

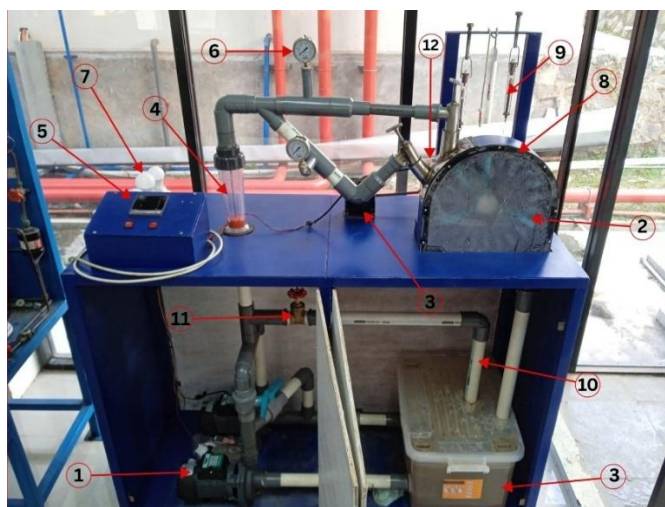
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan pada bab ini menjelaskan analisa data pengujian alat *tes bed* Turbin Pelton poros horizontal yang dirancang untuk Laboratorium Konversi Energi. Data diolah berdasarkan rumusan masalah pada proyek akhir dengan topik “Rancang Bangun Test Bed Turbin Pelton Poros Horizontal dan Uji Kinerja Pada *Head* 20 Meter” mencakup pada aspek perancangan, fabrikasi, kinerja hidrolis-mekanis, serta efisiensi sistem.

4.1. Hasil Perancangan dan Fabrikasi *Test Bed* Turbin Pelton

Setelah melalui proses perancangan berdasarkan parameter teknis yang telah ditentukan dan proses fabrikasi serta perakitannya, pada bagian ini ditunjukkan hasil akhir dari realisasi *test bed* Turbin Pelton Poros Horizontal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 1



Gambar 4. 1 Dokumentasi *test bed* Turbin Pelton

Test bed ini memuat seluruh komponen utama hasil desain sebelumnya, mulai dari sistem pemompaan, pengaturan aliran fluida hingga pengukuran parameter teknis yang dapat diuji dalam berbagai variasi pengujian yang telah ditetapkan. Berikut ini merupakan komponen utama test bed turbin Pelton dan kegunaannya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. 1 :

Tabel 4. 1 Komponen *Test Bed* Turbin Pelton

No	Nama Komponen	Kegunaan
1	Pompa Sentrifugal	Mensirkulasikan air dari bak penampung ke sistem turbin
2	Turbin Pelton	Mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros turbin
3	Water Tank	Bak penampung air
4	Flowmeter	Mengukur debit aliran air yang dipasok pada pipa
5	Panel Kontrol	Alat yang terpasang untuk mengukur kuat arus dan tegangan listrik
6	<i>Pressure Gauge</i>	Mengukur tekanan fluida yang dikirimkan pompa menuju <i>nozzle</i>
7	Lampu	Beban penggunaan daya pada Turbin Pelton
8	Rumah Turbin	Tempat sudu dan <i>runner</i> Turbin Pelton dipasang.
9	Neraca Newton	Memberikan beban kepada turbin yang berputar bertujuan untuk mengetahui daya Turbin Pelton.
10	Pipa Pembuangan	Saluran pembuangan air pada sistem <i>test bed</i>
11	Katup <i>bypass</i>	Mengatur aliran air yang masuk dan keluar pada sistem Turbin Pelton
12	<i>Nozzle</i>	Mempercepat aliran air dan mengarahkannya ke sudu pada <i>runner</i> Turbin Pelton

Data spesifikasi akhir menjadi referensi utama dalam analisis performa serta perhitungan efisiensi turbin pada tahap pengujian berikutnya. Ringkasan spesifikasi teknis hasil rancang bangun dapat dilihat pada Tabel 4. 2

Tabel 4. 2 Spesifikasi Test Bed Turbin Pelton

No	Kondisi Operasi Komponen	Nilai
1.	Dimensi P x L x T	1,5 x 0,65 x 2 meter
2.	Debit	2 – 6 m ³ /h
3.	<i>Head</i> Operasional	8 – 20 meter
4.	Putaran turbin maksimum	800 rpm
5.	Jumlah <i>bucket</i>	21, 19, dan 17
6.	Diameter roda	328,22 mm
7.	Lebar <i>bucket</i>	71,59 mm
8.	<i>Angle of deflection</i>	8°
9.	Jumlah <i>nozzle</i>	2
10.	Diameter <i>nozzle</i>	23,5 mm
11.	Rasio transmisi	1 : 2
12.	Generator	AC Generator 200 watt, 3000 rpm dengan permanet magnet

4.2. Data Penelitian

Proses pengambilan data penelitian *test bed* Turbin Pelton poros horizontal disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah proses perhitungan serta analisis. Data penelitian yang telah dikumpulkan kemudian dilakukan perhitungan sehingga mendapatkan parameter yang akan dibahas seperti torsi, daya hidrolis, daya turbin, daya generator, efisiensi, dan lain-lain. Hasil pengambilan data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 6. Hasil Pengambilan Data

4.3. Pengolahan Data

Pengolahan data adalah bentuk kalkulasi dari data hasil pengujian *test bed* Turbin Pelton poros horizontal yang telah dilakukan. Perhitungan dalam pengolahan data ini menggunakan rumus-rumus teknis seperti *head* aktual, daya hidrolis, torsi, daya turbin, serta efisiensi seperti yang dirujuk dari tinjauan pustaka. Penulis mengambil contoh perhitungan uji performa test bed Turbin Pelton poros horizontal dengan menggunakan jumlah *bucket* 17, variasi debit di 6 m³/h dan *head* aktual di 2 kgf/cm². Berikut ini merupakan proses pengolahan data unjuk kerja *test bed* Turbin Pelton poros horizontal :

4.3.1. Head Aktual

Head aktual merupakan tinggi energi potensial yang tersedia secara nyata dalam sistem aliran, setelah dikurangi kerugian-kerugian tekanan yang terjadi akibat gesekan dan hambatan dalam pipa, sambungan, serta komponen lainnya. Perhitungan *head* aktual bertujuan untuk memperoleh nilai tekanan efektif yang mendorong aliran air melalui *nozzle* menuju *runner* turbin. Nilai ini diperoleh dari hasil pengukuran tekanan menggunakan *pressure gauge* dan kemudian dikonversi menjadi satuan tinggi kolom air.

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (4.1)$$

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (4.2)$$

Dimana :

H = *Head*/Tinggi air jatuh (m)

P = Tekanan manometer sisi inlet *nozzle* (N/m²)

ρ = Massa Jenis fluida (kg/m³)

g = Gravitasi (m/s²)

Diketahui bahwa :

$$P = 2 \text{ Kg/cm}^2 \approx 196133 \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 998,7 \text{ kg/m}^3$$

$$G = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Sehingga,

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

$$H = \frac{196133 \text{ N/m}^2}{998,7 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$H = \frac{299205 \text{ N/m}^2}{9797,247 \text{ N/m}^3}$$

$$H = 20,02 \text{ m}$$

4.3.2. Daya Hidrolis

Daya hidrolis adalah kuantitas energi per satuan waktu yang terkandung dalam aliran fluida. Ini merupakan indikator kunci dari potensi energi yang dapat diekstrak dari air untuk berbagai aplikasi, khususnya dalam sistem konversi energi seperti turbin. Untuk menentukan besarnya daya hidrolis pada sistem uji (*test bed*), kita perlu mempertimbangkan beberapa parameter, yaitu massa jenis fluida,

percepatan gravitasi, laju aliran (debit), dan tinggi jatuh efektif (*head*). Perhitungan ini memungkinkan kita untuk mengukur seberapa efisien sistem dalam memanfaatkan energi air

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4.3)$$

Dimana :

P_0 = Daya hidrolis (watt)

ρ = Massa jenis fluida/air (kg/m^3)

g = Gravitasi (m/s^2)

Q = Debit air (m^3/s)

H = *Head* Efektif (m)

Diketahui bahwa :

ρ = $998,7 \text{ kg}/m^3$

g = $9,81 \text{ m}/s^2$

Q = $6 \text{ m}^3/h \approx 0.001667 \text{ m}^3/s$

H = $20,02 \text{ m}$

Sehingga,

$P_0 = 998,7 \text{ kg}/m^3 \cdot 9,81 \text{ m}/s^2 \cdot 0.001667 \text{ m}^3/s \cdot 20,02 \text{ m}$

$P_0 = 327,22 \text{ Watt}$

Secara lengkap hasil pengolahan data daya hidrolis dapat dilihat pada Tabel 4. 3 sebagai berikut :

Tabel 4. 3 Daya Hidrolis

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Daya Hidrolis (watt)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	109,07
2		2,5	136,34
3		3	163,61
4		3,5	190,88
5		4	218,15
6		4,5	245,42
7		5	272,68
8		5,5	299,95
9		6	327,22
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	109,07
2		2,5	136,34
3		3	163,61
4		3,5	190,88
5		4	218,15
6		4,5	245,42
7		5	272,68
8		5,5	299,95
9		6	327,22
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	109,07
2		2,5	136,34
3		3	163,61
4		3,5	190,88
5		4	218,15
6		4,5	245,42
7		5	272,68
8		5,5	299,95
9		6	327,22

4.3.3. Torsi

Torsi adalah ukuran kekuatan rotasi atau gaya putar yang cenderung menyebabkan objek berputar mengelilingi suatu poros atau titik. Dalam konteks sistem mekanik, perhitungan torsi sangat penting untuk memahami gaya putar yang dihasilkan atau dibutuhkan oleh suatu komponen, seperti *pulley* pada sistem transmisi daya. Torsi dihitung berdasarkan besar gaya yang diterapkan dan jarak tegak lurus dari titik aplikasi gaya ke sumbu putar (lengan momen atau jari-jari). Pemahaman torsi membantu dalam analisis performa dan efisiensi sistem, serta dalam perancangan komponen yang mampu menahan beban putar yang terjadi. Berikut adalah Persamaan (4.4) yang digunakan untuk menghitung torsi:

$$T = \Delta F \times r \quad (4.4)$$

Dimana :

ΔF = Gaya Total terukur (N)

r = Radius *Pulley* (m)

Diketahui bahwa,

$$\Delta F = 5,8 \text{ N} - 0,6 \text{ N} = 5,2 \text{ N}$$

$$r = 2 \text{ Inch} \approx 0,0508 \text{ m}$$

Sehingga,

$$T = \Delta F \times r$$

$$T = 5,2 \text{ N} \cdot 0,0508 \text{ m}$$

$$T = 0,264 \text{ Nm}$$

Secara lengkap hasil pengolahan data torsi dapat dilihat pada Tabel 4. 4 sebagai berikut :

Tabel 4. 4 Torsi

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Torsi (Nm)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,203
2		2,5	0,203
3		3	0,208
4		3,5	0,213
5		4	0,213
6		4,5	0,213
7		5	0,234
8		5,5	0,234
9		6	0,254
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	0,213
2		2,5	0,218
3		3	0,224
4		3,5	0,224
5		4	0,224
6		4,5	0,229
7		5	0,229
8		5,5	0,264
9		6	0,234
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,224
2		2,5	0,229
3		3	0,229
4		3,5	0,234
5		4	0,234
6		4,5	0,234
7		5	0,244
8		5,5	0,254
9		6	0,264

4.3.4. Daya Turbin

Daya turbin merujuk pada laju energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin dari energi fluida yang masuk. Dalam kasus Turbin Pelton dengan 17 *bucket*/sudu dan debit aliran fluida $6 \text{ m}^3/\text{h}$, perhitungan daya ini menjadi sangat penting untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi konversi energi hidrolis menjadi energi mekanik rotasi. Daya turbin merupakan hasil perkalian antara torsi yang dihasilkan pada poros turbin dan kecepatan sudut rotasinya. Untuk menghitung daya turbin (P_t), pertama-tama kita perlu menentukan kecepatan sudut (ω) dari putaran turbin (N) dalam satuan radian per detik. Kemudian, daya turbin dapat dihitung dengan mengalikan torsi (T) yang dihasilkan oleh turbin dengan kecepatan sudutnya

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (4.5)$$

$$P_t = T \times \omega \quad (4.6)$$

Dimana :

ω = Kecepatan Sudut Turbin rad/s

N = Putaran Turbin (rpm)

P_t = Daya Turbin (Watt)

T = Torsi (Nm)

ω = Kecepatan Keliling (rad/s)

Diketahui bahwa,

N = 301,4 rpm

Sehingga,

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 301,4}{60}$$

$$\omega = 31,576 \text{ rad/s}$$

Berdasarkan perhitungan, diperoleh nilai torsi sebesar 0,264 Nm, sehingga dapat dihitung daya output sebagai berikut:

$$P_t = 0,264 \text{ Nm} \cdot 31,576 \text{ rad/s}$$

$$P_t = 8,341 \text{ Watt}$$

Secara lengkap hasil pengolahan data daya turbin dapat dilihat pada Tabel 4. 5 sebagai berikut :

Tabel 4. 5 Daya Turbin

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Daya Turbin (watt)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	2,352
2		2,5	5,326
3		3	6,987
4		3,5	8,648
5		4	10,105
6		4,5	10,946
7		5	12,684
8		5,5	12,828
9		6	5,854
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	4,019
2		2,5	6,014
3		3	8,678
4		3,5	9,243
5		4	11,491
6		4,5	12,647
7		5	12,700
8		5,5	14,618
9		6	6,938
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	3,222

Tabel 4. 5 Daya Turbin (lanjutan)

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Daya Turbin (watt)
<i>Head</i> 20 meter			
2		2,5	6,881
3		3	8,753
4		3,5	10,081
5		4	12,042
6		4,5	12,906
7		5	13,869
8		5,5	14,532
9		6	8,341

4.3.5. Daya Elektrik dari Generator

Daya keluaran yang diukur pada *Test Bed* Turbin Pelton Poros Horizontal ini menggambarkan efisiensi aktual sistem konversi energi, karena mencakup *losses* yang terjadi selama aliran air melewati nozel, interaksi dengan *bucket*, serta transisi mekanis pada shaft dan generator juga transmisi *pulley*. Faktor-faktor seperti hambatan aliran pada saluran pipa, dan efisiensi mekanik transmisi torsi telah diperhitungkan dalam nilai daya keluaran. Oleh karena itu, daya keluaran aktual yang tercatat dari pengujian cenderung lebih rendah dibandingkan daya teoritis yang dihitung hanya berdasarkan *head* dan debit air.

$$P = V \cdot I \quad (4.7)$$

Dimana :

P = Daya Input (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Berdasarkan hasil pengukuran primer dari pengujian Turbin Pelton, diperoleh data sebagai berikut:

V = 4,785 Volt

I = 0,831 Amp

Sehingga,

P = 4,785 . 0,831

P = 3,975 Watt

Secara lengkap hasil pengolahan data daya elektrik dapat dilihat pada tabel Tabel

4. 6 sebagai berikut :

Tabel 4. 6 Daya Elektrik dari Generator

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Daya Generator (watt)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,000
2		2,5	2,236
3		3	3,219
4		3,5	3,778
5		4	4,382
6		4,5	5,031
7		5	5,724
8		5,5	4,175
9		6	4,382
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	0,000
2		2,5	2,236
3		3	3,219
4		3,5	3,778
5		4	4,382
6		4,5	5,031
7		5	5,487

Tabel 4. 6 Daya Elektrik dari Generator (lanjutan)

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Daya Generator (watt)
<i>Head 20 meter</i>			
8		5,5	3,778
9		6	3,588
<i>Head 20 meter</i>			
1		2	0,000
2		2,5	2,236
3		3	3,219
4		3,5	3,778
5	21	4	4,382
6		4,5	5,031
7		5	5,724
8		5,5	3,778
9		6	3,975

4.3.6. Efisiensi Hidrolik

Efisiensi hidrolik dihitung dengan membandingkan daya turbin yang dihasilkan dengan daya hidroliis yang tersedia, kemudian dinyatakan dalam persentase. Berikut adalah Persamaan (4.8) yang digunakan untuk menghitung efisiensi hidrolik:

$$\eta_h = \frac{P_t}{P_0} \times 100 \% \quad (4.8)$$

Dimana :

P_t = daya turbin (watt)

P_0 = daya hidroliis (watt)

η_h = Efisiensi Hidrolik (%)

Diketahui bahwa,

P_t = 8,341 Watt

$$P_0 = 327,22 \text{ Watt}$$

Sehingga,

$$\eta_h = \frac{8,341}{327,22} \times 100 \%$$

$$\eta_h = 2,549 \%$$

Secara lengkap hasil pengolahan data efisiensi hidrolik dapat dilihat pada Tabel 4.

7 sebagai berikut :

Tabel 4. 7 Efisiensi Hidrolik

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Efisiensi Hidrolik (%)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	2,157
2		2,5	3,907
3		3	4,270
4		3,5	4,531
5		4	4,632
6		4,5	4,460
7		5	4,651
8		5,5	4,277
9		6	1,789
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	3,685
2		2,5	4,411
3		3	5,304
4		3,5	4,842
5		4	5,267
6		4,5	5,153
7		5	4,657
8		5,5	4,873
9		6	2,120
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	2,954
2		2,5	5,047

Tabel 4. 7 Efisiensi Hidrolik (lanjutan)

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Efisiensi Hidrolik (%)
<i>Head</i> 20 meter			
3		3	5,350
4		3,5	5,282
5		4	5,520
6		4,5	5,259
7		5	5,086
8		5,5	4,845
9		6	2,549

4.3.7. Efisiensi Mekanik

Efisiensi mencerminkan seberapa efektif energi hidrolik yang dihasilkan pompa dan kepala air (*head*) berhasil dikonversi menjadi energi listrik oleh sistem:

$$\eta_m = \frac{P_g}{P_t} \times 100 \% \quad (4.9)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_t = daya turbin (watt)

η_m = Efisiensi Mekanis (%)

Diketahui bahwa,

P_g = 3,975 watt

P_t = 8,341 watt

Sehingga,

$$\eta_m = \frac{3,975}{8,341} \times 100 \%$$

$$\eta_m = 47,656 \%$$

Secara lengkap hasil pengolahan data efisiensi mekanik dapat dilihat pada Tabel 4.

8 sebagai berikut :

Tabel 4. 8 Efisiensi Mekanik

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Efisiensi Mekanik (%)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,000
2		2,5	41,986
3		3	46,073
4		3,5	43,688
5		4	43,363
6		4,5	45,959
7		5	45,129
8		5,5	32,547
9		6	74,853
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	0,000
2		2,5	37,184
3		3	37,093
4		3,5	40,878
5		4	38,136
6		4,5	39,776
7		5	43,207
8		5,5	25,847
9		6	51,714
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,000
2		2,5	32,501
3		3	36,775
4		3,5	37,477
5		4	36,389
6		4,5	38,978
7		5	41,273
8		5,5	26,000
9		6	47,656

4.3.8. Efisiensi Energi

Efisiensi energi atau efisiensi energi sistem keseluruhan adalah parameter yang mengukur efektivitas *test bed* keseluruhan dalam mengonversi daya hidrolis masukan menjadi daya elektrik yang dapat dimanfaatkan. Nilai ini merepresentasikan performa gabungan dari seluruh komponen, mulai dari kerugian hidrolis di dalam turbin hingga kerugian mekanis pada sistem transmisi dan generator. Efisiensi sistem dihitung dengan membandingkan daya elektrik keluaran akhir terhadap daya hidrolis masukan awal (Handayani, 2014).

$$\eta_e = \frac{P_g}{P_0} \times 100 \% \quad (4.10)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_0 = daya hidrolis (watt)

η_e = Efisiensi sistem (%)

Diketahui bahwa,

P_g = 3,975 watt

P_0 = 327,22 watt

Sehingga,

$$\eta_e = \frac{3,975}{327,22} \times 100 \%$$

$$\eta_e = 1,215\%$$

Secara lengkap hasil pengolahan data efisiensi sistem dapat dilihat pada Tabel 4. 9 sebagai berikut :

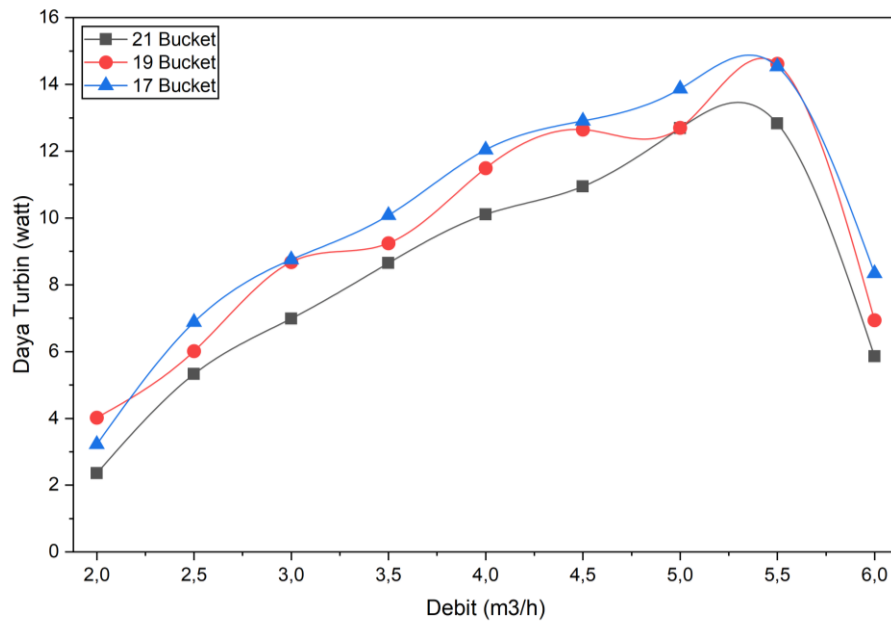
Tabel 4. 9 Efisiensi Energi

No	Jumlah <i>Bucket</i>	Debit (m^3/h)	Efisiensi Energi (%)
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,000
2		2,5	1,640
3		3	1,967
4		3,5	1,979
5		4	2,009
6		4,5	2,050
7		5	2,099
8		5,5	1,392
9		6	1,339
<i>Head 20 meter</i>			
1	19	2	0,000
2		2,5	1,640
3		3	1,967
4		3,5	1,979
5		4	2,009
6		4,5	2,050
7		5	2,012
8		5,5	1,260
9		6	1,096
<i>Head 20 meter</i>			
1	21	2	0,000
2		2,5	1,640
3		3	1,967
4		3,5	1,979
5		4	2,009
6		4,5	2,050
7		5	2,099
8		5,5	1,260
9		6	1,215

4.3.9. Pengaruh Debit Terhadap Daya Turbin

Pada sub bab ini membahas pengaruh antara debit terhadap daya turbin,

menganalisis performa turbin terhadap daya turbin terdapat pada Gambar 4. 2.



Gambar 4. 2 Pengaruh Debit Terhadap Daya Turbin

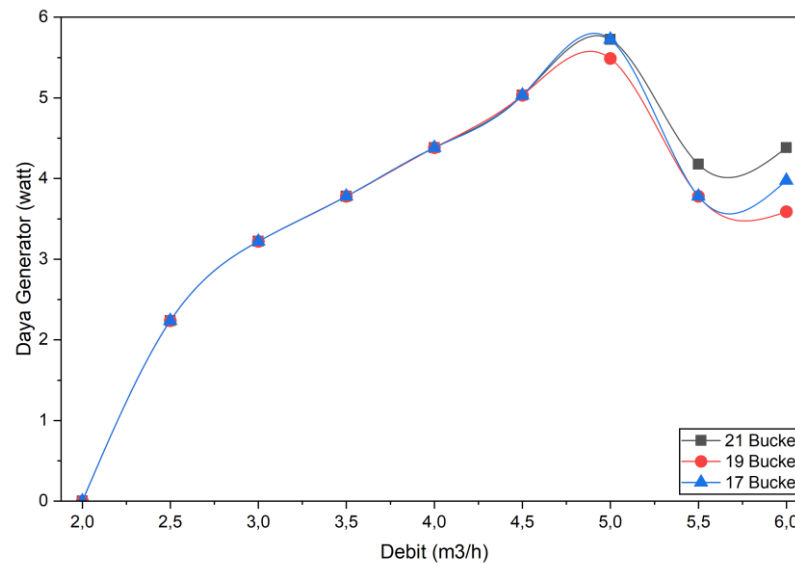
Berdasarkan grafik pengaruh antara debit terhadap daya turbin pada Gambar 4. 2 menunjukkan bahwa peningkatan debit dari 2 - 5,5 m^3/h secara konsisten daya turbin meningkat untuk ketiga konfigurasi sudu (17,19 dan 21). Daya turbin tertinggi di variasi 19 sudu dengan nilai sebesar 14,618 watt pada debit 5,5 m^3/h dengan percobaan *head* konstan sebesar 20 meter. Nilai terendah terjadi pada variasi 21 sudu sebesar 2,352 watt pada debit 2 m^3/h . Setelah pada titik optimal (5,5 m^3/h) daya masing-masing sudu menurun. Berdasarkan penelitian oleh oleh (Farge, Owaid dan Qasim, 2017) kinerja Turbin Pelton meningkat dengan mengendalikan jumlah debit air terhadap beban yang diberikan pada poros turbin pada rentang kecepatan optimal.

Pada umumnya semakin tinggi debit air yang dialirkan maka akan meningkatkan daya turbin yang dihasilkan. Namun, ini berkebalikan dengan

penelitian yang dilakukan ketika debit tertentu kondisi daya turbin yang dihasilkan justru menurun. Penurunan daya turbin ini diakibatkan oleh menurunnya kecepatan *nozzle* yang terjadi akibat bukaan *nozzle* yang terlalu besar sehingga energi kinetik aliran berkurang dan ketidaksempurnaan *nozzle* saat mengenai permukaan *bucket* Turbin Pelton. Hal ini sejalan dengan penelitian dan simulasi oleh (Jung *et al.*, 2019) menunjukkan ketidaksejajaran sumbu pada *nozzle* dengan *adjustment* sebesar 0,24 mm sampai dengan 1,24 mm mengakibatkan semburan air pada *outlet nozzle* kurang maksimal. Semburan air yang kurang maksimal berdampak secara signifikan pada performa Turbin Pelton. Penelitian lain oleh (Kholifah *et al.*, 2018) juga mengungkapkan bahwa terdapat ukuran diameter nosel yang optimal karena diameter yang terlalu besar akan menghasilkan tekanan air yang lebih rendah, maka keluaran air dari nosel sangat mempengaruhi berdasarkan tinggi muka air yang tersedia untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan.

4.3.10. Pengaruh Debit Terhadap Daya Elektrik dari Generator

Pada sub bab ini membahas pengaruh antara debit terhadap daya elektrik dari generator, menganalisis performa turbin terhadap daya elektrik dari generator terdapat pada Gambar 4. 3



Gambar 4. 3 Pengaruh Debit Terhadap Daya Elektrik dari Generator

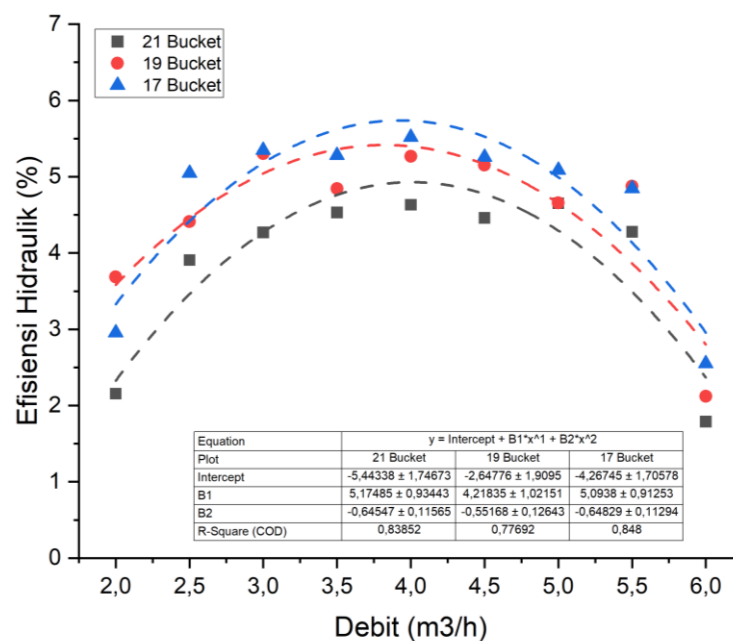
Berdasarkan grafik pengaruh antara debit terhadap daya elektrik dari generator pada Gambar 4. 3 menunjukkan bahwa pola peningkatan daya generator secara stabil dari debit 2 – 5 m^3/h , di mana variasi jumlah *bucket* 17 dan 21 menghasilkan daya listrik tertinggi sebesar 5,724 watt. Setelah mencapai titik puncak tersebut, terjadi penurunan daya meskipun terdapat peningkatan kembali pada debit 6 m^3/h . Peningkatan ini terjadi karena keterbatasan *test bed* Turbin Pelton yang telah dirancang. Pola ini konsisten untuk semua konfigurasi *bucket*, meskipun variasi 21 *bucket* sedikit lebih unggul di titik maksimum.

Hal ini ditunjukkan oleh (Aldeen Saad Obayes dan Abdul Khaliq Qasim, 2017) menyatakan bahwa kombinasi diameter *nozzle* dan debit menghasilkan titik puncak daya listrik, dan jika debit ditambah tanpa peningkatan kecepatan jet, maka terjadi penurunan daya akibat ketidakseimbangan antara gaya fluida dan kapasitas mekanis sistem. Penelitian lain oleh (Kholifah *et al.*, 2018) juga menunjukkan percobaan diameter *nozzle* 9 mm dengan *head* 3,6 dan 4,6 m pada debit 0,001 m^3/s

menghasilkan daya tertinggi sebesar 13,65 watt dan 16,89 watt, ini juga membuktikan bahwa diameter nosel dan tinggi muka air memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan.

4.3.11. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Hidrolis

Pada sub bab ini membahas pengaruh antara debit terhadap efisiensi hidrolis, menganalisis performa turbin terhadap efisiensi hidrolis terdapat pada Gambar 4. 4



Gambar 4. 4 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Hidrolis

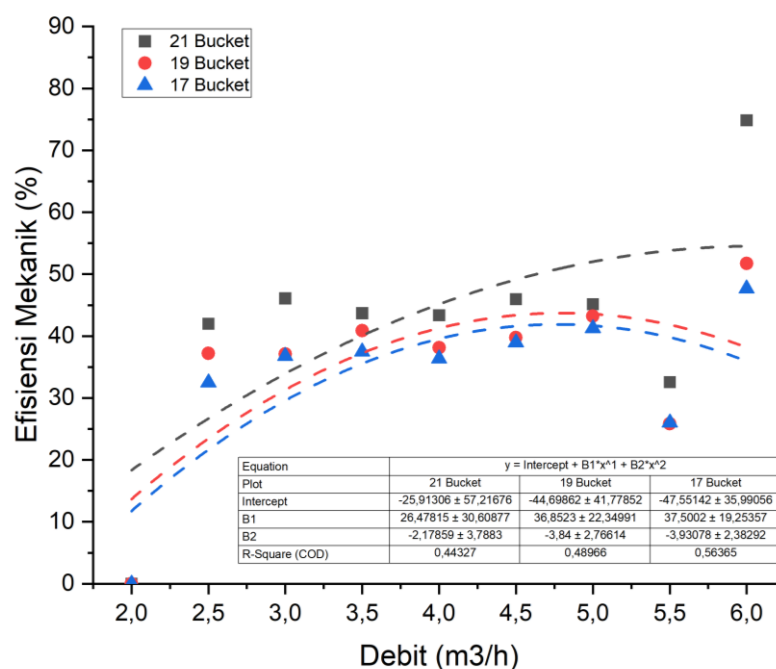
Berdasarkan grafik pengaruh antara debit terhadap efisiensi hidrolis pada Gambar 4. 4 menunjukkan bahwa efisiensi hidrolis berkisar antara 3% hingga 6%, dengan variasi 17 *bucket* menunjukkan nilai efisiensi paling konsisten dan tertinggi secara umum dengan nilai sebesar 5,52 % pada debit $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Garis *trendline* menunjukkan penurunan efisiensi seiring bertambahnya debit untuk semua variasi

bucket. Hal ini menunjukkan bahwa pada debit tinggi, efisiensi cenderung menurun, yang disebabkan oleh berkurangnya kemampuan sudu menangkap energi jet secara optimal akibat kecepatan jet yang menurun saat bukaan *nozzle* maksimum.

Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Rafae Alomar *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa efisiensi hidrolis meningkat dengan debit hingga mencapai kondisi optimal, namun menurun untuk bukaan *nozzle* yang terlalu besar dan mengakibatkan penurunan efisiensi produksi daya dari turbin. Data efisiensi hidrolis ini memperlihatkan bahwa kompleksitas peng-konversian energi hidrolis pada Turbin Pelton skala eksperimental, di mana efisiensi aktual dipengaruhi kerugian sistem dan presisi keluaran *nozzle* dengan interaksi *bucket* (Suyesh *et al.*, 2019).

4.3.12. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Mekanik

Pada sub bab ini membahas pengaruh antara debit terhadap efisiensi mekanik, menganalisis performa turbin terhadap efisiensi mekanik terdapat pada Gambar 4.



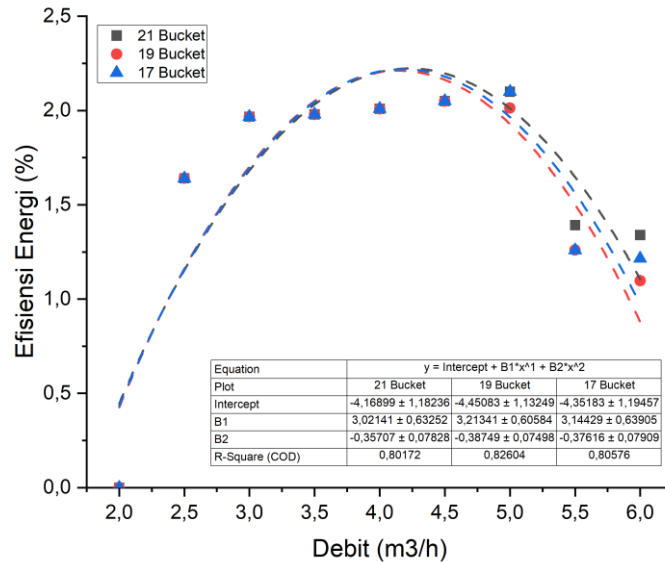
Gambar 4. 5 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Mekanik

Berdasarkan grafik pengaruh antara debit terhadap efisiensi mekanik pada Gambar 4. 5 menunjukkan bahwa efisiensi mekanis 25 – 75 %, dengan variasi 21 *bucket* menunjukkan nilai yang paling konsisten dan tertinggi dengan nilai efisiensi sebesar 74,583 % pada debit 6 m^3/h . Garis *trendline* menunjukkan kenaikan efisiensi seiring bertambahnya debit yang tinggi dan pada grafik ditunjukkan sempat terjadi penurunan pada debit 5,5 m^3/h dengan nilai terendah di variasi *bucket* 19 yaitu sebesar 25,847 % lalu terjadi peningkatan kembali untuk semua variasi *bucket*.

Hal ini ditunjukkan oleh (Xiao *et al.*, 2024) menyatakan bahwa efisiensi mekanis dipengaruhi oleh kerugian gesek dan getaran yang bersumber dari fluktuasi torsi pada *runner*, ketika jumlah sudu meningkat maka kurva koefisien efisiensi naik secara jelas sementara puncaknya pertama-tama naik lalu turun sedikit, dengan periode dan fluktuasi yang menurun.

4.3.13. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Energi

Pada sub bab ini membahas pengaruh antara debit terhadap efisiensi energi, menganalisis performa turbin terhadap efisiensi energi terdapat pada Gambar 4. 6



Gambar 4. 6 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Energi

Berdasarkan grafik pengaruh antara debit terhadap efisiensi energi pada Gambar 4. 6 menunjukkan bahwa efisiensi energi berkisar antara 1 % hingga 2 % untuk semua variasi jumlah sudu (17, 19, dan 21). Grafik *trendline* menunjukkan pola yang serupa, efisiensi cenderung meningkat seiring kenaikan debit dari 2 – 5 m^3/h , dengan nilai tertinggi efisiensi mekanis sebesar 2,099 % pada debit 5 m^3/h di variasi jumlah sudu 17 dan 21. Terjadi penurunan setelah pada titik optimalnya di 5,5 m^3/h – 6,0 m^3/h . Grafik efisiensi menunjukkan adanya rentang operasi optimal, di mana efisiensi akan menurun jika debit terlalu rendah atau terlalu tinggi. Nilai debit aliran awal akan semakin meningkat, tetapi pada saat nilai debit tertentu grafik akan menurun.

Hal ini ditunjukkan oleh (Rafae Alomar *et al.*, 2022) menyatakan bahwa peningkatan pada bukaan *nozzle* pada debit tertentu membuktikan bahwa tekanan air akan berkurang secara linear yang menyebabkan daya yang dihasilkan kecil sehingga mempengaruhi efisiensi energi. Penelitian lain oleh (Ji *et al.*, 2023) juga mengatakan bahwa dengan peningkatan laju aliran dan daya keluaran ditandai dengan tren kenaikan pertama dan kemudian sedikit penurunan menandakan karena besarnya nilai rugi rugi yang dihasilkan, seperti pada debit awal besarnya kerugian relatif kecil tetapi jika sudah mencapai titik tertentu besarnya kerugian menjadi relative besar, sehingga perbandingan daya poros terhadap daya hidrolis semakin mengecil. Oleh karena keterbatasan *test bed* yang dirancang, perlu dilakukan perbaikan pada desain *nozzle* yang telah dibahas sebelumnya untuk memperoleh hasil efisiensi energi yang optimal.