

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penyusunan tesis ini, peneliti mengumpulkan informasi dari berbagai jurnal ilmiah terdahulu sebagai bahan perbandingan, guna mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan yang terdapat pada penelitian sebelumnya. Di samping itu, peneliti juga menelaah data dari proyek-proyek sebelumnya untuk memperoleh pemahaman mengenai teori-teori yang relevan dengan topik penelitian, sehingga dapat membentuk dasar teori yang kuat secara ilmiah.

Beberapa penelitian telah membahas panas buangan dari turbin angin untuk desalinasi air laut. Dalam studi yang ditulis oleh **Hadi Rostamzadeh**, unit HDH dimanfaatkan untuk menangkap panas buangan dari generator berbagai model turbin angin guna desalinasi air laut, dengan sistem pendingin cair-cair Cu/air. Air pekat dari unit HDH dialirkan ke unit RO untuk meningkatkan produksi air tawar [4]. Studi ini membandingkan kinerja termodinamika dan termoekonomi sistem HDH-RO dengan RO tunggal, dan menyimpulkan bahwa RO tunggal lebih unggul secara ekonomi karena menghasilkan daya lebih besar dari brine, memiliki konfigurasi lebih sederhana, dan biaya investasi serta biaya satuan air tawar yang lebih rendah.

Pada penelitian lain yang ditulis oleh **Ehsanolah Assareh**, studi ini mengevaluasi sistem energi gabungan berbantuan surya di Isfahan, Iran, yang terdiri dari pembangkit listrik tenaga surya terpusat, siklus Rankine uap dan organik, siklus Brayton, sistem reverse osmosis, dan generator termoelektrik untuk menghasilkan air tawar dan listrik bersih [5]. Kinerja sistem dipengaruhi oleh radiasi matahari, jumlah heliostat, efisiensi turbin, tekanan dan suhu pada berbagai titik sistem. Optimasi menggunakan algoritma genetika multi-objektif menghasilkan efisiensi eksergi optimal sebesar 21,66% dan laju biaya 312,3 \$/jam, dengan kurva Pareto yang menunjukkan titik-titik solusi terbaik. Studi ini juga menekankan pentingnya mempertimbangkan pengaruh suhu lingkungan dan perubahan iklim terhadap kinerja sistem energi di masa depan.

Ada pula jurnal dari **Abdellah Shafeian**, Studi ini mengusulkan sistem inovatif gabungan desalinasi, pendinginan, dan pengkondisian udara untuk memanfaatkan panas buangan dari gas buang dan jaket air mesin diesel kapal selam [6]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu air memiliki pengaruh lebih besar terhadap fluks massa melalui membran dibandingkan laju aliran air panas, sehingga fluks lebih tinggi dicapai pada rasio massa gas buang yang tinggi dan aliran massa rendah. Sistem ini mampu menghasilkan daya pendinginan 130–190 kW dalam rentang parameter yang luas, serta mencapai COP 0,83–0,88 pada koefisien perpindahan panas 0,45 dan rasio massa gas buang 0,37–0,53. Secara keseluruhan, sistem ini dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, menghilangkan kebutuhan pasokan air tawar eksternal, serta mengurangi bobot dan kebutuhan daya penggerak kapal selam.

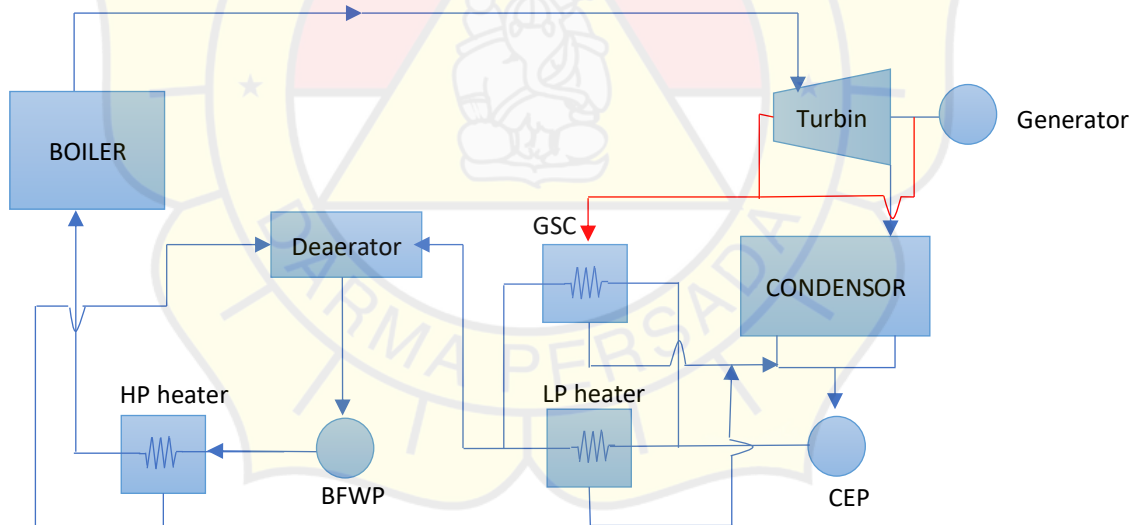
Penelitian ini menghadirkan kebaruan dalam pemanfaatan air buangan kondensor PLTU Timor 1 sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro, yang belum banyak dikaji dalam studi sebelumnya. Beberapa penelitian terdahulu, seperti studi Rostamzadeh yang memanfaatkan panas buangan turbin angin untuk desalinasi, studi sistem energi gabungan berbasis tenaga surya di Isfahan, serta sistem pendingin berbasis panas buangan pada kapal selam, lebih menitikberatkan pada pemanfaatan energi panas buangan dan tidak mengeksplorasi potensi aliran air buangan sebagai sumber energi mekanik. Tidak satu pun dari studi tersebut membahas pemanfaatan langsung air buangan kondensor dari pembangkit listrik berbasis uap sebagai sumber tenaga mikrohidro. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan pendekatan baru yang mengintegrasikan sistem mikrohidro dengan PLTU eksisting untuk meningkatkan efisiensi energi, khususnya di kawasan Indonesia Timur, serta memberikan analisis teknis dan ekonomis terhadap potensi pemanfaatan air buangan yang selama ini belum dimaksimalkan.

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan sistem konversi energi yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas, kemudian dikonversi menjadi

energi kinetik, dan akhirnya menjadi energi listrik. Komponen utama dalam PLTU adalah generator yang terhubung secara langsung (coupling) dengan turbin uap. Turbin diputar oleh energi kinetik dari uap kering bertekanan tinggi yang dihasilkan dari pemanasan air [7].

PLTU umumnya menggunakan berbagai jenis bahan bakar, terutama batubara, serta minyak bakar pada saat start-up. Sistem ini terdiri dari lima komponen utama, yaitu boiler (steam generator), turbin uap (steam turbine), pompa, kondensor, dan generator. Seluruh komponen bekerja secara terpadu untuk mengubah air menjadi uap, memanfaatkan siklus uap tertutup (closed steam cycle). Dalam siklus ini, uap yang telah memutar turbin kemudian dikondensasikan kembali menjadi air di kondensor. Air hasil kondensasi dipompa kembali ke boiler untuk dipanaskan ulang, sehingga proses ini berlangsung secara berulang dan berkesinambungan. Dengan mekanisme tersebut, energi listrik yang dihasilkan dapat diproduksi secara efisien dan berkelanjutan.. Gambar 2. merupakan siklus kerja dari PLTU Timor 1.



Keterangan :

HPH = *High Preassure Heater* BFWP = *Boiler feed water pump*

LPH = *Low Preassure Heater* CEP = *Condensate etraction pump*

GSC = *Gland steam condensor*

Gambar 2. Siklus Kerja PLTU Timor 1

2.2 Kondensor

Kondensor merupakan peralatan yang berfungsi mengubah uap menjadi air melalui proses kondensasi. Pada PLTU Timor 1, proses ini dilakukan dengan mengalirkan uap ke dalam ruang yang berisi pipa-pipa (tubes), di mana uap mengalir di sisi luar pipa (shell side), sedangkan air pendingin mengalir di dalam pipa. Tipe kondensor ini dikenal sebagai surface kondensor[8]. Kebutuhan air pendingin pada kondensor sangat besar sehingga telah diperhitungkan dalam tahap perencanaan. Umumnya, air pendingin diambil dari sumber dengan ketersediaan melimpah, seperti laut, danau, atau sungai. Kondensor biasanya ditempatkan di bawah turbin agar aliran uap dari turbin menuju kondensor dapat terjadi secara gravitasi. Secara umum, kondensor merupakan jaringan pipa yang berfungsi sebagai penukar panas untuk mengubah uap menjadi cairan (air) melalui proses kondensasi [9].



Gambar 3. Kondensor

Sumber: PLTU Timor 1, 2025

Gambar 2.2 merupakan kondensor yang terpasang di PLTU Timor 1 dimana Kondensor merupakan sistem pendingin tipe open cooling, di mana air laut dipompa melalui inlet water cooling menuju pipa-pipa kondensor sebagai fluida pendingin untuk mengkondensasikan uap dari turbin. Setelah proses kondensasi, air laut tersebut dialirkan keluar melalui outlet water cooling. Debit air yang masuk ke kondensor dipengaruhi oleh kondisi pasang surut air laut dan diatur menggunakan inlet valve. Sementara itu, jumlah air yang keluar melalui outlet kondensor bergantung pada tekanan dan suhu di dalam kondensor, sehingga alirannya dikontrol dengan outlet valve[10].

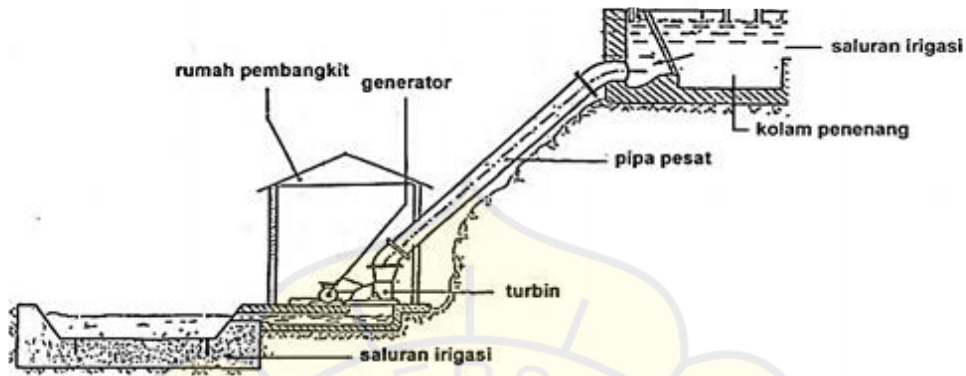
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu bentuk pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan energi potensial air sebagai sumber tenaga penggerakannya. Sumber air yang digunakan dapat berasal dari saluran irigasi, sungai, maupun air terjun alami, dengan prinsip utama memanfaatkan perbedaan ketinggian (head) dan debit aliran air untuk menghasilkan energi listrik[11].

Istilah "mikrohidro" berasal dari dua kata, yaitu "mikro" yang berarti kecil dan "hidro" yang berarti air, sehingga secara umum mengacu pada sistem pembangkit listrik tenaga air berkapasitas kecil. PLTMH secara teknis memiliki tiga komponen utama, yaitu sumber air (sebagai energi potensial), turbin (untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik), dan generator (untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik)

Prinsip dasar kerja dari PLTMH adalah mengarahkan air melalui saluran pembawa menuju pipa pesat (penstock), yang kemudian mengalirkan air ke turbin. Air tersebut akan melewati sudu-sudu pada runner turbin, sehingga menghasilkan putaran poros turbin. Putaran ini selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator, yang kemudian menghasilkan energi listrik. Setelah melewati turbin, air dikembalikan ke aliran semula, sehingga tidak mengganggu keseimbangan lingkungan dan tetap dapat digunakan untuk keperluan lain seperti pertanian[11].

Secara umum, sistem PLTMH dikenal sebagai teknologi ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi dan hanya sedikit mempengaruhi aliran air yang ada. Skema umum sistem kerja PLTMH dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 4. Skema PLTMH

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dilatarbelakangi oleh ketersediaan sumber daya air yang mengalir secara kontinu di suatu wilayah, dengan karakteristik debit dan ketinggian yang memenuhi syarat teknis. Dalam hal ini, terdapat dua parameter utama yang menjadi dasar perencanaan sistem mikrohidro, yaitu kapasitas aliran dan tinggi jatuh air (*head*)[12].

Kapasitas aliran atau *flow capacity* merujuk pada volume air yang mengalir per satuan waktu dan dinyatakan dalam satuan liter per detik (L/s) atau meter kubik per detik (m^3/s). Sementara itu, *head* adalah selisih ketinggian antara titik pengambilan air dan titik di mana air keluar dari sistem (biasanya setelah turbin), yang menentukan seberapa besar energi potensial yang dapat dimanfaatkan dari aliran air tersebut.

Berdasarkan kapasitas daya listrik yang dihasilkan, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, yaitu:

Tabel 1. Klasifikasi PLTA

Jenis PLTA	Kapasitas
PLTA besar	>100 MW
PLTA menengah	15 – 100 MW
PLTA kecil	1 – 15 MW
PLTM (mini hidro)	100 kW – 1 MW
PLTMH (mikro hidro)	5 kW – 100 kW
Pico hidro	< 5 kW

2.4 Potensi Air

Air yang mengalir memiliki energi potensial dan kinetik yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi mekanik melalui turbin, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik. Oleh karena itu, pusat-pusat pembangkit tenaga air umumnya dibangun di lokasi-lokasi dengan ketersediaan aliran air yang memadai, seperti sungai, daerah pegunungan, dan saluran irigasi. Bahkan dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), saluran irigasi atau air pendingin kondensor dapat dipertimbangkan sebagai sumber potensial untuk pemanfaatan energi air skala kecil[13].

Secara umum, pembangkit tenaga air diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan tekanan atau tinggi jatuh air yang digunakan, yaitu:

1. **Pusat tenaga air tekanan tinggi**, yang memanfaatkan perbedaan ketinggian (head) yang besar untuk menghasilkan energi.
2. **Pusat tenaga air tekanan rendah**, yang memanfaatkan aliran air dengan head kecil tetapi dengan debit yang relatif tinggi.

Energi potensial dari aliran air dapat dihitung menggunakan parameter debit aliran (Q) dalam satuan m³/s dan tinggi jatuh air (H) dalam meter. Daya teoritis yang dapat dihasilkan dari aliran air tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \rho \times Q \times g \times H \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- P = Daya (W)
- ρ = Kerapatan Air laut (1030 kg/ m³)
- Q = Debit Air (m³ /s)
- g = Gravitasi Bumi (9,81 m/s²)
- H = Ketinggian Jatuh Air (m)

Rumus ini menjadi dasar utama dalam menghitung potensi energi dari sistem mikrohidro dan digunakan secara luas dalam perencanaan awal pembangkit tenaga air.

2.5 Bagian – bagian Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

2.5.1 Kolam Penampung (Head Tank)

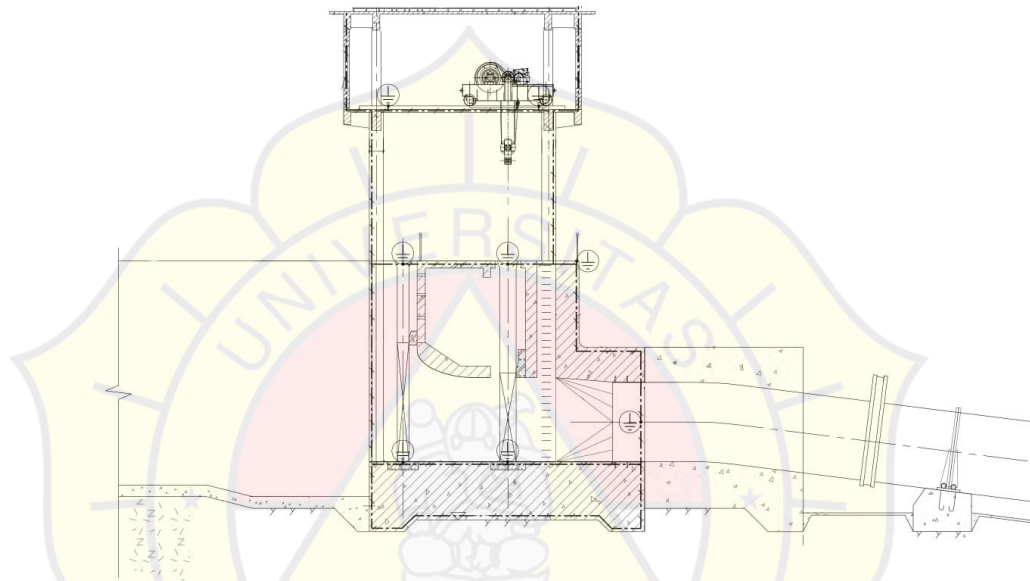
Kolam penampung, atau yang dikenal juga sebagai *head tank*, merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Kolam ini berfungsi sebagai tempat akhir dari saluran penghantar air (*headrace canal*) sebelum air dialirkan ke dalam pipa pesat (*penstock*). Peran utamanya adalah untuk menstabilkan aliran dan menampung sementara air sebelum memasuki pipa pesat, sehingga tekanan dan debit air yang masuk ke turbin dapat lebih terkendali[14].

Secara teknis, kolam penampung dilengkapi dengan beberapa komponen pendukung, antara lain:

- **Penyaring kotoran (trashrack):** berfungsi untuk menyaring material padat seperti ranting, daun, dan sampah lainnya agar tidak masuk ke dalam pipa pesat dan turbin, yang dapat merusak sistem mekanik.

- **Saluran pelimpah (flushing outlet atau spillway):** digunakan untuk membuang kelebihan air apabila debit aliran melebihi kapasitas kolam, terutama saat musim hujan atau saat terjadi lonjakan aliran.

Keberadaan kolam penampung berkontribusi terhadap efisiensi dan keamanan sistem, serta menjaga umur operasional komponen PLTMH lainnya seperti pipa dan turbin.



Gambar 5. kolam penampung (*head tank*)

2.5.2 Pipa Pesat (Penstock)

Pipa pesat (*penstock*) merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang berfungsi untuk mengalirkan air dari kolam penampung (*head tank*) atau saluran penghantar menuju turbin. Air yang dialirkan melalui pipa pesat memiliki energi potensial yang kemudian dikonversi menjadi energi kinetik saat melewati turbin, sehingga diperlukan tekanan dan kecepatan aliran yang tinggi untuk menghasilkan daya maksimal[15].

Pipa pesat umumnya dipasang dengan kemiringan tajam, menyesuaikan dengan konfigurasi topografi setempat, untuk memaksimalkan energi jatuh air (*head*). Oleh karena itu, pipa ini harus dirancang secara cermat untuk mampu menahan tekanan hidrostatik dan tekanan dinamis, termasuk beban akibat *water hammer* (pukulan air) yang dapat terjadi saat aliran air mengalami perubahan mendadak.

Konstruksi pipa pesat merupakan salah satu elemen paling mahal dalam pembangunan PLTMH. Oleh karena itu, pemilihan jenis dan material pipa yang tepat menjadi sangat penting, baik dari segi kekuatan, umur pakai, maupun efisiensi biaya. Beberapa jenis material pipa yang umum digunakan dan tahan terhadap korosi antara lain:

- **Baja tahan karat (stainless steel):** memiliki ketahanan tinggi terhadap tekanan dan korosi, cocok untuk sistem dengan tekanan tinggi, namun berbiaya tinggi.
- **Polietilena berdensitas tinggi (HDPE):** ringan, fleksibel, dan tahan korosi, cocok untuk tekanan sedang hingga rendah, serta memiliki biaya instalasi yang relatif rendah.
- **PVC (Polyvinyl Chloride):** tahan terhadap korosi dan kimia, namun hanya digunakan untuk tekanan rendah.
- **FRP (Fiber Reinforced Plastic):** tahan terhadap korosi dan ringan, cocok untuk instalasi di daerah sulit dijangkau.
- **Baja galvanis:** lebih ekonomis dibandingkan stainless steel, namun memiliki ketahanan korosi yang lebih rendah.

Pemilihan jenis pipa harus mempertimbangkan kondisi medan, tekanan kerja, efisiensi hidraulik, umur operasional, dan biaya pemeliharaan agar sistem PLTMH dapat beroperasi secara optimal dan berkelanjutan.



Gambar 6. Pipa Pesat (*Penstock*)

2.5.3 Gedung Pembangkit (Power House)

Gedung pembangkit, atau *power house*, merupakan struktur utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang berfungsi sebagai tempat instalasi dan operasi seluruh peralatan utama pembangkitan. Komponen utama yang ditempatkan di dalam gedung pembangkit meliputi turbin, generator, serta sistem kontrol dan proteksi kelistrikan. Selain itu, *power house* juga berfungsi sebagai pusat pemantauan kinerja sistem dan pengendalian distribusi daya listrik yang dihasilkan[16].

Pemilihan lokasi pembangunan gedung pembangkit harus memperhatikan beberapa aspek teknis penting, antara lain:

- **Tinggi muka air (tailwater level):** untuk memastikan efisiensi pembuangan air setelah melewati turbin.

- **Ketersediaan saluran pembuangan (tailrace):** guna mengalirkan air bekas turbin kembali ke sungai, laut atau aliran semula tanpa mengganggu lingkungan sekitar.
- **Kondisi geoteknik dan stabilitas lahan:** diperlukan pondasi bangunan yang kuat untuk menopang beban dinamis dari mesin-mesin berputar, serta menghindari penurunan tanah atau kerusakan struktural.

Desain gedung pembangkit harus disesuaikan dengan konfigurasi peralatan dan tata letak ruang yang ergonomis agar mempermudah proses pemasangan, pengoperasian, dan perawatan. Selain itu, aksesibilitas, keselamatan kerja, dan perlindungan terhadap gangguan lingkungan seperti banjir atau longsor juga harus menjadi pertimbangan utama dalam perencanaannya.

2.5.4 Turbin

Turbin merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Secara umum, turbin adalah perangkat mekanis yang terdiri dari roda (*runner*) dan poros (*shaft*), yang akan berputar ketika terkena aliran air dengan kecepatan tertentu. Energi air yang mengenai sudu-sudu pada runner akan menghasilkan gaya yang menyebabkan putaran poros, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator dalam menghasilkan energi listrik[17].

Pemanfaatan turbin sebagai penggerak utama generator dalam pembangkitan tenaga air dipilih karena beberapa keunggulan teknis berikut:

1. **Efisiensi tinggi dan stabil**, memungkinkan konversi energi air menjadi energi mekanik secara optimal dalam berbagai kondisi operasi.
2. **Kecepatan putaran yang cukup tinggi**, sehingga dapat langsung dikopel dengan generator tanpa memerlukan sistem transmisi tambahan.
3. **Fleksibilitas konstruksi**, karena turbin dapat dipasang dalam orientasi vertikal maupun horizontal dan dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi topografi serta variasi tinggi jatuh air (*head*).

2.5.4.1 Pemilihan Turbin

Turbin air merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) maupun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), yang berfungsi mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Pemilihan jenis turbin sangat bergantung pada karakteristik hidrologi, terutama tinggi jatuh air (*head*) dan debit air yang tersedia[18] .

turbin air diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerja dan tinggi jatuh air rencana menjadi beberapa jenis berikut:

1. **Turbin Francis** Merupakan jenis turbin reaksi yang paling banyak digunakan untuk sistem dengan head menengah (10–100 meter). Air masuk secara radial dan keluar secara aksial, sehingga memungkinkan efisiensi tinggi dalam kondisi debit yang berfluktuasi. Turbin ini mampu mengubah seluruh energi potensial dan tekanan menjadi energi kinetik secara bertahap di dalam runner[19].
2. **Turbin Pelton** Turbin ini termasuk dalam kategori turbin impuls dan digunakan untuk head tinggi (lebih dari 100 meter). Air bertekanan disemprotkan melalui nozzle dan diarahkan ke sudu (*bucket*) turbin dengan kecepatan tinggi, menghasilkan perubahan momentum yang menyebabkan runner berputar[20].
3. **Turbin Turgo** Merupakan varian dari turbin impuls, dengan sudut impak air yang lebih kecil dibanding Pelton, memungkinkan air mengalir melewati runner secara lebih cepat. Turbin ini cocok digunakan pada head menengah, yakni antara 30 hingga 300 meter, dan dikenal karena efisiensinya yang cukup tinggi pada debit sedang[21].
4. **Turbin Cross-Flow (Banki-Michell)** Jenis turbin ini tergolong turbin impuls yang cocok digunakan pada sistem dengan head rendah hingga menengah. Air diarahkan melalui nozzle dan melewati runner dua kali—masuk dari satu sisi dan keluar dari sisi lain—sehingga memberikan efisiensi yang stabil. Turbin ini dikenal karena desainnya yang sederhana dan kemudahan dalam perawatan[22].

5. **Turbin Kaplan** Turbin ini merupakan turbin reaksi axial-flow yang sangat sesuai untuk head rendah (di bawah 30 meter) dan debit besar. Keunggulan utama turbin Kaplan terletak pada sudu runner yang dapat diatur secara otomatis sesuai kondisi aliran, sehingga mampu menjaga efisiensi dalam berbagai variasi debit dan beban[23].
6. **Turbin Propeller** Serupa dengan turbin Kaplan, turbin propeller juga termasuk turbin reaksi axial-flow dan digunakan untuk head rendah. Namun, berbeda dengan Kaplan, sudu pada turbin propeller bersifat tetap (non-adjustable), sehingga efisiensinya tidak sebaik turbin Kaplan dalam kondisi debit yang berubah-ubah. Turbin ini ideal digunakan untuk sistem dengan debit yang relatif konstan [24][25].

2.5.4.2 Kriteria Pemilihan Turbin

Pemilihan jenis turbin dalam sistem PLTMH harus disesuaikan dengan kondisi teknis di lapangan dan kebutuhan daya listrik yang diinginkan. Setiap jenis turbin memiliki karakteristik, kelebihan, dan keterbatasan tertentu yang membuatnya lebih cocok untuk kondisi operasional yang spesifik. Oleh karena itu, pemilihan turbin perlu mempertimbangkan sejumlah parameter teknis yang dapat mempengaruhi efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan [26].

terdapat dua parameter utama yang sangat menentukan dalam pemilihan jenis turbin, yaitu:

- **Tinggi Jatuh Air Efektif (Net Head) dan Debit Aliran Air** Parameter ini merupakan faktor paling penting dalam penentuan jenis turbin. Sebagai contoh, **turbin Pelton** sangat efektif digunakan pada sistem dengan *head* tinggi dan debit kecil, sedangkan **turbin Propeller** dan **kaplan** lebih sesuai untuk kondisi *head* rendah dengan debit besar. Hubungan antara head dan debit ini menentukan energi potensial dan kinetik yang dapat dimanfaatkan oleh turbin[27].
- **Kebutuhan Daya (Power Output)** Daya yang diinginkan dari sistem pembangkit harus disesuaikan dengan potensi energi air yang tersedia, yang

merupakan fungsi dari tinggi jatuh air dan debit. Kombinasi antara head dan debit ini akan menentukan kapasitas energi yang dapat dikonversi oleh turbin menjadi energi mekanik dan selanjutnya menjadi energi listrik[28].

Output turbin dihitung dengan formula :

$$P_{\max} = \rho \times Q \times g \times H \times \eta_t \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

- P_{\max} = Daya Maksimum (W)
- ρ = Kerapatan Air laut (1030 kg/ m³)
- Q = Debit Air (m³ /s)
- g = Gravitasi Bumi (9,81 m/s²)
- H = Ketinggian Jatuh Air (m)
- η_t = Efisiensi turbin
 - = 0,8 – 0,85 untuk turbin pelton
 - = 0,8 – 0,9 untuk turbin francis
 - = 0,7 – 0,8 untuk turbin Cross-flow
 - = 0,8 – 0,9 untuk turbin propeller/kaplan

2.5.5 Transmitter

Putaran poros turbin yang dihasilkan dari konversi energi air tidak serta-merta menghasilkan listrik. Agar energi mekanik dari turbin dapat diubah menjadi energi listrik, diperlukan penghubung antara turbin dan generator. Generator merupakan komponen yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, sehingga sistem penghubung antara keduanya menjadi bagian penting dalam desain pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH).

terdapat dua metode umum dalam menghubungkan poros turbin dengan poros generator, yaitu:

- **Hubungan Langsung (Direct Coupling)** Pada metode ini, poros turbin dihubungkan secara langsung ke poros generator menggunakan kopling. Hubungan langsung hanya dapat diterapkan apabila kecepatan putaran turbin sama atau sangat mendekati kecepatan nominal generator. Metode ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi mekanik karena kehilangan energi relatif kecil, namun menuntut kesesuaian putaran yang presisi[29].
- **Hubungan Tidak Langsung (Indirect Coupling)** Dalam metode ini, poros turbin dan poros generator dihubungkan melalui sabuk (belt) atau roda gigi (gear). Sistem ini memungkinkan adanya pengaturan rasio kecepatan antara turbin dan generator. Pada pembangkit listrik mikrohidro, metode tidak langsung dengan sabuk sering digunakan karena memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan kecepatan turbin terhadap kebutuhan generator, serta lebih mudah dalam instalasi dan pemeliharaan.

2.5.6 Generator

Generator merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Proses konversi ini terjadi ketika terdapat interaksi antara medan magnet dan penghantar listrik yang bergerak relatif satu sama lain[30].

Pada umumnya, generator yang digunakan dalam pembangkit listrik mikrohidro memiliki kumparan sebagai bagian yang bergerak (rotor), sedangkan medan magnet dihasilkan oleh magnet tetap atau elektromagnet (stator). GGL yang dihasilkan akibat pergerakan ini sesuai dengan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik.

2.5.6.1 Pemilihan Generator

Dalam pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH), jenis generator yang umum digunakan adalah generator arus bolak-balik (AC generator) yang beroperasi secara *isolated* atau tidak tergabung dengan jaringan listrik utama (off-grid system). Pemilihan generator AC pada sistem ini didasarkan pada beberapa pertimbangan

teknis dan operasional yang berkaitan dengan kebutuhan distribusi listrik, kemudahan pengoperasian, serta karakteristik sumber energi air yang tersedia[31].

Generator AC bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dimana rotor yang berputar menghasilkan perubahan fluks magnetik terhadap stator yang berisi kumparan kawat penghantar. Perubahan fluks ini menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) bolak-balik pada kumparan stator, sehingga menghasilkan arus listrik AC. Arus AC ini memiliki keunggulan dapat dengan mudah ditransformasikan ke berbagai tingkat tegangan menggunakan trafo, sehingga memudahkan distribusi listrik ke konsumen.

Generator AC yang digunakan dalam pembangkit mikrohidro biasanya dirancang untuk beroperasi secara mandiri (stand-alone) tanpa tersambung ke jaringan listrik utama. Hal ini dikarenakan beberapa alasan berikut:

1. Kemandirian Sistem

Generator beroperasi secara independen, menyediakan tenaga listrik untuk kebutuhan lokal seperti pemukiman terpencil, pertanian, atau industri kecil yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.

2. Pengendalian dan Keamanan

Sistem off-grid memungkinkan pengendalian penuh terhadap operasi generator dan beban, mengurangi risiko gangguan dari jaringan listrik utama dan meningkatkan keamanan operasional.

3. Kemudahan Instalasi dan Pemeliharaan

Sistem ini lebih sederhana dalam hal instalasi dan pemeliharaan karena tidak memerlukan peralatan sinkronisasi dengan jaringan besar dan proteksi jaringan kompleks.

4. Karakteristik Beban yang Berbeda

Beban listrik pada sistem mikrohidro seringkali bersifat lokal dan tidak stabil, sehingga penggunaan generator AC yang tidak terganggu dengan jaringan utama memudahkan pengelolaan beban tanpa tergantung pada kestabilan jaringan eksternal.

Output dari sebuah generator yang digunakan dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$P = \rho \times Q \times g \times H \times \eta \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

P = Output Generator (kVA)

ρ = Kerapatan Air laut (1030 kg/ m³)

Q = Debit Air (m³ /s)

g = Gravitasi Bumi (9,81 m/s²)

H = Ketinggian Jatuh Air (m)

η = Efisiensi turbin (η_t) x Efisiensi transmitter (η_m) x Efisiensi generator (η_g)