

ANALISIS KINERJA TURBIN FRANCIS HORIZONTAL TERHADAP VARIASI DEBIT PADA SISTEM PLTMH AEK SIGEAON (THE PERFORMANCE ANALYSIS OF HORIZONTAL FRANCIS TURBINE TO DISCHARGE VARIATIONS IN THE AEK SIGEAON MICRO POWER PLANT SYSTEM)

1Hotmariana R Hutasoit, 1*Angky Puspawan, 1Nurul Iman Supardi, 2Jodi Trinaldi Manalu

1Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu,

2PLTMH Aek Sigeaon, PT Gading Energiprima

***Email:** apuspawan@unib.ac.id

Informasi Naskah:

Diterima:
07 November
2025

Diterbitkan:
24 Desember 2025

Abstract: A Micro-Hydro Power Plant (MHPP) is a small-scale power generation system that utilizes low-discharge water flow as its driving energy source. The water used can originate from irrigation channels, rivers, or natural waterfalls. In general, an MHPP consists of three main components: a water source, a water turbine, and a generator. This study aims to analyze the effect of water discharge variation on the performance of a horizontal Francis turbine in the Aek Sigeaon MHPP system. The research focuses on observing changes in input power, output power, and turbine efficiency resulting from variations in water discharge in the field. Data collection was carried out using a SCADA monitoring system to obtain real-time operational parameters, including water discharge, pressure, current, and voltage. The results show that increasing water discharge generally leads to higher input and output power, although it does not always result in higher turbine efficiency. The maximum turbine efficiency of 68.58% was achieved at a discharge of 5.23 m³/s, while the lowest efficiency of 57.57% occurred at a discharge of 5.06 m³/s.

Keywords: Micro Hydro Power Plant, Francis Turbine, Water Flow Rate, Input Power, Output Power, Turbine Efficiency

Abstrak: Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) merupakan pembangkit listrik berskala kecil yang menggunakan air dalam debit kecil sebagai sumber penggeraknya. Air yang dapat dimanfaatkan pada teknologi PLTMH dapat bersumber dari saluran irigasi, sungai atau terjun alam. Secara umum PLTMH memiliki tiga komponen utama yakni air, turbin air, dan generator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi debit air terhadap kinerja turbin Francis horizontal pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Aek Sigeaon. Fokus utama penelitian ini adalah mengamati perubahan daya input, daya output, dan efisiensi turbin sebagai akibat dari variasi debit air yang terjadi di lapangan. Pengambilan data dilakukan menggunakan sistem *monitoring* SCADA untuk memperoleh parameter operasional secara *real time* seperti debit air, tekanan, arus, dan tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan debit air secara umum menyebabkan kenaikan daya input dan output, namun tidak selalu berbanding lurus dengan efisiensi turbin. Efisiensi turbin tertinggi sebesar 68,58% diperoleh pada debit air 5,23 m³/s, sedangkan efisiensi terendah sebesar 57,57% terjadi pada debit air 5,06 m³/s.

Kata kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), Turbin Francis, Debit Air, Daya Masuk, Daya Keluar, Efisiensi Turbin

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) merupakan teknologi pembangkit listrik skala kecil yang dapat dikembangkan di daerah-daerah yang belum terjangkau jaringan listrik. Teknologi ini menjadi salah satu sumber energi yang ramah lingkungan karena memanfaatkan aliran air tanpa menghasilkan emisi yang signifikan. Keberagaman desain dan teknologi PLTMH memungkinkan sistem ini diintegrasikan dengan jaringan listrik yang sudah ada maupun dioperasikan secara mandiri di wilayah terpencil. Selain itu, PLTMH dapat dimanfaatkan secara komersial dalam skala kecil untuk mendorong kegiatan pembangunan dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat perdesaan. Oleh karena itu, pengembangan PLTMH menjadi salah satu alternatif yang tepat dalam upaya pemenuhan kebutuhan energi listrik di berbagai daerah [1].

PLTMH Aek Sigeaon merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang dikembangkan untuk mendukung penyediaan energi bersih di Provinsi Sumatera Utara. Pembangkit ini berlokasi di Kecamatan Sipoholon, Kabupaten Tapanuli Utara, dan memanfaatkan potensi aliran Sungai Aek Sigeaon yang memiliki debit stabil serta head menengah, sehingga sesuai untuk pengoperasian turbin Francis horizontal. Proyek ini dibangun dan dikelola oleh PT Gading Energiprima, sebuah perusahaan swasta nasional yang bergerak di bidang pengembangan energi baru dan terbarukan [2].

Turbin Francis horizontal merupakan salah satu jenis turbin air yang paling banyak digunakan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Turbin ini bekerja pada rentang head antara 10 hingga 350 meter dan mampu menghasilkan energi listrik dengan efisiensi mencapai sekitar 90%. Sebagai turbin reaksi, desainnya mengombinasikan aliran radial dan aksial sehingga memungkinkan pemanfaatan energi hidrolik secara optimal. Turbin Francis pertama kali dikembangkan oleh James B.

Francis pada tahun 1848 M. Melalui pendekatan ilmiah dan serangkaian pengujian, ia berhasil merancang turbin dengan efisiensi tinggi serta membuktikan kinerjanya melalui perhitungan matematis dan analisis grafis [3].

Namun, dalam operasionalnya, turbin sering menghadapi berbagai tantangan yang dapat memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem pembangkit. Beberapa permasalahan yang umum terjadi antara lain keausan pada sudu, penumpukan kotoran akibat kualitas air yang kurang baik, serta potensi kavitas yang dapat menimbulkan kerusakan pada komponen turbin. Kondisi tersebut menuntut adanya pemeliharaan yang terencana dan berkelanjutan agar turbin dapat beroperasi secara optimal.

Perawatan turbin memegang peranan krusial dalam menjaga kontinuitas operasi, mencegah terjadinya downtime, serta memperpanjang umur pakai peralatan. Pelaksanaan program pemeliharaan yang efektif tidak hanya berkontribusi pada peningkatan efisiensi konversi energi, tetapi juga mampu mengurangi potensi kerugian operasional. Oleh karena itu, manajemen perawatan turbin menjadi bagian yang integral dalam pengelolaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), karena secara langsung memengaruhi keandalan pasokan energi listrik yang dihasilkan [4].

Penelitian ini berjudul "Analisis Kinerja Turbin Francis Horizontal terhadap Variasi Debit" dan dilaksanakan di PLTMH Aek Sigeaon Kecamatan Sipoholon Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman mengenai pengaruh variasi debit air terhadap daya input, daya output, serta efisiensi turbin. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang bermanfaat dalam pengelolaan dan pengoperasian turbin, sehingga mendukung keandalan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dan mendukung pencapaian target produksi energi listrik perusahaan sekaligus menjamin pasokan listrik yang optimal bagi masyarakat sekitar.

TEORI

2.1 Cara Kerja Turbin Francis Horizontal

Turbin Francis merupakan salah satu jenis turbin reaksi dengan aliran campuran (radial–aksial) yang banyak digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Turbin ini dirancang untuk mengubah energi potensial dan energi tekanan air menjadi energi mekanik melalui putaran poros turbin. Aliran air dari saluran pesat (penstock) pertama-tama masuk ke rumah spiral (spiral casing), yang berfungsi membagi aliran air secara merata ke seluruh keliling turbin sekaligus mengubah tekanan menjadi kecepatan. Selanjutnya, aliran air diarahkan oleh stay vane dan diatur oleh guide vane, yang berperan dalam mengontrol jumlah debit serta sudut masuk air sesuai dengan kondisi operasi [6].

Air kemudian mengalir ke runner, yaitu komponen utama turbin yang memiliki suku dengan bentuk aerodinamis. Di bagian ini terjadi konversi energi, di mana kombinasi gaya reaksi akibat perbedaan tekanan dan gaya impuls akibat perubahan momentum menyebabkan runner berputar. Putaran runner diteruskan ke poros turbin, yang selanjutnya dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan energi listrik. Setelah melewati runner, aliran air keluar melalui draft tube. Saluran ini memiliki bentuk melebar dan berfungsi untuk memperlambat kecepatan aliran serta memulihkan sebagian tekanan. Selain itu, draft tube juga membantu mengurangi risiko kavitas pada suku turbin [7].

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pada penelitian ini dilakukan berdasarkan sumbernya. Data yang digunakan meliputi data teoretis terkait mesin serta data hasil pengukuran yang diperoleh di lapangan.

Tabel 1. Data Teoritis

No	Item	Satuan
1.	Debit Teoritis ($Q_{teoritis}$)	6,0 l/s
2.	Daya input Teoritis ($P_{in teoritis}$)	2700 kW
3.	Daya output teoritis ($P_{out teoritis}$)	2150 kW

4.	Efisiensi turbin air terotitis ($\eta_{turbin air}$)	94%
----	--	-----

3.2 Objek Yang Diamati

Objek yang diamati dalam penelitian ini adalah Turbin Francis Horizontal. Turbin Francis yang digunakan di PLTMH Aek Sigeao merupakan turbin reaksi dengan aliran campuran (mixed flow), di mana air masuk ke runner secara radial dan keluar secara aksial. Turbin Francis horizontal sangat cocok digunakan pada sistem PLTMH karena mampu bekerja secara stabil pada variasi debit dan head yang sedang. Pada PLTMH ini, tinggi jatuh air (head) yang tersedia sekitar 14 m, dengan debit air yang dapat berubah sesuai kondisi cuaca dan musim. Bentuk Turbin Francis horizontal dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Turbin Francis Horizontal
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian Pengujian dilakukan secara langsung pada sistem PLTMH Aek Sigeao dengan memanfaatkan sistem monitoring SCADA yang mencatat berbagai parameter operasional Turbin Francis horizontal. Parameter utama yang diamati meliputi debit air (Q), tekanan (P), daya input (energi hidraulik), daya output (energi listrik), serta efisiensi turbin.

Data yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi debit air memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja turbin. Peningkatan debit air umumnya menyebabkan peningkatan daya input dan daya output. Namun, kenaikan debit air tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi secara proporsional, menunjukkan bahwa efisiensi turbin dipengaruhi oleh kombinasi faktor hidraulik dan mekanik dalam sistem operasi.

Dari hasil pengukuran, efisiensi turbin tertinggi tercatat sebesar 68,58% pada debit 5,23 m³/s, sedangkan efisiensi terendah sebesar 57,57% pada debit 5,06 m³/s. Hal ini menunjukkan bahwa Turbin Francis horizontal bekerja lebih optimal pada debit rendah hingga menengah. Selain itu, hasil pengamatan juga memperlihatkan seiring meningkatnya debit, beban kerja turbin meningkat, namun sebagian energi hilang akibat faktor hidrolik dan mekanik, sehingga efisiensinya menurun. Dengan demikian, pengaturan debit yang tepat menjadi faktor penting untuk menjaga kinerja PLTMH agar tetap stabil dan optimal. Hasil pengamatan yang terekam pada sistem SCADA dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem Monitoring Digital (SCADA)

4.2 Metode Pengujian

Metode pengujian kinerja Turbin Francis horizontal pada sistem PLTMH Aek Sigeao dilakukan dengan pendekatan pengamatan langsung menggunakan sistem monitoring digital Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Sistem ini berfungsi untuk mencatat data operasional turbin secara *real-time*, sehingga parameter-parameter penting dapat diperoleh dengan akurat.

Pengujian yang dilakukan meliputi:

1. Menyalakan dan memastikan sistem turbin Francis serta generator Listrik berada dalam kondisi siap operasi, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kondisi Sistem Siap Operasi

2. Memastikan bahwa sistem monitoring digital Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) dalam kondisi aktif dan berfungsi dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 4.



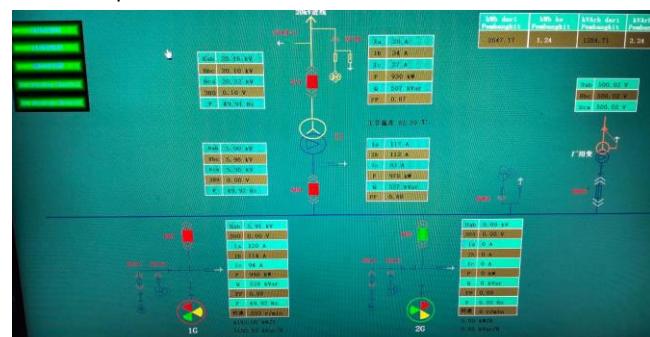
Gambar 4. Sistem Monitoring SCADA Aktif

3. Menyiapkan Komputer panel Kontrol yang terhubung ke sistem monitoring turbin Francis dan generator listrik untuk melihat dan mengekspor data seperti debit air, tekanan air, tegangan listrik (voltase Listrik), dan kuat arus Listrik, seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Komputer Panel Kontrol

4. Melakukan pengambilan data dari kondisi pengujian, yaitu data debit air dan tekanan air pada inlet turbin, serta tegangan Listrik dan kuat arus listrik dari generator listrik. Data tersebut diperoleh melalui tampilan sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengambilan Data

4.3 Hasil Pengujian

Hasil Pengujian kinerja turbin Francis horizontal pada sistem PLTMH dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran dari Pengujian

Waktu Operasi (WIB)	Debit (Q) (m ³ /s)	Tekanan Air (P) (Bar)	Tegangan (V) (Volt)	Arus (I) (Ampere)	Daya (PF) Nondimensional
08.00	5,23	4,50	20.000	95,0	0,85
09.00	5,23	4,63	20.000	90,7	0,85
10.00	5,06	4,67	20.000	82,3	0,85
11.00	5,13	4,67	20.000	85,0	0,85
12.00	5,33	4,57	20.000	95,0	0,85
13.00	5,18	4,73	20.000	91,3	0,85
14.00	5,15	4,83	20.000	88,3	0,85
15.00	5,07	4,85	20.000	85,0	0,85
16.00	5,06	4,62	20.000	88,0	0,85
17.00	5,03	4,77	20.000	81,3	0,85
Rerata	5,15	4,68	20.000	88,2	0,85

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan dari Pengujian

Waktu Operasi (WIB)	Debit Air Q (m ³ /s)	Tekanan Air P (Bar)	Daya Input P _{in} (MW)	Daya Output P _{out} (MW)	Efisiensi Turbin η _{Turbin} (%)
08.00	5,23	45,9	2,354	1,615	68,58
09.00	5,23	47,2	2,422	1,541	68,63
10.00	5,16	47,3	2,364	1,399	59,17
11.00	5,13	47,6	2,362	1,445	60,28
12.00	5,22	46,1	2,431	1,615	66,62
13.00	5,18	46,4	2,451	1,501	63,10
14.00	5,16	46,2	2,488	1,501	60,32
15.00	5,09	47,2	2,439	1,466	58,78
16.00	5,06	46,2	2,329	1,406	57,57
17.00	5,04	47,2	2,300	1,362	60,36
Rerata	5,15	46,7	2,394	1,485	62,34

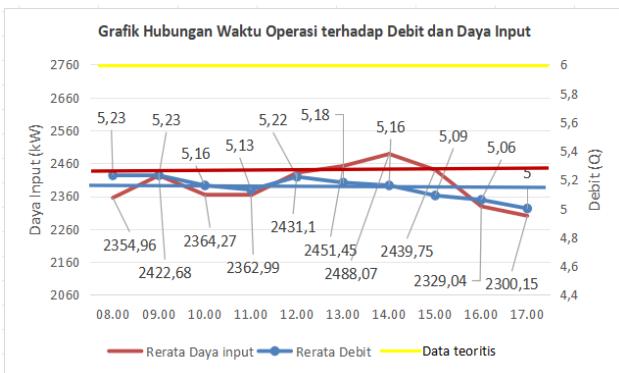
4.3 Pembahasan

Turbin Francis Horizontal merupakan salah satu jenis turbin reaksi yang umum digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Turbin ini mampu beroperasi pada berbagai variasi debit dan tinggi jatuh (head) menengah. Pada penelitian ini, analisis kinerja dilakukan terhadap Turbin Francis horizontal yang digunakan pada PLTMH Aek Sigeao dengan memvariasikan debit aliran air yang masuk ke turbin. Tujuan utama analisis ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi debit terhadap daya input, daya output, dan efisiensi sistem, sehingga dapat ditentukan debit optimal yang memberikan kinerja energi dan efisiensi terbaik.

Pada Penelitian sebelumnya meneliti perbandingan konfigurasi 5, 8, dan 10 guide vane, serta penggunaan 1 pipa dan 2 pipa masuk. Parameter yang diukur meliputi torsi, debit air, daya turbin, dan efisiensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi dengan 5 guide vane dan 2 pipa masuk menghasilkan daya maksimum sebesar 98 W dan efisiensi tertinggi sebesar 6,2%. Efisiensi turbin menurun seiring bertambahnya jumlah sudu, yang disebabkan oleh peningkatan hambatan aliran dan distribusi energi yang kurang optimal [8].

4.3.1 Analisis Waktu Operasi terhadap Debit dan Daya Input

Analisis waktu operasi terhadap debit dan daya output disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 7.

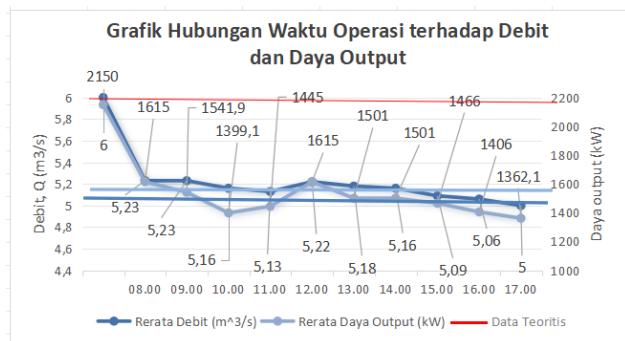


Gambar 7. Grafik Hubungan Waktu Operasi terhadap Debit dan Daya Input

Berdasarkan grafik hubungan antara waktu, debit, dan daya input, terlihat bahwa semakin besar debit air, semakin tinggi pula daya input yang dihasilkan turbin. Misalnya, pada debit 5,23 m³/s, daya input tercatat sebesar 2.422 kW, sedangkan pada debit 5,04 m³/s hanya sebesar 2.300 kW. Meskipun selisih daya input tidak terlalu besar, hal ini menunjukkan bahwa debit air merupakan faktor utama yang menentukan besarnya energi hidraulik yang masuk ke turbin. Semakin besar debit air, volume air yang melewati turbin meningkat, sehingga energi potensial dan energi tekanan yang tersedia untuk dikonversi menjadi energi mekanik juga semakin besar, yang berdampak langsung pada peningkatan daya input.

4.3.2 Analisis Waktu Operasi terhadap Debit dan Daya Output

Analisis waktu operasi terhadap debit dan daya output disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Hubungan Waktu Operasi Terhadap Debit dan Daya Output

Berdasarkan grafik hubungan antara waktu, debit, dan daya output pada Turbin Francis horizontal di PLTMH Aek Sigeao, terlihat bahwa peningkatan debit air cenderung menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi. Data menunjukkan bahwa pada debit 5,23 m³/s, daya output tercatat sebesar 1615 kW (1,6, sedangkan pada debit 5,04 m³/s, daya output hanya sebesar 1362 kW (1,362 MW). Fenomena ini menunjukkan adanya korelasi positif antara debit aliran air dengan daya listrik yang dihasilkan, karena debit yang lebih besar berarti volume air yang melewati turbin lebih banyak, sehingga energi hidraulik yang tersedia untuk dikonversi menjadi energi mekanik meningkat. Dengan kata lain, semakin besar aliran air yang masuk ke runner, semakin besar gaya dorong dan momentum yang bekerja pada sudu turbin, sehingga poros turbin berputar dengan daya yang lebih tinggi, dan akhirnya meningkatkan daya listrik yang dihasilkan oleh generator.

Meskipun demikian, kenaikan daya output tidak bersifat linier terhadap peningkatan debit. Hal ini terjadi karena adanya rugi-rugi energi yang selalu terjadi dalam sistem, baik di sisi mekanis maupun elektrik. Pada turbin, sebagian energi hidraulik hilang akibat gesekan antara air dan sudu, turbulensi aliran, serta kerugian akibat wake dan aliran balik di draft tube.

Selain itu, efisiensi mekanis poros dan sambungan juga memengaruhi seberapa besar energi yang berhasil diteruskan ke generator. Di sisi generator, tidak semua energi mekanik yang diterima oleh poros dapat dikonversi menjadi energi listrik secara sempurna. Rugi-rugi akibat hambatan elektrik, resistansi kawat tembaga, dan panas yang dihasilkan selama proses konversi menyebabkan daya output listrik tidak meningkat sebanding dengan peningkatan daya input atau debit air.

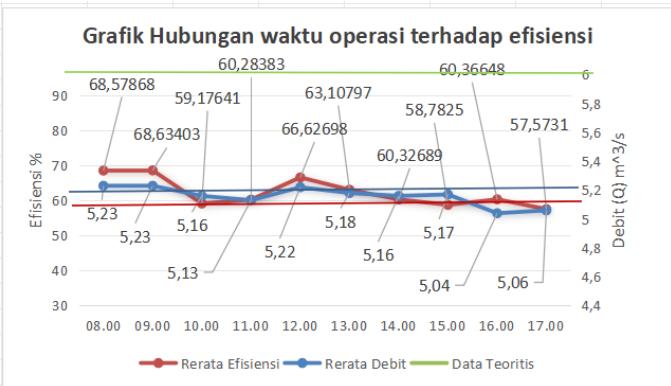
Selain faktor rugi-rugi, karakteristik turbin Francis itu sendiri juga memengaruhi hubungan debit dan daya output. Turbin ini memiliki debit optimal tertentu di mana efisiensi konversi energi maksimum dicapai. Pada debit yang lebih rendah dari kondisi optimal, energi hidraulik tidak sepenuhnya dimanfaatkan karena aliran air tidak cukup untuk memaksimalkan tekanan dan momentum pada sudu turbin. Sebaliknya, pada debit yang melebihi kapasitas optimal, energi tambahan yang masuk tidak dapat sepenuhnya dikonversi menjadi energi mekanik akibat keterbatasan desain sudu dan hambatan aliran, sehingga efisiensi menurun. Hal ini menjelaskan mengapa meskipun debit meningkat, daya output tidak selalu bertambah secara proporsional dan terkadang efisiensi sistem menurun.

Dari pengamatan ini, dapat disimpulkan bahwa pengaturan debit yang tepat menjadi faktor kunci untuk mencapai kinerja optimal Turbin Francis horizontal. Debit optimal tidak hanya memastikan daya output maksimal, tetapi juga menjaga efisiensi sistem agar kerugian energi dapat diminimalkan. Dalam pengoperasian PLTMH, manajemen debit yang baik sangat penting karena perubahan debit akibat musim atau kondisi hidrologi dapat memengaruhi kinerja keseluruhan pembangkit. Oleh karena itu, pemantauan secara real-time menggunakan sistem SCADA sangat membantu dalam menentukan strategi pengaturan debit sehingga daya output tetap stabil dan efisiensi turbin terjaga.

Dengan demikian, analisis ini menegaskan bahwa debit aliran air merupakan salah satu parameter terpenting dalam pengoperasian turbin Francis horizontal. Kenaikan debit meningkatkan potensi daya listrik, namun efisiensi dan daya output aktual tetap dipengaruhi oleh rugi-rugi hidraulik dan mekanis, serta karakteristik desain turbin itu sendiri. Pemahaman yang mendalam mengenai hubungan ini dapat membantu operator PLTMH dalam mengoptimalkan kinerja turbin dan memastikan pasokan listrik yang stabil bagi masyarakat serta pencapaian target produksi energi pembangkit.

4.3.3 Analisis Waktu Operasi terhadap Debit dan Efisiensi

Analisis waktu operasi terhadap debit dan daya output disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Hubungan Waktu Operasi Terhadap Debit dan Efisiensi

Berdasarkan grafik hubungan antara waktu, debit, dan efisiensi, terlihat bahwa efisiensi tertinggi Turbin Francis horizontal dicapai pada debit menengah, yaitu $5,23 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan nilai 68,63%. Sebaliknya, efisiensi terendah sebesar 57,57% terjadi pada debit $5,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Debit yang terlalu rendah menyebabkan energi air tidak termanfaatkan secara penuh, sementara debit yang terlalu tinggi menimbulkan kerugian energi akibat turbulensi dan hambatan aliran. Dengan demikian, Turbin Francis bekerja paling optimal pada debit tertentu yang sesuai dengan desainnya, yang mampu menghasilkan aliran stabil dan efisiensi maksimum.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa debit air merupakan faktor utama yang menentukan efisiensi dan output listrik.

Dalam pengujian pada Pembangkit Listrik Nano Hidro (PLNH), pengurangan debit dari $0,9 \text{ liter/s}$ menyebabkan penurunan signifikan pada kecepatan putar turbin (dari 445 menjadi 136 rpm), tegangan listrik (dari 4,32 menjadi 1,29 Volt), kuat arus listrik (dari 1,22 menjadi 0,28 Ampere), serta daya listrik (dari 1,4884 W menjadi 0,084 W) [9]. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan debit secara tepat sangat penting untuk mempertahankan kinerja turbin dan output listrik.

Pengujian skala laboratorium pada model Turbin Francis juga menunjukkan pola yang serupa. Dengan mengukur tekanan, torsi, pulsa, dan debit, kemudian dilakukan proyeksi ke skala prototipe berdasarkan prinsip kesetaraan skala (*model similarity*), hasil penelitian menunjukkan efisiensi turbin mencapai 94% pada model dan diproyeksikan mencapai 95% pada prototipe. Debit optimal menghasilkan aliran stabil, tekanan merata, dan efisiensi maksimum, sedangkan efisiensi menurun drastis saat debit berada di bawah desain nominal [10].

Hasil observasi pada PLTMH skala prototipe menunjukkan bahwa daya turbin maksimal Turbin Francis dapat mencapai 35,2 MW pada debit $46,7 \text{ m}^3/\text{s}$, tinggi jatuh 77 m, dan putaran 272,7 rpm [11]. Pengujian model terhadap berbagai kondisi operasi juga menunjukkan efisiensi puncak model sebesar 94% dan efisiensi prototipe sebesar 95,03%. Kavitas muncul pada beban parsial 50% tetapi hilang pada beban penuh, sementara fluktuasi tekanan tertinggi tercatat di inlet terendah pada elbow draft tube [12].

Analisis numerik menggunakan simulasi CFD pada Turbin Francis menunjukkan efisiensi hingga 90%, namun efisiensi sulit dipertahankan secara konsisten pada rentang debit yang luas karena variasi aliran dan parameter operasi [13]. Eksperimen lain untuk merancang dan membuat model PLTMH menunjukkan bahwa PLTMH dapat diimplementasikan secara efisien pada daerah dengan sumber daya air terbatas [14].

Selanjutnya, simulasi CFD dan pengujian eksperimental pada berbagai sudut pandang dan variasi beban/debit menunjukkan bahwa tekanan air berubah signifikan ketika debit keluaran bervariasi, dan amplitudo laju aliran cenderung meningkat pada beban parsial, mencerminkan ketidakstabilan aliran [15].

Secara keseluruhan, berbagai penelitian menunjukkan bahwa debit air merupakan parameter kunci dalam menentukan efisiensi dan daya output Turbin Francis. Debit optimal memungkinkan turbin bekerja dengan stabil, memaksimalkan konversi energi hidraulik menjadi energi mekanik, dan meminimalkan kerugian energi akibat turbulensi, kavitas, dan hambatan aliran. Oleh karena itu, pengaturan debit yang tepat menjadi faktor krusial dalam operasi PLTMH untuk mencapai kinerja maksimal serta efisiensi tinggi [15].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian serta pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi debit air berpengaruh signifikan terhadap daya input yang masuk ke turbin. Semakin besar debit, semakin tinggi daya input (energi hidraulik) yang diterima turbin. Daya input tertinggi tercatat sebesar 2.488 kW pada debit 5,16 m³/s, sedangkan daya input terendah sebesar 2.300 kW pada debit 5,04 m³/s.
2. Daya output listrik yang dihasilkan oleh generator cenderung meningkat seiring bertambahnya debit air. Daya output tertinggi diperoleh sebesar 1.615 kW pada debit 5,23 m³/s, sedangkan daya output terendah sebesar 1.362 kW pada debit 5,04 m³/s.
3. Efisiensi turbin tertinggi dicapai pada debit menengah, yaitu sebesar 68,58% pada debit 5,23 m³/s, sementara efisiensi terendah sebesar 57,57% terjadi pada debit 5,06 m³/s. Hal ini menunjukkan bahwa Turbin Francis horizontal bekerja paling optimal pada debit tertentu yang sesuai dengan desainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Siahaan, R., & Manalu, J. (2018). Analisis Sistem PLTMH dengan Turbin Aliran silang. *Jurnal Teknik Energi*, 3.
- [2]. Kusuma, D. (2019). Karakteristik Unjuk Kerja Turbin Francis pada PLTMH. Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang.
- [3]. Zulfian, M. (2020). Uji Kinerja Turbin Francis Skala Laboratorium dengan Variasi Bukaan Katup. *Jurnal Mekanikal*, 6(1).
- [4]. Liu, J., Zhang, X., & Wang, L. (2016). Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype. *Renewable Energy*, 85, 1012–1023.
- [5]. Widyantoro, H. (2020). Analisis Pengaruh Debit Air terhadap Kinerja Turbin pada Pembangkit Listrik Nano Hidro. *Jurnal Energi Terbarukan dan Konversi*, 4(1).
- [6]. PLN UID Sumatera Utara (2024). Laporan Operasional PLTMH Aek Sigeaon. PT. Gading Energiprima.
- [7]. PT Gading Energiprima. (2023). Profil Perusahaan dan Proyek PLTMH [Dokumen Internal Proyek Aek Sigeaon].
- [8]. Rahmawan, I. (2020). Analisis Mekanisme Turbin Pembangkit Bertenagakan Air. *Jurnal Reitims*, 6(1).
- [9]. Umar, B. M. (2024). Experimental flow performance investigation of Francis turbines from model to prototype. *Applied Sciences*, MDPI.
- [10]. Kale, S. (2022). Desain dan Analisis CFD Turbin Francis. *Jurnal Internasional Penelitian Teknik dan Sains*, 10.
- [11]. Li, S. (2025). Influence of Load Variation on the Flow Field and Stability of the Francis Turbine. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(Eng).
- [12]. Joy, J. (2022). Hydraulic Performance of A Francis Turbine with A Variable Draft Tube Guide Vane System to Mitigate Pressure Pulsation. *Energies*, 15.
- [13]. Amini, A. (2023). Upper Part-load Instability in A Reduced-scale Francis Turbine: An Experimental Study. *Experimental Fluids*, 64.

- [14]. Departemen Energi Sumber Daya Mineral RI (2017), Pedoman Umum Pengembangan PLTMH, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Jakarta.
- [15]. A. Widodo, *Turbin Air dan Jenis-jenisnya*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2015.