

## VARIASI JUMLAH SUDU DAN MODIFIKASI BENTUK NOSEL PADA TURBIN TURGO UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

Bono, Drs, S.T., M.Eng , Suwarti, S.T., M.T.

Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Semarang  
Jl. Prof. Sudarto, S.H., Tembalang, Semarang, 50275, PO BOX 6199/SMS  
Telp. (024) 7473417, 7499585, Faks (024) 7472396

### Abstrak

Pembangkit listrik tenaga air khususnya mikrohidro saat ini menjadi salah satu pilihan dalam mencari energi alternatif untuk menggantikan sumber energi konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti Turbin Turgo pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan variasi jumlah sudu berbentuk mangkuk berjumlah 20 buah, 19 buah, 18 buah, dan 17 buah, serta memodifikasi bentuk nosel keluaran air dengan bentuk lingkaran dan persegi. Bentuk nosel lingkaran dan persegi mempunyai luas penampang yang sama yaitu  $78,5 \text{ mm}^2$ , dengan diameter pada bentuk lingkaran yaitu 10 mm dan pada bentuk persegi dengan panjang sisi 10,84 mm dan 7,25 mm. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Konversi Energi, dengan parameter yang diukur yaitu debit aliran air, tekanan air pada nosel, putaran poros generator, torsi, tegangan dan arus listrik output dari generator, serta suhu air. Data dari pengujian dibuat grafik karakteristik dengan bentuk hiperbolik. Hasil terbaik didapatkan pada bentuk nosel lingkaran daripada bentuk persegi. Daya Mekanik maksimum didapat pada jumlah sudu 18 nosel lingkaran sebesar 261,722 W pada putaran 851,754 rpm. Lalu pada Daya Generator maksimum didapat pada jumlah sudu 20 nosel lingkaran sebesar 145,537 W pada putaran 1076,043 rpm. Efisiensi Generator maksimum didapat pada jumlah sudu 18 nosel persegi didapatkan sebesar 59,78% pada putaran 1037,76 rpm. Dan Efisiensi Sistem maksimum didapat pada jumlah sudu 20 nosel lingkaran sebesar 22,664 % pada putaran 880,148 rpm. Semua kinerja didapat pada debit  $0,00217 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Kata Kunci : Turbin Turgo, Jumlah Sudu, Variasi.

### PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga air saat ini menjadi salah satu pilihan dalam memanfaatkan sumber energi, namun pemanfaatan yang ada masih menggunakan teknologi yang sederhana. Pembangkit listrik jenis ini dalam proses pembuatannya sangat ekonomis, tetapi masih dalam skala kecil. Artinya pembangkit-pembangkit seperti ini hanya mampu mencukupi pemakaian energi listrik untuk sejumlah

rumah saja. Jenis pembangkit listrik tenaga air ini sering disebut *microhydro* atau sering juga disebut *picohydro* tergantung keluaran daya listrik yang dihasilkan. Teknologi ini terdiri dari komponen utama yaitu turbin air dan generator listrik (Marsudi, Djiteng. 2006). Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan pembangkit alternatif yang dapat digunakan untuk memaksimalkan adanya potensi air yang ada.

Turbin Turgo merupakan salah satu jenis turbin yang dapat digunakan pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. Turbin Turgo dikembangkan pada tahun 1919 oleh **Gilkes** sebagai modifikasi turbin Pelton. Perbedaan utama antara turbin Pelton dan turbin Turgo adalah bentuk sudunya, bentuk sudu turbin Turgo adalah setengah dari bentuk sudu turbin Pelton dengan jumlah dan ukuran sudu yang sama. Selama ini bentuk luas penampang nosel yang banyak digunakan adalah bentuk lingkaran. Untuk mengetahui apakah ada pengaruh terhadap jumlah sudu yang dipasang pada runner turbin dan bentuk penampang nosel, sehingga tugas akhir ini akan dilakukan pengembangan turbin air Turgo dengan variasi jumlah sudu dengan bentuk sudu mangkuk atau bucket. Variasi jumlah sudu yang akan digunakan yaitu 17 buah, 18 buah, 19 buah dan 20 buah. Dengan melakukan modifikasi bentuk penampang nosel menjadi persegi yang memiliki luasan yang sama dengan nosel berpenampang bentuk lingkaran.

**TINJAUAN PUSTAKA**

**Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)**

Mikrohidro atau yang dimaksud dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai tenaga penggerak seperti, saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjunan (*head*) dan jumlah debit air. Mikrohidro merupakan sebuah istilah yang terdiri dari kata mikro yang berarti kecil dan hidro yang berarti air.

Secara teknis, mikrohidro memiliki tiga komponen utama yaitu air (sebagai sumber energi), turbin dan generator. Mikrohidro mendapatkan energi dari aliran air yang memiliki perbedaan ketinggian tertentu.

Pada dasarnya, mikrohidro memanfaatkan energi potensial jatuhnya air (*head*). Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. Energi mekanik yang berasal dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator. Mikrohidro bisa memanfaatkan ketinggian air yang tidak terlalu besar, misalnya dengan ketinggian air 2.5 meter dapat dihasilkan listrik 400 watt.

**Turbin Air**

Secara umum turbin air adalah alat yang mengubah energi aliran air menjadi energi mekanik yaitu putaran poros. Putaran poros ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai hal, sebagian besar putaran poros turbin air dimanfaatkan untuk

memutar generator sebagai pembangkit tenaga listrik. Fungsi turbin adalah mengubah energi ketinggian air menjadi daya putaran poros. Pemilihan turbin air merupakan bagian yang sangat penting dalam perencanaan pembangunan sebuah PLTMH. Karena besarnya energi listrik yang dihasilkan sangat tergantung dari kemampuan turbin air dalam mengubah potensi tenaga air menjadi energi mekanik

**Turbin Turgo**

Turbin Turgo adalah salah satu jenis turbin impulse yang sering digunakan pada PLTMH yang memiliki tinggi jatuh (*head*) yang tinggi karena bentuk kelengkungan sudu yang tajam. Turbin Turgo dikembangkan pada tahun 1919 oleh Gilkes sebagai modifikasi Turbin Pelton.

Turbin Turgo adalah jenis turbin yang sesuai untuk menggantikan turbin Pelton nosel ganda (*multinozzel*) dengan head rendah maupun turbin Francis dengan head tinggi yaitu turbin Turgo dapat bekerja pada head menengah 15 meter sampai 30 meter (Anagnostopoulos dan Papantonis 2008). Anagnostopoulos dan Papantonis, (2008).



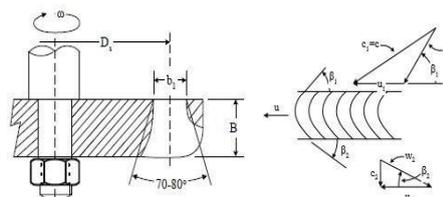
**Gambar 1. Sudu Turbin Turgo**

**Nosel**

Nosel berfungsi untuk menghasilkan jet aliran dengan cara mengubah head tekanan menjadi head kecepatan

**Sudu**

Sudu berfungsi sebagai penerima beban pancaran yang diseprotkan oleh nosel dan sebagai pengubah kecepatan air menjadi kecepatan sudu yang akan memutar runner yang dikopel dengan poros generator. Berikut gambar 2 yang menunjukkan penampang sudu Turbin Turgo dan segitiga kecepatan.



**Gambar 2. Penampang sudu Turbin Turgo dan Segitiga kecepatan**

### Generator AC Sinkron

Generator sinkron adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Generator sinkron dapat berupa generator sinkron AC tiga fasa atau generator sinkron AC satu fasa tergantung dari kebutuhan. Generator sinkron memiliki jumlah putaran rotor yang sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator yang sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator sehingga diperoleh kecepatan sinkron. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator sinkron adalah serempak dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC dimana dalam elektromagnet terdapat medan magnet. Medan magnet yang ditimbulkan oleh rotor bergerak searah putaran rotor. Hubungan antara putaran medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) yaitu :

$$n = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

- n = Kecepatan putar rotor [rpm]
- f = Frekuensi listrik [Hz]
- p = Jumlah kutub magnet

### Landasan Teori

#### Rasio Kecepatan

Rasio Kecepatan Turbin adalah perbandingan antara kecepatan keliling linier turbin pada diameter pitch runner dibagi dengan kecepatan teoritis air. Rasio Kecepatan Turbin dapat dihitung dengan persamaan (4), yaitu :

$$u = \frac{\pi \cdot n \cdot D_s}{60} \dots\dots\dots (2)$$

( John S. Anagnostopoulos, 2007 )

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \dots\dots\dots (3)$$

( John S. Anagnostopoulos, 2007 )

$$\varphi = \frac{u}{v} \dots\dots\dots (4)$$

( John S. Anagnostopoulos, 2007 )

Keterangan :

- $\varphi$  = rasio kecepatan
- u = kecepatan sudu turbin [m/s]
- v = kecepatan jet teoritis [m/s]
- n = putaran poros [rpm]
- $D_s$  = diameter pitch [m]
- H = head [m]

### Kinerja Turbin Turgo

#### Daya Hidrolik

Daya hidrolik adalah daya yang dimiliki oleh aliran suatu fluida (air yang dibangkitkan oleh suatu

keadaan tertentu), yang dihitung dengan persamaan (5), yaitu :

$$P_H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots (5)$$

( Muhammad Syawal Al-Azhar, 2017 )

Keterangan :

- $P_H$  = Daya hidrolik [watt]
- $\rho$  = Massa jenis air [kg/m<sup>3</sup>]
- g = Percepatan gravitasi [m/s<sup>2</sup>]
- Q = Debit [m<sup>3</sup>/s]
- H = Head [m]

### Daya Mekanik

Daya mekanik merupakan daya yang dihasilkan oleh poros turbin. Sehingga daya mekanik dapat dihitung pada Persamaan (6) :

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60} \dots\dots\dots (6)$$

( Muhammad Syawal Al-Azhar, 2017 )

Besarnya torsi diperoleh dengan Persamaan (7) berikut ini :

$$T = F \cdot l = (m \cdot g) \cdot l \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

- $P_m$  = Daya mekanik [watt]
- T = Torsi [Nm]
- l = Lengan torsi [m]
- m = Massa [kg]

### Daya Generator

Daya listrik yang dihasilkan oleh generator AC sinkron berupa tegangan dan arus bolak-balik yang dialirkan ke beban. Sehingga dapat dihitung Persamaan (8), yaitu :

$$P_g = V \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (8)$$

( Sumanto, 1984 : 572 )

Keterangan :

- $P_g$  = Daya keluaran generator [watt]
- V = Tegangan [volt]
- I = Arus [A]
- $\cos \varphi$  = Faktor daya

Dimana  $\cos \varphi$  adalah perbandingan sudut fasa antara tegangan dan arus yang mempunyai nilai maksimal.

### Efisiensi Hidrolik

Efisiensi hidrolik adalah perbandingan antara daya sudu dengan daya hidrolik. Sehingga dapat dihitung berdasarkan Persamaan (9), yaitu :

$$\eta_h = \frac{P_s}{P_H} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

### Efisiensi Mekanik

Efisiensi mekanik adalah perbandingan antara daya mekanik dengan daya sudu. Sehingga dapat dihitung berdasarkan Persamaan (10), yaitu :

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_s} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

**Efisiensi Generator**

Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya generator dengan daya mekanik. Sehingga dapat dihitung berdasarkan Persamaan (11), yaitu :

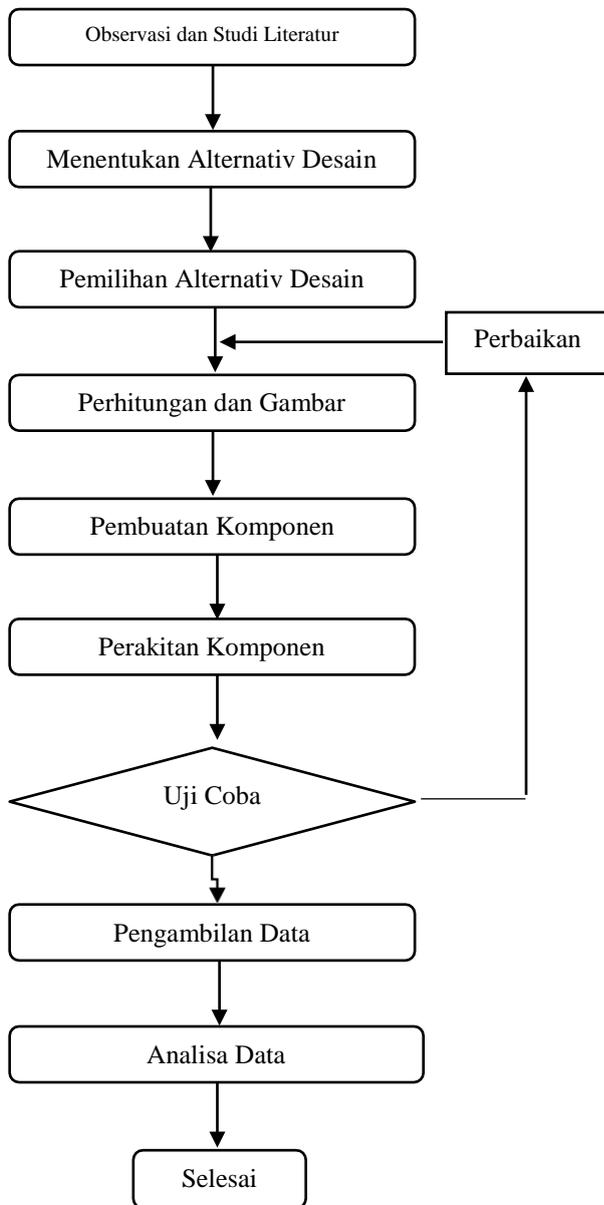
$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

**Efisiensi Sistem**

Efisiensi sistem adalah perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan generator dengan daya hidrolik. Sehingga dapat dihitung berdasarkan Persamaan (12), yaitu :

$$\eta_s = \frac{P_g}{P_h} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

**METODOLOGI PELAKSANAAN**



**Gambar 3. Metodologi Pelaksanaan**

**1. Observasi dan Studi Literatur**

Pengamatan atau observasi adalah aktivitas yang dilakukan makhluk cerdas, terhadap suatu proses

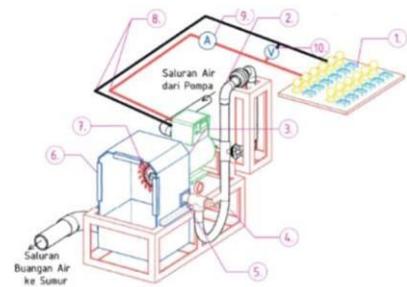
atau objek dengan maksud merasakan dan kemudian memahami pengetahuan dari sebuah fenomena berdasarkan pengetahuan dan gagasan yang sudah diketahui sebelumnya, untuk mendapatkan informasi-informasi yang dibutuhkan untuk melanjutkan suatu penelitian. Ilmu pengetahuan biologi dan astronomi mempunyai dasar sejarah dalam pengamatan oleh amatir. Di dalam penelitian, observasi dapat dilakukan dengan tes, kuesioner, rekaman gambar dan rekaman suara. Studi literatur adalah mencari referensi teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan.

**2. Menentukan Alternatif Design**

Menentukan alternatif design adalah menentukan/memutuskan pilihan lain seniterapan, arsitektur, dan berbagai pencapaian kreatif lainnya yang pada umumnya memperhitungkan aspek fungsi, estetika, dan berbagai macam aspek lainnya dengan sumber data yang didapatkan dari riset, pemikiran, brainstorming, maupun dari desain yang sudah ada sebelumnya.

**3. Pemilihan Alternatif Desain**

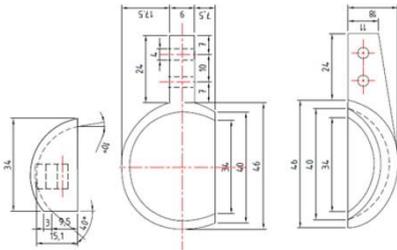
Pemilihan alternatif design adalah melakukan pemilihan/penentuan terhadap seni terapan, arsitektur, dan berbagai pencapaian kreatif lainnya yang pada umumnya memperhitungkan aspek fungsi, estetika, dan berbagai macam aspek lainnya dengan sumber data yang didapatkan dari riset, pemikiran, brainstorming, maupun dari desain yang sudah ada sebelumnya.



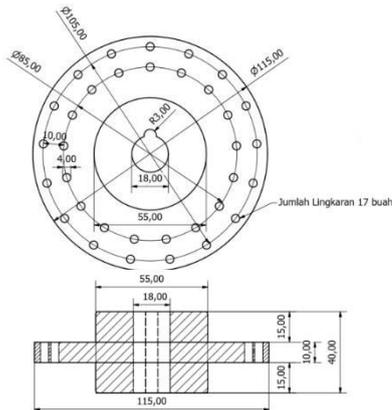
**Gambar 4. Instalasi Pengujian Turbin Turgo**

Keterangan:

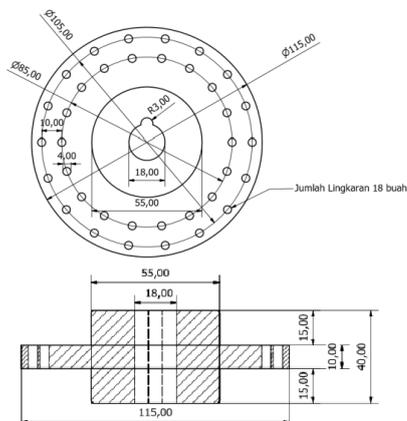
1. Seperangkat instalasi beban berupa lampu
2. Rotameter
3. Generator
4. Saluran masukan menuju nosel
5. Nosel
6. Rumah turbin
7. Turbin turgo
8. Instalasi generator ke beban
9. Amperemeter
10. voltmeter



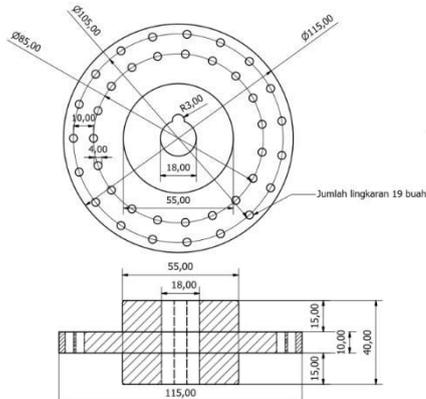
Gambar 5. Penampung Sudu Mangkuk



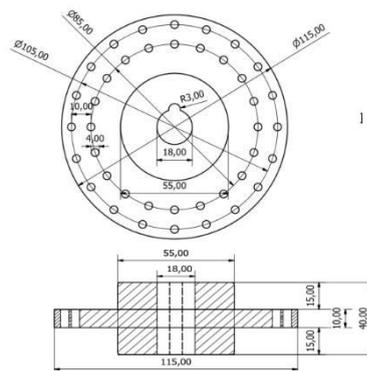
Gambar 6. Runner dengan jumlah sudu 17



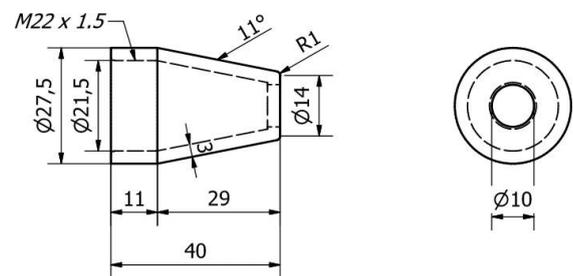
Gambar 7. Runner dengan jumlah sudu 18



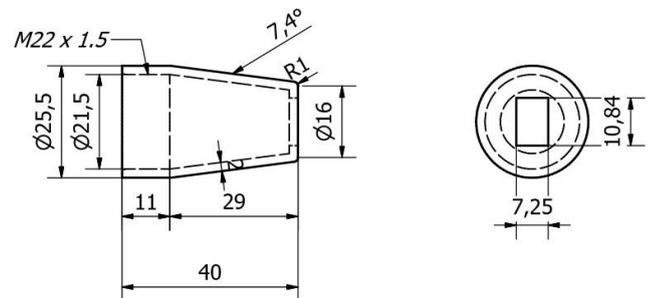
Gambar 8. Runner dengan jumlah sudu 19



Gambar 9. Runner dengan jumlah sudu 20



Gambar 10. Nosel dengan bentuk Lingkaran



Gambar 11. Nosel dengan bentuk Persegi

#### 4. Penghitungan Gambar

Penghitungan adalah proses yang disengaja untuk mengubah satu masukan atau lebih ke dalam hasil tertentu, dengan sejumlah peubah. Gambar adalah kombinasi antara titik, garis, bidang, dan warna untuk menciptakan suatu imitasi dari suatu objek—biasanya objek fisik atau manusia.

#### 5. Pembuatan Komponen

Pembuatan komponen adalah proses yang menghasilkan suatu komponen yaitu part-part (bagian-bagian) dari suatu produk.

**6. Perakitan Komponen**

Perakitan komponen atau Assembling Komponen merupakan proses penggabungan/penyatuan komponen-komponen menjadi satu kesatuan yang utuh

**7. Uji Coba**

Uji coba adalah proses pengujian sesuatu sebelum dipakai atau dilaksanakan seperti bahan tes, kendaraan, dan lain-lain.

**8. Pengambilan Data**

Pengambilan data adalah teknik atau cara yang dilakukan oleh peneliti untuk mengumpulkan data. Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Sementara itu instrumen pengumpulan data merupakan alat yang digunakan untuk mengumpulkan data. Karena berupa alat, maka instrumen pengumpulan data dapat berupa check list, kuesioner, pedoman wawancara, hingga kamera untuk foto atau untuk merekam gambar

**9. Analisa Data**

Analisa data adalah Kegiatan mengubah data hasil penelitian menjadi informasi yang dapat digunakan untuk mengambil kesimpulan dalam suatu penelitian. Adapun cara mengambil kesimpulan bisa dengan hipotesis maupun dengan estimasi hasil.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pelaksanaan langkah pengujian adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan instalasi pengujian turbin Turgo.
2. Menyiapkan peralatan yang dibutuhkan antara lain *tachometer, torsimeter, voltmeter, amperemeter, multimeter, kabel spade, themometer, load bank* dan kunci pas.
3. Memasang runner dengan sudu berjumlah 20 buah berbentuk mangkuk pada instalasi.
4. Mengisi bak tampungan air.
5. Memasang nosel berbentuk lingkaran dan mengatur sudut nosel 20<sup>o</sup> agar semprotan nosel mengenai sudu-sudu turbin Turgo.
6. Menghubungkan voltmeter secara paralel pada generator untuk mengukur tegangan yang dihasilkan.
7. Menghubungkan amperemeter secara seri pada generator dan beban untuk mengukur arus yang melewati beban.
8. Meng-ON kan pompa
9. Mengatur katup *bypass* dan katup bukaan nosel mencapai tekanan 3 bar yang terukur pada manometer dan debit 130 liter/menit yang terukur pada rotameter.
10. Menaikan beban pada *loadbank* secara bertahap dari 10 W hingga 600 W.
11. Mengukur putaran poros generator menggunakan tachometer

12. Mengukur torsi menggunakan neraca pegas digital
13. Mencatat data-data yang diperlukan pada tabel
14. Setelah selesai mencatat seluruh data yang diperlukan, matikan beban secara bertahap dan meng-OFF kan pompa
15. Mengulangi langkah no. 8 sampai 14 dengan mengganti sudu mangkuk berjumlah 19, 18, dan 17 buah.
16. Mengulangi langkah no. 8 sampai 14 dengan tekanan tetap 3 bar dan debit 115 liter/menit.
17. Mengulangi langkah no. 8 sampai 16 dengan bentuk nosel persegi.

**DATA HASIL PENGUJIAN**

Data Hasil Pengujian *Runner* Sudu Berjumlah 20 Buah Berbentuk Mangkuk dengan Nosel Berbentuk Lingkaran pada Tekanan Air Masuk Nosel 3 Bar dan Debit 130 liter/menit pada Tabel 1.

**Tabel 1 Data Hasil Pengujian *Runner* Sudu Berjumlah 20 Buah Berbentuk Mangkuk dengan Nosel Berbentuk Lingkaran pada Tekanan Air Masuk Nosel 3 Bar dan Debit 130 liter/menit.**

No	Beban (W)	N (rpm)	Torsi (kg)	Tegangan (V)	Arus (A)
1	0	1680	0,25	246	0
2	10	1660	0,275	243	0,1
3	20	1638	0,28	237	0,2
4	30	1632	0,29	235,5	0,21
5	40	1602	0,295	231	0,22
6	50	1580	0,305	228	0,28
7	60	1568	0,31	226,5	0,3
8	70	1552	0,315	223,5	0,34
9	80	1502	0,325	216	0,4
10	90	1498	0,34	214,5	0,4
11	100	1490	0,355	213	0,44
12	110	1458	0,36	207	0,48
13	120	1426	0,385	199,5	0,54
14	130	1422	0,39	198	0,6
15	140	1412	0,385	193,5	0,58
16	150	1378	0,39	192	0,63
17	160	1368	0,395	189	0,64
18	170	1356	0,405	186	0,68
19	180	1338	0,415	181,5	0,73
20	190	1318	0,42	178,5	0,74
21	200	1310	0,425	177	0,76
22	210	1270	0,465	174	0,8
23	220	1246	0,495	171	0,86
24	230	1240	0,515	169,5	0,86
25	240	1230	0,53	162	0,88
26	250	1210	0,545	159	0,9
27	260	1168	0,565	147	0,93
28	270	1162	0,565	145,5	0,94
29	280	1156	0,555	144	0,96
30	290	1128	0,56	139,5	0,98

Tabel 1 Lanjutan

No	Beban (W)	N (rpm)	Torsi (kg)	Tegangan (V)	Arus (A)
31	300	1110	0,575	138	1
32	310	1090	0,605	135	1,04
33	320	1066	0,605	130,5	1,07
34	330	1038	0,61	129	1,08
35	340	1016	0,6	129	1,08
36	350	1004	0,615	123	1,12
37	360	984	0,64	120	1,15
38	370	952	0,645	118,5	1,16
39	380	950	0,665	117	1,18
40	390	940	0,67	114	1,2
41	400	936	0,68	112,5	1,2
42	410	916	0,68	111	1,22
43	420	906	0,69	108	1,24
44	430	904	0,69	106,5	1,25
45	440	880	0,695	105	1,27
46	450	874	0,705	103,5	1,3
47	460	858	0,715	102	1,32
48	470	856	0,705	100,5	1,32
49	480	850	0,715	99	1,34
50	490	842	0,725	96	1,36
51	500	840	0,73	94,5	1,38
52	510	828	0,73	93	1,39
53	520	822	0,735	91,5	1,4
54	530	816	0,735	90	1,4
55	540	804	0,75	88,5	1,42
56	550	800	0,755	87	1,44
57	560	800	0,745	84	1,5
58	570	792	0,765	78	1,56
59	580	790	0,75	75	1,58
60	590	788	0,75	75	1,59
61	600	780	0,75	73,5	1,6

Berdasarkan data hasil pengujian yang diperoleh seperti pada tabel hasil pengujian maka dapat dihitung besaran daya hidrolik, daya mekanik, daya listrik (daya generator), efisiensi turbin, efisiensi generator dan efisiensi sistem PLTMH. Contoh perhitungan pada sudu berjumlah 20 buah berbentuk mangkuk dengan nosel berbentuk lingkaran pada tekanan air masuk nosel sebesar 3 bar dan debit 130 liter/menit pada beban nominal lampu 100 Watt dengan data sebagai berikut :

1. Debit (Q) = 130 l/menit
2. Tekanan (P) = 3 bar
3. Putaran (n) = 1490 rpm
4. Torsi (T) = 1,392 kg
5. Tegangan (V) = 213 V
6. Arus (I) = 0,44 A
7. Suhu air = 30 °C
8. Panjang lengan torsi (l) = 0,4 m
9. Diameter pitch = 0,135 m

**1. Mencari Head**

Head yang diperoleh merupakan hasil konversi dari pembacaan alat ukur manometer dari bar menjadi mH<sub>2</sub>O, yaitu :

Dari tabel konversi diperoleh bahwa

$$1 \text{ bar} = 10,197 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$H = 3 \text{ bar} = 3 \text{ bar} \times 10,197 \frac{\text{mH}_2\text{O}}{\text{bar}} = 30,6 \text{ mH}_2\text{O}$$

**2. Mencari Debit**

Perhitungan debit ini merupakan hasil konversi dari hasil pembacaan alat ukur rotameter dari liter/menit menjadi m<sup>3</sup>/s, yaitu :

$$Q = 130 \frac{\text{l}}{\text{menit}} = \frac{130 \frac{\text{l}}{\text{menit}}}{1000 \times 60 \frac{\text{s}}{\text{menit}}} = 0,00217 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

**3. Mencari Kecepatan Sudu Turbin**

Untuk mencari kecepatan sudu turbin berdasarkan Persamaan (2), yaitu :

$$u = \frac{\pi \times n \times D_t}{60}$$

$$u = \frac{3,14 \times 1490 \times 0,135}{60}$$

$$u = 10,53 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**4. Mencari Kecepatan Jet Teoritis**

Untuk mencari kecepatan pancaran jet teoritis dengan Persamaan (3), sebagai berikut :

$$v = \sqrt{2 g H}$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9,806 \cdot 30,6}$$

$$= 24,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**5. Mencari Rasio Kecepatan**

Perhitungan rasio kecepatan sesuai dengan Persamaan (4), yaitu :

$$\varphi = \frac{u}{v}$$

$$\varphi = \frac{10,53}{24,5} = 0,43$$

**6. Mencari Torsi**

Besarnya torsi dapat dihitung sesuai dengan Persamaan (7), yaitu :

$$T = F \times l$$

$$= (m \times g) \times l$$

$$= 0,355 \text{ kg} \times 9,806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,4 \text{ m}$$

$$= 1,392 \text{ Nm}$$

**7. Mencari Daya Input (Hidrolik)**

Perhitungan daya hidrolik sesuai dengan Persamaan (5), yaitu :

$$\rho_{30^\circ\text{C}} = 995,944 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

$$= 995,944 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,00217 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 30,6 \text{ m}$$

$$= 64 \text{ 8,497 W}$$

**8. Mencari Daya Mekanik**

Perhitungan daya mekanik sesuai dengan Persamaan (6), yaitu :

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60}$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1490 \cdot 1,392}{60}$$

$$= 217,158 \text{ W}$$

**9. Mencari Daya Listrik (Daya Generator)**

Perhitungan daya generator sesuai dengan Persamaan (8), yaitu :

$$P_g = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$= 213 \cdot 0,44 \cdot 1$$

$$= 93,72 \text{ W}$$

**10. Mencari Efisiensi Turbin**

Perhitungan efisiensi turbin sesuai dengan Persamaan di bawah ini, yaitu :

$$\eta_t = \frac{P_m}{P_h} \times 100 \%$$

$$= \frac{217,158}{648,497} \times 100 \%$$

$$= 33,49 \%$$

**11. Mencari Efisiensi Generator**

Perhitungan efisiensi generator sesuai dengan Persamaan (11), yaitu :

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m} \times 100 \%$$

$$= \frac{93,72}{217,158} \times 100 \%$$

$$= 43,16 \%$$

**12. Mencari Efisiensi Sistem**

Perhitungan efisiensi turbin sesuai dengan Persamaan (12), yaitu :

$$\eta_s = \frac{P_g}{P_h} \times 100 \%$$

$$= \frac{93,72}{648,497} \times 100 \%$$

$$= 14,45 \%$$

Untuk data selanjutnya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang sama dan hasil perhitungan dapat disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut ini.

**Tabel 2 Data Hasil Perhitungan Runner Sudu Berjumlah 20 Buah Berbentuk Mangkuk dengan Nosel Berbentuk Lingkaran pada Tekanan Air Masuk Nosel 3 Bar dan Debit 130 liter/menit.**

**Tabel 2 Lanjutan**

No	Beban (W)	N (rpm)	Ph (W)	Pm (W)	Pg (W)	$\eta$ (%)	$\eta_t$ (%)	$\eta_g$ (%)
13	120	1426	648,497	225,393	107,73	34,76	47,80	16,61
14	130	1422	648,497	227,680	118,8	35,11	52,18	18,32
15	140	1412	648,497	223,180	112,23	34,41	50,29	17,31
16	150	1378	648,497	220,635	120,96	34,02	54,82	18,65
17	160	1368	648,497	221,842	120,96	34,21	54,53	18,65
18	170	1356	648,497	225,463	126,48	34,77	56,10	19,50
19	180	1338	648,497	227,963	132,495	35,15	58,12	20,43
20	190	1318	648,497	227,261	132,09	35,04	58,12	20,37
21	200	1310	648,497	228,571	134,52	35,25	58,85	20,74
22	210	1270	648,497	242,447	139,2	37,39	57,41	21,47
23	220	1246	648,497	253,212	147,06	39,05	58,08	22,68
24	230	1240	648,497	262,174	145,77	40,43	55,60	22,48
25	240	1230	648,497	267,634	142,56	41,27	53,27	21,98
26	250	1210	648,497	270,734	143,1	41,75	52,86	22,07
27	260	1168	648,497	270,927	136,71	41,78	50,46	21,08
28	270	1162	648,497	269,535	136,77	41,56	50,74	21,09
29	280	1156	648,497	263,397	138,24	40,62	52,48	21,32
30	290	1128	648,497	259,333	136,71	39,99	52,72	21,08
31	300	1110	648,497	262,030	138	40,41	52,67	21,28
32	310	1090	648,497	270,734	140,4	41,75	51,86	21,65
33	320	1066	648,497	264,772	139,635	40,83	52,74	21,53
34	330	1038	648,497	259,949	139,32	40,08	53,60	21,48
35	340	1016	648,497	250,268	139,32	38,59	55,67	21,48
36	350	1004	648,497	253,495	137,76	39,09	54,34	21,24
37	360	984	648,497	258,545	138	39,87	53,38	21,28
38	370	952	648,497	252,091	137,46	38,87	54,53	21,20
39	380	950	648,497	259,362	138,06	39,99	53,23	21,29
40	390	940	648,497	258,561	136,8	39,87	52,91	21,09
41	400	936	648,497	261,303	135	40,29	51,66	20,82
42	410	916	648,497	255,720	135,42	39,43	52,96	20,88
43	420	906	648,497	256,648	133,92	39,58	52,18	20,65
44	430	904	648,497	256,081	133,125	39,49	51,99	20,53
45	440	880	648,497	251,089	133,35	38,72	53,11	20,56
46	450	874	648,497	252,965	134,55	39,01	53,19	20,75
47	460	858	648,497	251,857	134,64	38,84	53,46	20,76
48	470	856	648,497	247,755	132,66	38,20	53,54	20,46
49	480	850	648,497	249,508	132,66	38,47	53,17	20,46
50	490	842	648,497	250,617	130,56	38,65	52,10	20,13
51	500	840	648,497	251,746	130,41	38,82	51,80	20,11
52	510	828	648,497	248,150	129,27	38,27	52,09	19,93
53	520	822	648,497	248,039	128,1	38,25	51,65	19,75
54	530	816	648,497	246,228	126	37,97	51,17	19,43
55	540	804	648,497	247,558	125,67	38,17	50,76	19,38
56	550	800	648,497	247,969	125,28	38,24	50,52	19,32
57	560	800	648,497	244,685	126	37,73	51,49	19,43
58	570	792	648,497	248,741	121,68	38,36	48,92	18,76
59	580	790	648,497	243,248	118,5	37,51	48,72	18,27
60	590	788	648,497	242,632	119,25	37,41	49,15	18,39
61	600	780	648,497	240,169	117,6	37,03	48,97	18,13

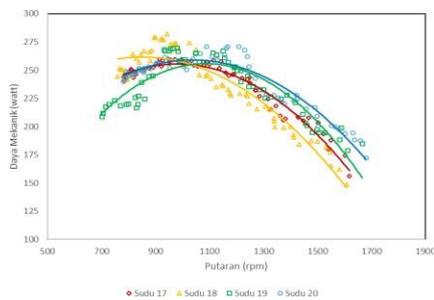
No	Beban (W)	N (rpm)	Ph (W)	Pm (W)	Pg (W)	$\eta$ (%)	$\eta_t$ (%)	$\eta_g$ (%)
1	0	1680	648,497	172,429	0	26,59	0	0
2	10	1660	648,497	187,414	24,3	28,90	12,97	3,75
3	20	1638	648,497	188,292	47,4	29,04	25,17	7,31
4	30	1632	648,497	194,303	49,455	29,96	25,45	7,63
5	40	1602	648,497	194,019	50,82	29,92	26,19	7,84
6	50	1580	648,497	197,841	63,84	30,51	32,27	9,84
7	60	1568	648,497	199,557	67,95	30,77	34,05	10,48
8	70	1552	648,497	200,707	75,99	30,95	37,86	11,72
9	80	1502	648,497	200,407	86,4	30,90	43,11	13,32
10	90	1498	648,497	209,099	85,8	32,24	41,03	13,23

**ANALISA DATA HASIL PENGUJIAN**

Grafik dibuat untuk mempermudah analisa data hasil pengujian. Pada Tugas Akhir ini dilakukan uji kinerja turbin Turgo sudu berbentuk mangkuk dengan nosel berbentuk lingkaran dan nosel persegi pada saat variasi jumlah sudu 20, 19, 18, dan 17. Pengujian variasi jumlah sudu dengan nosel berbentuk lingkaran dan nosel persegi ini diuji pada tekanan air masuk nosel 3 bar dan debit 130 liter/menit, kemudian diperoleh hasil berupa contoh grafik sebagai berikut :

**1. Karakteristik Daya Mekanik (Pm) terhadap Putaran (n)**

Gambar 11. dibawah ini menunjukkan karakteristik hubungan daya mekanik terhadap putaran saat menggunakan nosel lingkaran. Pengujian dengan variasi jumlah sudu mangkuk yaitu pada sudu 20, 19, 18, dan 17 buah menghasilkan 4 kurva berbeda. Pada masing-masing sudu diuji pada head sebesar 3 bar dan debit sebesar 130 liter/menit menunjukkan sifat atau kecenderungan yang sama pula yaitu daya mekanik meningkat bersamaan dengan naiknya putaran poros hingga mencapai titik puncaknya yang kemudian akan turun kembali meskipun putaran nya terus meningkat



**Gambar 12. Grafik Hubungan Daya Mekanik (Pm) terhadap Putaran (n) menggunakan Nosel Lingkaran**

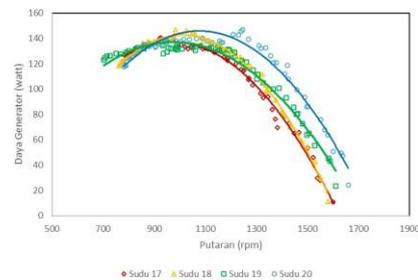
Berdasarkan Gambar 11. tersebut harga optimum kurva karakteristik daya mekanik terhadap putaran berturut-turut adalah sudu 18, 20, 19, dan 17. Selanjutnya untuk masing-masing sudu memberikan daya mekanik maksimum sebagai berikut :

1. Jumlah sudu 18 buah diperoleh nilai maksimum daya mekanik sebesar 261,722 W pada putaran 851,754 rpm.
2. Harga maksimum daya mekanik pada jumlah sudu 20 buah diperoleh sebesar 259,378 W pada putaran 1040,637 rpm.
3. Harga maksimum jumlah sudu 17 buah diperoleh daya mekanik maksimum sebesar 255,807 W pada putaran 983,127 rpm.

4. Sedangkan untuk jumlah sudu 19 buah diperoleh sebesar 255,514 W pada putaran 1084,467 rpm.

Hasil nilai daya mekanik optimum diatas tidak hanya dipengaruhi oleh banyaknya jumlah sudu mangkuk yang ada tapi juga kerapatan sudut antara sudu pada runner turbin, dan pengaruh dari menggunakan nosel lingkaran.

**2. Karakteristik Daya Generator (Pg) Terhadap Putaran (n)**



**Gambar 13. Grafik Hubungan Daya Generator (Pg) terhadap Putaran (n) menggunakan Nosel Lingkaran**

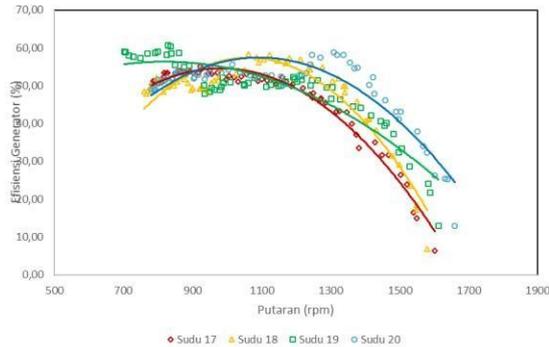
Gambar 12. terlihat bahwa grafik hubungan daya generator terhadap putaran pada keempat kurva pada sudu 20, 19, 18, dan 17 buah menunjukkan semakin putaran runner bertambah maka daya generator naik hingga titik puncak, kemudian daya generator turun walaupun putaran terus bertambah sehingga membentuk kurva hiperbolik. Adapun harga kurva optimum maksimum berturut-turut sebagai berikut:

1. Sudu 20 diperoleh daya generator maksimum sebesar 145,537 W pada putaran 1076,043 rpm.
2. Daya generator maksimum untuk sudu 18 diperoleh sebesar 143,099 W pada putaran 1012,085 rpm.
3. Daya generator maksimum untuk sudu 17 diperoleh sebesar 137,286 W pada putaran 970,761 rpm.
4. Sedangkan pada sudu 19 diperoleh daya generator maksimum sebesar 136,744 W pada putaran 972,804 rpm.

**3. Karakteristik Efisiensi Generator ( $\eta_g$ ) terhadap Putaran (n)**

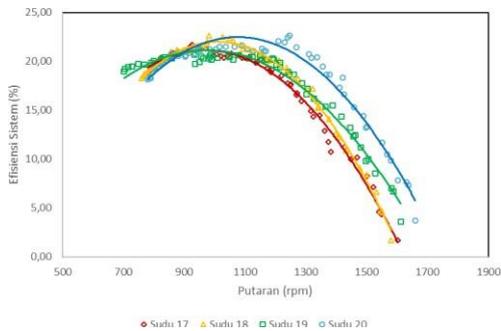
Gambar 13 dibawah ini adalah grafik hubungan antara efisiensi generator terhadap putaran menggunakan nosel lingkaran. Pengujian dilakukan pada sudu berjumlah 20, 19, 18, dan 17 pada head 3 bar dan debit 130 lpm, kemudian diperoleh 4 kurva berbeda dengan harga efisiensi generator yang berbeda pula. Putaran yang dihasilkan oleh masing-masing sudu yang berbeda berpengaruh pada harga efisiensi yang diperoleh. Semakin cepat putaran runner sudu maka harga efisiensi semakin

tinggi hingga titik puncak, dan kemudian turun meskipun putaran semakin bertambah. Berdasarkan data efisiensi generator pada masing-masing sudu diperoleh efisiensi generator terbaik berturut-turut adalah efisiensi generator sebesar 57,00 % dengan putaran sebesar 1058,156 diperoleh dari sudu 18, sudu 20 efisiensi turbinnya sebesar 56,89 % pada putaran 1088,116 rpm, sudu 19 diperoleh efisiensi sebesar 56,64 % pada putaran 826,061 rpm, dan sudu 17 dengan efisiensi turbin sebesar 54,7 % pada putaran 983,151 rpm.



**Gambar 14. Grafik Hubungan Efisiensi Generator terhadap Putaran menggunakan Nosel Lingkaran**

**4. Karakteristik Efisiensi Sistem ( $\eta_s$ ) terhadap Putaran (n)**

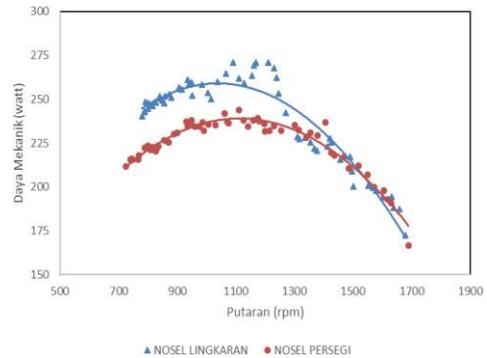


**Gambar 15. Grafik Hubungan Efisiensi Sistem terhadap Putaran menggunakan Nosel Lingkaran**

Gambar 14. diatas menunjukkan karakteristik hubungan efisiensi sistem terhadap putaran menggunakan Nosel lingkaran. Variasi jumlah sudu yaitu sudu 20, 19, 18, dan 17 pada pengujian tersebut diperoleh 4 kurva berbeda, dan harga efisiensi sistem yang berbeda pula. Diketahui bahwa semakin cepat putaran variasi sudu maka harga efisiensi sistem akan semakin bertambah, kemudian jika sudah mencapai harga maksimal, maka harga efisiensi sistem akan menurun meskipun harga putaran semakin bertambah, sehingga membentuk kurva melengkung dari awal hingga akhir.

Berdasarkan data pengujian tersebut diperoleh harga efisiensi terbesar berturut-turut adalah 22,664 % pada putaran 880,148 rpm oleh sudu 20, sudu 18 efisiensi sistemnya sebesar 21,76 % pada putaran 965,730 rpm, 21,35 % pada putaran 974,540 rpm oleh sudu 17, dan sudu 19 efisiensi sistemnya sebesar 20,826 % pada putaran 965,730 rpm.

**5. Karakteristik Daya Mekanik ( $P_m$ ) terhadap Putaran (n) pada perbandingan nosel lingkaran dan nosel persegi**



**Gambar 16. Grafik Hubungan Daya Mekanik terhadap Putaran pada Sudu 20 dengan Perbandingan Antara Nosel Lingkaran dan Nosel Persegi**

Gambar 15. dibawah ini, menunjukkan karakteristik hubungan daya mekanik terhadap putaran pada sudu 20 dengan perbandingan saat menggunakan nosel lingkaran dan nosel persegi. Terlihat bahwa pada kurva tersebut, semakin cepat putaran yang dihasilkan maka daya mekanik yang dihasilkan akan semakin bertambah hingga mencapai titik puncak, kemudian daya mekanik akan mengalami penurunan meskipun jumlah putaran semakin bertambah.

Pada kedua kurva perbandingan diatas diperoleh harga daya mekanik paling optimum adalah sebagai berikut berturut-turut :

1. Daya mekanik maksimum untuk sudu 20 pada nosel lingkaran sebesar 259,378 W, dengan jumlah putaran sebesar 1040,637 rpm.
2. Sedangkan harga daya mekanik maksimum sudu 20 pada nosel persegi sebesar 238,113 W, dengan jumlah putaran sebesar 1110,696 rpm.

Berdasarkan data tersebut daya mekanik maksimum untuk sudu 20 terbesar terjadi pada saat menggunakan nosel lingkaran. Meskipun begitu, terlihat pada grafik tersebut,, kerapatan harga hubungan daya mekanik terhadap putaran terbaik terjadi pada saat menggunakan nosel persegi. Hal tersebut terjadi karena penurunan

putaran pada setiap beban saat menggunakan nosel lingkaran lebih teratur dari pada saat menggunakan nosel persegi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa variasi jumlah sudu mangkuk dengan perbandingan saat menggunakan nosel lingkaran dan nosel persegi, diperoleh harga daya mekanik, daya generator, efisiensi generator, dan efisiensi sistem. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa pengujian saat menggunakan nosel lingkaran memiliki kinerja terbaik pada saat variasi jumlah sudu mangkuk ketimbang saat menggunakan nosel persegi, berikut ini harga parameternya,

1. Daya mekanik maksimum perbandingan antara nosel lingkaran dan nosel persegi dari variasi jumlah sudu yaitu 20, 19, 18, dan 17 terbaik adalah pada sudu 18 menggunakan nosel lingkaran diperoleh daya mekaniknya sebesar 261,722 W pada putaran 851,754 rpm, dan daya mekanik terendah terjadi pada nosel persegi yaitu pada sudu 19 sebesar 228,999 W pada putaran 1086,85 rpm.
2. Daya generator maksimum perbandingan antara nosel lingkaran dan nosel persegi dari variasi jumlah sudu yaitu 20, 19, 18, dan 17 terbaik adalah pada sudu 20 menggunakan nosel lingkaran diperoleh daya generatornya sebesar 145,537 W pada putaran 1076,043 rpm, dan daya generator terendah terjadi pada nosel persegi yaitu pada sudu 19 sebesar 123,047 W pada putaran 970,231 rpm.
3. Efisiensi generator maksimum perbandingan antara nosel lingkaran dan nosel persegi dari variasi jumlah sudu yaitu 20, 19, 18, dan 17 terbaik adalah pada sudu 18 menggunakan nosel persegi diperoleh efisiensi generatornya sebesar 59,78 % pada putaran 1037,76 rpm, dan efisiensi generator terendah juga terjadi pada nosel persegi yaitu pada sudu 17 sebesar 48,07 % pada putaran 973,959 rpm.
4. Efisiensi sistem maksimum pada perbandingan saat menggunakan nosel lingkaran dan nosel persegi dari variasi jumlah sudu yaitu 20, 19, 18, dan 17 terbaik adalah pada sudu 20 menggunakan nosel lingkaran diperoleh efisiensi sistemnya sebesar 22,664 % pada putaran 880,148 rpm, dan efisiensi sistem terendah terjadi pada nosel persegi yaitu pada sudu 19 sebesar 18,97 % pada putaran 970,282.

## DAFTAR PUSTAKA

Anagnostopoulos, J.S., dan Papantonis, D.E., 2008, *Flow Modeling and Runner Design of Optimization in Turgo Water Turbines*,

*International Journal of Applied Science Engineering and Technology* 4;3.

Bono, dkk. 2010. Karakteristik Unjuk Kerja Turbin Aksial Terhadap Variasi Jumlah Sudu Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro.

-----, 2012. *Kajian Eksperimental Turbin Turgo dengan Variasi Sudut Nozzle*. Jurnal Teknik Energi. Volume 8, No. 1. Semarang.

-----, 2012. *Optimasi Daya Turbin Turgo dengan Variasi Jumlah Sudu dan Sudut Nosel untuk Pembangkit Listrik Tenaga Picohidro*.

Dwiyanto, Very., dkk. 2016. *Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Studi Kasus: Sungai Air Anak (Hulu Sungai Way Besai) JRSDD, Edisi September 2016*. Volume 4, No. 3. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Endardjo P, Warga Dalam J, Setiadi A. 1998. *Pengembangan Rancang Bangun Mikrohidro Standar PU*. Bandung: Prosiding HATHI.

Fox, Robert W dan Alan T.Mc. Donald. 1994. *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition. SI Version, John Wiley & Sons, Inc. Canada*.

Harvey, Adam et al. 1993. *Microhydro Design Manual, Intermediate Technology Publication London*.

Hendar dan Ujang. 2007. *Desain, manu-facturing dan instalasi turbin propeller open flume Ø 125 Mm di C.V. Cihanjuang Inti Teknik Cimahi-Jawa Barat*. Bogor: Fakultas Teknologi Pertanian IPB.

Hsb, Muhammad Syawal Al-Azhar dkk. 2017. *Pengujian Karakteristik Turbin Pelton dengan Sudu 15 dan 16 Skala Laboratorium*. Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Harapan Medan.

Ismono H.A. 1999. *Perencanaan Turbin Air Tipe Cross Flow untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Institut Teknologi Nasional Malang*. Skripsi

Lestari, Agus., dkk. 2017. *Modifikasi Bentuk Sudu Turbin Turgo untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro*. Tugas Akhir. Semarang: Jurusan Teknik Mesin.

Morong, Juneidy Yohanes. 2016. *Rancang Bangun Kincir Air Irigasi Sebagai Pembangkit Listrik di Desa Talawaan*. Tugas Akhir. Manado: Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado.

Nasir, Bilal Abdullah. 2013. *Design of High Efficiency Pelton Turbine for Microhydro Power Plant*. Hawijah Technical Institute. Iraq.

Nugraha, I.N.E., dkk. 2013. *Penerapan dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Piko hidro dengan Turbin Propeller Open Flume TC 60 dan Generator Sinkron Satu Fasa 100 VA di UPI Bandung*. Jurnal Reka Elkomika. Volume 1, No.4. Bandung

Setiawan, Budi., dkk. Tanpa tahun. *Unjuk Kerja Turbin Air Tipe Crossflow dengan Variasi Debit Air dan Sudut Serang Nosel*. Tugas Akhir. Pangkalpinang: Jurusan Teknik Mesin Universitas Bangka Belitung.

Tampubolon, Frans Ade Putra . 2014. *Uji Performansi Turbin Pelton dengan 26 Sudu Pada Head 5,21 Meter Dengan Menggunakan Satu Buah Nosel dan Analisa Perbandingan Menggunakan Variasi Bentuk Sudu* . Departemen Teknik Mesin, Universitas Sumatera Utara.

Utomo, Agaza Dwi, Sentono Aji dan Ulin Setyawan, 2014. *Rancang Bangun Turbin Turgo dengan Variasi Diameter Piringan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Pico hidro*. Tugas Akhir. Semarang: Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang.