

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Dalam Penyusunan tugas akhir ini, penulis mengkaji beberapa penelitian terdahulu yang memiliki kaitan dengan topik pengujian turbin air, khususnya turbin Francis, serta sistem kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Berikut adalah penelitian-penelitian yang relevan :

Analisis Kinerja Turbin Francis pada Pembangkit listrik Tenaga Air (PLTA) (2018). Penelitian yang dilakukan oleh Dwi Cahyo Nugroho ini menganalisis pengaruh variasi debit air terhadap daya dan efisiensi turbin Francis. Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi maksimum dicapai pada kondisi debit optimum sebesar $0,035\text{m}^3/\text{s}$ dengan efisiensi mencapai 87%. Penelitian ini menjadi acuan dalam memahami hubungan antara debit air dan efisiensi turbin, yang juga akan menjadi parameter utama dalam pengujian turbin Francis di PLTA Kerinci Merangin Hidro.

1. Evaluasi Kinerja Sistem Turbin dan Geerator pada PLTA Sigura-gura, Sumatera Utara (2021). R. Saputra dan A. Suryadi melakukan penelitian membahas efisiensi system turbin-generator serta factor-faktor yang mempengaruhinya, seperti kualitas air, kondisi bearing, dan kebersihan runner. Nilai efisiensi mencapai 83% setelah perbaikan peralatan. Studi ini memberikan gambaran tentang evaluasi performa sistem turbin-generator yang dapat dijadikan referensi dalam pengujian turbin Francis pada PLTA Kerinci Merangin Hidro,

terutama dalam aspek pengukuran efisiensi sistem secara keseluruhan.

2. Analisis Potensi Energi Air sebagai Sumber Pembangkit Listrik di Kabupaten Kerinci, Jambi (2022). Lestari, R. mengidentifikasi potensi energi air dari aliran sungai di daerah Kerinci dan Merangin. Berdasarkan analisis hidrologi, potensi daya yang dapat dihasilkan mencapai lebih dari 350 MW. Penelitian ini mendukung pentingnya pembangunan PLTA Kerinci Merangin Hidro sebagai pemanfaatan potensi energi air daerah, serta memberikan data pendukung tentang kondisi geografis dan hidrologi setempat.

2.1 Tabel Penelitian Yang Relevan

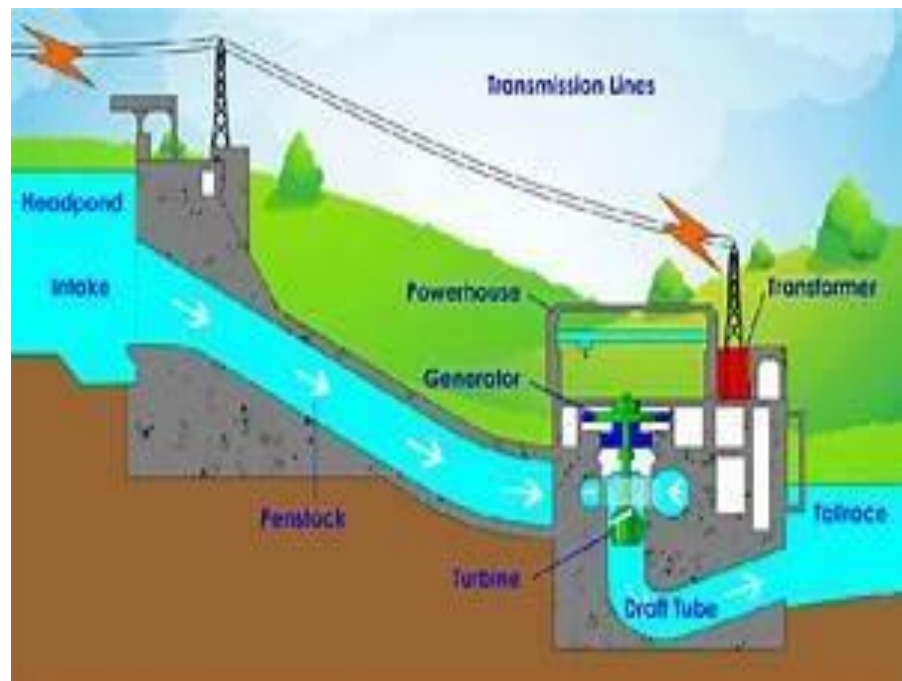
No.	Nama Peneliti/ Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Relevansi dengan Penelitian ini
1	Dwi Cahyo Nugroho (2018)	Analisis Kinerja Turbin Francis pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Wonogiri	Menunjukkan efisiensi maksimum turbin Francis sebesar 87% pada debit optimum 0,035 m ³ /s.	Menjadi acuan dalam memahami hubungan antara debit air dan efisiensi turbin Francis.

2	R. Saputra & A. Suryadi (2021)	Evaluasi Kinerja Sistem Turbin dan Generator pada PLTA Sigura-gura, Sumatera Utara	Efisiensi sistem turbin–generator mencapai 83% setelah perbaikan peralatan dan pembersihan komponen.	Memberikan gambaran evaluasi performa sistem turbin-generator yang bisa diterapkan pada pengujian PLTA Kerinci Merangin Hidro.
3	Lestari, R. (2022)	Analisis Potensi Energi Air sebagai Sumber Pembangkit Listrik di Kabupaten Kerinci, Jambi	Potensi daya air di wilayah Kerinci dan Merangin mencapai ± 350 MW berdasarkan analisis hidrologi.	Mendukung pentingnya pembangunan PLTA Kerinci Merangin Hidro dan relevan terhadap lokasi penelitian.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) adalah sistem pembangkit yang mengubah energy potensial dan kinetic air menjadi energi listrik melalui proses konversi bertingkat. Air yang memiliki beda tinggi (*head*) dialirkan melalui saluran atau pipa pesat (*penstock*) menuju turbin air untuk menggerakkan poros turbin, yang selanjutnya memutar generator listrik. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga air tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2.1 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Air

2.2.2 Prinsip Kerja PLTA

Prinsip kerja PLTA didasarkan pada hukum kekekalan energy (Hukum Bernoulli), dimana energy potensial air dibendung dikonversi menjadi energy kinetic dan akhirnya menjadi energy listrik.

2.2.3 Komponen Utama PLTA

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung untuk mengubah energy potensial air menjadi energy listrik. Setiap komponen memiliki fungsi dan peran penting dalam menjaga efisiensi serta keandalan system pembangkitan. Berikut penjelasan komponen-komponen utama PLTA :

1. Bendungan (Dam)

Bendungan berfungsi sebagai tempat penampungan air dari sungai yang dimiliki aliran konstan. Air yang tertampung akan membentuk waduk dengan ketinggian tertentu sehingga memiliki energy potensial.

- Pengaturan debit air agar konstan sepanjang tahun.
- Pengendalian banjir dan penyediaan air irigasi.
- Menyediakan head (beda tinggi air) yang diperlukan untuk memutar turbin.

Bahan bendungan biasanya berupa beton bertulang, atau tanah dengan sistem pelindungan rembesan.



Gambar 2.2 Bendungan (Dam)

2. Saluran Masuk (*Intake*)

Intake adalah bagian awal dari sistem pembangkitan yang berfungsi untuk mengatur jumlah air yang masuk ke pipa pesat. Komponen ini dilengkapi :

- Pintu air (*sluice gate*) untuk membuka dan menutup aliran air.
- *Trash rack* (saringan sampah) yang berfungsi menahan kotoran, batang kayu, dan sampah agar tidak masuk ke sistem turbin.

Desain intake harus memperhatikan turbulensi dan kecepatan aliran agar tidak menimbulkan kavitasi pada turbin.



Gambar 2.3 Intake

3. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat berfungsi menyalurkan air dari waduk atau saluran masuk menuju turbin dengan tekanan tinggi.

Ciri-ciri utama penstock :

- Terbuat dari baja karbon atau baja tahanan karat.
- Dirancang menahan tekanan air yang besar (*static head* dan *dynamic head*)
- Dilengkapi dengan katup pengaman (*surge tank* dan *butterfly valve*) untuk mencegah *water hammer* saat terjadi perubahan mendadak pada aliran air.

Panjang dan diameter pipa pesat ditentukan berdasarkan debit air dan tinggi jatuh air yang direncanakan.



Gambar 2.4 Pipa Pesat (*Penstock*)

4. Turbin Air (Francis)

Turbin adalah komponen utama yang mengubah energy potensial air menjadi energy mekanik berupa putaran poros. Jenis turbin ditentukan oleh ketinggian jatuh air (*head*) dan debit aliran (*flow rate*).

Beberapa jenis turbin yang umum digunakan :

- Pelton Turbine = untuk head tinggi (di atas 300 m).
- Francis Turbine = untuk head sedang (30-300 m).
- Kaplan Turbine = untuk head rendah (di bawah 30 m).

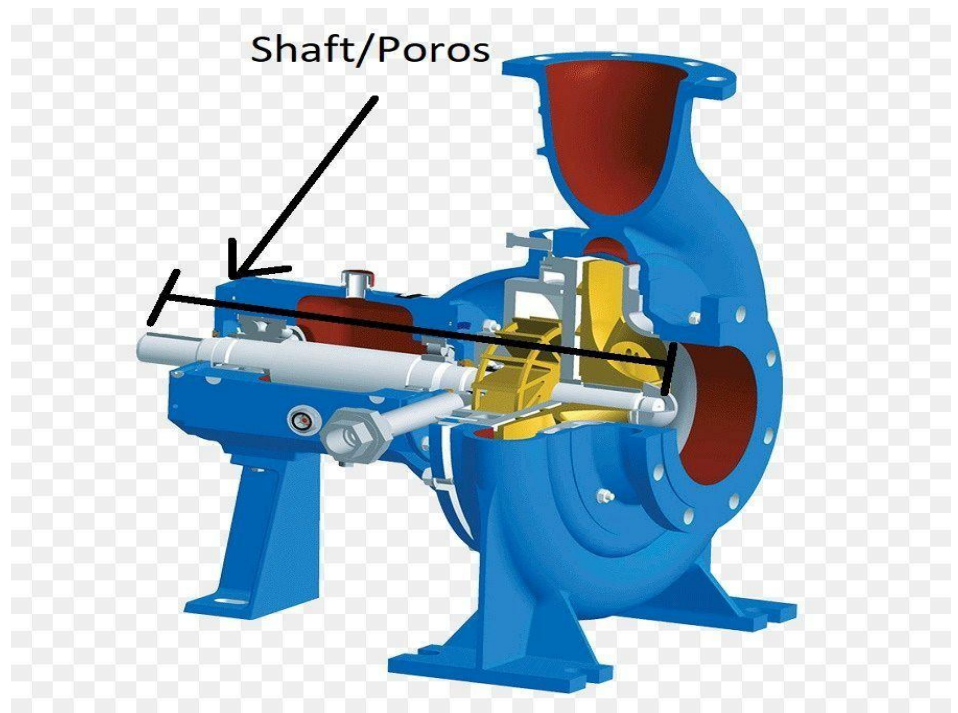
Pada PLTA Kerinci Merangin Hidro, digunakan turbin Francis vertical karena sesuai dengan karakteristik head dan debit sungai batang merangin.



Gambar 2.5 Francis Turbine

5. Poros (*Shaft*)

Poros menghubungkan turbin dengan generator. Energi mekanik dari turbin diteruskan melalui poros menuju rotor generator untuk menghasilkan listrik. Poros harus kuat menahan torsi besar serta memiliki keseimbangan dinamis agar tidak menimbulkan getaran berlebih selama operasi.



Gambar 2.6 Poros (*Shaft*)

6. Generator

Generator berfungsi mengubah energy mekanik yang diterima dari turbin menjadi energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika rotor (kumparan berputar) bergerak didalam medan megnet stator, timbul gaya gerak listrik (GGL). Generator di PLTA umumnya bertipe sinkron dengan tegangan keluaran sekitar 11-15 kV.



Gambar 2.7 Generator

7. Transformator (*Step-up Transformer*)

Transformator digunakan untuk menaikkan tegangan listrik dari generator sebelum disalurkan ke jaringan transmisi PLN. Hal ini dilakukan untuk mengurangi rugi daya selama proses transmisi. Contohnya tegangan 15 kV dari generator dinaikkan menjadi 150 kV atau 275 kV agar efisiensi untuk distribusi jarak jauh.



Gambar 2.8 Transformator

8. Saluran Pembuangan (*Tailrace*)

Tailrace adalah saluran yang mengalirkan air buangan dari turbin kembali ke sungai. Fungsi utamanya :

- Mengembalikan air ke aliran sungai tanpa menimbulkan turbulensi berlebihan.
- Menjaga agar tekanan di sisi keluaran turbin tetap stabil.

Desain *Tailrace* harus memperhitungkan ketinggian muka air dan kecepatan aliran agar tidak menimbulkan rugi energy yang besar.



Gambar 2.9 Tailrace

9. Rumah Pembangkit (*Power House*)

Power house merupakan bangunan tempat turbin, generator, dan peralatan pendukung lainnya dipasang.

Terdapat dua tipe utama :

- *Surface Power House* → dibangun di permukaan tanah.
- *Underground Power House* → dibangun di dalam terowongan atau bukit (seperti pada beberapa proyek besar termasuk Kerinci Merangin Hidro).

Di dalam *Power House*, juga terdapat sistem control, *cooling system*, *lubrication system*, dan *control panel* untuk memantau operasi pembangkit.



Gambar 2.10 *Power House*

10. Sitem Kontrol Proteksi

Sitem ini mengatur operasi pembangkit secara otomatis dan melindungi peralatan dari gangguan. Komponen utama :

- *Governor* → mengatur kecepatan turbin sesuai beban.
- *Excitation system* → mengontrol arus medan pada generator.
- *Protection system* → melindungi peralatan dari gangguan arus lebih, tegangan lebih, atau gangguan mekanik.



Gambar 2.11 Ruang Kontrol

11. Sistem Pendinginan dan Pelumasan.

- *Colling system* : menjaga suhu generator dan bearing tetap dalam batas aman dengan sirkulasi air pendingin atau oli.
- *Lubrication System* : mengurangi gesekan pada bantalan (*bearing*) turbin dan poros agar umur peralatan lebih panjang.

2.2.4 Teori Energi Air

Energi potensial air di hitung dengan rumus :

$$P_{air} = p \times g \times Q \times H \quad (2.1)$$

Dengan :

p = massa jenis air (1000 kg/m^3)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Q = debit air (m^3/s)

H = tinggi jatuh air (m)

Energi air ini merupakan input bagi sistim turbin. Daya mekanik yang dihasilkan turbin dihitung dengan :

$$P_{turbin} = T \times w \quad (2.2)$$

Dengan :

T = torsi turbin (N.m)

w = kecepatan sudut (rad/s)

Sedangkan efisiensi turbin di rumuskan sebagai :

$$\eta_t = \frac{P_{turbin}}{P_{air}} \times 100\% \quad (2.3)$$

2.2.5 Jenis Turbin Air

Turbin air diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama berdasarkan cara air memberikan energy pada *runner* :

- Turbin Impuls (*Impulse Turbin*) : air mengenai sudu dengan kecepatan tinggi. Contoh : *Pelton Turbine*.
- Turbin Reaksi (*Reaction Turbine*) : energi diperoleh dari kombinasi tekanan dan kecepatan air. Contohnya : *Francis turbine* dan *Kaplan turbine*.

Turbin yang dipasang pada PLTA Kerinci Merangin Hidro merupakan Turbin Francis karena Turbin Francis adalah turbin air tipe reaksi yang mengubah energy air menjadi energy mekanik melalui perubahan tekanan dan kecepatan aliran. Berdasarkan kesesuaian karakteristik head dan debit, efisisensi yang tinggi, fleksibilitas operasi, serta keandalan jangka panjang, penggunaan

turbin Francis merupakan pilihan yang tepat dan optimah untuk PLTA Kerinci Merangin Hidro.

2.2.6 Efisiensi Sistem PLTA

Efisiensi pada PLTA adalah ukuran kemampuan sistem dalam mengubah energy potensial air menjadi energy listrik secara efektif. Efisiensi menggambarkan seberapa besar energi air yang tersedia dapat dimanfaatkan menjadi listrik tanpa bnyak kehilangan energi selama proses konversi.

Dalam sistem PLTA, energy air mengalami beberapa tahapan perubahan :

Energi air → Energi Mekanik (turbin) → Energi Listrik
(generator)

Pada setiap tahap konversi, selalu terjadi kehilangan anergi akibat gesekan fluida, turbulensi, panas, dan rugi mekanik. Oleh karena itu, efisiensi total sistem tidak pernah mencapai 100%.

2.2.7 Keuntungan PLTA

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu sumber energy terbarukan yang paling banyak dimanfaatkan di dunia. Dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar fosil, PLTA memiliki berbagai keunggulan dari sisi ekonomi, teknis, dan lingkungan.

Keuntungan utama sistem PLTA :

- Energi bersih dan ramah lingkungan
- Sumber energy terbarukan dan berkelanjutan
- Biaya operasi dan pemeliharaan rendah
- Efisiensi konversi energy tinggi

- Meningkatkan keandalan system ketenagalistrikan
- Multifungsi
- Meningkatkan kemandirian energy rendah
- Umur pembangkit yang panjang
- Pengoperasian cepat dan fleksibel
- Mendukung pembangunan berkelanjutan

Dari berbagai keuntungan diatas, PLTA menjadi pilihan ideal dalam penyediaan energy listrik yang bersih, efisien, dan berkelanjutan. Pada kontek PLTA Kerinci Merangin Hidro, kehadiran proyek ini tidak hanya mendukung ketahanan energy nasional, tetapi juga memberikan manfaat social, ekonomi, dan lingkungan bagi masyarakat di Provinsi Jambi.

2.2.8 Keterkaitan dengan PLTA Kerinci Merangin Hidro

PLTA Kerinci Merangin Hidro menggunakan turbin Francis vertical dengan sistem aliran sungai (*run-off* system). Head efektifnya berada pada kisaran menengah, sehingga sesuai dengan karakteristik turbin Francis. Energi air dari Sungai Batang merangin dikonversi menjadi listrik berkapasitas total 350 MW, menjadikannya salah satu PLTA terbesar di Sumatera.

Dengan memahami landasan teori PLTA ini, studi awal pengujian turbin Francis dapat dilakukan untuk menilai kesesuaian antara kinerja actual di lapangan dengan teori efisiensi dan desain pabrikan.

2.3 Kerangka Pemikiran

Turbin Francis dipilih karena kemampuannya bekerja pada rentang head dan debit yang menengah hingga tinggi, dengan efisiensi konversi energi yang baik. Namun, performa aktual turbin dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti:

- Variasi head efektif (H),
- Debit air (Q) yang masuk ke turbin,
- Kondisi mekanis turbin,
- Dan kerugian energi (head loss) di saluran masuk dan keluaran.

Untuk menilai kinerja turbin Francis, dilakukan *commissioning test* pada Turbin di power house dengan parameter utama berupa daya keluaran (P), efisiensi turbin (η), serta hubungan antara head, debit, dan daya. Hasil *commissioning* akan dibandingkan dengan data desain untuk mengetahui kinerja turbin.

2.4. Konsep *Commissioning*

Commissioning adalah suatu proses sistematis dan terdokumentasi untuk memastikan bahwa seluruh sistem, peralatan, dan komponen suatu instalasi telah dirancang, dipasang, diuji, dan dioperasikan sesuai dengan spesifikasi desain, standar teknis, serta tujuan operasional yang telah ditetapkan.

Dalam konteks pembangkit listrik, commissioning merupakan tahap akhir sebelum unit dinyatakan siap untuk Commercial Operation Date (COD). Pada tahap ini dilakukan serangkaian pengujian performa untuk memverifikasi bahwa sistem bekerja sesuai parameter desain.

2.4.1. Parameter yang di ukur pada saat *commissioning* Turbin Francis

1. Head (H)

Head efektif adalah selisih energi antara elevasi air masuk dan keluar dikurangi kerugian (head loss).

$$H_{\text{efektif}} = H_{\text{gross}} - H_{\text{loss}}$$

Head sangat mempengaruhi daya karena daya berbanding lurus dengan head.

2. Debit (Q)

Debit adalah volume air yang mengalir per satuan waktu (m^3/s).

Debit biasanya diukur menggunakan :

- Flow meter ultrasonic



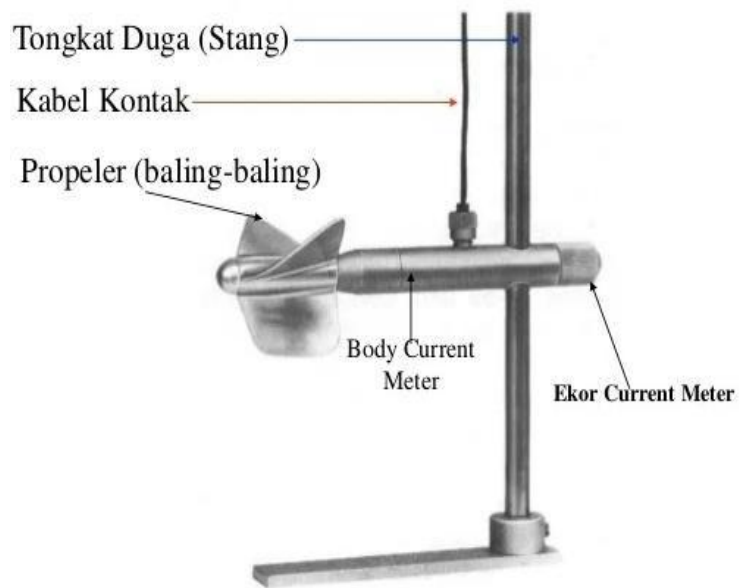
Gambar 2.12 Flow meter ultrasonic

- *Differential pressure method*



Gambar 2.13 *Differential Pressure Method*

- Current meter



Gambar 2.14 Current meter

2.4.2. Tujuan *Commissioning* secara teknis

1. Memastikan output daya sesuai kontrak EPC

Pada Proyek PLTA kontraktor EPC (*Engineering, Procurement, Construction*) berkewajiban menyerahkan pembangkit dengan kapasitas daya tertentu sesuai kontrak. Misalnya 4x87,5 MW.

2. Menguji performa pada kondisi head actual

Pada tahap desain PLTA, perhitungan daya dan efisiensi turbin dilakukan berdasarkan head desain (*design head*), yaitu tinggi jatuh air yang diasumsikan ideal sesuai perencanaan teknis.

Namun, ketika pembangkit sudah terpasang dan diuji di lapangan, kondisi sebenarnya sering berbeda. Oleh karena itu, commissioning bertujuan untuk menguji kinerja turbin pada head aktual (*actual head*), yaitu *head* yang benar-benar terjadi saat operasi nyata.

3. Memastikan turbin bekerja pada titik *Best Efficiency Point*

Memverifikasi bahwa turbin Francis beroperasi pada kondisi debit dan head yang menghasilkan efisiensi maksimum sesuai desain. Hal ini penting untuk menjamin konversi energi yang optimal, meminimalkan kerugian hidrolis, menjaga stabilitas operasi, serta memperpanjang umur pakai komponen sebelum unit dinyatakan layak beroperasi secara komersial.

4. Menghindari cavitation

Cavitation adalah fenomena terbentuknya gelembung uap (vapor bubbles) di dalam aliran fluida ketika tekanan lokal turun di bawah tekanan uap air. Gelembung ini kemudian pecah (collapse) saat memasuki daerah bertekanan lebih tinggi dan menghasilkan gelombang kejut mikro.

Pada Turbin Francis, cavitation biasanya terjadi di:

- Bagian belakang sudu runner
- Area draft tube
- Ujung trailing edge sudu
- Daerah tekanan rendah akibat perubahan kecepatan aliran

5. Mengurangi risiko kegagalan dini

Kegagalan dini (*early failure*) adalah kerusakan atau gangguan yang terjadi pada periode awal operasi pembangkit, biasanya

dalam beberapa minggu atau bulan pertama setelah unit mulai beroperasi.

Pada turbin Francis, kegagalan dini dapat berupa:

- Overheating pada bearing
- Getaran berlebih (excessive vibration)
- Misalignment poros turbin-generator
- Kebocoran sistem hidrolik
- Kerusakan seal
- Retak awal pada sudu
- Trip proteksi berulang

Jika tidak terdeteksi sejak awal, kerusakan kecil dapat berkembang menjadi kerusakan besar.

2.4.3. Faktor Penyebab Deviasi Saat *Commissioning*

Beberapa faktor yang menyebabkan hasil aktual berbeda dari desain:

- Head Loss pada Penstock

Kerugian gesekan pada pipa menurunkan head efektif.

- Variasi Debit Aktual

Debit sungai tidak selalu sama dengan debit desain. Debit desain dihitung berdasarkan data hidrologi historis. Namun saat commissioning:

- Debit sungai bisa lebih kecil
- Debit bisa fluktuatif
- Terdapat pembatasan bukaan intake

Turbin Francis memiliki kurva efisiensi terhadap debit. Turbin Francis dirancang optimal pada debit tertentu.

- Toleransi Manufaktur Runner
Ketidaksempurnaan profil sudu mempengaruhi efisiensi.
- Alignment dan Vibrasi
Ketidaksejajaran poros menyebabkan kerugian mekanik.
- Kondisi Air
Adanya sedimen atau gelembung udara.