

Kinerja *Penstock* Terhadap Fluktuasi Debit pada PLTA Bili Bili

Bagus Fadil Pratama¹ | Farouk Maricar^{*2} | Abd. Rakhim Nanda³

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia.

bagusfadilpratama2003@gmail.com

² Universitas Hasanuddin, Indonesia.

fkmaricar@yahoo.com

³ Program Studi Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar, Indonesia.

rakhim.nanda@unismuh.ac.id

Korespondensi:

*Farouk Maricar

fkmaricar@yahoo.com

ABSTRAK:

Penstock merupakan komponen vital dalam sistem pembangkitan listrik tenaga air karena berfungsi menyalurkan aliran air bertekanan dari bendungan menuju turbin. Kinerja penstock sangat dipengaruhi oleh kondisi hidraulik di dalamnya, khususnya fluktuasi debit yang dapat menimbulkan perubahan tekanan, kehilangan energi, dan potensi terjadinya water hammer. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kinerja penstock pada PLTA Bili Bili di bawah kondisi variasi debit operasi, serta menganalisis pengaruh fluktuasi debit terhadap parameter-parameter hidraulik utama seperti tekanan, kecepatan aliran, dan efisiensi penyaluran energi. Data yang dikaji meliputi karakteristik penstock, variasi debit harian, tekanan operasi, serta data kinerja turbin. Analisis dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perubahan debit dengan perubahan tekanan internal, head loss, dan respons sistem terhadap potensi transien aliran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi debit memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik hidraulik penstock. Pada debit tinggi terjadi peningkatan tekanan statis dan kehilangan energi yang lebih besar, sedangkan pada debit rendah penurunan tekanan menyebabkan efisiensi penyaluran energi menurun. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam optimasi operasi penstock dan peningkatan keandalan sistem pembangkitan pada PLTA Bili Bili.

KATA KUNCI

Penstock, Fluktuasi Debit, Hidraulika Penstock, PLTA Bili Bili, Water hammer, Head loss.

ABSTRACT:

Penstock is a vital component in a hydropower generation system because it functions to channel the flow of pressurized water from the dam to the turbine. The performance of the penstock is greatly influenced by the hydraulic conditions in it, especially discharge fluctuations that can cause pressure changes, energy loss, and the potential for water hammering. This study aims to examine the performance of the penstock in the Bili Bili hydropower plant under conditions of operating discharge variations, as well as analyze the effect of discharge fluctuations on key hydraulic parameters such as pressure, flow speed, and energy distribution efficiency. The data studied included penstock characteristics, daily discharge variations, operating pressure, and turbine performance data. The results of the study show that the discharge fluctuations have a significant influence on the hydraulic characteristics of the penstock. At high discharge there is an increase in static pressure and greater energy loss, while at low discharge there is a decrease in pressure causing the efficiency of energy distribution to decrease. This study is expected to contribute to the optimization of penstock operations and improve the reliability of the generation system at the Bili Bili hydropower plant.

Keywords:

Penstock, Discharge Fluctuation, Penstock Hydraulics, Bil Hydropower, Water hammer, Head loss

1 | PENDAHULUAN

Indonesia menunjukkan komitmennya dalam mengembangkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan, sebagaimana diatur dalam berbagai regulasi seperti Undang-Undang, Peraturan Pemerintah, Peraturan Presiden, Peraturan Menteri, serta peraturan pendukung lainnya. Kondisi geografis Indonesia yang didominasi oleh wilayah bergunung dan berbukit memberikan potensi besar terhadap pengembangan energi air. Potensi ini menjadi salah satu fokus utama pemerintah dalam upaya mencapai target bauran energi baru dan terbarukan, yaitu minimal 23% pada tahun 2025 dan meningkat menjadi minimal 31% pada tahun 2030 (Taufiqurrahman & Windarta, 2020).

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan berupa air. Salah satu keunggulan dari pembangkit ini adalah ramah lingkungan dan kapasitas daya keluarannya paling besar diantara energi terbarukan lainnya (Maulana, 2020).

Adapun salah satu komponen utama PLTA adalah pipa pesat (penstock), yakni pipa yang terbuat dari bahan baja karbon atau baja struktural, karena material ini memiliki kekuatan tarik tinggi, kemampuan menahan tekanan hidraulik besar, serta ketahanan terhadap deformasi saat terjadi fluktuasi debit. Fungsinya adalah untuk mengalirkan air dari tangki penampung menuju turbin. Pipa pesat mempunyai posisi kemiringan yang tajam dengan maksud agar diperoleh kecepatan dan tekanan air yang tinggi untuk memutar turbin. Konstruksinya harus diperhitungkan agar dapat menerima tekanan besar yang timbul termasuk tekanan dari pukulan air. Sedangkan fluktuasi debit mengacu pada perubahan volume atau laju air yang mengalir melalui saluran penstock.

Pipa pesat (penstock) merupakan saluran yang dipasang berdasarkan perbedaan elevasi antara titik masuk dan keluaran air, dan berfungsi untuk menyalurkan air langsung menuju turbin. Pada ujung keluaran (output) pipa ini biasanya dipasang nosel guna meningkatkan tekanan air yang jatuh. Penstock digunakan untuk mengalirkan air dari sumber utama atau dari tangki penampung (head race water) menuju rumah turbin (Liem, 2017).

Penstock berperan sebagai penyalur aliran fluida antara bak penampungan dan turbin (Suryanto et al., 2019), adapun masalah pada penstock terhadap fluktuasi debit terutama dalam mengelola dampak water hammer yang terjadi dalam aliran fluida. Fenomena Water hammer dapat menyebabkan fluktuasi tegangan pada pipa yang dapat merusak peralatan dan menghambat kelangsungan pengoperasian. Maka dari itu perlu dilakukan analisis mengenai pemilihan waktu penutupan katup yang tepat agar dapat meminimalkan resiko kerusakan pada sistem PLTA dan menjamin keberhasilan operasi PLTA (Herdiansyah et al., n.d.). Dalam sebuah sistem pemipaan pasti akan terjadi head losses (kerugian akibat adanya gesekan), adapun faktor yang mempengaruhi kerugian aliran fluida di dalam pipa adalah kecepatan aliran, luas penampang (pipa), friction factor, viskositas dan massa jenis fluida. Selain itu juga head losses akan berdampak pada daya turbin yang menurun (Sulistyo et al., 2018).

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Bili-Bili merupakan salah satu fasilitas pembangkit energi listrik dengan kapasitas terpasang sekitar ± 21 MW (megawatt), yang terbagi menjadi 2 unit turbin, unit 1 dengan kapasitas ± 6 MW dan unit 2 dengan kapasitas ± 15 MW. yang memanfaatkan aliran air dari Sungai Jeneberang sebagai sumber dayanya. Komponen utama sistem PLTA meliputi bendungan, saluran pengambilan, penstock, turbin, serta generator. Dari seluruh komponen tersebut, penstock berperan penting sebagai pipa bertekanan yang menyalurkan air dari reservoir menuju turbin untuk menghasilkan energi mekanik.

Kinerja penstock sangat bergantung pada fluktuasi debit air yang berasal dari hulu. Perubahan debit ini dapat disebabkan oleh variasi curah hujan, pengaturan operasi bendungan, maupun kondisi hidrologi di wilayah tangkapan air. Variasi debit tersebut akan mempengaruhi tekanan dan kecepatan aliran di dalam penstock yang, apabila tidak terkendali, berpotensi menurunkan efisiensi turbin serta mempercepat penurunan umur layanan pipa.

Dengan demikian, penelitian mengenai kinerja penstock terhadap fluktuasi debit pada PLTA Bili-Bili menjadi penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik tekanan dan aliran di dalam sistem, serta memahami sejauh mana pengaruhnya terhadap efisiensi dan kestabilan operasi PLTA secara keseluruhan. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan berupa air. Salah satu keunggulan dari pembangkit ini adalah ramah lingkungan dan kapasitas daya keluarannya paling besar diantara energi terbarukan lainnya

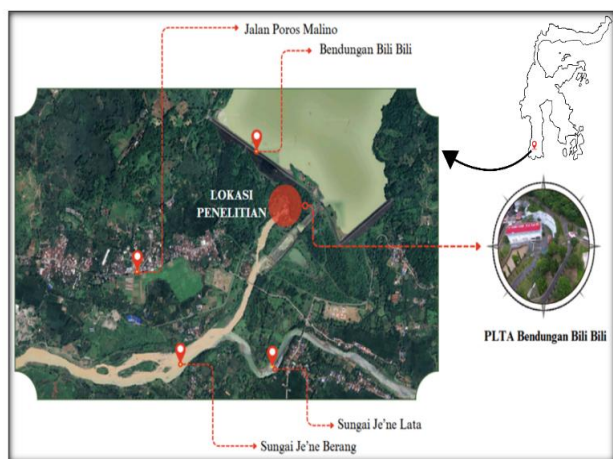
Penelitian mengenai “Studi kinerja penstock terhadap fluktuasi debit pada PLTA Bili-Bili” saya pilih sebagai judul skripsi karena perubahan debit air menjadi faktor krusial yang mempengaruhi kestabilan dan efisiensi aliran dalam penstock pada pembangkit listrik tenaga air. Variasi debit yang terjadi secara tiba-tiba dapat menimbulkan tekanan dinamis yang berfluktuasi, yang berpotensi menyebabkan kerusakan maupun penurunan performa sistem secara keseluruhan. Melalui penelitian ini, saya ingin menganalisis bagaimana fluktuasi debit berdampak pada kinerja penstock, sehingga dapat memberikan pemahaman lebih mendalam serta rekomendasi teknis untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional PLTA. Dengan demikian, topik ini sangat penting untuk dikaji sebagai kontribusi dalam pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga air yang lebih efektif dan handal.

2 | METODE PENELITIAN

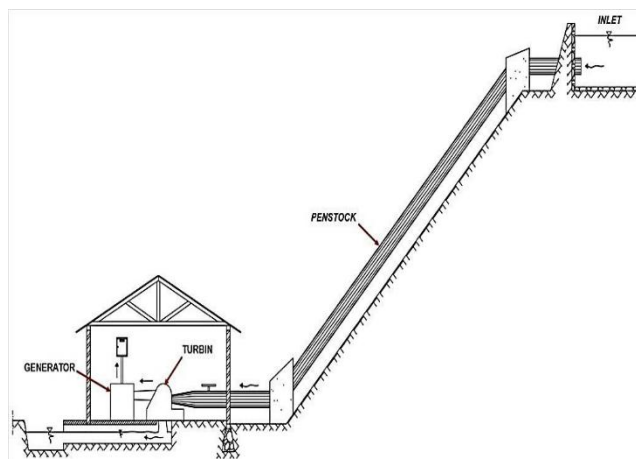
2.1 | Lokasi Penelitian dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang berada di kawasan Bendungan Bili-Bili, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan., yang memiliki karakteristik sistem penstock. Kegiatan penelitian dijadwalkan berlangsung mulai dari Juli hingga Agustus tahun 2025.

Secara geografis, lokasi ini terletak sekitar 30 kilometer dari Kota Makassar dan dapat diakses melalui jalur darat dengan waktu tempuh kurang lebih 1 jam. Bendungan Bili-Bili dibangun di atas aliran Sungai Jeneberang dan memiliki peran strategis sebagai infrastruktur multifungsi, yaitu sebagai penyedia air baku, pengendali banjir, serta sebagai sumber energi listrik melalui sistem PLTA. Pemilihan lokasi ini sebagai objek penelitian didasarkan pada peran penting bendungan dalam sistem kelistrikan lokal, serta potensi pengaruh dinamika aliran air terhadap kinerja komponen utama PLTA, khususnya pada sistem penstock. Agar memudahkan pemahaman, gambar berikut menampilkan rincian titik penelitian yang menjadi fokus pembahasan.



GAMBAR 1. Peta Lokasi Penelitian



GAMBAR 2. Sketsa PLTA Bendungan Bili Bili

2.2 | Jenis Penelitian dan Sumber Data

Teknik Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif karena melibatkan pengukuran terhadap variabel debit dan kinerja penstock. Termasuk dalam jenis penelitian eksplanatif, karena bertujuan untuk menjelaskan hubungan kausal antara fluktuasi debit (variabel bebas) dan respon penstock (variabel terikat), seperti tekanan dan kecepatan aliran. Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan melalui observasi lapangan dengan data sekunder seperti:

2.2.1 | Data Sekunder

Untuk melengkapi hasil observasi dan pengukuran di lapangan, penelitian ini turut memanfaatkan data sekunder. Penyajian data sekunder berikut dimaksudkan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai variabel-variabel yang memengaruhi penelitian ini.

- Pengambilan data debit air pada *penstock* (Q).
- Data tekanan di dalam *penstock* (Mpa).
- Pengukuran Suhu *Penstock* (C)
- Gambar teknik *penstock* (diameter, panjang dan kemiringan).
- Studi literatur atau laporan teknis terdahulu tentang performa *penstock*

2.2.2 | Pengumpulan Data dan Analisis Data

Data penelitian terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data hasil pengukuran dan observasi langsung ke lapangan mengenai data debit, kecepatan aliran dan tekanan yang terjadi pada penstock. Sementara itu, data sekunder mencakup gambar teknis dari penstock.

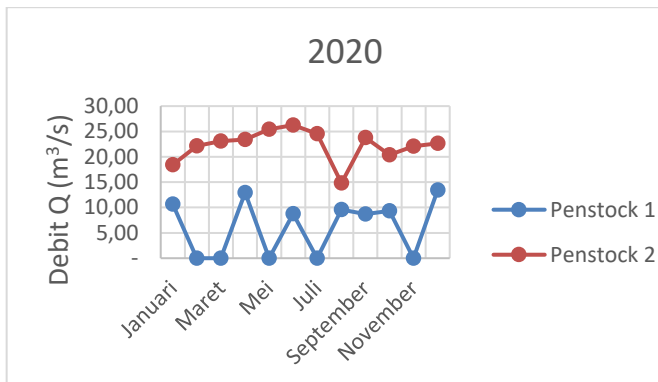
3 | HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 | Data Hasil Penelitian

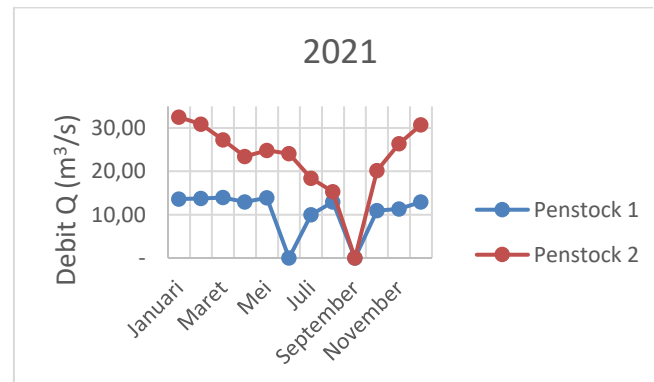
Penelitian ini memanfaatkan data sekunder yang dikumpulkan melalui observasi langsung di lapangan serta dokumentasi operasional dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA Bili Bili) yang menjadi objek studi. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh perubahan debit air terhadap performa penstock. Jenis dan karakteristik data yang dihimpun dalam penelitian ini mencakup:

3.1.1 | Data Debit Air (Q (m^3/s))

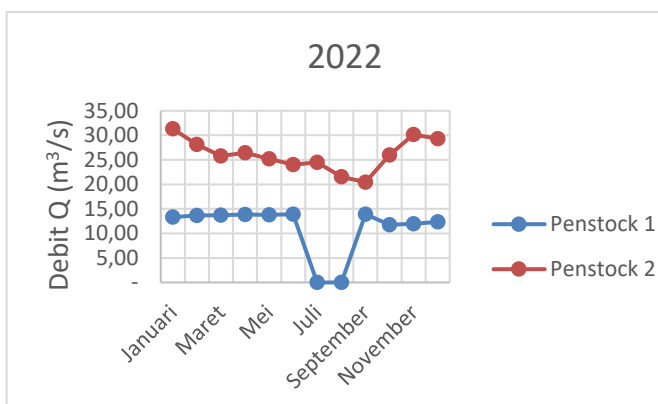
- Asal Data: Diperoleh dari catatan harian operasional bendungan dan PLTA.
- Periode Waktu: Januari 2020 sampai Desember 2024.
- Satuan: m^3/s .
- Interval Pencatatan: Setiap hari, dengan pencatatan tambahan per jam.
- Rentang Variasi: Debit berkisar antara $8,31 m^3/s$ hingga $32,50 m^3/s$.



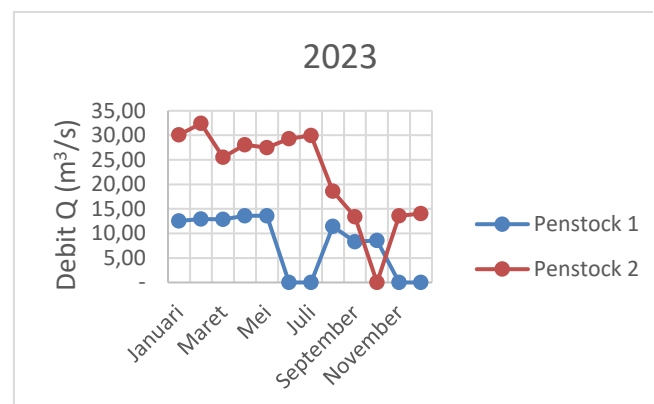
GAMBAR 3. Grafik Debit pada penstock 2020



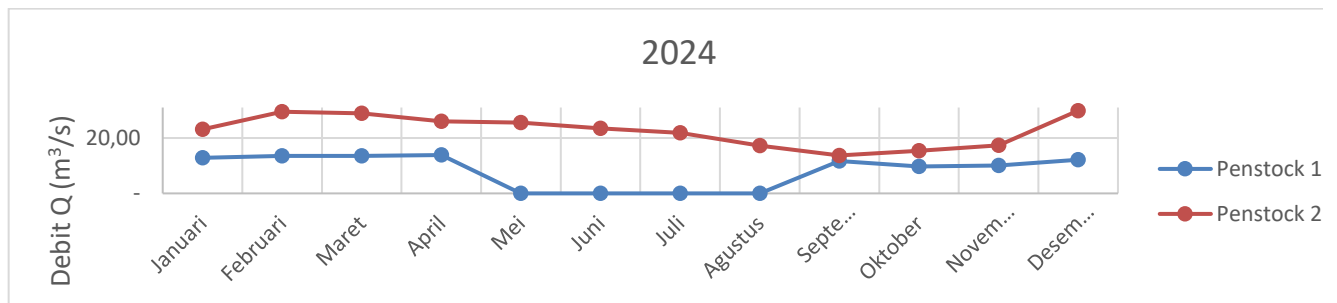
GAMBAR 4. Grafik Debit pada penstock 2021



GAMBAR 5. Grafik Debit pada penstock 2022



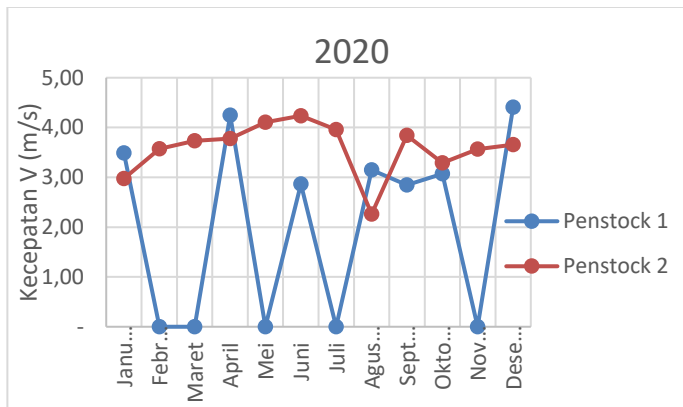
GAMBAR 6. Grafik Debit pada penstock 2023



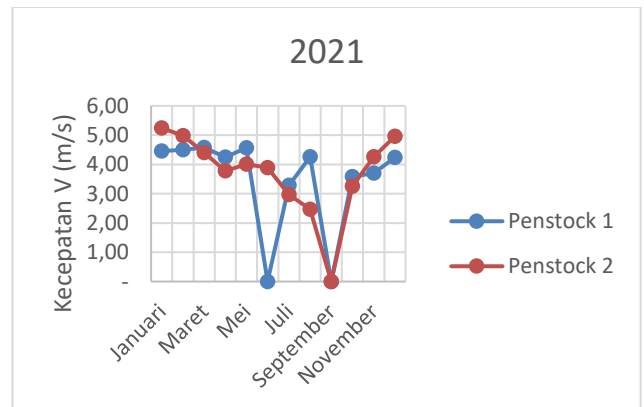
GAMBAR 7. Grafik Debit pada penstock 2024

3.1.2 | Data Kecepatan Aliran Air (V (m/s))

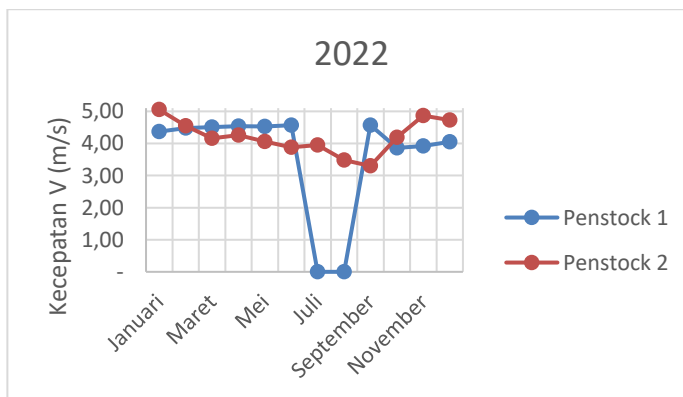
- Asal Data: Data tekanan diperoleh dari sensor yang dipasang pada jalur *penstock*, sedangkan kecepatan aliran dihitung menggunakan rumus berdasarkan data debit dan luas penampang *penstock*.
- Satuan: Tekanan diukur dalam bar atau Pascal (MPa), kecepatan aliran dalam meter per detik (m/s).
- Tujuan: Menilai sejauh mana variasi debit mempengaruhi tekanan dalam sistem *penstock*.



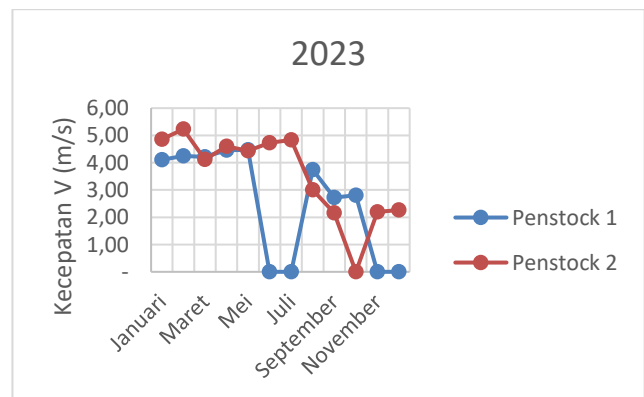
GAMBAR 8. Grafik Kecepatan aliran pada penstock 2020



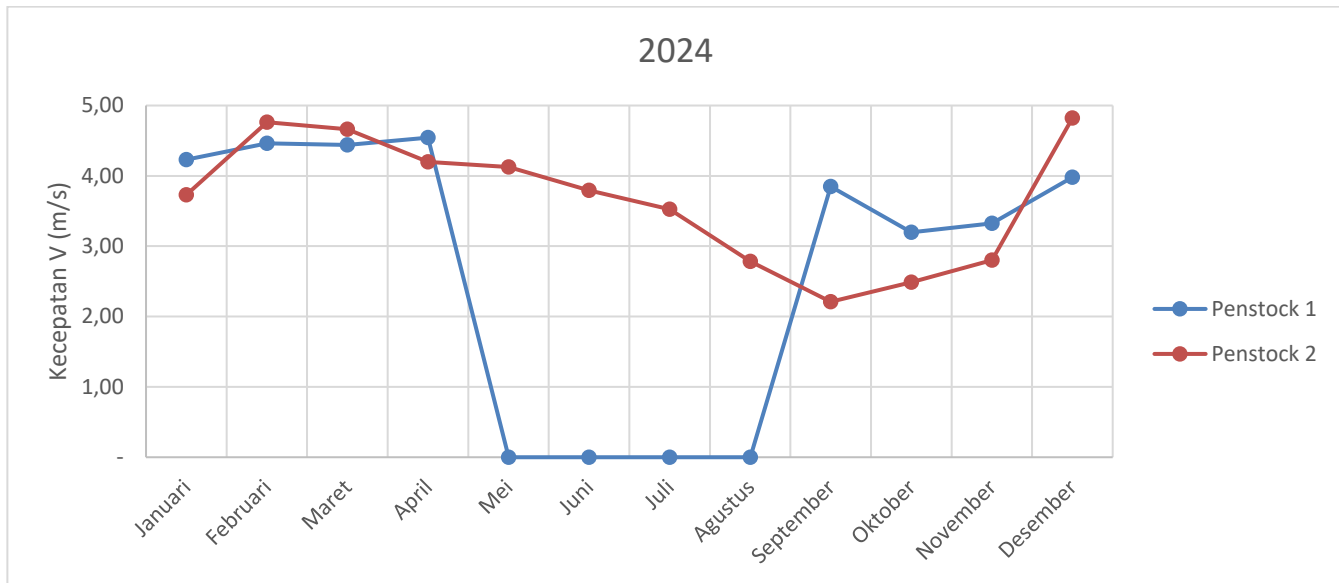
GAMBAR 9. Grafik Kecepatan aliran pada penstock 2021



GAMBAR 10. Grafik Kecepatan aliran pada penstock 2022

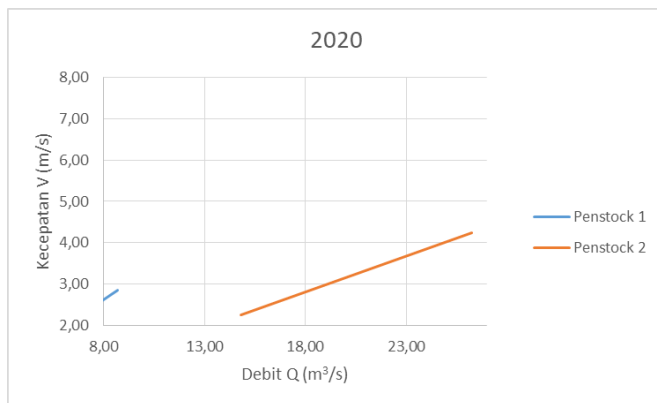


GAMBAR 11. Grafik Kecepatan aliran pada penstock 2023

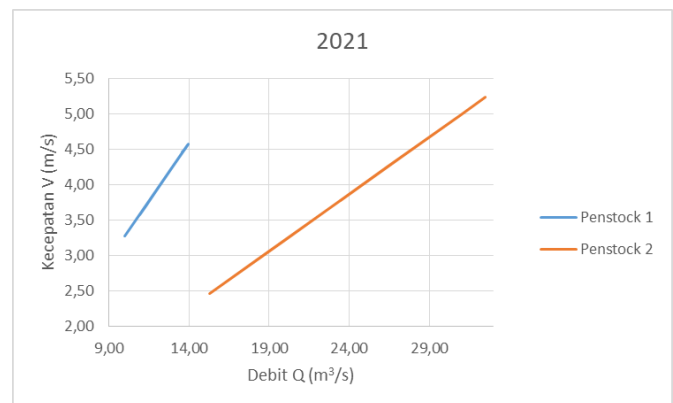


GAMBAR 12. Grafik Kecepatan aliran pada penstock 2024

3.1.3 | Data Hubungan Antara Debit Air (Q (m^3/s)), dan Kecepatan Aliran Air (V (m/s)).



GAMBAR 13. Hubungan antara Debit dan Kecepatan 2020



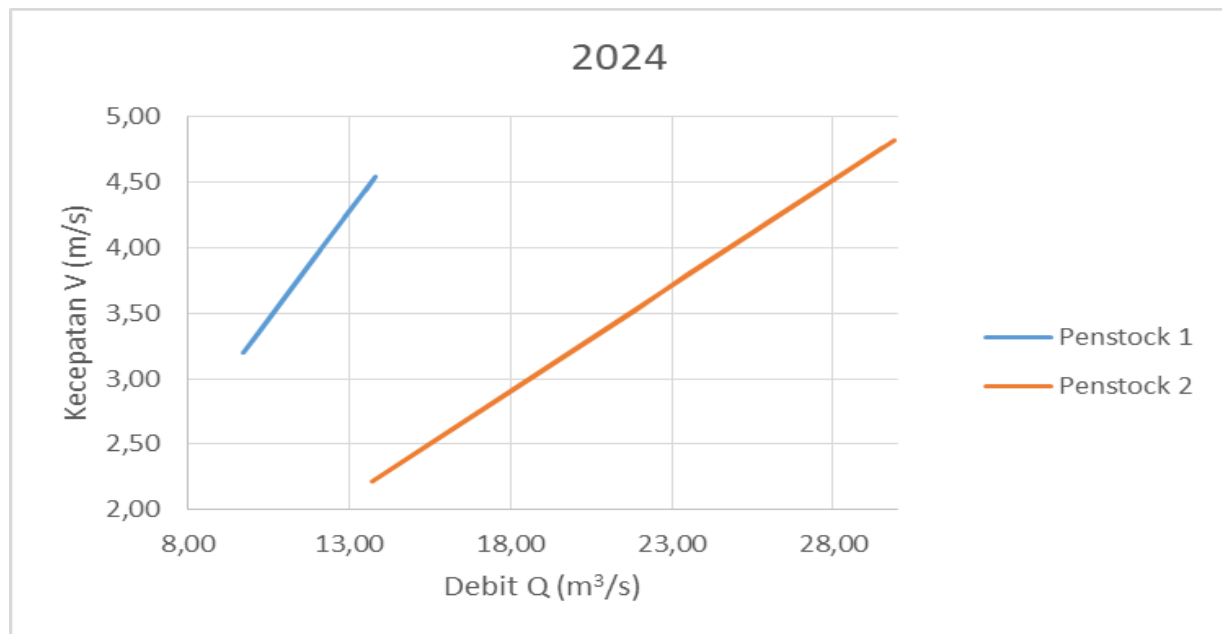
GAMBAR 14. Hubungan antara Debit dan Kecepatan 2021



GAMBAR 15. Hubungan antara Debit dan Kecepatan 2022



GAMBAR 16. Hubungan antara Debit dan Kecepatan 2023



GAMBAR 17. Hubungan antara Debit dan Kecepatan 2024

3.2 | Analisis Data Debit Air (Q (m³/s)), dan Kecepatan Aliran Air (V (m/s)).

TABEL 1. Analisa data debit dan kecepatan pada *penstock* 1 dan 2 tahun 2020 - 2024

Tahun	Bulan	Q (m ³ /s)		V (m ³ /s)	
		<i>Penstock 1</i>	<i>Penstock 2</i>	<i>Penstock 1</i>	<i>Penstock 2</i>
2020	Januari	10,63	18,45	3,49	2,98
	Februari	-	22,15	-	3,57
	Maret	-	23,12	-	3,73
	April	12,94	23,43	4,25	3,78
	Mei	-	25,46	-	4,11
	Juni	8,73	26,26	2,87	4,24
	Juli	-	24,52	-	3,96
	Agustus	9,60	14,81	3,15	2,39
	September	8,68	23,80	2,85	3,84
	Oktober	9,36	20,37	3,07	3,29
	November	-	22,10	-	3,57
	Desember	13,43	22,64	4,41	3,65
2021	Januari	13,59	33,50	4,46	5,24
	Februari	13,72	30,87	4,50	4,98
	Maret	13,94	27,28	4,58	4,40
	April	12,94	23,43	4,25	3,78
	Mei	13,89	24,86	4,56	4,01
	Juni	-	24,07	-	3,88
	Juli	10,00	18,39	3,28	2,97
	Agustus	12,97	12,59	4,26	2,47
	September	-	-	-	-
	Oktober	10,91	20,20	3,58	3,26
	November	11,29	26,41	3,70	4,26

Tahun	Bulan	Q (m ³ /s)		V (m ³ /s)	
		Penstock 1	Penstock 2	Penstock 1	Penstock 2
2022	Desember	12,92	30,71	4,24	4,96
	Januari	13,30	31,32	4,37	5,05
	Februari	13,65	28,17	4,48	4,54
	Maret	13,73	25,76	4,51	4,16
	April	13,82	26,42	4,54	4,26
	Mei	13,80	25,17	4,53	4,06
	Juni	13,91	24,03	4,57	3,88
	Juli	-	24,49	-	3,95
	Agustus	-	21,58	-	3,48
	September	13,93	20,45	4,57	3,30
	Oktober	11,77	20,00	3,86	4,19
	November	11,95	30,19	3,92	4,87
2023	Desember	12,34	29,30	4,05	4,73
	Januari	12,53	30,12	4,11	4,48
	Februari	12,96	32,41	4,25	5,23
	Maret	12,85	25,50	4,22	4,11
	April	13,60	28,06	4,46	4,53
	Mei	13,61	27,49	4,47	4,43
	Juni	-	29,29	-	4,73
	Juli	-	29,95	-	4,19
	Agustus	11,41	18,61	3,74	4,87
	September	8,31	13,41	2,73	5,23
	Oktober	8,56	-	2,81	-
	November	-	13,61	-	4,53
	Desember	-	14,05	-	4,43

Dari gambar 4 - 17 dan table 1 yang menunjukkan hubungan antara debit dan kecepatan, dapat diamati bahwa penurunan debit pada dua penstock yang memiliki perbedaan diameter akan berdampak langsung pada berkurangnya kecepatan aliran, tetapi tingkat penurunannya sangat dipengaruhi oleh ukuran diameter penstock. Penstock dengan diameter lebih kecil menunjukkan perubahan kecepatan yang lebih besar, baik saat debit meningkat maupun menurun, karena luas penampang yang sempit membuat aliran lebih peka terhadap variasi debit. Perbedaan diameter yang mencolok antara kedua penstock menyebabkan perbedaan luas penampang yang signifikan, sehingga pada debit yang sama, kecepatan aliran di penstock kecil dapat mencapai hingga 103% lebih tinggi dibandingkan penstock berdiameter lebih besar. Kondisi ini merupakan konsekuensi langsung dari prinsip kontinuitas, dimana penampang yang lebih kecil memaksa aliran bergerak lebih cepat. Variasi kecepatan sebesar 103% tersebut membawa dampak penting terhadap rugi energi, bilangan Reynolds, distribusi tekanan, serta stabilitas operasi penstock secara keseluruhan.

Perbedaan diameter penstock menghasilkan karakteristik hidraulik yang berbeda secara signifikan. Penstock berdiameter lebih kecil memiliki luas penampang yang lebih sempit, sehingga pada debit yang sama kecepatan alirannya meningkat jauh lebih besar. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada penstock kecil mencapai 103% lebih tinggi dibandingkan penstock berdiameter lebih besar. Hal ini merupakan konsekuensi langsung dari prinsip kontinuitas, dimana penampang yang lebih kecil menghasilkan percepatan aliran yang lebih besar. Perbedaan kecepatan sebesar ini berpengaruh terhadap rugi energi, turbulensi aliran, serta stabilitas operasi penstock.

Hubungan antara debit dan kecepatan pada dua penstock dengan ukuran diameter yang berbeda, tampak bahwa peningkatan debit berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aliran pada keduanya, namun penstock yang memiliki diameter lebih kecil menunjukkan peningkatan kecepatan yang lebih besar pada debit yang sama. Kondisi ini terjadi karena luas penampang yang lebih kecil menyebabkan aliran bergerak lebih cepat. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa diameter pipa memiliki pengaruh terhadap perubahan kecepatan aliran, di mana semakin kecil diameter penstock, maka semakin tinggi kecepatan aliran yang terjadi ketika debit meningkat.

3.3 | Analisis Tekanan (Mpa)

Tekanan ijin merupakan tekanan maksimum yang dapat ditoleransi oleh material penstock berdasarkan tegangan ijin dengan membandingkan tekanan operasi dengan tekanan ijin, dapat ditentukan kondisi aman penstock serta kebutuhan proteksi tambahan jika diperlukan. Berikutnya, hasil perhitungan disajikan pada tabel di atas berikut. Tabel tersebut menunjukkan ringkasan data dan hasil analisis tekanan ijin pada penstock, yang bertujuan untuk mengetahui apakah tekanan operasi berada dalam batas aman atau melebihi kemampuan material.

Tekanan merupakan salah satu parameter penting dalam analisis kinerja penstock pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA).. Besarnya tekanan akan menentukan jumlah energi potensial yang dapat diubah menjadi energi mekanis pada turbin. Oleh karena itu, pemantauan dan analisis tekanan menjadi langkah penting untuk memastikan mencegah kerusakan akibat tekanan berlebih atau fluktuasi mendadak.

TABEL 2. Parameter *Penstock* 1 dan 2

Parameter	Penstock 1	Penstock 2
Diameter (D)	1,97 m	2,81 m
Tebal (t)	0,013 m	0,036 m
Material	Baja SM41	Baja SM41
Tegangan luluh (σ_y)	154 MPa	154 MPa
Faktor keamanan (n)	2	2
Allowance korosi (ca)	0,002 m	0,002 m
Tekanan Ijin	0,85 MPa	1,86 MPa

TABEL 3. Analisa data Kecepatan dan Tekanan pada penstock 1 dan 2 tahun 2020

TAHUN	BULAN	V (m/s)		Tekanan (Mpa)			
		1	2	1		2	
2020	Januari	3,49	2,98	0,38	< 0,85	0,45	< 1,86
	Februari	-	3,57	-	< 0,85	0,50	< 1,86
	Maret	-	3,73	-	< 0,85	0,54	< 1,86
	April	4,25	3,78	0,54	< 0,85	0,54	< 1,86
	Mei	-	4,11	-	< 0,85	0,55	< 1,86
	Juni	2,87	4,24	0,52	< 0,85	0,54	< 1,86
	Juli	-	3,96	-	< 0,85	0,51	< 1,86
	Agustus	3,15	2,26	0,48	< 0,85	0,49	< 1,86
	September	2,85	3,84	0,47	< 0,85	-	< 1,86
	Oktober	3,07	3,29	0,45	< 0,85	0,44	< 1,86
	November	-	3,57	-	< 0,85	0,39	< 1,86
	Desember	4,41	3,65	0,47	< 0,85	0,41	< 1,86

TABEL 4. Analisa data Kecepatan dan Tekanan pada penstock 1 dan 2 tahun 2021

TAHUN	BULAN	V (m/s)		Tekanan (Mpa)			
		1	2	1		2	
2021	Januari	4,46	5,24	0,49	< 0,85	0,48	< 1,86
	Februari	4,50	4,98	0,51	< 0,85	0,50	< 1,86
	Maret	4,58	4,40	0,53	< 0,85	0,53	< 1,86
	April	4,25	3,78	0,54	< 0,85	0,54	< 1,86
	Mei	4,56	4,01	0,54	< 0,85	0,55	< 1,86
	Juni	-	3,88	-	< 0,85	0,53	< 1,86
	Juli	3,28	2,97	0,51	< 0,85	0,51	< 1,86
	Agustus	4,26	2,47	0,48	< 0,85	0,50	< 1,86
	September	-	-	-	< 0,85	-	< 1,86
	Oktober	3,58	3,26	0,44	< 0,85	0,43	< 1,86
	November	3,70	4,26	0,40	< 0,85	0,40	< 1,86
	Desember	4,24	4,96	0,46	< 0,85	0,46	< 1,86

TABEL 5. Analisa data Kecepatan dan Tekanan pada *penstock* 1 dan 2 tahun 2022

TAHUN	BULAN	V (m/s)		Tekanan (Mpa)			
		1	2	1		2	
2022	Januari	4,37	5,05	0,47	< 0,85	0,47	< 1,86
	Februari	4,48	4,54	0,50	< 0,85	0,50	< 1,86
	Maret	4,51	4,16	0,52	< 0,85	0,53	< 1,86
	April	4,54	4,26	0,54	< 0,85	0,54	< 1,86
	Mei	4,53	4,06	0,54	< 0,85	0,54	< 1,86
	Juni	4,57	3,88	0,54	< 0,85	0,55	< 1,86
	Juli	-	3,95	-	< 0,85	0,53	< 1,86
	Agustus	-	3,48	-	< 0,85	0,52	< 1,86
	September	4,57	3,30	0,49	< 0,85	0,49	< 1,86
	Oktober	3,86	4,19	0,45	< 0,85	0,45	< 1,86
	November	3,92	4,87	0,45	< 0,85	0,45	< 1,86
	Desember	4,05	4,73	0,48	< 0,85	0,48	< 1,86

TABEL 6. Analisa data Kecepatan dan Tekanan pada penstock 1 dan 2 tahun 2023

TAHUN	BULAN	V (m/s)		Tekanan (Mpa)			
		1	2	1		2	
2023	Januari	4,11	4,86	0,48	< 0,85	0,48	< 1,86
	Februari	4,25	5,23	0,50	< 0,85	0,49	< 1,86
	Maret	4,22	4,11	0,49	< 0,85	0,51	< 1,86
	April	4,46	4,61	0,53	< 0,85	0,54	< 1,86
	Mei	4,47	4,43	0,53	< 0,85	0,54	< 1,86
	Juni	-	4,73	-	< 0,85	0,52	< 1,86
	Juli	-	4,83	-	< 0,85	0,47	< 1,86
	Agustus	3,74	3,00	0,42	< 0,85	0,43	< 1,86
	September	2,73	2,16	0,40	< 0,85	0,41	< 1,86
	Oktober	2,81	-	0,36	< 0,85	-	< 1,86
	November	-	2,20	-	< 0,85	0,35	< 1,86
	Desember	-	2,27	-	< 0,85	0,35	< 1,86

TABEL 7. Analisa data Kecepatan dan Tekanan pada penstock 1 dan 2 tahun 2024

TAHUN	BULAN	V (m/s)		Tekanan (Mpa)			
		1	2	1		2	
2024	Januari	4,23	3,73	0,47	< 0,85	0,43	< 1,86
	Februari	4,46	4,76	0,51	< 0,85	0,51	< 1,86
	Maret	4,44	4,66	0,53	< 0,85	0,53	< 1,86
	April	4,54	4,20	0,53	< 0,85	0,54	< 1,86
	Mei	-	4,13	-	< 0,85	0,55	< 1,86
	Juni	-	3,79	-	< 0,85	0,53	< 1,86
	Juli	-	3,52	-	< 0,85	0,51	< 1,86
	Agustus	-	2,78	-	< 0,85	0,49	< 1,86
	September	3,85	2,21	0,45	< 0,85	0,47	< 1,86
	Oktober	3,20	2,49	0,37	< 0,85	0,42	< 1,86
	November	3,32	2,80	0,37	< 0,85	0,39	< 1,86
	Desember	3,98	4,82	0,45	< 0,85	0,45	< 1,86

Dengan demikian, berdasarkan table 7 - 11 baik *Penstock* 1 maupun *Penstock* 2 memiliki faktor keamanan yang memadai untuk menahan tekanan kerja yang timbul selama operasi, tanpa risiko melebihi batas kekuatan material.

3.4 | Analisis Suhu (°C)

Dalam kajian hidraulika penstock, sifat fisik air seperti kepadatan (ρ) dan viskositas dinamis (μ) memiliki ketergantungan yang kuat terhadap suhu. Oleh sebab itu, pengukuran suhu air menjadi tahapan awal yang krusial sebelum proses perhitungan dilakukan. Perubahan suhu akan memengaruhi jarak antar molekul air, sehingga dapat mengubah massa jenis serta karakteristik alirannya. Secara umum, kenaikan suhu mengakibatkan kepadatan air sedikit berkurang, sementara viskositas mengalami penurunan cukup signifikan, yang pada akhirnya meningkatkan kelancaran aliran. Pada penelitian ini, data suhu yang diperoleh dianalisis menggunakan tabel 12 dan 13 sebagai referensi sifat fisik air pada berbagai tingkat suhu untuk memperoleh nilai kepadatan dan viskositas.

TABEL 8. Tabel Kekentalan berdasarkan suhu (ρ)

Suhu	Kepadatan
-30,00	983,854
-20,00	993,547
-10,00	998,117
0	999,8395
4,00	999,972
10,00	999,7026
15,00	999,1026
20,00	998,2071
22,00	997,7735
25,00	997,0479
30,00	995,6502
40,00	992,2
60,00	983,2
80,00	971,8
100,00	958,4

TABEL 9. Viskositas Dinamis berdasarkan suhu (μ)

Suhu	Viskositas
0,01	0,0017911
10	0,0013059
20	0,0010016
25	0,00089002
30	0,00079722
40	0,00065273
50	0,00054652

TABEL 10. Suhu Hasil interpolasi pada *Penstock* 1

Tahun	Suhu	Kepadatan	Viskositas
2020	13,90	999,835	0,001187327
2021	23,95	998,026	0,000913362
2022	24,40	997,919	0,000903483
2023	19,41	999,209	0,001019702
2024	17,82	999,493	0,001067989

TABEL 11. Suhu Hasil interpolasi pada *Penstock* 2

Tahun	Suhu	Kepadatan	Viskositas
2020	34,34	997,603	0,000734511
2021	26,51	998,024	0,000862052
2022	30,16	999,047	0,000794967
2023	25,89	998,197	0,00087352
2024	29,63	997,150	0,000804017

Untuk mendapatkan nilai kekentalan dan viskositas yang diperlukan dalam perhitungan bilangan Reynolds, dilakukan interpolasi dari data pada tabel 12 dan 13. Hasil interpolasi ini ditampilkan pada tabel 9 dan 10, yang kemudian digunakan sebagai input dalam analisis bilangan Reynold.

3.5 | Analisis Reynolds (RE)

TABEL 12. Analisa Angka Bilangan Reynold (RE)

Tahun	Q (m ³ /s)		V (m/s)		Reynold		Jenis Aliran
	1	2	1	2	1	2	
2020	6,11	22,26	2,01	3,58	4406004,67	13665059,82	Re > 2.000, turbulen penuh (<i>fully developed turbulent flow</i>)
2021	10,51	22,84	3,45	3,68	7429089,70	11985081,61	
2022	11,02	26,07	3,62	4,21	7868658,42	14854104,17	
2023	7,82	21,87	2,57	3,54	4954109,63	11352827,17	
2024	8,13	22,68	2,67	3,66	4919803,76	12749356,28	

Menurut tabel 11, aliran air di dalam *penstock* sangat bergejolak, penuh pusaran, dan mengalami fluktuasi kecepatan secara acak. Hal ini umum terjadi dalam *penstock*, karena aliran air biasanya memiliki debit besar dan kecepatan tinggi untuk memutar turbin secara maksimal. Maka aliran dikategorikan sebagai turbulen penuh (*fully developed turbulent flow*).

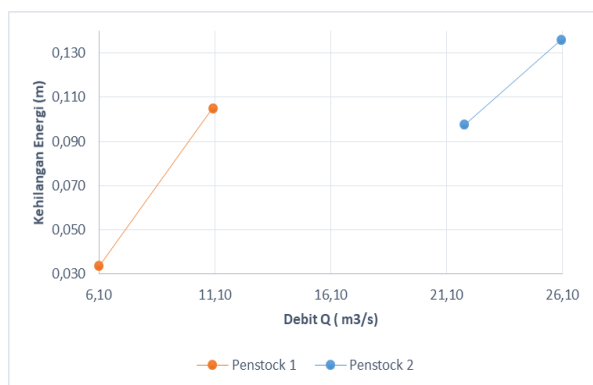
Nilai bilangan Reynolds yang menunjukkan aliran benar-benar turbulen menandakan bahwa kondisi aliran dalam *penstock* sudah sangat sesuai untuk keperluan pembangkitan listrik. Aliran turbulen memungkinkan pemanfaatan energi kinetik air secara maksimal oleh turbin, sehingga efisiensi sistem PLTA dapat tercapai secara optimal. Meskipun aliran turbulen menyebabkan rugi-rugi tekanan yang lebih besar, hal ini dapat dikompensasi oleh tingginya energi yang dihasilkan dari pergerakan air berkecepatan tinggi dan volume besar. Dalam sistem *penstock* pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan jenis aliran fluida berdasarkan karakteristik fisik seperti kecepatan aliran, diameter *penstock*, dan viskositas air.

3.6 | Analisis Kehilangan Energi (Hf)

Untuk mengetahui seberapa besar energi yang hilang selama aliran fluida melalui *penstock*, dilakukan analisis terhadap hasil perhitungan kehilangan energi. Ringkasan hasil analisis tersebut ditampilkan pada tabel 13 di bawah ini, sehingga dapat terlihat hubungan antara debit, kecepatan aliran, dan besarnya kehilangan energi.

TABEL 13. Data kehilangan Energi dan Total Kehilangan Daya

Tahun	Q (m ³ /s)		V (m/s)		Hf (m)		Total Kehilangan Daya (Watt)		Efisiensi Penstock (η)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2020	6,11	22,26	2,01	3,58	0,034	0,099	2016,88	21570,20	99,92%	99,78%
2021	10,51	22,84	3,45	3,68	0,096	0,106	9880,55	23599,42	99,77%	99,75%
2022	11,02	26,07	3,62	4,21	0,105	0,136	11327,90	34778,44	99,78%	99,72%
2023	7,82	21,87	2,57	3,54	0,055	0,098	4178,55	20886,30	99,87%	99,77%
2024	8,13	22,68	2,67	3,66	0,059	0,104	4701,43	23012,33	99,87%	99,77%



GAMBAR 18. Grafik Hubungan antara Debit dan Kehilangan Energi



GAMBAR 19. Grafik Hubungan antara Kehilangan Energi dan Total Kehilangan Daya

Berdasarkan table 12 dan gambar 18 - 19, hasil analisis data dan grafik hubungan antara debit (Q), kecepatan aliran (V), serta kehilangan energi (H_f) pada kedua *penstock*, dapat diketahui bahwa peningkatan debit aliran berbanding lurus dengan bertambahnya kecepatan aliran dan besarnya kehilangan energi di sepanjang *penstock*. *Penstock 2* menunjukkan nilai debit dan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan *Penstock 1*, sehingga kehilangan energi dan daya yang hilang juga lebih besar. Sehingga semakin besar debit yang mengalir, maka kecepatan dan kehilangan energinya pun meningkat secara signifikan. Nilai kehilangan energi pada *Penstock 2* berada pada kisaran 0,099 hingga 0,136 m, sedangkan pada *Penstock 1* berkisar antara 0,034 hingga 0,096 m. Perbedaan ini menunjukkan bahwa faktor dimensi pipa, kekasaran permukaan, dan besarnya debit sangat memengaruhi tingkat kehilangan energi. Peningkatan kehilangan energi tersebut berdampak pada naiknya kehilangan daya, di mana debit yang semakin besar menghasilkan daya hilang yang lebih tinggi. Kondisi ini paling terlihat pada tahun 2022 ketika debit mencapai nilai tertinggi sehingga kehilangan daya juga menjadi yang terbesar dibandingkan tahun lainnya.

Oleh karena itu, pengaturan debit yang tepat diperlukan untuk menjaga efisiensi sistem penyaluran air pada *penstock* agar proses konversi energi potensial air menjadi energi mekanik turbin dapat berlangsung secara optimal dan aman.

3.7 | Penjelasan Hasil Penelitian

Hasil analisis dan pengolahan data menunjukkan bahwa kinerja *penstock* sangat dipengaruhi oleh variasi debit yang terjadi selama operasi PLTA. Peningkatan debit akan secara langsung menaikkan kecepatan aliran serta tekanan dinamis di dalam *penstock*, sehingga meningkatkan energi potensial yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Namun, perubahan debit yang terlalu cepat dan besar berpotensi menimbulkan lonjakan tekanan secara tiba-tiba.

Untuk memperjelas pola hubungan antar variabel dalam penelitian ini, seluruh hasil perhitungan dirangkum dalam tabel 18. Dimana setiap variabel saling berpengaruh satu sama lain pada kondisi fluktuasi debit.

TABEL 14. Hubungan Antara Variabel dan Keterangan Hasil Penelitian

Variabel	Deskripsi Penelitian	Dampak Fluktuasi Debit Terhadap <i>Penstock</i>
Debit Q (m^3/s)	Tahun 2022 memiliki debit rata rata tertinggi (<i>Penstock 1</i>: 11,02 m^3/s, <i>Penstock 2</i>: 26,07 m^3/s), mengakibatkan kehilangan daya terbesar (11.327 Watt dan 34.778 Watt). <i>Penstock 2</i> dapat mengalirkan debit lebih besar karena diameter lebih besar.	Debit tinggi meningkatkan energi air, tetapi juga meningkatkan potensi kehilangan energi di <i>penstock</i> .
Kecepatan Aliran V (m/s)	Pada debit yang sama di tahun 2022, kecepatan Alirannya meningkat jauh lebih besar. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada <i>penstock</i> kecil mencapai 103% lebih tinggi dibandingkan <i>penstock</i> berdiameter lebih besar.	Peningkatan debit menyebabkan kenaikan kecepatan aliran dalam <i>penstock</i> . Pada dua <i>penstock</i> dengan diameter berbeda, <i>penstock</i> berdiameter lebih kecil mengalami peningkatan kecepatan yang lebih besar pada debit yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil diameter <i>penstock</i> , semakin tinggi kecepatan aliran saat debit meningkat.
Tekanan Aliran (MPa)	Tekanan tertinggi pada <i>penstock 1</i> adalah 0,54 MPa dan untuk <i>penstock 2</i> adalah 0,55 MPa rata rata terjadi pada tahun 2022 tapi itu masih jauh dari tekanan ijin yang di perbolehkan.	Perubahan debit atau kecepatan aliran mempengaruhi tekanan yang terjadi pada <i>penstock</i>
Reynold (Re)	Semua nilai $\text{Re} > 2.000$, kondisi aliran turbulen penuh di kedua <i>penstock</i> sepanjang 2020 –2024. Tahun 2022 memiliki nilai Re tertinggi (<i>Penstock 1</i> = 7.868.658,41, <i>Penstock 2</i> = 14.854.104,16 yang berkaitan langsung dengan debit tertinggi (Q <i>Penstock 1</i> = 11,02 m^3/s , Q <i>Penstock 2</i> = 26,07 m^3/s). Pada tahun ini juga tercatat H_f dan total kehilangan daya terbesar.	Bilangan Reynolds di kedua <i>penstock</i> selalu berada pada rentang aliran turbulen. Naiknya Re akibat fluktuasi debit menyebabkan peningkatan turbulensi dan gesekan sehingga H_f dan total kehilangan daya meningkat
Kehilangan Energi	Tahun 2022 memiliki H_f tertinggi yaitu 0,105 m	Semakin besar H_f , semakin sedikit energi yang

dan Daya (H_f & Watt)	(<i>Penstock 1</i>) dan 0,136 m (<i>Penstock 2</i>) . Tahun 2023 debit turun, H_f turun menjadi 0,055 – 0,098 m . Kehilangan daya tertinggi terjadi pada 2022 (<i>Penstock 2</i> : 34.778 Watt) karena debit paling besar. Tahun 2023 turun drastis (20886 Watt) karena debit menurun.	sampai ke turbin. Semakin besar kehilangan daya, semakin kecil energi air yang dapat diubah menjadi energi mekanik di turbin.
Efisiensi <i>Penstock</i> (η)	Tahun 2020 efisiensi tertinggi (99,92% <i>Penstock 1</i>) karena debit rendah sehingga kehilangan energi kecil.	Semakin besar Debit maka semakin besar kehilangan energi yang terjadi dan efisiensi <i>penstock</i> akan menurun.

4 | KESIMPULAN

4.1 | Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa karakteristik hidraulik debit dan kecepatan aliran terhadap kinerja penstock pada debit yang sama kecepatan alirannya meningkat jauh lebih besar. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan aliran pada penstock kecil lebih tinggi dibandingkan penstock berdiameter lebih besar. Yakni penampang yang lebih kecil menghasilkan percepatan aliran yang lebih besar.

Perbedaan kecepatan sebesar ini berpengaruh terhadap rugi energi, turbulensi aliran, serta stabilitas operasi penstock.

Pengaruh Aliran terhadap Tekanan maksimal pada kedua penstock masih berada jauh di bawah nilai tekanan ijin material, sehingga sistem memiliki faktor keamanan yang memadai. Hal ini menunjukkan bahwa desain penstock sudah sesuai standar, mampu menahan fluktuasi tekanan operasi, serta dapat bekerja secara andal dan aman tanpa risiko kegagalan akibat beban tekanan.

Karakteristik Bilangan Reynolds yang tinggi menunjukkan bahwa aliran di penstock berada dalam kondisi turbulen penuh (fully developed turbulent flow). Aliran turbulen penuh pada penstock memastikan bahwa energi kinetik air dapat disalurkan secara optimal ke turbin, sehingga kinerja penstock tetap optimal dan aman selama operasi PLTA. Kehilangan energi pada penstock meningkat seiring bertambahnya debit dan kecepatan aliran. Nilai bilangan Reynolds yang tinggi menunjukkan aliran turbulen penuh, sehingga gesekan antara fluida dan dinding pipa menjadi penyebab utama meningkatnya kehilangan energi. Dengan demikian, pengaturan debit dan desain penstock yang tepat sangat penting untuk meminimalkan kehilangan energi dan menjaga efisiensi sistem PLTA.

4.2 | Saran

Pengaturan operasi pintu air dan katup perlu dilakukan secara bertahap dan terkontrol untuk menjaga kestabilan tekanan. Pengaturan debit air harus dilakukan secara bertahap untuk menghindari lonjakan kecepatan yang dapat memperbesar nilai Reynolds secara signifikan dan memicu risiko.

Daftar Pustaka

- Alamsyah, F., Notosudjono, D., & Soebagia, H. (2017). Studi Kinerja Generator Pembangkit Listrik Tenaga Air Ubrug Sukabumi. *Jurnal Online*, 1(1), 1–11.
- Alhabsyi, A. C., Badrun, B., & Yusuf, A. R. (2023). Studi Perencanaan Pipa Penstock Pada Pembangunan PLTA Poso. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 1(3), 156–159.
- Azmi, M. N., Juwono, P. T., & Wicaksono, P. H. (2018). Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Pada Bendungan Lubuk Ambacang Kabupaten Kuantan. *Student Jurnal Universitas Brawijaya*. <http://Repository.Ub.Ac.Id/9206/>
- Beno, J., Silen, A. ., & Yanti, M. (2022). No Title. *Braz Dent J.*, 33(1), 1–12.
- Hasibuan, B. A., Siahaan, J. C., & Harianda, I. (2022). Analisis Unjuk Kerja Turbin Air Kapasitas 3×6 Mw Pada Beban Normal Dan Beban Puncak Di Unit Plta Pakkat Pt. Energy Sakti Santosa. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 3(1), 13–22. <https://doi.org/10.51510/Sinergipolmed.V3i1.701>

- Herdiansyah, F. S., Moballa, B., & Setiawan, P. A. (N.D.). Closing Time Valve. 2656, 185–189.
- Joseph Kestin, Mordechai, W. A. (2009). Viscosity Of Liquid Water In The Range – 8 ° C To. 941(October).
- Liem, S. B. (2017). Analisis Pengaruh Tinggi Jatuhnya Air (Head) Terhadap Daya Pembangkit Listrik Tenaga Micro Hydro Tipe Turbin Pelton. *Jurnal Voering*, 2(1), 53. <https://doi.org/10.32531/jvoe.v2i1.64>
- Maulana, F. (2020). Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Sriwijaya 2020. 1–25.
- Mujiburrahman, M. (2021). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Sungai Tuk Bening Kebun Kaligua Brebes. Tesis. Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung, 119(4), 361–416. <http://repository.unissula.ac.id/22278/12/30201900252.pdf>
- Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C., & Hasegawa, K. (1988). Datasheet For Metals SM 41 A SM 41 A Standard Number : SM 41 A Chemical Composition (Mass Fraction) (Wt .%) SM 41 A Physical Properties SM 41 A Mechanical Properties SM 41 A Heat Treatment Regime SM 41 A Range Of Products We Can Produce Metals The Speci. 5–6.
- Rumahorbo, R. P., & Nursadi, H. (2023). Energi Baru Terbarukan Sumber Daya Air : Manfaat Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan Hidup. *Jurnal Darma Agung*, 31(1), 185. <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v3i1.2967>
- SHELEMO, A. A. (2023). No Title. *Nucl. Phys.*, 13(1), 104–116.
- Sudibyo, H., & Susatyo, A. (2018). Perhitungan Head Losses Pada Pipa Penstock Turbin Propeller. Pusat Penelitian Tenaga Listrik Dan Meknik.
- Sulistyo, E., Wahyuningsih, U., & Sutisna, M. A. R. (2018). Analisis Head Losses Pada Penstock Unit Iii Di Perum Jasa Tirta Ii. *Jurnal Power Plant*.
- Suryanto, S., Apollo, A., Hamzah, M. J., & Israwati, T. (2019). Analisis Perancangan Penstock PLTMH Di Eremerasa Kabupaten Bantaeng Dengan Menggunakan ANSYS. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 17(1), 16–24. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v17i1.1588>
- Taufiqurrahman, A., & Windarta, J. (2020). Overview Potensi Dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air Di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(3), 124–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10036>
- Ummah, M. S. (2019). No Title. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isallowed=Y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Vokasi, F. (2018). *Jurnal Waterhammer*.
- Widiana, I. N., Giriantari, I. A. D., & Setiawan, I. N. (2020). Perancangan Penstock (Pipa Pesat) Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Di Banjar Dinas Mekarsari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 19(2), 235. <https://doi.org/10.24843/mite.2020.v19i02.p16>