

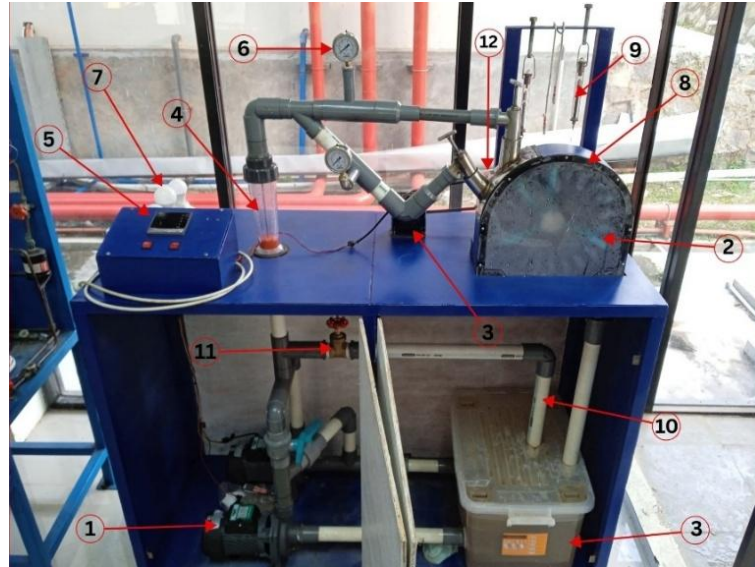
BAB IV

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. Analisa data diperoleh dari perhitungan sesuai dengan persamaan-persamaan yang dirujuk pada bab sebelumnya. Data diolah berdasarkan rumusan masalah pada proyek akhir dengan topik “Rancang Bangun *Test Bed* Turbin Pelton Poros Horizontal Dan Uji Kinerja Pada Head 15 Meter” .

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

Pada sub bab ini disajikan hasil akhir dari proses perancangan dan pabrikan dari *test bed* turbin Pelton poros horizontal. Seluruh tahapan realisasi topik “Rancang Bangun *Test Bed* Turbin Pelton Poros Horizontal Untuk Lab Konversi Energi” mengacu pada tinjauan pustaka dan metodologi penelitian yang telah dijelaskan secara detail pada bab-bab sebelumnya. Dokumentasi visual mengenai instalasi pengujian beserta identifikasi komponen utamanya, disajikan pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Dokumentasi test bed turbin pelton

Keterangan:

1. Unit Pompa Sentrifugal
2. Turbin Pelton
3. Reservoir Air
4. Pengukur Laju Aliran (Flowmeter)
5. Panel Indikator Digital (Tachometer)
6. Pengukur Tekanan (Pressure Gauge)
7. Beban Listrik (Lampu Indikator)
8. Rumah Turbin (Turbine Casing)
9. Neraca Gaya (Newtonmeter)
10. saluran Bypass Pipa Saluran Buang (Outlet Pipe)
11. Katup Pengatur Bypass (Gate Valve)
12. Nosel (Nozzle)

Data spesifikasi ini 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. 1

Tabel 4. 1 Spesifikasi Test Bed Turbin Pelton

Parameter	Spesifikasi	Satuan
Tipe Runner	Pelton, Poros Horizontal	-
Dimensi keseluruhan (PxLxT)	1,5 x 0,65 x 2	meter
Alat Ukur		
Rentang Debit	: Rotameter (2-6)	m ³ /h
Rentang Tekanan	: Pressure Bourdon Gauge (0-10)	Bar
<i>Head</i> Operasional	8-20	meter
Jumlah Sudu (z)	21 (Variasi 19 & 17)	buah
Material Turbin Pelton		-
Piringan <i>Runner</i>	: Aluminium	
Sudu Turbin Pelton	: Resin eSUN Hard-Tough	
Putaran Maksimum Turbin	800	RPM
Diameter <i>runner</i>	329,6	mm
Lebar <i>Lebar Bucket</i>	72,6	mm
<i>Angle of deflection</i>	8	°
Jumlah Nosel (n)	2	buah
Diameter Jet Nosel (<i>d_o</i>)	23.5	mm
Material Nosel	<i>Stainless Steel</i>	-
Rasio Transmisi	1:2	-
Generator		
daya maksimal	: 200	Watt
Putaran maksimal	: 3000	RPM

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 1.

4.3. Pengolahan Data

Pengolahan data adalah bentuk kalkulasi dari data yang telah dilakukan pengambilan data menggunakan persamaan yang dirujuk dari tinjauan Pustaka. Pengolahan data ini bertujuan untuk mengetahui hasil akhir turbin pelton sesuai dengan rumusan masalah yang diajukan. Penulis mengambil contoh perhitungan uji performa *test bed* turbin pelton poros horizontal dengan menggunakan jumlah bucket 21 dan variasi debit di $6 \text{ m}^3/\text{h}$. Berikut ini merupakan proses pengolahan data unjuk kerja *test bed* Turbin Pelton poros horizontal :

4.3.1. Head Aktual

Tinggi jatuh efektif (head) merupakan variabel kontrol utama yang dijaga konstan pada tiga level yaitu 20 m, 15 m, dan 10 m. Pengaturan tersebut bertujuan untuk menganalisis respons turbin pada kondisi energi potensial masukan yang identik. Nilai head ini dicapai dengan mengatur laju aliran fluida hingga tekanan (P) pada pressure gauge di sisi masuk nosel mencapai nilai target yang telah dihitung. Besarnya head ini secara langsung memengaruhi daya hidrolis yang

dimiliki oleh fluida (Fahrudin and Mulyadi, 2018). Adapun perhitungan untuk menentukan tekanan target pada setiap level head terdapat pada persamaan 2.7.

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (2.7)$$

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (2.7.1)$$

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 Kg/cm² $\approx$ 196133 N/m²

ρ = 998,7 kg/m³

G = 9,81 m/s²

Sehingga,

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

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

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

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

Dengan prosedur perhitungan yang sama, diperoleh tekanan target untuk head 15 m sebesar $1,5 \text{ kg/cm}^2$ dan untuk head 10 m sebesar $1,0 \text{ kg/cm}^2$.

4.3.2. Daya Hidrolis

Daya hidrolis adalah daya masukan teoretis pada aliran fluida dan berfungsi untuk mengevaluasi efisiensi konversi energi turbin. Perhitungan berdasarkan tinggi jatuh efektif (*head*) sebagai energi potensial dan laju aliran volumetrik sebagai laju massa fluida (Zhang, 2016). Diasumsikan konversi energi potensial menjadi energi kinetik terjadi tanpa adanya kerugian, kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.8.

$$P_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.8)$$

Dimana :

$$P_0 = \text{Daya hidrolis (watt)}$$

$$\rho = \text{Massa jenis fluida/air (kg/m}^3\text{)}$$

$$g = \text{Gravitasi (m/s}^2\text{)}$$

$$Q = \text{Debit air (m}^3\text{/s)}$$

$$H = \text{Head Efektif (m)}$$

Diketahui bahwa :

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

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

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

$$H = 15,01 \text{ m}$$

Sehingga,

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

$$P_0 = 245,42 \text{ Watt}$$

Prosedur perhitungan ini diterapkan pada seluruh set data pengujian yang diatur oleh head dan debit terkontrol. Untuk memperoleh nilai daya hidrolis pada setiap kondisi operasi. Nilai tersebut menjadi dasar untuk penggunaan analisis efisiensi pada sub-bab selanjutnya. Secara lengkap hasil pengolahan data daya hidrolis dapat dilihat pada Tabel 4. 2 sebagai berikut :

Tabel 4. 2 Daya Hidrolis

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Hidrolis (watt)
Head 15 meter			
1	21	2	81,81
2		2,5	102,26
3		3	122,71
4		3,5	143,16
5		4	163,61
6		4,5	184,06
7		5	204,51
8		5,5	224,96
9		6	245,42
1	19	2	81,81
2		2,5	102,26
3		3	122,71
4		3,5	143,16
5		4	163,61
6		4,5	184,06
7		5	204,51
8		5,5	224,96
9		6	245,42
1	17	2	81,81

Tabel 4. 2 Daya Hidrolis (Lanjutan)

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Hidrolis (watt)
Head 15 meter			
2	17	2,5	102,26
3		3	122,71
4		3,5	143,16
5		4	163,61
6		4,5	184,06
7		5	204,51
8		5,5	224,96
9		6	245,42

4.3.3. Torsi

Torsi adalah besaran gaya rotasional yang dihasilkan pada putaran runner turbin sebagai respons terhadap gaya impuls dari jet air. Nilai torsi actual akan menentukan daya mekanis yang mampu ditransmisikan oleh poros turbin. Pengukuran torsi dilakukan secara pengukuran aktual menggunakan neraca gaya newton. Rangkaian alat pengukuran terdiri dari sebuah *pulley* yang terpasang pada poros turbin, yang putarannya dihambat oleh mekanisme pengereman. Gaya pengereman ini diukur menggunakan neraca gaya (Newtonmeter) yang terhubung pada lengan torsi. Torsi yang dihasilkan oleh turbin dihitung sebagai hasil perkalian antara selisih gaya pengereman yang terukur dengan jari-jari efektif puli (Mafruddin and Irawan, 2020):

$$T = \Delta F \times r \quad (2.13)$$

Dimana :

ΔF = Gaya Total terukur (N)

r = Radius *Pulley* (m)

Diketahui bahwa,

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

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

Sehingga,

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

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

$$T = 0,254 \text{ Nm}$$

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

Tabel 4. 3 Torsi

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Torsi (Nm)
Head 15 meter			
1	21	2	0,203
2		2,5	0,213
3		3	0,218
4		3,5	0,224
5		4	0,224
6		4,5	0,234
7		5	0,224
8		5,5	0,234
9		6	0,239
1	19	2	0,208
2		2,5	0,218
3		3	0,229
4		3,5	0,229
5		4	0,234
6		4,5	0,234
7		5	0,234
8		5,5	0,239
9		6	0,249

Tabel 4. 3 Torsi (Lanjutan)

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Torsi (Nm)
Head 15 meter			
1	17	2	0,168
2		2,5	0,173
3		3	0,178
4		3,5	0,183
5		4	0,188
6		4,5	0,193
7		5	0,183
8		5,5	0,188
9		6	0,193

4.3.4. Daya Turbin

Daya turbin adalah nilai aktual konversi energi dari fluida menjadi kerja mekanis yang berputar pada poros. Nilai ini merupakan menginterpretasikan kemampuan turbin dalam menghasilkan daya dalam rotasinya sebelum di hubungkan dengan generator. Perhitungan ini dihasilkan oleh torsi aktual turbin dan kecepatan sudut rotasi. Untuk menghitung daya turbin (P_t), kecepatan sudut (ω) ditentukan dari data putaran turbin (N) yang terukur menggunakan tachometer dalam persamaan 2.14.

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.14)$$

Selanjutnya, daya mekanis turbin dihitung dengan mengalikan torsi aktual yang diperoleh dari sub-bab sebelumnya dengan kecepatan sudut

$$P_t = T \times \omega \quad (2.15)$$

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 = 220 rpm

Sehingga,

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 220}{60}$$

$$\omega = 30,528 \text{ rad/s}$$

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

$$P_t = 0,254 \text{ Nm} \cdot 30,528 \text{ rad/s}$$

$$P_t = 7,289 \text{ Watt}$$

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

Tabel 4. 4 Daya Turbin

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Turbin (watt)
Head 15 meter			
1	21	2	2,459
2		2,5	5,152
3		3	7,170
4		3,5	8,933
5		4	10,158
6		4,5	11,102

Tabel 4. 4 Daya Turbin (Lanjutan)

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Turbin (watt)
Head 15 meter			
7	21	5	6,128
8		5,5	6,468
9		6	7,289
1	19	2	2,202
2		2,5	5,769
3		3	7,594
4		3,5	8,871
5		4	9,837
6		4,5	10,838
7		5	5,484
8		5,5	6,726
9		6	7,088
1	17	2	2,030
2		2,5	4,196
3		3	5,860
4		3,5	6,805
5		4	8,044
6		4,5	9,125
7		5	4,834
8		5,5	5,246
9		6	5,851

4.3.5. Daya Elektrik dari Generator

Daya elektrik generator adalah daya keluaran aktual yang dihasilkan oleh sistem *tesbed*. Nilai ini merupakan besaran energi listrik yang berhasil dihasilkan dari energi mekanis yang ditransmisikan oleh system transmisi *tesbed* turbin Pelton. Daya elektrik ditentukan melalui pengukuran actual pada *multimeter* pembacaan keluaran generator yang terhubung ke beban listrik. Nilai ini dihitung sebagai hasil tegangan dan kuat arus yang terukur (Mafruddin and Irawan, 2020).

$$P = V \cdot I \quad (2.16)$$

Dimana :

P = Daya Input (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

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

V = 5,024 Volt

I = 0,872 Amp

Sehingga,

P = $4,665 \times 0,810$

P = 3,778 Watt

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

4. 5 sebagai berikut :

Tabel 4. 5 Daya Elektrik dari Generator

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Generator (watt)
Head 15 meter			
1	21	2	-
2		2,5	0,993
3		3	3,044
4		3,5	3,778
5		4	4,382
6		4,5	4,382
7		5	3,219
8		5,5	3,044
9		6	3,778
1	19	2	-
2		2,5	2,387
3		3	3,219
4		3,5	3,754
5		4	4,382

Tabel 4.5 Daya Elektrik dari Generator (Lanjutan)

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Daya Generator (watt)
Head 15 meter			
6	17	4,5	4,594
7		5	3,219
8		5,5	3,401
9		6	3,588
1		2	-
2		2,5	-
3		3	2,872
4		3,5	3,778
5		4	4,175
6		4,5	4,382
7		5	2,705
8		5,5	3,219
9		6	3,778

4.3.6. Efisiensi Hidrolik

Efisiensi hidrolik merupakan indikator yang digunakan untuk menganalisa efektivitas runner turbin ketika mengkonversi daya hidrolik sistem menjadi daya mekanis aktual pada poros turbin. Nilai dari daya hidrolik memperlihatkan rugi-rugi hidrolik pada saat interaksi jet air dengan sudu-sudu turbin yang berputar, termasuk kerugian akibat energi kinetik pada aliran keluar. Persamaan Perhitungan efisiensi hidrolik membandingkan daya mekanis turbin yang dihasilkan terhadap daya hidrolik masukan melalui pengukuran data (Handayani, 2014).

$$\eta_h = \frac{P_t}{P_0} \times 100 \% \quad (2.17)$$

Dimana :

P_t = daya turbin (watt)

P_0 = daya hidrolik (watt)

η_h = Efisiensi Hidrolik (%)

Diketahui bahwa,

P_t = 7,289 Watt

P_0 = 245,42 Watt

Sehingga,

$$\eta_h = \frac{7,289}{245,42} \times 100 \%$$

$$\eta_h = 2,97\%$$

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

6 sebagai berikut :

Tabel 4. 6 Efisiensi Hidrolik

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Efisiensi Hidrolik (%)
Head 15 meter			
1	21	2	3,006
2		2,5	5,039
3		3	5,843
4		3,5	6,240
5		4	6,209
6		4,5	6,032
7		5	2,996
8		5,5	2,875
9		6	2,970
1	19	2	2,691
2		2,5	5,642
3		3	6,189
4		3,5	6,196
5		4	6,012
6		4,5	5,888
7		5	2,681
8		5,5	2,990
9		6	2,888
1	17	2	2,482

Tabel 4.6 Efisiensi Hidrolik (Lanjutan)

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Efisiensi Hidrolik (%)
Head 15 meter			
2	17	2,5	4,104
3		3	4,776
4		3,5	4,754
5		4	4,916
6		4,5	4,957
7		5	2,364
8		5,5	2,332
9		6	2,384

4.3.7. Efisiensi Mekanik

Efisiensi mekanis adalah parameter efektivitas pengukuran sistem transmisi daya dan generator dalam mengkonversi daya mekanis yang dihasilkan oleh poros turbin menjadi daya elektrik. Perhitungan efisiensi mekanis dilakukan dengan membandingkan daya elektrik keluaran terhadap daya mekanis masukan pada sistem tersebut (Handayani, 2014).

$$\eta_m = \frac{P_g}{P_t} \times 100 \% \quad (2.18)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_t = daya turbin (watt)

η_m = Efisiensi Mekanis (%)

Diketahui bahwa,

P_g = 3,778 watt

P_t = 7,289 watt

Sehingga,

$$\eta_m = \frac{3,778}{7,289} \times 100 \%$$

$$\eta_m = 51,835 \%$$

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

7 sebagai berikut :

Tabel 4. 7 Efisiensi Mekanik

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Efisiensi Mekanis (%)
Head 15 meter			
1	21	2	-
2		2,5	19,280
3		3	42,450
4		3,5	42,292
5		4	43,138
6		4,5	39,470
7		5	52,529
8		5,5	47,057
9		6	51,835
1	19	2	-
2		2,5	41,375
3		3	42,388
4		3,5	42,318
5		4	44,549
6		4,5	42,388
7		5	58,701
8		5,5	50,564
9		6	50,619
1	17	2	-
2		2,5	-
3		3	49,003
4		3,5	55,518
5		4	51,905
6		4,5	48,023
7		5	55,952
8		5,5	61,364
9		6	64,577

4.3.8. Efisiensi Energi

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

$$\eta_e = \frac{P_g}{P_0} \times 100 \% \quad (2.19)$$

Dimana :

P_g = daya generator (watt)

P_0 = daya hidrolis (watt)

η_e = Efisiensi sistem (%)

Diketahui bahwa,

P_g = 3,778 watt

P_0 = 245,42 watt

Sehingga,

$$\eta_e = \frac{3,778}{245,42} \times 100 \%$$

$$\eta_e = 1,539\%$$

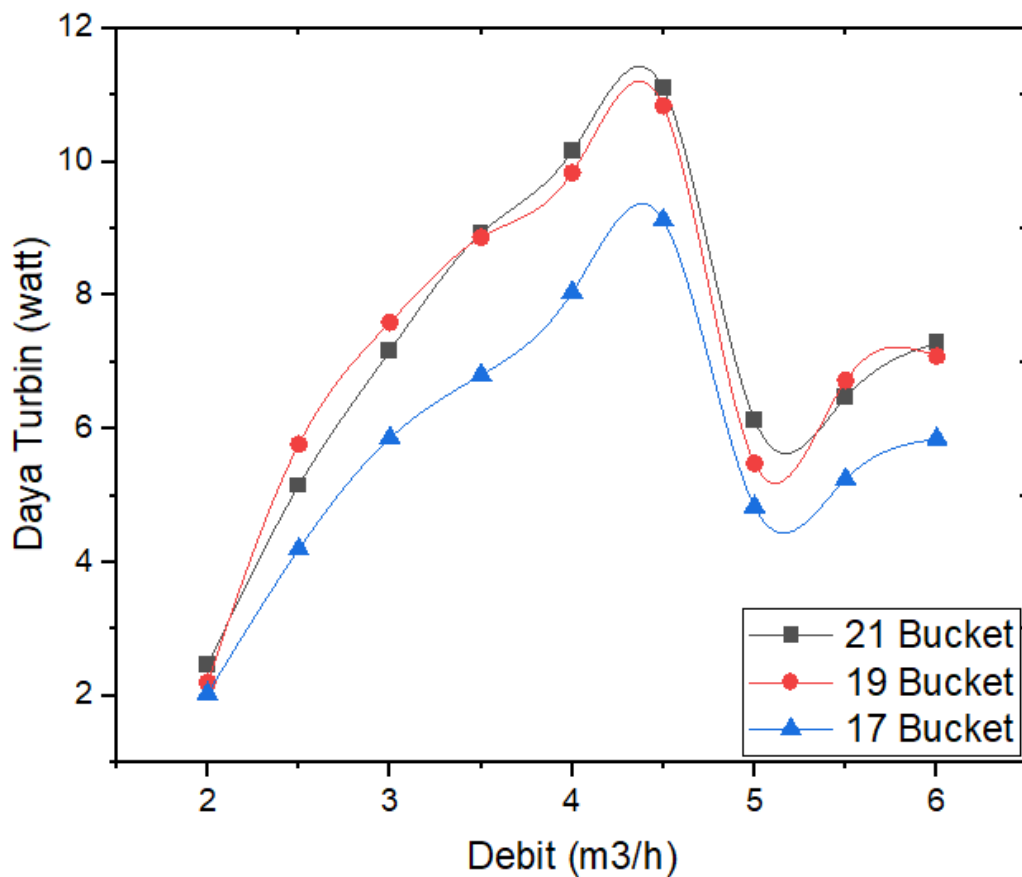
Secara lengkap hasil pengolahan data efisiensi sistem dapat dilihat pada Tabel 4. 8 sebagai berikut :

Tabel 4. 8 Efisiensi Energi

No	Jumlah Bucket	Debit (m ³ /h)	Efisiensi Sistem (%)
Head 15 meter			
1	21	2	-
2		2,5	0,971
3		3	2,480
4		3,5	2,639
5		4	2,678
6		4,5	2,381
7		5	1,574
8		5,5	1,353
9		6	1,539
1	19	2	-
2		2,5	2,334
3		3	2,623
4		3,5	2,622
5		4	2,678
6		4,5	2,496
7		5	1,574
8		5,5	1,512
9		6	1,462
1	17	2	-
2		2,5	-
3		3	2,340
4		3,5	2,639
5		4	2,552
6		4,5	2,381
7		5	1,322
8		5,5	1,431
9		6	1,539

4.3.9. Pengaruh Debit Terhadap Daya Turbin

Berdasarkan grafik pengaruh debit air terhadap daya turbin Pelton pada head 15 meter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, terlihat bahwa daya turbin meningkat seiring dengan kenaikan debit hingga mencapai titik puncak. Nilai daya turbin tertinggi terjadi saat debit air 4,5 m³/h pada jumlah bucket 21 dengan nilai sebesar 11,102 watt. Sedangkan daya turbin terendah ditunjukkan pada percobaan debit 2 m³/h pada jumlah sudu 17 dengan nilai sebesar 2,030 watt.



Gambar 4. 2 Pengaruh Debit Terhadap Daya Turbin

Secara umum, daya turbin meningkat secara signifikan dari debit 2 m³/h sampai dengan debit 4,5 m³/h. Fenomena penurunan performa yang drastis terjadi setelah mencapai puncak, yaitu pada debit 5 m³/h. Kemudian, daya turbin kembali menunjukkan tren kenaikan pada penambahan debit selanjutnya sampai percobaan

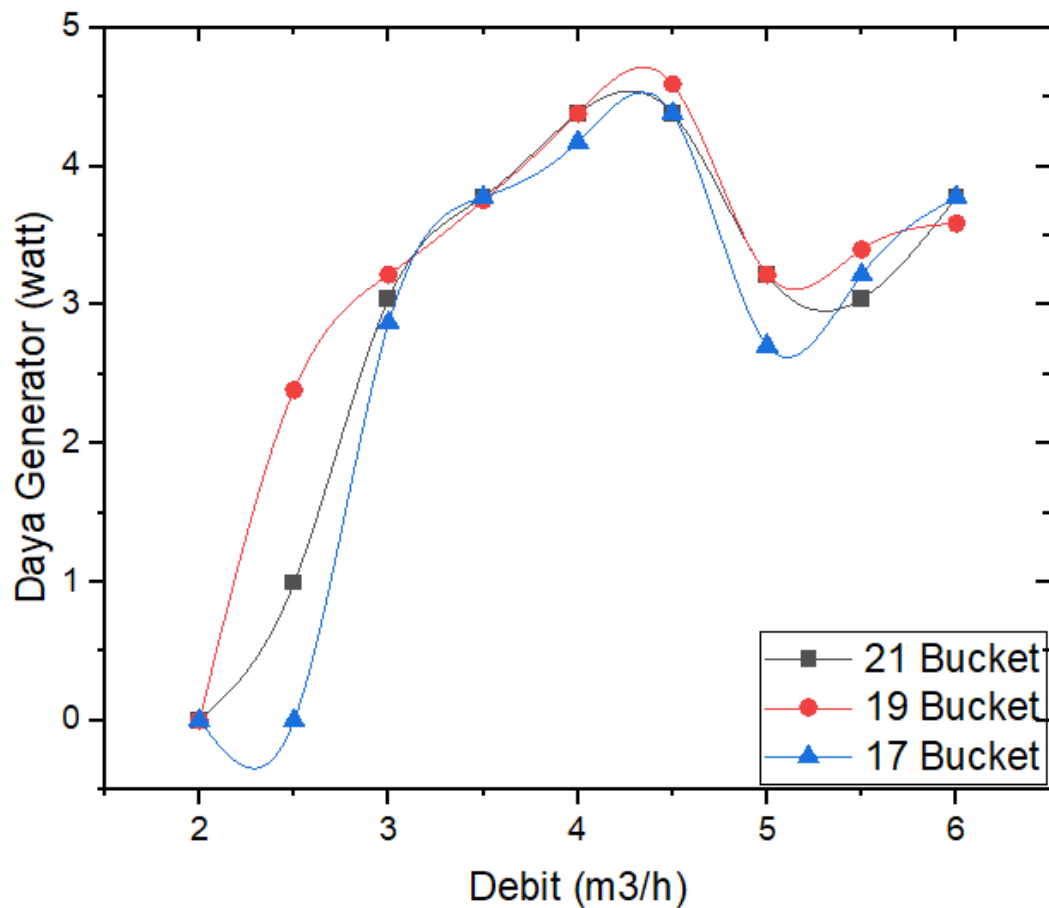
berakhir pada 6 m³/h. Kinerja Turbin Pelton meningkat dengan mengendalikan jumlah debit air terhadap beban yang diberikan pada poros turbin pada rentang kecepatan optimal (Farge, Owaid and Qasim, 2017).

Penurunan daya secara drastis seperti yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.2 terjadi pada debit 5 m³/h untuk semua variasi jumlah sudu, dengan nilai daya turbin rata-rata 5,482 watt. Pada umumnya, seiring dengan penambahan debit air yang terjadi akan meningkatkan daya turbin yang dihasilkan. Hal ini berkebalikan dengan penelitian yang dilakukan ketika pada debit tertentu kondisi daya turbin yang dihasilkan justru menurun. Penurunan daya turbin ini diakibatkan oleh ketidaksempurnaan pancaran air dari *nozzle* saat mengenai permukaan *bucket* turbin Pelton. nilai ketidaksejajaran sumbu pada *nozzle* dengan *adjustment* sebesar 0,24 mm sampai dengan 1,24 mm mengakibatkan semburan air pada *outlet nozzle* kurang maksimal (Jung *et al.*, 2019). Semburan air yang kurang maksimal berdampak secara signifikan pada performa turbin Pelton. Hal ini menegaskan pentingnya perancangan *nozzle* yang mendekati semburan optimal untuk mendapatkan daya turbin yang maksimal. 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 (Kholifah *et al.*, 2018).

4.3.10. Pengaruh Debit Terhadap Daya Elektrik dari Generator

Dari grafik pengaruh debit terhadap daya generator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, terlihat bahwa kenaikan debit air akan meningkatkan daya

generator yang dihasilkan hingga mencapai titik puncak. Pada saat percobaan dengan menggunakan debit 2 m³/h, tidak ada energi listrik yang dihasilkan oleh generator untuk semua variasi *bucket*. Sementara pada debit 2,5 m³/h, konfigurasi 17 bucket juga belum menghasilkan daya, namun generator pada konfigurasi 19 dan 21 bucket sudah mulai membangkitkan listrik. Fenomena ini terjadi karena putaran generator masih berada di bawah putaran minimal yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan.



Gambar 4. 3 Pengaruh Debit Terhadap Daya Elektrik dari Generator

Daya listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian meningkat seiring kenaikan debit. Daya listrik tertinggi yang dihasilkan oleh generator yaitu pada

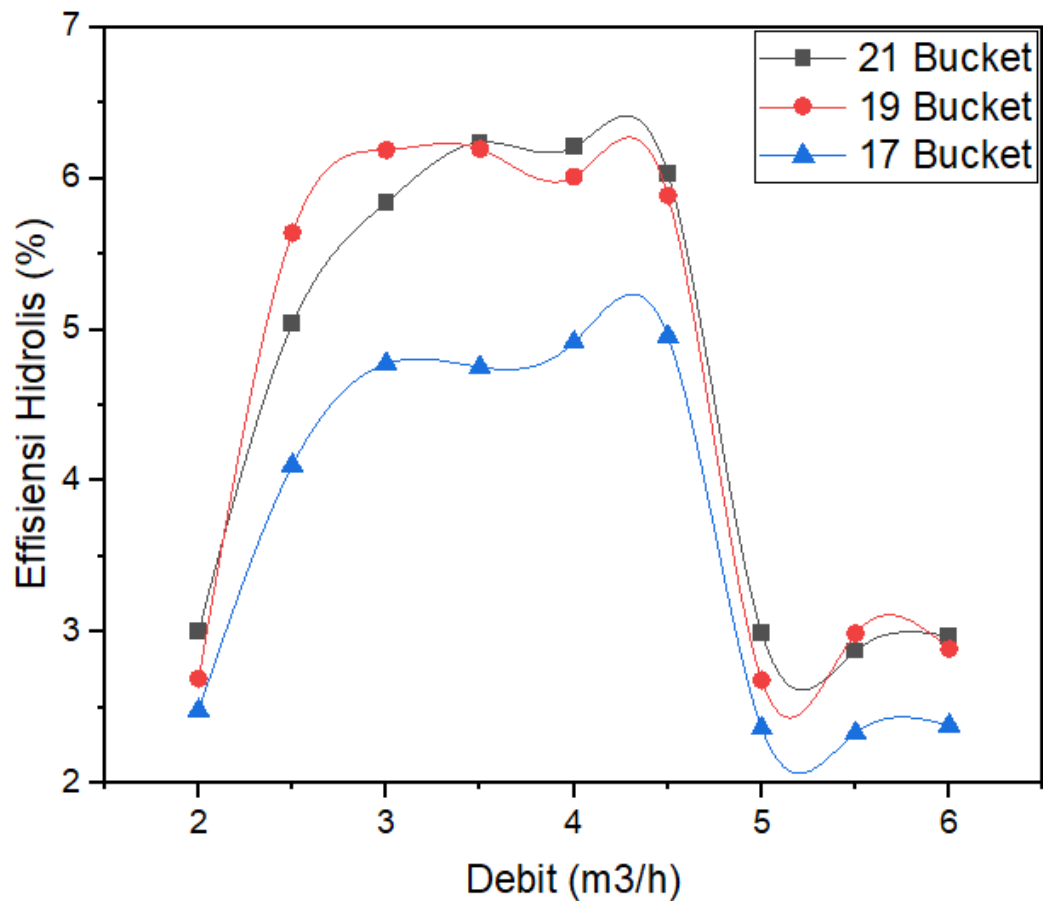
debit 4,5 m³/h dengan nilai 4,594 watt untuk konfigurasi 19 *bucket*. Setelah mencapai puncaknya, terjadi penurunan daya generator yang signifikan pada debit 5 m³/h, di mana nilai terendah tercatat sebesar 2,705 watt pada konfigurasi 17 *bucket*. Kenaikan daya generator terjadi kembali pada percobaan debit dari 5,5 m³/h sampai 6 m³/h. Sebagai contoh, pada percobaan 6 m³/h, variasi jumlah *bucket* 17 dan 21 sama-sama menghasilkan daya generator sebesar 3,778 watt.

Selain itu, penelitian yang telah dilakukan (Kholifah *et al.*, 2018) dengan menggunakan diameter *bucket* 17 mm, jumlah sudu 22, diameter runner 105 mm, rasio transmisi 1:2, dan menggunakan generator permanen magnet AC 200 watt menunjukkan daya listrik yang dihasilkan oleh turbin Pelton mengalami penurunan pada debit tertentu. Menurut penelitian ini, daya terbesar yang dihasilkan oleh turbin Pelton terjadi pada kondisi head 4,6 meter dan diameter nozzle 9 mm dengan nilai 16,89 watt. Sedangkan daya terendah didapatkan nilai 7,21 watt pada kondisi head 3,6 meter dan diameter nozzle 5 mm.

4.3.11. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Hidrolis

Dari grafik pengaruh debit terhadap efisiensi hidrolik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, terlihat bahwa efisiensi cenderung meningkat pada awalnya dan kemudian mengalami penurunan secara signifikan pada debit 5 m³/h. Penurunan drastis ini kemungkinan besar terjadi karena semburan air dari *nozzle* kurang efektif mengenai sudu turbin pada laju aliran tersebut. Nilai efisiensi hidrolik menurun secara tajam karena daya turbin yang dihasilkan jauh lebih kecil dibandingkan dengan input daya hidrolik dari air.

Efisiensi hidrolik tertinggi dihasilkan pada percobaan debit 3 m³/h dengan jumlah bucket 19, mencapai nilai 6,2%. Sedangkan efisiensi hidrolik terendah ditunjukkan pada percobaan debit sekitar 5,25 m³/h dengan jumlah bucket 17, yang nilainya turun hingga 2,1%. Studi yang dilakukan oleh (Rafae Alomar *et al.*, 2022) juga menunjukkan, nilai efisiensi hidrolik pada percobaan dengan menggunakan daya turbin konstan 20 watt dengan debit 85 liter/menit, dan menggunakan diameter *nozzle* 12,5 mm menghasilkan nilai efisiensi daya terendah 2,5%.

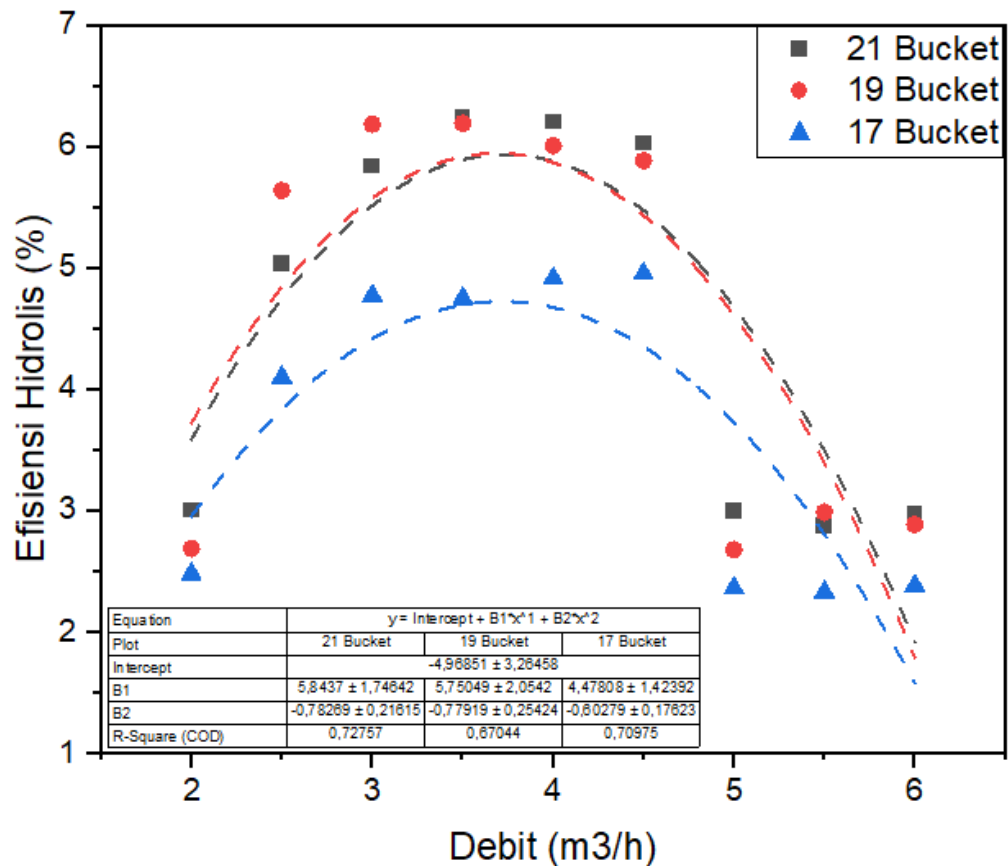


Gambar 4. 4 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Hidrolis

Berdasarkan grafik *trendline* yang dapat dilihat pada Gambar 4.6, tren kenaikan efisiensi hidrolis terjadi pada saat debit 2 m³/h sampai sekitar 3,5 m³/h. Tren kenaikan ini terjadi saat semburan air maksimum mengenai *runner* turbin Pelton

dan menghasilkan daya turbin secara optimal. Setelah mencapai puncaknya, tren efisiensi cenderung menurun, dengan penurunan paling tajam terjadi setelah debit 4,5 m³/h.

Nilai R-Square tertinggi pada grafik *trendline* ini yaitu 0,72757 di bucket 21. Nilai R-Square yang tidak mencapai 1 menunjukkan bahwa model regresi polinomial tidak dapat menangkap semua variasi data dengan sempurna, terutama pada titik anomali penurunan efisiensi. Hal ini menyiratkan adanya parameter lain selain debit air yang dapat mempengaruhi efisiensi hidrolis.

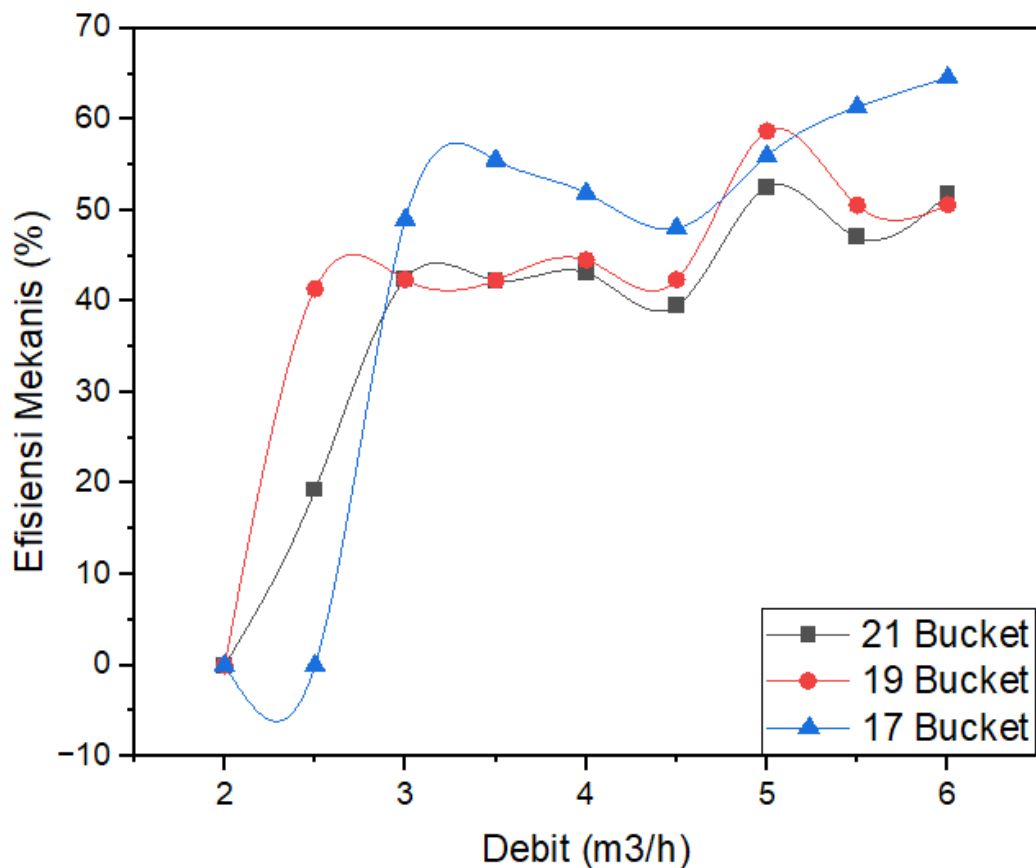


Gambar 4. 5 Trendline Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Hdirolis

4.3.12. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Mekanik

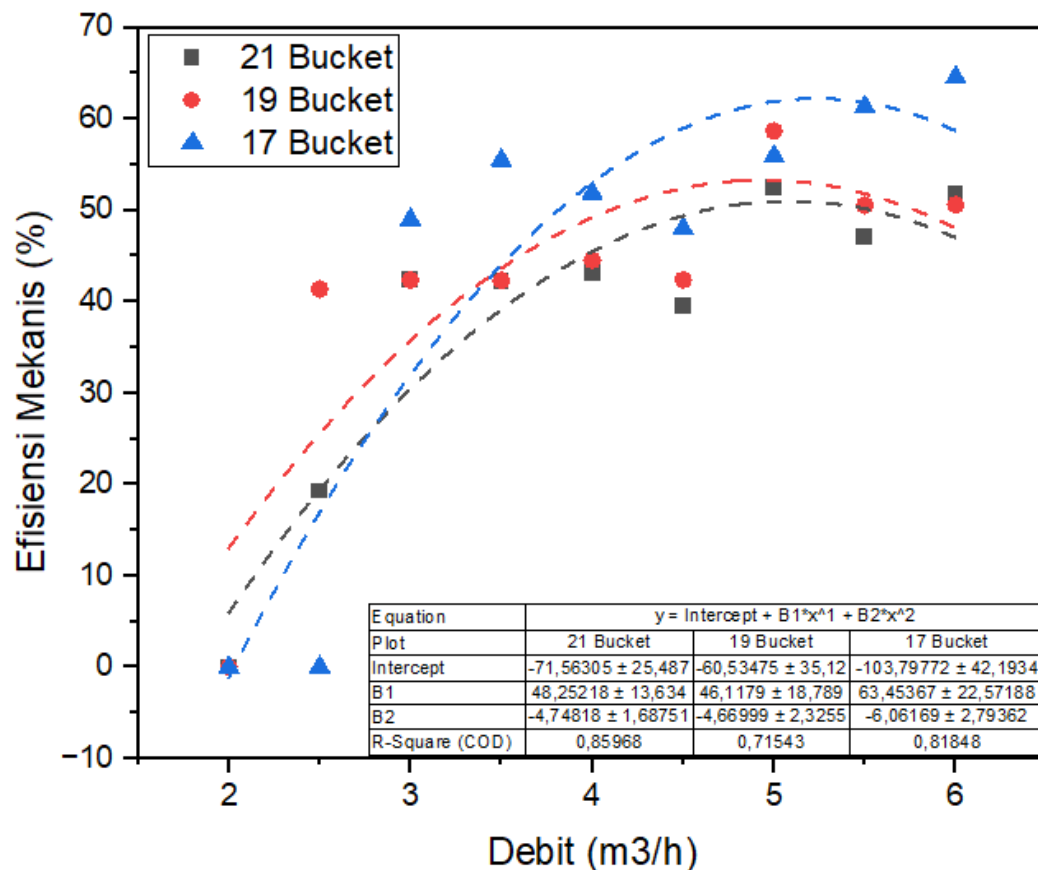
Berdasarkan grafik hubungan debit terhadap efisiensi mekanis pada head 15 meter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, dapat dijelaskan bahwa pada debit 2 m³/h, semua variasi bucket belum menghasilkan efisiensi (nilai 0 atau negatif). Pada debit 2,5 m³/h, efisiensi untuk 17 bucket juga masih nol, yang menandakan generator belum menghasilkan daya listrik secara konsisten pada kondisi tersebut.

Setelah itu, nilai efisiensi mekanis cenderung meningkat seiring dengan kenaikan debit. Efisiensi mekanis tertinggi tercatat pada percobaan dengan debit 6 m³/h menggunakan 17 bucket, yang nilainya mencapai 64,6%. Sementara itu, efisiensi mekanis terendah setelah generator mulai beroperasi secara stabil adalah 19,3%, yang didapatkan pada percobaan debit 2,5 m³/h dengan jumlah bucket 21.



Gambar 4. 6 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Mekanis

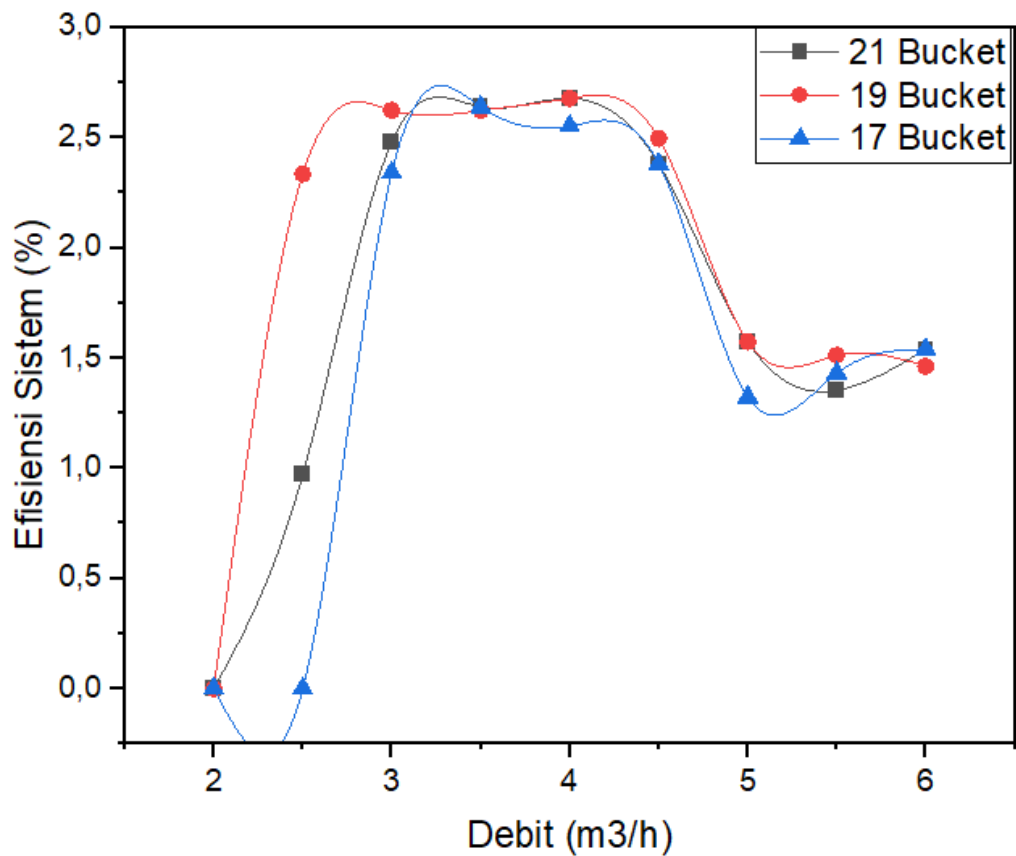
Berdasarkan grafik *trendline* yang dapat dilihat pada Gambar 4.7, tren kenaikan efisiensi mekanis secara umum terjadi pada rentang debit 2,5 m³/h hingga puncaknya di sekitar 5,5 m³/h. Tren kenaikan ini terjadi saat konversi energi dari daya turbin ke daya listrik oleh generator menjadi lebih optimal, seiring dengan meningkatnya kecepatan rotasi generator. Sedangkan tren penurunan atau pelandaian efisiensi mekanis mulai terlihat setelah melewati titik puncak tersebut. Nilai R-Square tertinggi pada grafik *trendline* ini berada di bucket 21 sebesar 0,85968.



Gambar 4. 7 Trendline Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Mekanis

4.3.13. Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Energi

Berdasarkan grafik efisiensi sistem yang dapat dilihat pada Gambar 4.9, menunjukkan nilai efisiensi sistem pada percobaan debit 2 m³/h memiliki nilai 0. Demikian pula pada debit 2,5 m³/h untuk variasi 17 bucket, efisiensi masih nol dikarenakan generator tidak menghasilkan daya listrik sama sekali. Efisiensi sistem kemudian mengalami kenaikan pada debit 2,5 sampai 4 m³/h, dan efisiensi tertinggi tercatat pada percobaan debit 4 m³/h dengan jumlah bucket 19 dan 21, yang keduanya memiliki nilai 2,68%.

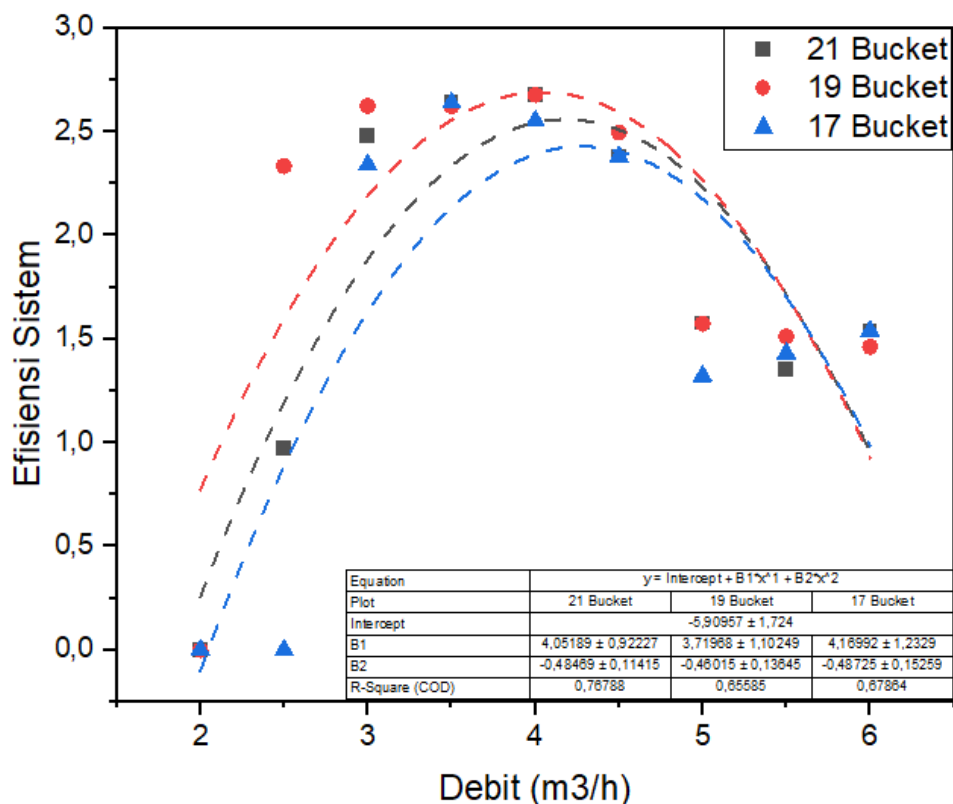


Gambar 4. 8 Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Sistem

Sedangkan efisiensi sistem mengalami penurunan signifikan setelahnya, dengan nilai terendah pasca-puncak pada debit 5 m³/h untuk 17 bucket, yaitu 1,32%. Kemudian, efisiensi sistem cenderung melandai sampai dengan percobaan 6 m³/h.

Penelitian yang dilakukan oleh (Asrori, Adikusuma and Yudiyanto, 2022) pada *test bed* yang dirancang menunjukkan head 10 meter, dan jumlah bucket 17 memiliki nilai efisiensi energi sebesar 24%. Oleh karena keterbatasan *test bed* yang dirancang, perlu dilakukan perbaikan dan penyempurnaan pada desain *nozzle* yang dibahas sebelumnya untuk memperoleh hasil efisiensi energi yang lebih optimal.

Dari grafik *trendline* yang dapat dilihat pada Gambar 4.10, menunjukkan tren kenaikan efisiensi sistem terjadi pada saat debit 2,5 sampai dengan 4 m³/h. Tren kenaikan ini terjadi saat konversi energi yang dilakukan oleh generator menghasilkan *output* daya listrik yang optimal. Sedangkan tren penurunan efisiensi sistem ini terjadi setelah melewati puncaknya, yaitu dari debit 4 m³/h sampai 6 m³/h. Tren penurunan ini diakibatkan oleh daya potensial air yang tinggi, akan tetapi konversi energi menjadi energi listrik tidak lagi optimal. Nilai R-Square rata-rata pada grafik *trendline* efisiensi ini yaitu 0,768



Gambar 4. 9 Trendline Pengaruh Debit Terhadap Efisiensi Sistem