

PERANCANGAN ALAT UJI EFISIENSI PEMBANGKIT LISTRIK TURBIN PIKOHIDRO

EFFICIENCY TESTER DESIGN OF PICOHYDRO POWER PLANT GENERATOR

Nushaibah Athifah¹, Drs. Suwandi, S.Si.², Ahmad Qurthobi, S.T., M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹nushaibahathifah@gmail.com, ²suwandi@telkomuniversity.ac.id, ³qurthobi@gmail.com.

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Piko hidro (PLTPH) merupakan pembangkit tenaga listrik terbarukan dengan daya keluaran dibawah 5 kilowatt. Pembangkit ini digunakan pada daerah pegunungan yang memiliki aliran sungai kecil sebagai sumber energi. Akan tetapi, pada pelaksanaannya masih ditemukan beberapa masalah teknis sehingga perlu adanya tinjauan khusus dalam perancangan alat uji pada PLTPH sebagai solusi dari masalah tersebut. Untuk itu diperlukan sebuah sistem pengujian yang berfungsi untuk mencari variabel yang berhubungan dengan penyebab masalah tersebut.

Pada penelitian tugas akhir ini dirancang sebuah sistem pengujian efisiensi PLTPH dengan menggunakan sistem aliran fluida tertutup. Alat uji dirancang untuk pengukuran skala laboratorium. Variabel yang diuji pada penelitian ini adalah laju aliran air, tekanan, tegangan dan arus listrik. Dari data-data tersebut kemudian diperoleh karakteristik statik, karakteristik dinamik, dan efisiensi PLTPH yang diuji. Dari hasil penelitian didapatkan karakteristik statik yaitu rata-rata tekanan masukan adalah 6649 Pa dengan standar deviasi 135, rata-rata laju aliran air masukan adalah $9,27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ dengan standar deviasi sebesar $1,36 \times 10^{-5}$, rata-rata tegangan keluaran adalah 1,21 V dengan standar deviasi sebesar 0,04, rata-rata arus keluaran adalah 0,053 A dengan standar deviasi sebesar 0,006. Karakteristik dinamik yang didapatkan yaitu waktu respon tegangan keluaran mencapai tunak adalah 78 detik, sedangkan waktu respon arus keluaran mencapai tunak adalah 64 detik. Efisiensi yang dihasilkan dari PLTPH yang diuji adalah 0,76 %.

Kata kunci : Alat uji PLTPH, skala laboratorium, karakteristik statik, karakteristik dinamik, efisiensi.

Abstract

Pico hydro power plant generator is renewable power plan with power output below five kilowatts. This power plant is applied at mountainous area with a small stream as energy sourcing. However, in the implementation still found technical problems so that needed a special review in design of PLTPH tester as a solution of that problem. Therefore that is required a testing system to found variables that associated with cause of the problem.

In this final project, a PLTPH efficiency testing system is designed with closed channel flow system for laboratory scale measurement. The variables that tested in this project are water flow rate, pressure, voltage, and electric current. Form these data then obtained static characteristics, dynamic characteristics, and efficiency of PLTPH tested. Form the research result obtained static characteristics are the average of input pressure is 6649 Pa with standard deviation 135, the average of input water flow rate is $9,27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ with a standard deviation of $1,36 \times 10^{-5}$, the average of output voltage is 1.21 V with a standard deviation of 0.04, the average of output current is 0.053 A with a standard deviation of 0.006. The dynamic characteristic is that the response time of the output voltage reaches steady is 78 seconds, while the response time of the output current reaches steady is 64 seconds. The efficiency of PLTPH tested is 0,76 %.

Keyword: PLTPH efficiency testing system, laboratory scale measurement, static characteristics, dynamic characteristics, efficiency.

1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan manusia. Permintaan energi dunia mengalami peningkatan sehingga diperkirakan akan terjadi krisis energi dalam dekade setelahnya [1]. Permasalahan tersebut menjadi pusat perhatian dari berbagai negara sehingga dicari energi alternatif seperti PLTS, biomassa, panas bumi, PLTA, PLTB, dll, untuk menunjang permintaan kebutuhan energi [2]. Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) merupakan sumber energi alternatif dan energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan air yang melimpah serta tidak memiliki produk sampingan limbah. Namun kekurangan juga ditemukan dalam konstruksi pembangunan PLTA yang cenderung menggunakan lahan besar. Berbeda dengan pemanfaatan energi air berskala kecil atau dikenal dengan pikohidro [3].

Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) merupakan pembangkit tenaga listrik dengan daya keluaran dibawah 5 kilowatt. Pembangkit ini digunakan pada daerah pegunungan yang memiliki aliran sungai kecil sebagai sumber energi. Secara teknis, tenaga listrik diperoleh dengan proses konversi energy dari energi mekanik air menjadi energi listrik [4,5,6]. Beberapa penelitian telah dilakukan dalam mengembangkan PLTPH, salah satunya di tahun 2012 ditujukan kepada aplikasi PLTPH yaitu pengaruh aliran air (*water block*) dengan menggunakan turbin *bulb*. Efisiensi yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan jenis turbin PLTPH lainnya. Turbin ini dapat memenuhi kebutuhan penerangan satu rumah. Akan tetapi, pada pelaksanaannya masih ditemukan beberapa masalah teknis sehingga perlu adanya tinjauan khusus dalam perancangan alat uji pada PLTPH sebagai solusi dari masalah tersebut. Untuk itu diperlukan sebuah sistem pengujian yang berfungsi untuk mencari variabel yang berhubungan dengan penyebab masalah tersebut.

Pada kegiatan tugas akhir ini, dirancang sebuah sistem pengujian efisiensi PLTPH dengan menggunakan sistem aliran fluida tertutup. Kegiatan yang dilakukan dalam pengujian meliputi perancangan alat uji dengan menggunakan sensor mekanik, yaitu sensor tekanan dan kecepatan aliran pada titik inlet dan outlet sistem, dan sensor elektrik, yaitu sensor arus dan tegangan. Setelah itu data diambil dari beberapa sampel pengukuran berdasarkan prosentase kondisi *ball valve* pada pipa masukan. Dari data tersebut diharapkan hasil perancangan berupa karakteristik statik dan dinamik dari PLTPH yang diuji.

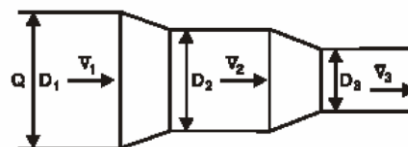
2. Dasar Teori

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro

Pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTPH) merupakan pembangkit listrik skala kecil yaitu dibawah 5 kW yang menggunakan tenaga air sebagai sumber energi. PLTPH biasanya digunakan pada aliran air rendah seperti irigasi di daerah pedesaan atau aliran sungai. Komponen utama PLTPH terdiri dari air sebagai sumber energi, turbin dan generator. Air mengalir dengan kapasitas dengan ketinggian tertentu menuju rumah instalasi (rumah turbin). Di rumah turbin air menumbuk turbin sehingga terjadi proses konversi energi dari energi air menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Poros yang berputar kemudian dilanjutkan ke generator. Dalam generator energi mekanik dikonversikan menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan masuk ke dalam kontrol arus listrik sebelum didistribusikan untuk keperluan perumahan, seperti lampu bulb, radio, dan televisi [4,5,6,7,8].

2.2 Pengukuran Aliran

Fluida merupakan zat yang memiliki kemampuan untuk berdeformasi atau berubah bentuk akibat gaya yang bekerja sejajar dengan penampang atau tegak lurus terhadap sumbu batang (atau tangensial) seperti tegangan geser. Fluida meliputi zat cair dan gas. Pengukuran aliran fluida adalah dengan menggunakan pendekatan volume atau untuk hukum kekekalan massa atau sering disebut dengan persamaan kontinuitas seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kontinuitas Aliran dalam Pipa

Berdasarkan persamaan kontinuitas, aliran yang bersifat laminar akan memiliki debit yang sama pada setiap titik sehingga kecepatan aliran dapat diperoleh dari persamaan (2.1) [9].

$$v_2 = \frac{Q_1}{A_2} \quad (2.1)$$

Fluida pada suatu aliran tertutup akan memiliki perbedaan energi diantara titik inlet dan outlet. Perbedaan energi dapat ditentukan melalui persamaan Bernoulli (2.2) dimana hal tersebut berdasarkan peningkatan kecepatan fluida serta penurunan tekanan pada aliran fluida.

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.2)$$

Pada saat densitas dan ketinggian fluida sama, maka didapatkan persamaan perbedaan tekanan dan laju aliran fluida seperti pada persamaan (2.3). [10,11]

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\rho}} \quad (2.3)$$

Di mana Q adalah debit air, A_2 adalah luas penampang di titik 2, A_1 adalah luas penampang di titik 1, g adalah percepatan gravitasi, Δp adalah selisih tekanan di titik 1 dan 2, dan ρ adalah densitas air.

2.3 Pengukuran Tekanan

Tekanan merupakan gaya normal yang disebabkan oleh kontak antara fluida dengan batas per satuan luas. Tekanan memiliki satuan internasional adalah newton per meter persegi (N/m^2) atau disebut pascal (Pa). Pengukuran tekanan secara umum berada pada rentang vakum (dalam 10^{-1} mmHg) yaitu pengukuran diantara tekanan nol dan tekanan atmosfer normal (14,7 psi). [12]

Tekanan dapat diukur sebagai tiga jenis yaitu: 1) Tekanan absolut merupakan tekanan total yang dihasilkan oleh medium; 2) Tekanan diferensial merupakan tekanan selisih antara dua tekanan; 3) Tekanan terukur merupakan tekanan khusus dari tekanan diferensial yang dinyatakan pada persamaan 2.4.

$$P_g = P_a - P_s \quad (2.4)$$

Di mana P_g adalah tekanan terukur, P_a adalah tekanan absolut, dan P_s adalah tekanan atmosfer.

2.4 Pengukuran Daya

Daya merupakan laju alih energi dari suatu sistem menuju sistem lain dengan Satuan Internasional *joule* per sekon, atau dinamakan *watt* (W). Pengukuran daya air dilakukan dengan cara mengatur kecepatan aliran air dan ketinggian air yang mengalir menuju sistem turbin [8]. Daya air dapat diperoleh melalui persamaan 2.5.

$$P = \rho g h Q \quad (2.5)$$

Di mana P adalah daya, ρ adalah densitas, g adalah konstanta gravitasi, h adalah ketinggian, dan Q adalah kecepatan aliran air.

2.5 Karakteristik Statik

Karakteristik statik merupakan karakter yang berhubungan dengan pembacaan respon sistem saat kondisi *steady state* (stabil). Karakteristik statik seringkali dikaitkan dengan metode kalibrasi yaitu membandingkan nilai keluaran dan masukan menggunakan instrumen standar serta memerhatikan nilai eror lingkungan pada sistem [13,14]. Beberapa karakteristik statik instrumen pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

2.5.1 Rata-rata

Rata-rata merupakan jumlah nilai seluruh data dibagi dengan banyaknya data. Rata-rata dapat diperoleh melalui persamaan (2.6).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.6)$$

Dimana x_i adalah data ke- i dan n adalah banyak pengujian.

2.5.2 Standar Deviasi

Standard deviasi merupakan ukuran variabilitas data data yang diambil. Standar deviasi dapat diperoleh melalui persamaan (2.7).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

Di mana σ adalah standar deviasi, x_i adalah data ke- i , \bar{x} adalah rata-rata, dan n adalah banyak pengujian.

2.5.3 Presisi

Presisi merupakan penyebaran nilai pengukuran dari nilai rata-ratanya. Presisi dalam instrumentasi biasa digunakan untuk melihat distribusi kesalahan pengukuran. Apabila dalam pengukuran ditemukan presisi yang besar, penyebaran pembacaan cenderung kecil. Dalam ilustrasi ini, presisi tinggi tidak menentukan akurasi pengukuran. Presisi suatu pengukuran dapat diperoleh melalui persamaan (2.8).

$$\text{Pr esisi} = 100\% \times \left(1 - \frac{3\sigma}{\bar{x}}\right) \quad (2.8)$$

Di mana σ adalah standar deviasi dan \bar{x} adalah rata-rata.

2.6 Karakteristik Dinamik

Karakteristik dinamik merupakan karakter yang menggambarkan perilaku sistem ketika merespon suatu masukan terhadap waktu sampai dengan kondisi stabil [13,14]. Karakteristik dinamik dari suatu pengukuran dapat dibahas dengan mengembangkan persamaan (2.9) yaitu hubungan antara masukan dan keluaran di mana waktu (t) > 0 .

$$a_n \frac{d^n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_i \quad (2.9)$$

Di mana q_i adalah nilai yang diukur, q_o adalah nilai yang terbaca, $a_o \dots$ dan b_o adalah konstanta.

2.6.1. Respon Waktu

Untuk memahami karakteristik dan sifat dari sistem, maka persamaan (2.9) digambarkan dalam bentuk grafik terhadap waktu dari $t = 0$ hingga t mendekati tak hingga ($t \rightarrow \infty$) atau sering disebut dengan *time-invariant system*. Penggambaran dalam bentuk grafik dinamakan respon waktu.

2.6.1.1. Pengukuran Orde Satu

Pengukuran dikatakan orde satu apabila nilai koefisien $a_2 \dots a_n$ sama dengan nol, sehingga persamaan orde satu menjadi persamaan (2.10).

$$a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \quad (2.10)$$

Apabila persamaan (2.10) didefinisikan dalam fungsi transfer atau domain s maka persamaan menjadi persamaan (2.11)

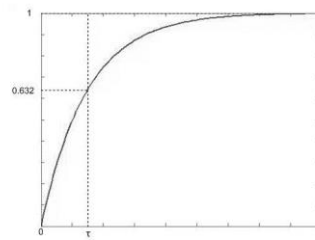
$$q_o(s) = q_i(s) \frac{b_0}{a_1 s + a_0} \quad (2.11)$$

$$\frac{q_o}{q_i} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.12)$$

Dimana K adalah sensitifitas statik sebesar b_0/a_0 , serta τ adalah konstanta waktu sebesar a_1/a_0 . Konstanta waktu merupakan waktu ketika nilai keluaran mencapai 63,2% dari nilai akhirnya. Jika pada sistem orde satu diberikan masukan berupa sinyal step dimana $q_i = 1/s$, maka sinyal keluaran dapat digambarkan melalui persamaan invers laplace dalam domain waktu (t) yang ditunjukkan pada persamaan (2.13).

$$q_o(t) = 1 - e^{-at} \quad (2.13)$$

Dari persamaan di atas dapat digambarkan kurva respon sistem orde satu seperti pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Kurva Respon Sistem Orde 1

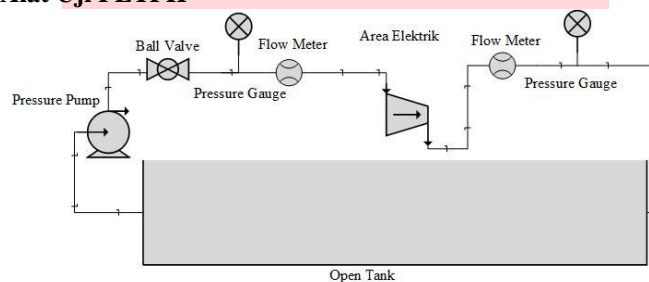
Dari gambar 2.5 dapat diketahui respon waktu sistem orde satu berupa waktu naik (*rise time*) dan waktu tunak (*settling time*). Waktu naik adalah waktu yang diperlukan untuk sistem naik dari 10% sampai dengan 90% nilai akhirnya. Waktu naik (T_r) diperoleh melalui persamaan (2.14)

$$T_r = 2,2\tau \quad (2.14)$$

Sedangkan waktu tunak adalah waktu yang diperlukan untuk sistem mencapai kondisi tunak. Waktu tunak (T_s) diperoleh melalui persamaan (2.15).

$$T_s = 4\tau \quad (2.15)$$

2.7 Sistem Kerja Alat Uji PLTPH



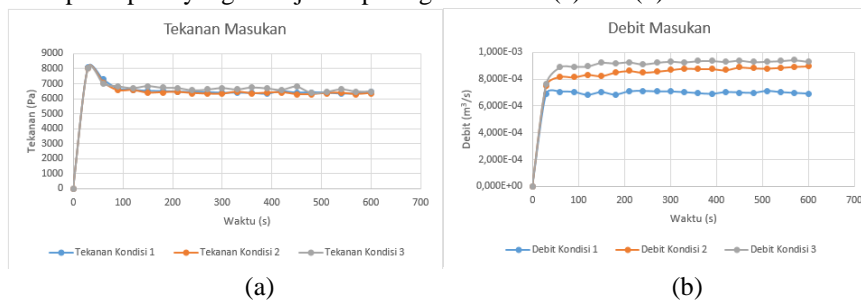
Gambar 2.3 P&ID Alat Uji PLTPH

Skema kerja alat uji PLTPH diperlihatkan pada gambar 2.3.. Air sebagai sumber energi ditampung dalam tangki air 1000 liter berbentuk balok dengan ukuran sebesar 1,2 m x 1,5 m x 0,7 m. Aliran air pada proses ini diasumsikan bersifat tetap atau laminar. Air dialirkan melalui pipa berukuran tiga inci. Kemudian air didorong oleh pompa air menuju sistem alat uji PLTPH. Pompa yang digunakan pada penelitian ini adalah pompa aliran. Pompa ini memiliki karakteristik aliran keluaran maksimum sebesar 630 liter per menit. Air dari pompa diteruskan ke dalam *ball valve*, sebagai pengatur kecepatan aliran untuk mendapatkan variasi data pengukuran.

Sistem alat uji PLTPH terdiri dari *flowmeter* dan *pressure gauge* sebagai alat ukur mekanik, serta sensor arus dan tegangan sebagai sensor elektrik sistem. Sensor mekanik diletakan pada titik pengukuran, yaitu inlet dan outlet turbin. Sedangkan sensor elektrik diletakan setelah generator PLTPH. Aliran air masuk ke dalam *flowmeter* inlet kemudian menggerakkan impeller sehingga gigi roda pada *flowmeter* bergerak. Hal ini menghasilkan medan magnet pada kumparan impeller. Medan magnet tersebut dikonversikan oleh modul sensor efek *hall* menjadi sinyal pulsa. Nilai kecepatan aliran yang terukur dideskripsikan oleh sinyal pulsa keluaran. Kemudian aliran air diteruskan menuju *pressure gauge* inlet untuk mengukur tekanan aliran. Membran dalam *pressure gauge* mengalami deformasi. Hal ini mengakibatkan perubahan jarum skala pada *pressure gauge* dan menunjukkan tekanan yang terukur. Setelah diukur kecepatan dan tekanan aliran pada inlet turbin, air dilanjutkan menuju turbin PLTPH. Air menggerakkan sudu turbin supaya dapat dikonversi energi mekanik menjadi energi listrik oleh generator. Energi listrik keluaran turbin diukur menggunakan sensor arus dan tegangan. Setelah itu, energi listrik dihubungkan dengan mikrokontroler dan beban 30 watt. Aliran air yang keluar dari turbin tidak sama dengan masukan sehingga dalam penelitian ini aliran diteruskan kembali menuju *flowmeter* untuk mengukur aliran keluaran turbin. Hal ini disebabkan oleh aliran air pada titik outlet cenderung memiliki kecepatan lebih cepat dibandingkan dengan aliran pada titik inlet. Tekanan pada titik outlet diukur kembali menggunakan *pressure gauge*. Setelah itu, air dibuang melalui pipa pembuangan menuju tanki penampungan dan proses berlangsung secara kontinu.

3. Pembahasan

Sebelum melakukan pengujian, dilakukan pengkondisian sampel uji yaitu sebanyak tiga kondisi bukaan valve, antara lain 1/3 bukaan valve, 2/3 bukaan valve, dan kondisi penuh. Hasil pengujian sampel seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1. (a) dan (b).



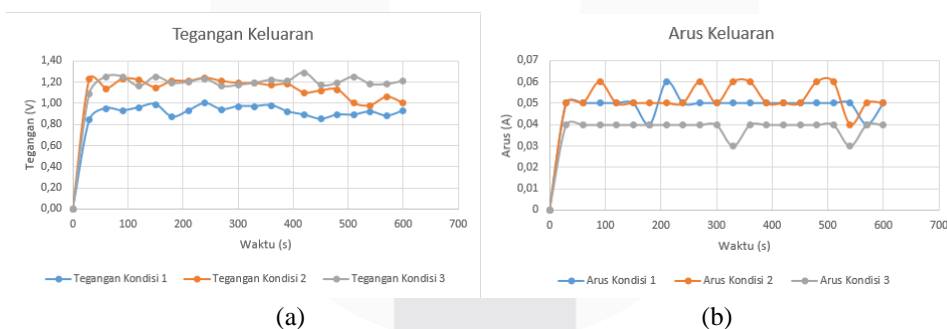
Gambar 3.1 Hasil Pengkondisian Sampel Uji : (a) Tekanan Masukan; (b) Debit Masukan

Dari hasil pengujian sampel uji didapatkan nilai tekanan dan debit untuk ketiga kondisi bukaan valve. Nilai-nilai tersebut kemudian menjadi variabel pengujian turbin PLTPH seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Pengujian PLTPH

Pengujian	Kondisi Bukaan Valve	Tekanan (Pa)	Debit (m ³ /s)
Kondisi 1	1/3	6440	$6,99 \times 10^{-4}$
Kondisi 2	2/3	6382	$8,84 \times 10^{-4}$
Kondisi 3	3/3	6649	$9,27 \times 10^{-4}$

Hasil pengujian tegangan dan arus keluaran dari turbin PLTPH yang diuji ditunjukkan pada gambar 3.2 (a) dan (b).



Gambar 3.2 Hasil Pengujian Keluaran Turbin : (a) Tegangan; (b) Arus

Apabila hasil pengujian tegangan dan arus keluaran turbin PLTPH ditinjau dari karakteristik statik, didapatkan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Karakteristik Statik Tegangan dan Arus Keluaran Turbin

Pengujian	Tegangan		Arus	
	Rata-rata (volt)	Standar Deviasi	Rata-rata (Ampere)	Standar Deviasi
Kondisi 1	0,93	0,04	0,049	0,004
Kondisi 2	1,14	0,08	0,053	0,006
Kondisi 3	1,21	0,04	0,039	0,003

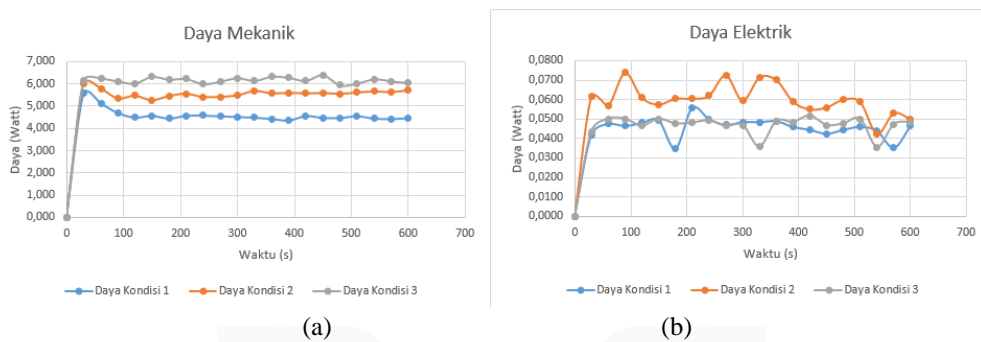
Hasil pengujian tegangan dan arus keluaran menunjukkan bahwa keadaan transien berada pada ketiga data pertama dengan kata lain 100 detik pertama. Apabila sinyal masukan dalam hal ini

diasumsikan berupa sinyal step, maka sinyal keluaran dapat dimodelkan melalui pendekatan orde satu, sehingga waktu respon dari karakteristik dinamik ditunjukkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Karakteristik Dinamik Tegangan dan Arus Keluaran Turbin

Pengujian	Tegangan			Arus		
	τ (s)	Tr (s)	Ts (s)	τ (s)	Tr (s)	Ts (s)
Kondisi 1	18,73	41,206	74,92	17,13	37,686	68,52
Kondisi 2	16,16	35,552	64,64	18,24	40,128	72,96
Kondisi 3	19,52	42,944	78,08	15,88	34,936	63,52

Untuk mendapatkan nilai efisiensi dilakukan pengujian daya mekanik masukan dan daya elektrik keluaran turbin. Hasil pengujian daya mekanik masukan dan daya elektrik keluaran dari turbin PLTPH yang diuji ditunjukkan pada gambar 3.3 (a) dan (b).



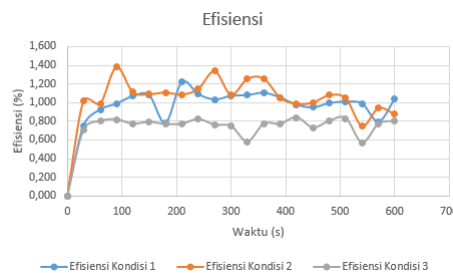
Gambar 3.3 Hasil Pengujian Daya : (a) Daya Mekanik Masukan; (b) Daya Elektrik Keluaran

Apabila hasil pengujian daya mekanik masukan dan daya elektrik keluaran turbin PLTPH ditinjau dari karakteristik statik, didapatkan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil Pengujian Daya

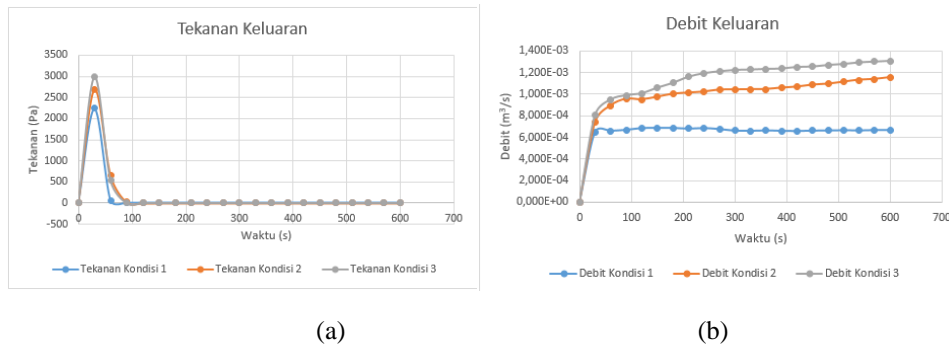
Pengujian	Daya Mekanik		Daya Elektrik	
	Rata-rata (Watt)	Standar Deviasi	Rata-rata (Watt)	Standar Deviasi
Kondisi 1	4,49	0,08	0,046	0,005
Kondisi 2	5,57	0,12	0,060	0,008
Kondisi 3	6,16	0,13	0,047	0,004

Hasil pengujian efisiensi dari turbin PLTPH yang diuji ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hasil Pengujian Efisiensi Turbin PLTPH

Berdasarkan gambar 3.4 rata-rata pengujian efisiensi pada kondisi pertama adalah 1,02%, rata-rata pengujian efisiensi pada kondisi kedua adalah 1,08%, sedangkan rata-rata pengujian efisiensi pada kondisi ketiga adalah 0,76%. Informasi lain yang didapatkan pada penelitian ini adalah tekanan dan *flow rate* keluaran ditunjukkan pada gambar 3.5 (a) dan (b).



Gambar 3.5 Hasil Pengujian Keluaran : (a) tekanan; (b) *Flow Rate*

Apabila hasil pengujian tekanan dan debit keluaran turbin PLTPH ditinjau dari karakteristik statik, didapatkan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Hasil Pengujian Tekanan dan Debit Keluaran

Pengujian	Tekanan		Debit	
	Rata-rata (Pa)	Standar Deviasi	Rata-rata (m ³ /s)	Standar Deviasi
Kondisi 1	0,00	0,00	$6,63 \times 10^{-4}$	$2,99 \times 10^{-6}$
Kondisi 2	0,00	0,00	$1,09 \times 10^{-3}$	$4,12 \times 10^{-5}$
Kondisi 3	0,00	0,00	$1,30 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-5}$

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya dapat disimpulkan bahwa:

1. Karakteristik statik dari pengujian turbin PLPH antara lain :
 - a. Rata-rata tekanan masukan maksimal dari alat uji PLTPH yang dirancang adalah 6649 Pa, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh dengan standar deviasi sebesar 135, sedangkan rata-rata tekanan masukan minimal dari alat uji adalah 6380 Pa dengan standar deviasi sebesar 79, yaitu pada saat dua pertiga kondisi bukaan *valve*.
 - b. Rata-rata laju aliran air masukan maksimal dari alat uji PLTPH yang dirancang adalah $9,27 \times 10^{-4}$ m³/s dengan standar deviasi sebesar $1,36 \times 10^{-5}$, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh, sedangkan rata-rata tekanan masukan minimal dari alat uji adalah $6,99 \times 10^{-4}$ m³/s dengan standar deviasi sebesar $8,70 \times 10^{-6}$, yaitu pada saat sepertiga kondisi bukaan *valve*.
 - c. Rata-rata tegangan keluaran maksimal dari turbin yang diuji adalah 1,21 V dengan standar deviasi sebesar 0,04, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh, sedangkan rata-rata tegangan keluaran minimal dari turbin adalah 0,93 V dengan standar deviasi sebesar 0,04, yaitu pada saat sepertiga kondisi bukaan *valve*.
 - d. Rata-rata arus keluaran maksimal dari turbin yang diuji adalah 0,053 A dengan standar deviasi sebesar 0,006, yaitu pada saat dua pertiga kondisi bukaan *valve*, sedangkan rata-rata tegangan keluaran minimal dari turbin adalah 0,039 A dengan standar deviasi sebesar 0,003, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh.
2. Karakteristik dinamik dari pengujian turbin PLPH antara lain :
 - a. Rentang waktu respon tegangan keluaran naik dari 10% sampai dengan 90% nilai akhirnya adalah 36-43 detik. Sedangkan rentang waktu respon tegangan keluaran mencapai kondisi tunak pada saat pengujian adalah 65-78 detik dengan asumsi sinyal masukan yang diberikan berupa sinyal step.
 - b. Rentang waktu respon arus keluaran naik dari 10% sampai dengan 90% nilai akhirnya adalah 36-40 detik. Sedangkan rentang waktu respon arus keluaran mencapai kondisi tunak pada saat pengujian adalah 64-73 detik.

3. Efisiensi maksimal dari turbin yang diuji adalah 1,08%, yaitu pada saat dua pertiga kondisi bukaan *valve*, sedangkan efisiensi minimal dari turbin adalah 0,76%, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh.
4. Informasi lain yang didapatkan dari alat uji yaitu tidak ada tekanan keluaran. Rata-rata debit keluaran maksimal adalah $1,30 \times 10^{-3}$ m³/s, yaitu pada saat kondisi bukaan *valve* penuh, sedangkan rata-rata laju aliran air minimal adalah $6,63 \times 10^{-4}$ m³/s, yaitu pada saat sepertiga kondisi bukaan *valve*.
5. Variabel yang berhubungan dengan masalah efisiensi turbin yang diuji cenderung kecil adalah faktor mekanik dari turbin, antara lain poros turbin yang tidak presisi sehingga putaran menjadi tidak berjalan dengan semestinya, ukuran *eye shape*, atau pengarah aliran, pada turbin kurang sesuai dengan ukuran sudu-sudu turbin sehingga turbin tidak dapat berputar secara maksimal, adanya *dampner* pada turbin, dan masih adanya kebocoran pada mekanik turbin.

Daftar Pustaka

- [1] *Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral*. [online] : <http://www.esdm.go.id/berita/37-umum/2133-hingga2030-permintaan-energi-dunia-meningkat-45.html>. Diakses pada tanggal : 23 Juni 2016.
- [2] Das, H. S., Dey, A., Wei, T. C., & Yatim, A. H. (2016). Feasibility Analysis of Standlobe PV/Wind/Battery Hybrid Energy System for Rural Bangladesh. *International Journal of Renewable Energy Reasearch*, Vol.6 No.2.
- [3] Saputro, A. E., & Kurniawati, H. A. (2013). Analisis Teknis dan Ekonomis Pemasangan Towing Kite dalam Upaya Penghematan Bahan Bakar pada Tanker 6500 DWT di Wilayah Perairan Indonesia. *Jurnal Teknik Pomits Vol.2 No.1*.
- [4] Zainuddin, H., Yahaya, M. S., Lazi, J. M., Basar, M. M., & Ibrahim, Z. (2009). Design and Development of Pico-hydro Generation System for Energy Storage Using Consumng Water Distributed to Houses. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic, and Communication Engineering Vol:3, No:11*.
- [5] Risnandar, Pratama, F. A., & Novrinaldi. (2011). GIS untuk Menentukan Potensial Pembangunan Piko-Hidro. *Jurnal Teknologi Informasi*, 60-61.
- [6] Khomsah, A., & Zuliari, E. A. (2015). Analisa Teori : Performa Turbin Cross Flow Sudu Bambu 5" sebagai Penggerak Mula Generator Induksi 3 Fasa. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III*.
- [7] Nugraha, I. N., Waluyo, & Syahrizal. (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 Elektronika*, 328-329.
- [8] Dave, D. S., Pamar, A. A., Shah, A. P., & Vyas, N. M. (2014). Pico Hydro Power Generator: Renewable Energy Technology For Rural Electrification. *Internasional Journal of Advance Research in Engineering, Science & Management*.
- [9] Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2002). *Fundamental of Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics : Fundamentals and Application*. New York: Mc Graw-Hill.
- [11] V., S. K., & Roy, B. K. (2012). An Intelligent Flow Measurement Technique Using Orifice. *International Journal of Applied Physics and Matematics*, Vol.2 No.3, 165-166.
- [12] Doebelin, E. O. (1990). *Measurement System Application and Design*. New York: Mc Graw-Hill.
- [13] Nise, N.S. (2011). *Control System Engineering*. USA: John Wiley and Sons.
- [14] Morris, A (2001). *Measurement and Instrument Principles*. London: Butterworth Heinemann.