-flow juga digunakan untuk tahap menengah di mana desain aliran radial-axial memungkinkan pemanfaatan energi fluida secara optimal (Dewangga, Kholis, Baskoro, & Haryudo, 2022).

Karakteristik turbin mixed-flow meliputi efisiensi tinggi pada rentang *head* dan debit air yang bervariasi, desain sudu yang kompleks untuk mengarahkan aliran fluida secara optimal, serta kemampuan memanfaatkan energi kinetik dan tekanan secara bersamaan. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi sudu, sudut masuk fluida (*inlet angle*), dan bentuk *runner* turbin mixed-flow dapat meningkatkan efisiensi hingga 92% pada turbin air modern (Ariefianto, Hasanah, & Wijono, 2022).

Efisiensi turbin mixed-flow dipengaruhi oleh geometri sudu, rasio tekanan, dan kombinasi arah aliran fluida. Sudu dirancang agar fluida memberikan dorongan maksimal pada poros turbin saat bergerak melalui aliran *radial-axial*. Turbin *mixed-flow* umumnya digunakan pada kondisi di mana tinggi jatuh (*head*) sedang dan debit air bervariasi, sehingga turbin ini optimal untuk konversi energi kinetik dan tekanan menjadi energi mekanik secara efisien.

Dengan demikian, klasifikasi turbin tidak hanya berkaitan dengan sumber energi dan perubahan energi fluida, tetapi juga desain sudu dan arah aliran, yang menentukan karakteristik operasi dan efisiensi turbin. Studi empiris mendukung bahwa pemilihan jenis turbin yang tepat harus mempertimbangkan ketiga kriteria ini agar turbin dapat beroperasi optimal sesuai kondisi teknis dan lingkungan.

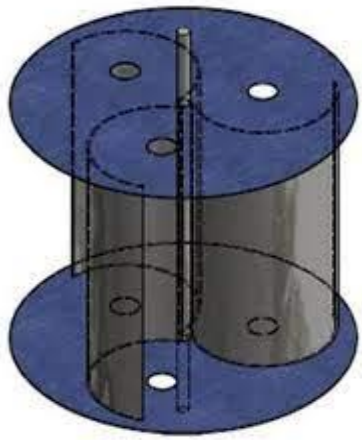
2.5 Turbin Air Savonius

Turbin air Savonius adalah jenis turbin poros vertikal yang memiliki *blade* melengkung menyerupai huruf “S”, yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik. Turbin ini bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan dan hambatan: ketika aliran air mengenai *blade* melengkungnya, tercipta torsi yang memutar *rotor*, dan putaran ini dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan *generator* listrik, *pump* air, atau peralatan mekanik lainnya. Bagian utama turbin Savonius terdiri dari *rotor* (*blade*) yang menangkap energi dari aliran air, *shaft* yang mentransfer energi putar ke *generator* atau *machine*, serta rangka penopang yang menjaga kestabilan turbin di aliran air. Turbin ini memiliki karakteristik kecepatan putar rendah tetapi torsi tinggi, sehingga dapat bekerja pada aliran air berkecepatan rendah. Desainnya sederhana, biaya pembuatan relatif rendah, dan tahan terhadap kondisi aliran air yang tidak stabil.

Kelebihan turbin Savonius antara lain struktur yang sederhana dan mudah dibuat, mampu menangkap energi dari aliran air dari berbagai arah, tahan terhadap kondisi aliran yang tidak stabil, dan cocok untuk aplikasi skala kecil atau *micro-hydro*. Namun, efisiensinya lebih rendah dibanding turbin lain seperti *Francis turbine* atau *Kaplan turbine*, dan putaran rendah membatasi pemanfaatan langsung untuk *generator* yang membutuhkan kecepatan tinggi. Oleh karena itu, turbin ini lebih sesuai untuk penggunaan skala kecil, seperti pembangkit listrik *micro-hydro* di sungai kecil, *pump* air untuk irigasi pertanian, atau penggerak mekanik sederhana di lokasi terpencil.

Penelitian ilmiah terbaru menunjukkan potensi optimasi desain turbin Savonius untuk meningkatkan efisiensi. Sebagai contoh, penelitian oleh S. M. Adewumi et al. (2023) dalam jurnal *Mekanika* menunjukkan bahwa turbin Savonius dua tahap (*double stage*) di sungai dengan kecepatan aliran sekitar 1,55 m/s mampu menghasilkan *power coefficient* maksimum sekitar 0,32 dengan rasio *tip-speed* sekitar 0,5. Selain itu, penelitian lain oleh H. I. O. Oluwole et al. (2022) menemukan bahwa penambahan *grooves* pada *blade rotor* Savonius meningkatkan efisiensi hingga 30,97–35,66%, tergantung konfigurasi *rotor* yang digunakan (*Enhancing Savonius rotor model with additional grooves on hydrokinetic turbine performance*, 2022). Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun turbin Savonius memiliki efisiensi awal rendah, modifikasi desain dapat meningkatkan kinerjanya secara signifikan.

Secara keseluruhan, turbin air Savonius merupakan solusi fleksibel dan sederhana untuk pemanfaatan energi aliran air berskala kecil, dan penelitian mutakhir terus mengembangkan desain agar efisiensi dan kinerjanya semakin optimal.



Gambar 2.11 Turbin Savonius
(*Sumber: kinematika.ulm.ac.id*)

2.6 Konsep Dasar Perhitungan

Rumus-rumus yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut;

1. **Luas penampang A (m^2)**

Luas penampang adalah luas permukaan suatu bidang atau suatu benda. Luas penampang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$A = Ds \cdot h \qquad (2.1)$$

Dimana:

A = luas penampang (m^2)

D_s = Diameter sudu (m)

h = Tinggi (m)

2. **Debit air (Q)**

Debit air dapat dihitung dengan perkalian antara kecepatan aliran dengan luas penampang rotor, dengan menggunakan rumus:

$$Q = A \cdot v \qquad (2.2)$$

Dimana:

Q = Debit air (m^3/s)

A = Luas penampang (m^2) v = Kecepatan aliran (m/s)

3. ***Head* efektif (H)**

Head efektif adalah total dari semua *head* yaitu *head* statis(h_s) dan *head* dinamis(h_d)

$$H_e = \frac{V^2}{2g} \qquad (2.3)$$

Dimana:

H_e = Tinggi jatuh air (m)

v = Kecepatan aliran (m/s)

g = Kecepatan gravitasi (m/s^2)

4. Daya air (Pa)

Daya air adalah potensi atau kandungan energi yang ada di dalam air atau sumber air, dan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$Pa = \rho . g . Q . H$…….....……(2.4)

Dimana:

Pa = Daya air (W)

ρ = Massa jenis air(kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s)

Q = Debit air (m^3/s)

H = *Head* efektif (m)

5. Gaya pengereman (F)

Gaya pengereman adalah gaya yang diterapkan pada suatu objek yang bergerak untuk memperlambat atau menghentikan gerakannya, dan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

F = m . g……...…….....……..(2.5)

Dimana:

F = Gaya pembebanan (N)

m = Massa (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

6. Torsi (τ)

Torsi merupakan hasil kali dari gaya dengan jari-jari, maka diperoleh persamaan rumus:

τ = F . r (Nm)……………………………................……………..……..(2.6)

Dimana:

τ = Torsi (Nm)

F = Gaya (N)

r = Jari-jari *pully* (m)

7. Kecepatan sudut (ω)

Kecepatan sudut adalah ukuran seberapa cepat suatu benda berputar pada lintasan melingkar, diukur berdasarkan besar sudut yang ditempuh dalam satuan waktu, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$\omega = \frac{2.\pi.n}{60}$…………………………………………....………………..(2.7)

Dimana:

ω = Kecepatan sudut

n = Putaran turbin (rpm)

π = 3,14

8. Daya turbin (Pt)

Daya turbin didefinisikan sebagai laju transfer energi dari suatu aliran fluida (cair, gas, atau uap) yang diubah menjadi energi mekanik rotasi pada poros turbin per satuan waktu, dan dapat dihitung dengan persamaan:

P_t = τ . ω…….....…….(2.8)

Dimana:

P_t = Daya turbin (Watt)

τ = Torsi (Nm)

ω = Kecepatan sudut (rpm)

9. *Tip Speed Ratio* (TSR)

Adalah rasio antara kecepatan rotasi pada ujung sudu dan kecepatan *actual* dari aliran air (hayashi et al, 2015) *Tip Speed Ratio* didefenisikan sebagai berikut

TSR = $\frac{\omega.r}{v}$ ……..…...……...(2.9)

Dimana:

ω = kecepatan sudut

v = kecepatan aliran air (m/s)

r = jari-jari (m)

10. Efisiensi turbin (ɳ)

Rumus efisiensi turbin yaitu perbandingan dengan output dan daya air, dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

ɳ = $\frac{P_t}{P_{air}}$. 100%.....(2.10)

Dimana:

ɳ = Efisiensi turbin (%)

P_t = Daya turbin (Watt)

P_a = Daya air (Watt)

2.7 Jurnal Rujukan

Penelitian mengenai rotor Savonius telah banyak dilakukan dengan berbagai fokus, mulai dari rancang bangun, jumlah sudu, modifikasi sudu, hingga penggunaan *guide vanes* untuk meningkatkan performa turbin.

Penelitian oleh Adia Cahya Purnama, Ridho Hantoro, dan Gunawan Nungroho (2013) membahas rancang bangun turbin air Sungai poros vertikal tipe Savonius dengan pemandu arah aliran. Tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan *energi kinetik* aliran air menjadi *energi mekanik* untuk menggerakkan turbin. Metode yang digunakan adalah *eksperimen* dengan variasi kecepatan aliran air dan pengukuran kecepatan putar (*RPM*), daya keluaran (*MW*), serta efisiensi (*coefficient of power*, *Cp*). Hasil penelitian menunjukkan kecepatan putar maksimum 162 rpm, daya keluaran 2,3 W, koefisien daya maksimum 0,13, *TSR* 1,5, dan efisiensi maksimum 13,16%.

Budi Hartandi dan Rendi (2018) meneliti pengaruh *free motion* sudu pada rotor Savonius modifikasi. Penelitian ini bertujuan mengetahui seberapa besar pengaruh sudut *free motion* terhadap kinerja turbin. Metode eksperimen dilakukan dengan variasi sudut *free motion* 0°, 10°, 20°, dan 30°. Hasil penelitian menunjukkan nilai *TSR* tertinggi terjadi pada jarak bebas 0°, sedangkan torsi tertinggi pada jarak 30°. Jumlah sudu juga mempengaruhi kinerja, dengan torsi maksimum 0,38 N/m pada 3 sudu dan putaran maksimum 35,8 rpm.

Jamal Jamal (2019) meneliti pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin Savonius. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh jumlah sudu (2, 3, 4) terhadap torsi, *RPM*, dan efisiensi, serta menentukan konfigurasi jumlah sudu

optimal. Metode penelitian meliputi perancangan dan fabrikasi prototipe turbin 2-, 3-, dan 4-sudu, serta pengujian *eksperimental* di *wind tunnel* atau saluran air dengan pengukuran torsi, *RPM*, dan perhitungan efisiensi. Hasil menunjukkan turbin 2-sudu menghasilkan *RPM* tertinggi pada beban rendah, sedangkan turbin 3- dan 4-sudu memberi torsi lebih besar dan stabil. Efisiensi terbesar tergantung kombinasi beban-*speed*; tidak selalu meningkat dengan jumlah sudu, sehingga desain turbin sebaiknya menyesuaikan prioritas antara *high RPM* atau torsi/efisiensi stabil.

Gerard Antonini Duma, Luther Sule, dan Masbin Dahlan (2023) menganalisis kinerja turbin Savonius poros vertikal dengan empat sudu bersusun. Penelitian ini bertujuan menilai performa turbin pada aliran air dengan variasi debit serta menentukan efisiensi dan daya keluaran. Metode yang digunakan adalah *experimental* prototipe turbin 4 sudu bersusun dengan variasi debit aliran, pengukuran daya keluaran, dan efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan daya turbin 1,109 W dan efisiensi 14,45% pada beban 1,5 kg.

Aris Rahmanto dan Indra Herlamba Sireger (2019) meneliti pengaruh jarak celah *blade* pengganggu dengan *blade* utama terhadap kinerja turbin Savonius. Tujuannya adalah mengetahui besar gaya yang dihasilkan dan pengaruhnya terhadap efisiensi turbin. Metode penelitian adalah *eksperimen* dengan variasi celah 0 cm, 2 cm, 4 cm, dan 6 cm. Hasil menunjukkan jarak celah 6 cm menghasilkan efisiensi tertinggi dan daya sebesar 3,03 W.

Sultio Atmandi dan Ahmad Jamaludin Fitroh (2008) mengembangkan metode penentuan parameter awal rotor turbin angin vertikal tipe Savonius. Tujuan penelitian adalah mengetahui kisaran ukuran dan kecepatan putar rotor untuk mencapai daya

yang diinginkan. Hasil perhitungan menunjukkan koefisien daya (*Cp*) 0,1, *TSR* 0,8, dan rasio diameter terhadap tinggi rotor (D/t) 0,8.

Petrus Sampelawang, Lery Alfriany Salo, dan Lukiawan Rili (2022) meneliti pengaruh model alur bergerigi pada turbin air Savonius sudu dua dengan variasi jumlah alur horizontal. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi daya, torsi, efisiensi, dan *tip speed ratio* dari turbin. Metode penelitian menggunakan bahan pipa PVC, besi, dan alat pengukuran seperti *tachometer*, *stopwatch*, dan timbangan. Hasil menunjukkan daya maksimum 9,80 W, torsi maksimum 0,86 Nm, dan efisiensi maksimum 9,5% pada konfigurasi 8 alur.

Nur Ichsan, Dwi Anung Ningdito, dan Raden Haryo Saputra (2021) meneliti pengaruh dimensi lebar *rectifier guide vanes* terhadap kinerja turbin hidrokinetik Savonius. Penelitian ini bertujuan membandingkan performa turbin dengan dan tanpa *guide vanes* dengan variasi lebar L=Rt/4, L=Rt/2, dan L=3Rt/4. Metode *experimental* menunjukkan bahwa *guide vanes* L=½Rt menghasilkan *RPM* antara 97,38–127,75, sedangkan L=¾Rt menghasilkan *RPM* 96,13–128,93.

Nadirah Addina Rahadian, Hadi Nasbey, dan Sunaryo (2023) meneliti rancang bangun turbin Savonius horizontal axis untuk kecepatan air rendah. Tujuan penelitian adalah mengembangkan turbin yang dapat dimanfaatkan pada aliran air 0,7–1,2 m/s. Hasil penelitian menunjukkan turbin mampu menangkap sebagian besar aliran air dan menghasilkan torsi yang besar.

Basori, Wismanto, Setyadi, dan Resaferdiana (2016) meneliti kinerja turbin air pada PLTA kapasitas 70 MW. Tujuan penelitian adalah memanfaatkan *kinetic* dan *potential energy* air menjadi *mechanical energy* melalui turbin dan selanjutnya

diubah menjadi listrik. Pengumpulan data meliputi spesifikasi teknis peralatan dan pengukuran performa. Hasil menunjukkan setelah 36.000 jam operasi, efisiensi turbin menurun 7,35% menjadi 83,681%, menunjukkan pengaruh umur operasional terhadap performa.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menegaskan bahwa kinerja turbin Savonius sangat dipengaruhi oleh jumlah dan sudut sudu, model alur sudu, penggunaan *guide vanes*, kecepatan aliran, serta konfigurasi poros vertikal atau horizontal. Hal ini menjadi dasar bagi pengembangan turbin Savonius yang optimal untuk berbagai kondisi aliran air.