

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut

1. Penelitian yang dilakukan oleh **Suwignyo dkk. (2023)** mengenai pengaruh variasi debit terhadap daya turbin menunjukkan bahwa debit aliran merupakan parameter paling krusial dalam menentukan output energi pada sistem pembangkit listrik tenaga air. Melalui pengujian eksperimental, ditemukan bahwa daya turbin meningkat secara konsisten seiring dengan bertambahnya volume air yang masuk ke unit turbin, selama ketinggian jatuh air (*head*) berada dalam kondisi stabil. Namun, penelitian ini juga menggarisbawahi adanya titik jenuh di mana peningkatan debit yang melebihi kapasitas desain geometri sudu justru memicu turbulensi berlebih dan kerugian hidrolis, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi total turbin
2. Penelitian yang dilakukan oleh **M. N. Al-Mustofa (2024)** mengevaluasi korelasi antara fluktuasi debit sungai musiman terhadap output daya listrik pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang menggunakan turbin Francis. Hasil studi ini mengungkapkan bahwa meskipun daya yang dihasilkan secara teoritis berbanding lurus dengan ketersediaan debit air, terdapat penurunan efisiensi yang signifikan pada saat kondisi debit rendah (*low flow*) karena energi kinetik air habis digunakan hanya untuk mengatasi hambatan mekanis dan torsi awal poros turbin. Temuan ini menegaskan bahwa untuk menjaga stabilitas daya output, diperlukan sistem manajemen air yang presisi atau penyesuaian sudut sudu pengarah (*guide vanes*) guna meminimalisir kerugian hidrolis saat ketersediaan air sungai menurun di musim kemarau.

3. Penelitian yang dilakukan oleh **Dwi Prasetyo & Utama (2024)** memberikan analisis mengenai dampak fluktuasi debit air musiman dan sedimentasi waduk terhadap stabilitas daya pada PLTA skala besar. Dengan mengobservasi data operasional selama satu tahun, peneliti menemukan bahwa penurunan debit air sungai yang signifikan memaksa turbin beroperasi pada "zona kasar" (*rough zone*), di mana aliran air menjadi tidak koheren. Kondisi ini mengakibatkan penurunan daya output generator disertai dengan peningkatan getaran mekanis yang dapat mempercepat keausan komponen utama. Penelitian ini menyimpulkan bahwa efisiensi sistem dapat menurun hingga 12% saat debit turun menjadi separuh dari debit rencana, sehingga diperlukan pembersihan sedimen secara rutin untuk menjaga volume air efektif yang masuk ke turbin.
4. Penelitian yang dilakukan oleh **Pranoto, dkk. (2024)** mengevaluasi pengaruh mekanisme bukaan sudu pengarah (*guide vane*) terhadap performa daya mekanik pada turbin Francis skala mikro. Melalui pengujian eksperimental dengan variasi bukaan dari 25% hingga 100%, riset ini mengungkapkan bahwa daya maksimal tidak selalu dihasilkan pada saat bukaan penuh (100%), melainkan pada titik optimal sebesar 75%. Hal ini disebabkan karena pada bukaan tersebut, aliran air masuk dengan sudut yang paling sesuai dengan geometri sudu *runner*, sehingga meminimalisir turbulensi dan kerugian energi hidrolik. Temuan ini sangat penting untuk menentukan strategi operasional turbin agar tetap bekerja pada efisiensi tertinggi meskipun ketersediaan debit air bervariasi.

Turbin air adalah Turbin air merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga air. Fungsinya adalah mengonversi energi fluida, baik berupa energi potensial maupun energi kinetik dari aliran air, menjadi energi mekanik yang digunakan untuk memutar rotor atau kincir. Karena proses kerjanya melibatkan perpindahan dan perubahan energi fluida, turbin air digolongkan sebagai mesin fluida.

Turbin air terdiri dari beberapa jenis yang diklasifikasikan berdasarkan prinsip kerjanya dalam mengubah energi air (energi potensial dan kinetik) menjadi energi mekanik, yaitu sebagai berikut:

1. Turbin Impuls

Turbin Impuls Turbin impuls merupakan salah satu jenis turbin yang bekerja dengan mengubah seluruh energi air menjadi energi kinetik untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Pada turbin jenis ini, rotor (runner) berputar akibat dorongan aliran air yang memanfaatkan perbedaan ketinggian (head) yang dikonversi menjadi kecepatan aliran. Dalam sistem turbin impuls, tidak terjadi perubahan tekanan pada air saat melewati rotor, baik ketika masuk maupun keluar dari turbin. Berikut ini adalah beberapa contoh turbin yang termasuk dalam kelompok turbin impuls :

1) Turbin Pelton

Pertama Turbin ini pertama kali diperkenalkan oleh Lester Allen Pelton. Prinsip kerjanya adalah air dialirkan melalui nozel yang kemudian menghantam ember-ember (bucket) yang terpasang di sekeliling roda putar (runner), sehingga menyebabkan runner berputar. Turbin Pelton biasanya digunakan pada lokasi dengan tinggi jatuh air (head) yang besar, sehingga sangat sesuai dan efisien untuk kondisi tersebut yang tinggi, menjadikan turbin tersebut sangat cocok dan efisiensi untuk digunakan.

2) Turbin Crossflow

Turbin ini ditemukan oleh Michell-Banki. Prinsip kerja dari turbin ini, yaitu aliran air mengalir masuk pada inlet adapter yang ada kemudian akan diatur banyak aliran yang masuk oleh guide vane (distributor). Aliran air sendiri masuk dari atas sudu jalan (blades) dan mendorong sudu jalan bergerak sehingga air turun dan kembali mendorong sudu bagian bawah dan turbin akan berputar. Turbin ini biasa dipakai untuk tinggi terjun (head) yang tinggi, lebih tinggi dari turbin kaplan dimana batas tinggi terjun sampai pada batas tinggi terjun mengah dari turbin Francis.

2. Turbin Reaksi

Turbin reaksi merupakan salah satu jenis turbin selain turbin impuls, yang bekerja dengan mengubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi mekanik. Pada turbin ini, konversi energi potensial menjadi energi kinetik terjadi baik pada *guide* maupun rotor (runner), sehingga terjadi penurunan

tekanan (pressure drop) saat air melewati runner. Berikut ini adalah beberapa contoh turbin yang termasuk dalam kelompok turbin reaksi;

1) Turbin Kaplan

Turbin Kaplan (Propeller), yang ditemukan oleh Viktor Kaplan, adalah salah satu jenis turbin reaksi dengan aliran air bersifat aksial. Turbin ini memiliki susunan seperti baling-baling perahu, biasanya terdiri dari tiga hingga enam sudu. Turbin Kaplan umumnya digunakan pada kondisi tinggi jatuh air (head) yang rendah. Desain sudu rotor pada turbin Kaplan terbagi menjadi dua tipe, yaitu sudu rotor tetap dan sudu rotor yang dapat digerakkan secara otomatis menggunakan sistem hidrolik. Tujuan dari desain ini adalah agar turbin dapat beroperasi dengan efisiensi tinggi

2) Turbin Francis

Turbin Francis, yang ditemukan oleh James B. Francis, termasuk dalam kelompok turbin reaksi selain turbin Kaplan. Turbin ini biasanya dipasang di antara sumber air bertekanan tinggi di bagian masuk dan aliran air bertekanan rendah di bagian keluaran. Turbin Francis memiliki sudu pengarah yang mengatur aliran air secara tangensial, yang dapat berupa sudu tetap maupun sudu yang dapat disesuaikan, mirip dengan sudu bilah rotor pada turbin Kaplan.

Turbin ini biasanya diterapkan pada lokasi dengan tinggi jatuh menengah (*medium head*). Rumah siput (*scroll case*) pada turbin Francis dibuat dari plat baja, baja cor, atau besi cor, disesuaikan dengan tinggi jatuh dan kapasitas turbin, serta berfungsi menahan sebagian besar tekanan hidrolik yang masuk. Tekanan tambahan ditopang oleh sudu penahan (*stay vane*) atau cincin penahan (*stay ring*). Sementara itu, sudu pengarah (*guide vane*) dipasang mengelilingi rotor (runner) dan berperan mengatur daya keluaran turbin dengan menyesuaikan bukaan sudu sesuai fluktuasi beban melalui mekanisme pengatur.

2.1.1 Kriteria Pemilihan Jenis Turbin Air

Pemilihan jenis turbin sebaiknya dilakukan dengan menilai keunggulan dan kelemahan masing-masing tipe turbin, terutama untuk desain yang bersifat spesifik. Pada tahap awal, pemilihan turbin dapat dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai parameter khusus yang memengaruhi kinerja dan operasi sistem turbin, yaitu:

1. Faktor tinggi jatuh air efektif (*Net Head*) dan debit aliran yang akan digunakan dalam operasi turbin menjadi pertimbangan utama dalam menentukan jenis turbin. Sebagai contoh, turbin Pelton cocok untuk kondisi tinggi jatuh yang besar, sedangkan turbin Propeller lebih efektif digunakan pada kondisi tinggi jatuh yang rendah.
2. Faktor daya (*Power*) yang dibutuhkan tergantung pada tinggi jatuh air (*head*) dan debit aliran yang tersedia.
3. Kecepatan putar turbin yang akan diteruskan ke generator. Sebagai contoh, pada sistem transmisi *direct-coupled* antara generator dan turbin dengan tinggi jatuh rendah, turbin reaksi (propeller) mampu mencapai putaran yang dibutuhkan, sedangkan turbin Pelton dan Crossflow berputar lebih lambat (*low speed*), sehingga sistem tidak dapat beroperasi dengan baik.

2.1.2 Karakteristik Operasional Turbin Francis

Turbin Francis merupakan jenis turbin reaksi (*reaction turbine*) yang paling banyak digunakan dalam pembangkit listrik tenaga air (PLTA), khususnya pada tinggi jatuh menengah hingga tinggi (sekitar 20–700 meter) dengan tingkat efisiensi yang tinggi.

Turbin Francis dikenal sebagai turbin reaksi yang paling efisien untuk head menengah. Berdasarkan penelitian klasik dan perkembangan terbaru pada tahun 2025, efisiensi turbin ini sangat dipengaruhi oleh kesesuaian sudut serang air dengan bukaan *guide vane*. Pada PLTMH Poigar Unit 2, turbin ini memiliki spesifikasi daya maksimum 1,2 MW pada putaran 1000 rpm, yang menunjukkan bahwa turbin beroperasi pada kecepatan tinggi dan membutuhkan pengaturan debit air yang presisi untuk menjaga frekuensi standar 50 Hz.

Secara konsep, karakteristik operasional turbin Francis didasarkan pada aliran air yang masuk secara radial menuju pusat *runner* dan keluar secara aksial searah poros, dengan turbin beroperasi sepenuhnya di dalam air.

Berikut adalah konsep teori karakteristik operasional turbin Francis:

1. Prinsip Dasar Operasional (Reaction Turbine)

- a. Reaksi dan Tekanan : Berbeda dengan turbin impuls (Pelton), turbin Francis bekerja berdasarkan perbedaan tekanan. Air memasuki runner dengan tekanan tinggi dan kecepatan tinggi, lalu mengalami penurunan tekanan saat memutar sudu-sudu (*runner*), menghasilkan daya mekanik.
- b. Aliran Radial ke Aksial : Air masuk melalui *spiral casing*, melewati *guide vanes* (sudu pengarah) yang mengatur debit, masuk ke runner secara radial, dan keluar secara aksial melalui *draft tube*.
- c. Beroperasi Penuh : Seluruh bagian runner harus terendam air.

2. Karakteristik Kinerja Utama

Karakteristik operasional ditentukan oleh hubungan antara head (H), debit (Q), kecepatan putaran (N), dan efisiensi (π).

- a. Efisiensi Tinggi pada Beban Sebagian : Turbin Francis dikenal memiliki efisiensi yang sangat baik (seringkali $>90\%$) pada kisaran beban yang luas (60%-100% dari kapasitas penuh)
- b. Hubungan Debit dan Head : Debit (Q) yang melalui turbin berbanding lurus dengan akar dari head ($Q \propto \sqrt{H}$) dan bukaan sudu pengarah (*guide vanes*)
- c. Karakteristik Kecepatan Spesifik : Turbin Francis memiliki kecepatan spesifik medium (60-400 rpm), menjadikannya ideal untuk head menengah.
- d. Kurva Iso-Efisiensi (Hill Diagram) : Karakteristik ini sering digambarkan dalam “Hill Diagram” (Kurva Efisiensi) yang menunjukkan area efisiensi tertinggi berdasarkan kombinasi kecepatan dan head

3. Komponen Pengendali Operasional

- a. Guide Vanes (Sudu Pengarah): Berfungsi untuk mengubah arah aliran air agar sesuai dengan sudu runner dan mengatur kuantitas debit air (mengontrol beban).
- b. Runner: Sudu-sudu melengkung yang menerima energi air.
- c. Draft Tube (Pipa Hisap): Komponen krusial berbentuk kerucut difuser yang menghubungkan runner ke tailrace. Fungsinya menurunkan tekanan keluar turbin di bawah tekanan atmosfer (tekanan vakum), sehingga meningkatkan head efektif dan efisiensi.

4. Karakteristik Operasional Kritis

- a. Kavitasi (Cavitation): Karakteristik negatif yang terjadi jika tekanan di dalam runner turun di bawah tekanan uap air. Ini menghasilkan gelembung uap yang pecah dan merusak material runner (pitting). Hal ini membatasi posisi pemasangan turbin (harus tidak terlalu tinggi di atas permukaan air buangan/tailrace).
- b. Vortex Rope (Tali Pusaran): Pada beban rendah atau di luar titik efisiensi optimal, aliran keluar dari runner tidak merata, menciptakan pusaran di draft tube yang menyebabkan getaran hebat dan penurunan efisiensi.
- c. Kecepatan Konstan: Untuk menghasilkan listrik dengan frekuensi stabil (50/60 Hz), turbin Francis umumnya dioperasikan pada kecepatan putaran konstan.

2.1.3 Hubungan Debit (Q) Terhadap Daya Turbin (Pt)

Berdasarkan hukum dasar hidrostatika, daya teoritis air dipengaruhi oleh debit dan ketinggian jatuh (*head*). Namun, dalam praktiknya, daya turbin (Pt) dipengaruhi oleh efisiensi mekanis. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa setiap penurunan debit di bawah titik desain ($1,75 \text{ m}^3/\text{s}$) akan menyebabkan penurunan tekanan pada *runner*, yang secara eksponensial menurunkan torsi. Di Poigar Unit 2, tercapainya daya 1,37 MW (sebagai daya input/turbin) untuk menghasilkan output listrik 1,2 MW mencerminkan efisiensi sistem yang harus dijaga melalui regulasi debit yang konstan.

1. Analisis Torsi dan Putaran Spesifik

Torsi sebesar 12.540 Nm pada 1000 rpm merupakan indikator beban mekanis yang diterima poros turbin. Tinjauan pustaka dari jurnal-jurnal teknik mesin terbaru menekankan bahwa pada turbin Francis, fluktuasi debit tidak hanya menurunkan daya, tetapi juga menyebabkan getaran (*vibration*) jika torsi yang dihasilkan tidak seimbang dengan beban generator. Frekuensi 50 Hz sangat bergantung pada kestabilan putaran 1000 rpm ini, sehingga sistem kontrol debit menjadi krusial.

2. Perbandingan dengan Penelitian yang Relevan

Beberapa penelitian yang mendasari analisis ini meliputi :

- a. Analisis Efisiensi Head Efektif : Penelitian pada PLTMH serupa menunjukkan bahwa ketinggian 90 m memerlukan manajemen *trash rack* yang bersih untuk memastikan *head* tidak turun, yang secara langsung akan mengganggu pencapaian daya maksimal 1,2 MW.
- b. Studi Komparasi Debit Musiman: Penelitian mengenai sungai-sungai di Sulawesi Utara (seperti Sungai Poigar) mencatat adanya variabilitas debit yang tinggi. Literatur menyebutkan bahwa pada kondisi debit rendah, turbin Francis cenderung mengalami kavitasi lebih cepat dibandingkan turbin Cross-flow.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Mikrohidro adalah istilah yang terdiri dari kata “mikro” yang berarti kecil dan “hidro” yang berarti air. Meskipun istilah ini tidak bersifat baku, secara umum mikrohidro selalu memanfaatkan air sebagai sumber energi. Perbedaan utama antara mikrohidro dan minihidro terletak pada daya yang dihasilkan; mikrohidro biasanya menghasilkan daya di bawah 100 W, sedangkan minihidro memiliki keluaran daya antara 100 hingga 5000 W. Secara teknis, sistem mikrohidro memiliki tiga komponen utama, yaitu air sebagai sumber energi, turbin, dan generator. Setiap sistem pembangkit memiliki teknik berbeda untuk menjaga kualitas daya listrik, termasuk pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).

PLTMH adalah pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air dari sungai, saluran irigasi, atau air terjun sebagai penggerak. Sistem ini memanfaatkan tinggi jatuh air (*head*) dan debit aliran untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik. Aliran air diarahkan untuk memutar poros turbin, sehingga turbin berputar dan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian diteruskan ke generator untuk menghasilkan listrik. Semakin tinggi jatuhnya air dan semakin besar debitnya, semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan. Prinsip kerja PLTMH adalah memanfaatkan aliran air dan perbedaan ketinggian untuk konversi energi secara efisien.

Komponen-komponen PLTMH terdiri dari beberapa bagian, yaitu :

1. Diversion Weir dan Intake (Dam/Bendungan Pengalih dan Intake)

Dam pengalih berfungsi untuk mengalihkan air melalui sebuah pembuka di bagian sisi sungai ('Intake' pembuka) ke dalam sebuah bak pengendap (Settling Basin).

2. Settling Basin (Bak Pengendap)

Bak pengendap digunakan untuk memindahkan partikel-partikel pasir dari air. Fungsi dari bak pengendap adalah sangat penting untuk melindungi komponen-komponen berikutnya dari dampak pasir.

3. Headrace (Saluran Pembawa) Saluran pembawa mengikuti kontur dari sisi bukit untuk menjaga elevasi dari air yang disalurkan.

4. Headtank (Bak Penenang) Fungsi dari bak penenang adalah untuk mengatur perbedaan keluaran air antara sebuah penstock dan headrace, dan untuk pemisahan akhir kotoran dalam air seperti pasir, kayukayuan.
5. Penstock (Pipa Pesat/Penstock) Penstock dihubungkan pada sebuah elevasi yang lebih rendah ke sebuah roda air, dikenal sebagai sebuah turbin.
6. Turbine dan Generator Perputaran gagang dari roda dapat digunakan untuk memutar sebuah alat mekanikal (seperti sebuah penggilingan biji, pemeras minyak, mesin bubut kayu dan sebagainya), atau untuk mengoperasikan sebuah generator listrik. Mesin-mesin atau alat-alat, dimana diberi tenaga oleh skema hidro, disebut dengan 'Beban' (Load).

PLTMH Poigar Kab. Bolaang Mongondow Timur merupakan suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan potensi air dari sungai Modinding-Poigar untuk menghasilkan energi listrik. Lokasi PLTM ini berjarak 60 km menuju kota Tutuyan yang merupakan ibu kota Bolaang Mongondow Timur. Pembangkit ini merupakan salah satu PLTM terbesar di Provinsi Sulawesi Utara yang dikelola oleh PT.PLN (persero) UP3 Kotamobagu . Pada dasarnya prinsip pembangkitan dari PLTM hampir sama dengan PLTA yaitu air mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju tempat yang lebih rendah. Proses dalam pipa energi potensial kembali menjadi energi kinetik dan energi kinetik tersebut akan berubah menjadi energi mekanik di dalam turbin dan selanjutnya proses dari turbin akan berputar. Putaran turbin inilah yang digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Air yang berasal dari sungai modinding dialirkan ke bendungan penampungan air untuk keperluan pembangkitan energi listrik. Air dari bendungan tersebut masuk ke kanal melalui intake gate. Pada bendungan tersebut dipasang filter mekanis untuk memisahkan air dan kotoran yang hendak masuk ke kanal. Dan air dari kanal akan mengalir menuju kolam penenang melalui pipa pesat yang di atur oleh pintu pengatur yang terdapat di kanal dan air akan di tenangkan di kolam penenang. Air dalam kolam penenang akan di salurkan ke turbin melalui pipa pesat.

2.2.2 Turbin Francis

Teori dan desain Turbin Francis diciptakan oleh James Bicheno Francis (1815–1892), seorang insinyur sipil Amerika kelahiran Inggris. Beliau mengembangkan turbin reaksi aliran campuran (kombinasi radial dan aksial) pada pertengahan abad ke-19 untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air pada turbin air, menjadikannya salah satu jenis turbin paling umum saat ini. Turbin Francis adalah jenis turbin reaksi aliran campuran (mixed-flow) yang paling umum digunakan pada PLTA dengan *head* (ketinggian jatuh air) sedang hingga tinggi (sekitar 40-600 meter). Turbin ini mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik melalui runner, beroperasi efisien dengan aliran air masuk secara radial dan keluar secara aksial.

1. Karakteristik Utama Turbin Francis:

- a. Jenis Turbin Reaksi: Turbin bekerja di bawah tekanan, memanfaatkan energi tekanan air yang diubah menjadi energi kinetik.
- b. Aliran Campuran (Mixed Flow): Air masuk ke *runner* secara radial (melingkar) dan keluar secara aksial (searah poros).
- c. Komponen Utama: Terdiri dari *spiral casing* (rumah turbin), *guide vanes* (sudu pengarah/pengatur debit), dan *runner* (sudusudu yang berputar).
- d. Efisiensi Tinggi: Mampu mencapai efisiensi tinggi, seringkali di atas 90%, terutama pada kondisi operasi optimal.
- e. Penggunaan: Sangat populer untuk PLTA skala sedang hingga besar karena keandalannya dalam menjaga kecepatan putar konstan meskipun beban berubah.

Secara ringkas, air bertekanan tinggi masuk melalui spiral casing, diarahkan oleh sudu pemandu ke runner, memaksa runner berputar untuk memutar generator yang terhubung dengan porosnya. Turbin Francis bekerja berdasarkan prinsip reaksi, mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik putaran (poros) melalui sudu-sudu, kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Air masuk secara radial melalui *spiral casing* dan *guide vanes* yang mengatur debit, memutar *runner* ke arah aksial, dan memanfaatkan

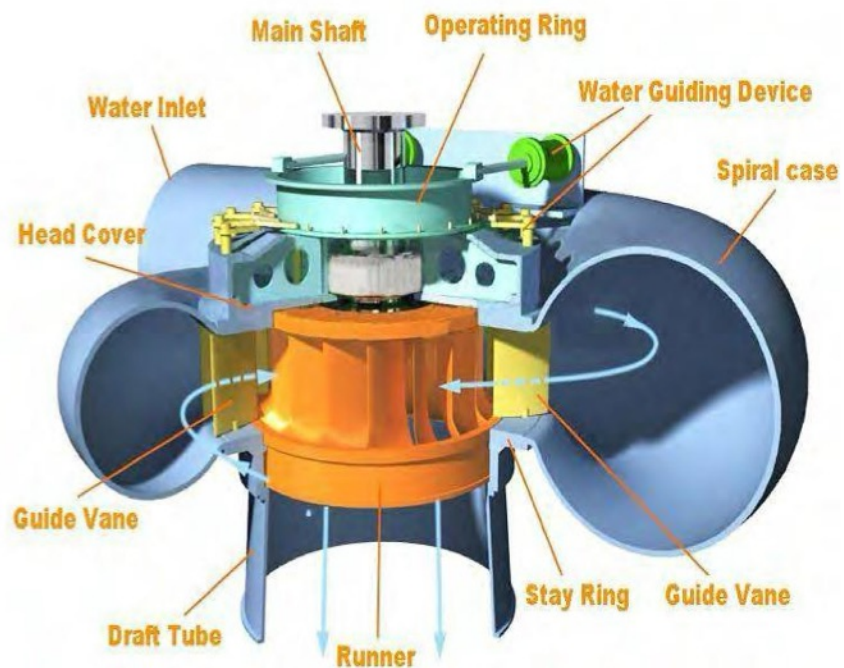
tekanan air maksimal untuk efisiensi tinggi. Turbin Francis sangat efisien untuk head (ketinggian air) sedang antara 10-600 meter dan sering digunakan pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA).

2. Berikut adalah detail prinsip kerja turbin Francis :

- a. Aliran Masuk (Spiral Casing): Air bertekanan tinggi dari pipa pesat (*penstock*) masuk ke dalam rumah siput (*spiral casing*), yang menyebarkan aliran air secara merata ke seluruh keliling *runner*.
- b. Pengaturan Sudu (Guide Vanes): Air melewati sudu pengarah (distributor) yang dapat diatur sudutnya untuk menyesuaikan jumlah air dan arah aliran yang masuk ke *runner* sesuai beban kebutuhan listrik.
- c. Putaran Runner: Air mengenai bilah-bilah *runner* (sudusudu) yang melengkung. Perpaduan antara energi kinetik dan tekanan air menyebabkan *runner* berputar, mengubah energi hidrokinetik menjadi energi mekanik.
- d. Perubahan Arah Aliran: Air masuk ke *runner* secara radial (horizontal) dan keluar secara aksial (vertikal ke bawah) melalui pipa isap (*draft tube*).
- e. Pipa Isap (Draft Tube): Pipa ini berfungsi untuk meningkatkan tekanan dan mengurangi kecepatan air yang keluar, sehingga memaksimalkan pemanfaatan energi potensial air serta mengurangi kehilangan energi.

Turbin Francis adalah turbin reaksi yang bekerja berdasarkan tekanan pada roda turbin sehingga menyebabkan roda berputar. Aliran air masuk melalui rumah keong dan diarahkan oleh sudu pengarah (*guide vane*) menuju sudu roda turbin (*runner blade*). Daya keluaran turbin dapat dikontrol dengan mengatur posisi sudu pengarah, sehingga aliran air yang menumbuk roda turbin dapat disesuaikan. Turbin Francis bekerja dengan memanfaatkan perbedaan tekanan. Ketika air memasuki roda turbin, sebagian energi dari tinggi jatuh telah dikonversi menjadi kecepatan oleh sudu pengarah, sementara sisa energi digunakan di sudu roda. Kehadiran pipa isap memungkinkan energi tinggi jatuh dimanfaatkan secara maksimal di sudu roda. Di sisi keluar roda, tekanan air rendah (kurang dari 1 atmosfer) dengan

kecepatan aliran tinggi. Di dalam pipa isap, kecepatan air menurun dan tekanannya kembali naik, sehingga air dapat dialirkan keluar melalui saluran bawah dengan tekanan yang menyesuaikan kondisi sekitar. Fungsi pipa isap pada turbin Francis mirip dengan sudu hantar pada pompa sentrifugal. Turbin ini memiliki dua komponen utama yang terendam dalam air, yaitu sudu pengarah dan sudu roda. Air dialirkan ke dalam cincin berbentuk spiral sebelum mencapai turbin, baik melalui pengisian dari atas maupun melalui rumah spiral. Roda turbin selalu bekerja secara kontinu. Daya yang dihasilkan dapat diatur dengan mengubah bukaan sudu pengarah, sehingga volume air yang masuk ke roda turbin bisa diperbesar atau dikurangi. Turbin Francis dapat dipasang dengan orientasi vertikal maupun horizontal. Karena gaya sentrifugal, partikel air bergerak menuju pusat roda turbin dengan kecepatan relatif W yang sejajar permukaan sudu. Kecepatan absolut C merupakan hasil penjumlahan geometris dari kecepatan roda U dan kecepatan relatif W .



Gambar 2.2.2 Turbin francis

Turbin Francis yang dikelilingi dengan sudu pengarah semuanya terbenam di dalam air. Air yang dimasukkan ke dalam turbin air bisa dialirkan melalui pengisian air dari atas atau melalui rumah yang berbentuk spiral. Roda jalan semuanya selalau bekerja. Daya yang dihasilkan turbin air dapat diatur dengan cara mengubah posisi pembukaan sudu pengarah, dengan demikian kapasitas air yang masuk ke dalam roda turbin air bisa diperbesar atau diperkecil. Turbin Francis diletakan dengan posisi poros vertikal atau horizontal .

Sekarang turbin francis adalah yang paling banyak digunakan karena tinggi air jatuh dan kapasitas yang paling sering sesuai dengan kebutuhannya. Dari hasil penggunaan dan penelitian terus menerus turbin francis sekarang dapat digunakan untuk tinggi air jatuh sampai 700 m dengan kapasitas air dan kecepatan roda putar yang sudah memenuhi harapan. Kesukaran akan timbul jika air mengandung pasir dan packingnya., bila sampai bagian tersebut aus maka harus dicari kemungkinan menggantinya tanpa turbin terlalu lama berhenti. Turbin Francis dapat dibuat dengan kecepatan putar yang sama tingginya, dimana kecepatan putar yang tinggi tersebut menghasilkan keuntungan terhadap berat, harga turbin air dan generatornya. Tidak ada kerugian tinggi air jatuh akibat adanya ruang bebas. Penentuan turbin Francis di dalam bangunan bawah tanah yang baik dan menguntungkan untuk turbin air ini adalah bila tinggi permukaan air bawah sangat berubah-ubah. Efisiensi untuk turbin Francis dengan beban penuh cukup baik, tetapi akan memburuk jika bebannya tidak penuh.

3. Komponen Utama Turbin Francis

1) Penstock

Penstock atau yang biasa disebut dengan pipa isap, berfungsi sebagai tempat mengalirnya air dari waduk penampungan menuju rumah turbin (spiral casing) yang mengubah energi kecepatan air menjadi energi tekan (Angraini S. 2018)

2) Rumah Turbin (Spiral Casing)

Bagian ini terdiri dari pipa baja yang mengelilingi runner blade, semakin ujung semakin mengecil sehingga disebut rumah siput. Hal ini bertujuan agar aliran air menjadi lebih cepat sehingga mendorong roda turbin berputar, disisi lain tekanan air didalamnya menjadi berkurang. Posisi inlet spiral casing tergantung pada saluran langsung air dari penstock yang mungkin akan merubah keserasian penempatan.

3) Sudu Pengarah (Guide Blade)

Merupakan bagian dari Turbin Francis yang berfungsi sebagai pintu masuk air dan spiral casing menuju runner blade; selain itu juga berfungsi sebagai distributor agar air dikelilingi runner mempunyai debit yang sama rata, serta sebagai pengaman turbin pada saat terjadi gangguan.

4) Sudu Gerak (Guide Vane)

Bagian ini juga disebut bila rotor atau sudu gerak; pada runner blade energi kinetik (hidrolis) air yang dikenakan padanya diubah menjadi energi mekanik.

5) Poros Utama

Berfungsi mentransmisikan energi mekanik rotor kepada generator. Terbuat dari dua bagian utama, yaitu bagian atas generator shaft yang dikopling dengan kopling tetap (mur dan baut); dan bagian bawah berlapis yaitu inner shaft sehingga berfungsi sebagai penggerak runner blade dan main shaft.

6) Bantalan Utama

Berfungsi sebagai bantalan dari main shaft yang menahan guncangan bila turbin sedang beroperasi. Antara bagian bergerak dan ujungnya dilindungi oleh labirin seal liner.

4. Karakteristik Operasional Kritis

- 1) Kavitasi (Cavitation): Karakteristik negatif yang terjadi jika tekanan di dalam runner turun di bawah tekanan uap air. Ini menghasilkan gelembung uap yang pecah dan merusak material runner (pitting). Hal ini membatasi posisi pemasangan turbin (harus tidak terlalu tinggi di atas permukaan air buangan/tailrace).
- 2) Vortex Rope (Tali Pusaran): Pada beban rendah atau di luar titik efisiensi optimal, aliran keluar dari runner tidak merata, menciptakan pusaran di draft tube yang menyebabkan getaran hebat dan penurunan efisiensi.
- 3) Kecepatan Konstan: Untuk menghasilkan listrik dengan frekuensi stabil (50/60 Hz), turbin Francis umumnya dioperasikan pada kecepatan putaran konstan.

2.2.3 Generator

Generator adalah mesin yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya didasarkan pada putaran rotor generator yang digerakkan oleh turbin sehingga menghasilkan listrik. Energi untuk menggerakkan turbin bisa berasal dari berbagai sumber, seperti uap, air, gas, mesin diesel, dan lain-lain. Generator digunakan sebagai sumber tenaga listrik untuk berbagai beban atau peralatan, misalnya pompa air, pompa minyak, penerangan, dan sebagainya. Jenis generator yang sering digunakan, terutama pada PLTA dan PLTD, adalah generator kutub menonjol yang beroperasi pada kecepatan putar rendah.

Konversi energi elektromagnetik mencakup perubahan energi dari mekanik ke listrik dan sebaliknya. Energi mekanik diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak utama (*prime mover*), sedangkan energi listrik

dihasilkan melalui induksi elektromagnetik pada kumparan stator dan rotor (Eugene C. Luster, 1993, dikutip dalam Asmara, 2016). Dalam sistem PLTMH yang menggunakan turbin Francis, terdapat dua jenis generator utama yang biasanya digunakan, tergantung pada kebutuhan arus listrik yang diperlukan :

1. Generator Arus Bolak-Balik (AC)

Jenis yang paling umum digunakan untuk mendistribusikan listrik ke perumahan atau beban industri karena tegangan lebih mudah dinaikkan atau diturunkan melalui transformator.

2. Generator Arus Searah (DC)

Biasanya digunakan pada skala lebih kecil seperti pikohidro atau aplikasi yang memerlukan kontrol kecepatan dan torsi presisi.

Generator sinkron memiliki pengertian bahwa frekuensi listrik yang dihasilkan selaras (*sinkron*) dengan putaran mekanis rotor generator. Rotor generator sinkron yang digerakkan oleh penggerak utama (*prime mover*), dengan belitan medan yang diberi arus searah, akan menciptakan medan magnet berputar dengan kecepatan dan arah yang sama dengan putaran rotor. Generator sinkron umumnya digunakan pada pembangkit listrik berkapasitas besar, seperti PLTA, PLTU, PLTD, dan sebagainya. Selain itu, ada juga generator berkapasitas lebih kecil, misalnya untuk penerangan darurat atau generator cadangan (*Generator Set*). Generator sinkron mengubah energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik melalui prinsip elektromagnetik. Energi mekanik diperoleh dari penggerak utama yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan melalui induksi elektromagnetik pada kumparan stator. Besarnya kapasitas generator disesuaikan dengan daya keluaran turbin dan kebutuhan listrik dari PLTMH yang bersangkutan. Oleh karena itu, tahap pertama dalam perencanaan adalah menghitung daya keluaran turbin menggunakan formulasi tertentu.

$$P_t = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_{ef} \cdot H_t$$

Keterangan :

P_t = daya keluar dari turbin (kW)

ρ = masa jenis air (1000 kg/m³)

g = gravitasi (m/s²)

H_{ef} = tinggi jatuh air efektif (m)

Q = debit air (m³ /s)

η_t = efisiensi turbin

Setelah mengetahui daya yang keluar dari turbin, kemudian perlu diketahui keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan. Besarnya keluaran listrik ini ditentukan melalui formulasi sebagai berikut :

$$P_g = \eta_g \times P_t$$

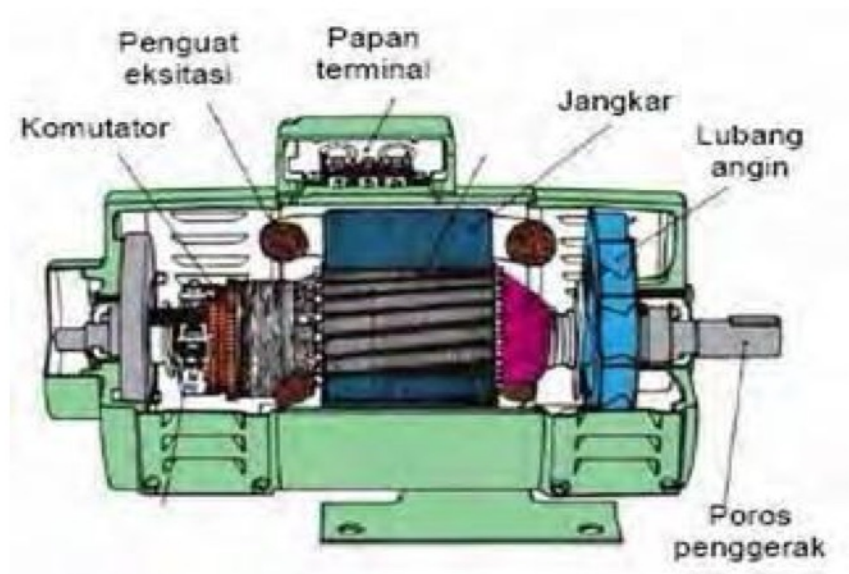
Keterangan :

P_g = daya listrik yang keluar dari generator (kW)

η_g = efisiensi generator (90%)

Ketika data besarnya daya keluar dari turbin, dan keluaran listrik dari PLTMH bersangkutan diperoleh, dapatlah kemudian ditentukan kapasitas generator yang hendak dipilih. Memperimbangkan keawetan dari generator, maka kapaistas generator harus lebih besar, paling tidak 20%, dari pembangkitan listrik yang 29 dilakukan. Oleh karenanya, nilai kapasitas generator didapat melalui rumus sebagai berikut (Febriansyah,2013):

$$P_g \text{ terpasang} = (P_{\text{gen out}}) + (P_{\text{gen out}} \times 20\%)$$



Gambar 2.2.3 Generator

2.2.4 Standar Operating Prosedur PLTMH

1. Tahap Persiapan dan Pemeriksaan (Sebelum Startup)

Operator wajib memeriksa seluruh komponen sebelum menghidupkan PLTMH untuk menghindari kerusakan fatal.

Intake & Weir (Bendung): Pastikan pintu air terbuka, bak penenang (forebay) penuh, dan saringan sampah (trashrack) bersih dari sampah/ranting.

Saluran Pembawa (Headrace): Pastikan tidak ada kebocoran besar atau penyumbatan.

Penstock (Pipa Pesat): Periksa apakah ada kebocoran air di sambungan pipa dan pastikan butterfly valve (katup utama) dalam posisi tertutup saat startup.

Turbin & Generator: Periksa pelumasan pada bantalan (bearing) turbin dan generator. Pastikan tidak ada komponen yang longgar.

Sistem Kontrol (Electronic Load Controller - ELC): Pastikan panel kontrol dalam kondisi aktif/normal dan tidak ada alarm gangguan.

2. Tahap Pengoperasian (Startup)

Membuka Valve Air: Buka butterfly valve (katup penstock) menuju turbin secara perlahan. Jangan membuka terlalu cepat agar tidak terjadi water hammer (lonjakan tekanan).

Menjalankan Turbin: Biarkan air memutar turbin hingga mencapai kecepatan putar (rated speed) normal.

Pengaktifan Generator: Setelah turbin berputar stabil, generator akan menghasilkan daya. Pastikan ELC (Load Controller) bekerja untuk menstabilkan frekuensi dan tegangan.

Pengecekan Panel: Amati panel indikator: Tegangan (V) harus sekitar 220V/380V dan Frekuensi (Hz) harus stabil di 50Hz.

Penyambungan Beban: Masukkan beban listrik secara bertahap menggunakan Main Circuit Breaker (MCB).

3. Tahap Pengawasan (Selama Beroperasi)

Pengecekan Berkala: Operator wajib mengecek suhu bearing, getaran turbin/generator, dan suara mesin setiap 2-4 jam.

Monitoring Listrik: Memantau voltase dan frekuensi di panel kontrol agar tidak overload atau underload.

Kebersihan: Rutin membersihkan trashrack (saringan) dari sampah yang terbawa aliran air.

4. Tahap Mematikan PLTMH (Shutdown)

Pelepasan Beban: Matikan beban listrik (MCB utama) secara bertahap sebelum menutup air, untuk mencegah lonjakan tegangan (surge).

Penutupan Valve: Tutup butterfly valve atau nosel turbin secara perlahan hingga air terhenti sepenuhnya dan turbin berhenti berputar.

Pengecekan Akhir: Pastikan tidak ada air yang menetes di area elektrik dan matikan sistem kontrol.

5. Prosedur Keadaan Darurat (Emergency)

Jika terjadi beban lebih (overload): ELC biasanya akan melepas beban tambahan (dump load). Jika masih overload, matikan MCB utama.

Jika terjadi kebocoran pipa pesat: Segera tutup intake gate (pintu air utama) dan matikan butterfly valve.

Jika ada suara/getaran tidak wajar: Hentikan operasi segera (emergency shutdown) dan periksa bantalan turbin/generator.

6. Pemeliharaan Rutin (Maintenance)

Harian : Membersihkan sampah di saringan, mengecek oli/gemuk bearing.

Mingguan: Memeriksa kekencangan baut-baut, membersihkan panel kontrol dari debu.

Bulanan / Berkala: Mengganti oli bearing, membersihkan/mengecat ulang penstock jika berkarat, dan mengkalibrasi alat ukur.

Dengan mematuhi SOP ini, masa pakai komponen PLTMH dapat bertahan lebih lama dan pasokan listrik ke masyarakat menjadi lebih stabil.