Studi Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Arus Sungai di Sungai Buduk Dusun Nibung Desa Sahan Kecamatan Seluas Kabupaten Bengkayang

Matias^{a)}, Alfeus Sunarso^{b*)}, Boni Pahlanop Lapanporo^{a)}

^{a)}Prodi Fisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura Pontianak

^{b)}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak

^{*)}Email : sunarso@dosen.polnep.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perubahan unjuk kerja pembangkit listrik tenaga arus sungai (PLTAS) di Sungai Buduk (RT Mensibu, Dusun Nibung, Desa Sahan, Kecamatan Seluas, Kabupaten Bengkayang) akibat perubahan kondisi operasi. Untuk itu, dilakukan pengukuran kecepatan air, kecepatan putar poros kincir dan sistem transmisi, serta frekuensi, tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator. Pengukuran ini dilakukan pada berbagai kondisi pembukaan pintu air dan beban listrik. Data hasil pengukuran dianalisa untuk menentukan daya hidrolik, daya listrik, efisiensi sistem transmisi dan efisiensi total pembangkit. Hasil analisa menunjukkan bahwa dengan penambahan pembukaan pintu air, debit air yang masuk ke saluran kincir meningkat, sehingga daya yang dihasilkan PLTAS juga meningkat. Pada kondisi pembukaan pintu air tertentu, daya yang dihasilkan pembangkit cenderung meningkat dengan peningkatan beban terpasang. Hal ini disebabkan karena semakin besar beban terpasang, semakin besar daya pembangkit yang dapat diserap oleh beban. Namun demikian, jika beban terpasang melewati nilai tertentu daya yang dihasilkan cenderung turun. Penurunan daya ini berhubungan dengan penurunan efisiensi sistem transmisi. Pada kondisi operasi yang memungkinkan pada saat penelitian dilakukan, diketahui bahwa pembangkit dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 1889 Watt dengan efisiensi kincir 25%, efisiensi sistem transmisi sekitar 80%, dan efisiensi total pembangkit sekitar 15%. Rendahnya efisiensi total pembangkit disebabkan oleh rendahnya efisiensi kincir. Oleh karena itu diperlukan pengembangan kincir yang lebih efisien untuk meningkatkan unjuk kerja PLTAS.

Kata Kunci : *pembangkit listrik tenaga arus sungai (PLTAS), kincir air, unjuk kerja, daya hidrolik, daya listrik, efisiensi.*

1. Pendahuluan

Listrik merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat saat ini, karena merupakan sumber energi untuk menggerakkan kegiatan di berbagai aspek kehidupan, baik untuk kegiatan rumah tangga maupun industri. Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan peningkatan taraf hidup masyarakat. Karena keterbatasan pasokan, tidak semua masyarakat memiliki akses terhadap energi listrik. Data dari Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan menunjukkan bahwa rasio elektrifikasi Indonesia pada tahun 2014 adalah 84%[1]. Ini berarti bahwa 16% masyarakat Indonesia belum memperoleh akses tenaga listrik. Untuk Kalimantan Barat, kondisinya lebih buruk karena sekitar 20% masyarakatnya masih belum memperoleh akses energi listrik. Mayoritas masyarakat yang belum memiliki akses energi listrik ini adalah masyarakat yang tinggal di daerah terpencil.

Salah satu upaya untuk mengurangi permasalahan energi listrik di atas adalah dengan mengembangkan pembangkit listrik skala mikro (untuk satu komunitas) yang

menggunakan energi terbarukan seperti energi matahari, energi air dan energi angin. Pengembangan pembangkit listrik skala mikro menggunakan tenaga air di Kalimantan Barat cukup menjanjikan karena terdapat banyak sungai yang memiliki debit yang cukup besar[2]. Untuk mendorong pengembangan pembangkit listrik skala mikro tersebut, tim Penelitian Prioritas Nasional Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia (PENPRINAS MP3EI) Politeknik Negeri Pontianak telah mengembangkan prototipe PLTAS[3]. Salah satu prototipe dibangun di Sungai Buduk RT Mensibu Dusun Nibung Desa Sahan Kecamatan Seluas Kabupaten Bengkayang, yang mulai beroperasi pada bulan Agustus 2015.

Pengoperasian dan perawatan prototipe PLTAS ini sepenuhnya dilakukan oleh operator dari masyarakat lokal. Agar masyarakat dapat mengoperasikan PLTAS dengan baik, diperlukan informasi tentang unjuk kerja PLTAS pada berbagai kondisi operasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan studi untuk mempelajari unjuk kerja prototipe PLTAS pada berbagai kondisi operasi. Dengan adanya

informasi ini diharapkan operator dapat mengoperasikan PLTAS pada kondisi operasi yang optimum, sehingga permasalahan dalam operasi dapat dikurangi dan PLTAS dapat dioperasikan secara berkelanjutan. Selain itu, informasi unjuk kerja PLTAS ini bermanfaat untuk pengembangan PLTAS selanjutnya.

2. Metodologi

Pada PLTAS, energi aliran air diubah menjadi energi listrik. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, aliran air sungai diarahkan ke kincir melalui saluran kincir. Debit air pada saluran kincir diatur dengan mengatur pembukaan pintu kincir. Tumbukan air pada sudu kincir mengakibatkan kincir berputar, dan putaran ini diteruskan melalui sistem transmisi putaran (puli dan sabuk) ke generator yang mengubah energi mekanik (putaran) menjadi energi listrik.

Perlu diperhatikan bahwa unjuk kerja PLTAS dapat dilihat dari daya listrik yang dihasilkan, yang tergantung pada beberapa faktor, antara lain: daya input (daya hidrolik), beban konsumen, efisiensi kincir air, efisiensi transmisi putaran dan efisiensi generator. Untuk mempelajari unjuk kerja PLTAS tersebut, dilakukan pengukuran kecepatan air pada saluran kincir, kecepatan putar poros kincir dan sistem transmisi, serta frekuensi, tegangan dan arus listrik yang dihasilkan generator. Data hasil pengukuran ini dianalisa untuk menentukan

daya hidrolik, daya listrik, efisiensi sistem transmisi dan efisiensi total pembangkit.

Untuk mempelajari pengaruh perubahan kondisi pada sisi input, yaitu perubahan debit air, pengukuran dilakukan pada pembukaan pintu air (H_p) 10, 15, 20, 25, 30, 35, dan 40 cm. Sedangkan untuk mempelajari pengaruh perubahan kondisi pada sisi output, yaitu perubahan beban konsumen, pengukuran dilakukan dengan beban yang bervariasi. Pengaturan beban dilakukan sedemikian hingga tegangan antar fase yang dihasilkan generator (V_g) berkisar antara 300 V dan 400 V. Tegangan minimum 300 V dibutuhkan agar alat-alat listrik yang ada pada panel kontrol dapat beroperasi dengan baik. Sedangkan tegangan maksimum 400 V tidak boleh terlampaui untuk mencegah kerusakan pada alat-alat listrik. Untuk setiap kondisi operasi dilakukan berbagai pengukuran dengan lokasi pengukuran yang mengacu pada Gambar 1. Pengukuran kecepatan air dilakukan pada mulut saluran kincir (di dekat pintu kincir air) menggunakan *water current meter*. Pengukuran kecepatan putar dilakukan menggunakan *tachometer* pada poros kincir, poros sistem transmisi putaran (2 tingkat), dan poros generator. Pada sisi keluar generator (pada panel kontrol), tegangan antar fase diukur menggunakan *multimeter*, dan arus yang mengalir pada setiap fase (R, S, T) diukur menggunakan *tang ampere meter*.

Gambar 1. Bagian utama prototipe PLTAS.

Pengumpulan data dilakukan dengan prosedur seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Sebelum melakukan pengukuran, saluran listrik yang menuju konsumen harus diputuskan. Agar beban dapat diatur dengan mudah, saluran ke konsumen tersebut disambungkan ke saluran lampu penyeimbang yang bisa dilepas atau dipasang dengan mudah. Pada awal pengukuran, tanggal, waktu dan tinggi air di mulut saluran kincir harus dicatat. Kemudian beban berupa lampu pijar dipasang pada pembangkit dengan kapasitas maksimum (2100 W), dan pintu air dibuka dengan pembukaan minimum (10 cm). Setelah itu beban dikurangi sehingga tegangan listrik yang dihasilkan (tegangan antar fase) mencapai 300 V. Jika tegangan sudah mencapai 300 V dilakukan pengukuran kecepatan aliran air, kecepatan putar poros, frekuensi, tegangan dan arus listrik yang dihasilkan pembangkit. Setelah itu beban dikurangi dan tegangan yang dihasilkan generator diperiksa. Jika tegangan masih di bawah 400 V, pengukuran dilakukan seperti langkah sebelumnya, tetapi jika melebihi 400 V, beban maksimum dipasang pada pembangkit. Selanjutnya, pembukaan pintu air dinaikkan, jika belum mencapai 40 cm, pengukuran dilakukan seperti pada langkah sebelumnya. Pengukuran berakhir jika pembukaan pintu air melebihi 40 cm.

Data yang diperoleh dari pengukuran diolah untuk memperoleh informasi tentang daya listrik yang dibangkitkan, efisiensi total pembangkit dan efisiensi sistem transmisi. Efisiensi total pembangkit (η_{TP}) merupakan perbandingan antara daya output berupa daya listrik (P_L) dengan daya input berupa daya hidrolik (P_H):

$$\eta_{TP} = \frac{P_L}{P_H} \times 100\% \quad (1)$$

Daya hidrolik tergantung pada laju aliran air atau debit (Q) dan beda ketinggian permukaan air pada bagian hulu dan hilir kincir atau head (H), dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_H = \rho g H Q \quad (2)$$

Di sini, ρ adalah masa jenis air (998 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$). H dan Q masing-masing dinyatakan dalam m dan m^3/s . Debit Q dapat diperoleh dengan mengukur kecepatan aliran air (v) dan tinggi air di mulut saluran yang sama dengan tinggi pembukaan pintu air (H_p). Jika saluran kincir memiliki lebar L , maka Q dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = v H_p L \quad (3)$$

Head H dapat diperoleh dengan mengukur ketinggian permukaan air pada bagian mulut saluran kincir (H_M). Mengingat bahwa mulut saluran lebih tinggi 1 m dari saluran pada bagian hilir kincir, maka:

$$H = 1 + H_M \quad (4)$$

Gambar 2. Diagram alir pengumpulan data.

Daya listrik P_L , dapat diperoleh dengan mengukur tegangan (V) antara jalur salah satu fase dengan jalur netral dan arus listrik pada setiap fase (I_R, I_S, I_T). Jika arus total I merupakan penjumlahan dari I_R, I_S, I_T maka daya listrik dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_L = VI \quad (5)$$

Perlu diperhatikan bahwa efisiensi total pembangkit yang dihitung dari persamaan (1) biasanya di bawah 100%. Hal ini disebabkan adanya rugi-rugi pada kincir air, sistem transmisi putaran dan generator. Dengan kata lain, efisiensi total pembangkit (η_{TP}) tergantung pada efisiensi kincir air (η_w), efisiensi transmisi putaran (η_R), dan efisiensi generator (η_G):

$$\eta_{TP} = \eta_w \eta_R \eta_G \quad (6)$$

Efisiensi generator biasanya berkisar antara 80-90%, dan pada penelitian ini diasumsikan sebesar 80%. Sedangkan efisiensi transmisi putaran dapat diperoleh dengan mengukur rugi-rugi akibat slip. Jika efisiensi total (persamaan (1)), efisiensi generator, dan efisiensi transmisi diketahui, maka efisiensi kincir air dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta_w = \eta_{TP} / (\eta_R \eta_G) \quad (7)$$

Rugi-rugi pada sistem transmisi putaran disebabkan adanya slip antara sabuk dan puli. Besarnya slip dapat ditentukan berdasarkan perbandingan putaran ideal (tergantung pada perbandingan diameter puli) dan perbandingan putaran aktual (diperoleh dari pengukuran). Diameter puli yang digunakan dan perbandingan putaran ideal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran puli pada sistem transmisi putaran.

No	Diameter (mm)	Posisi Puli Pada Poros	Rasio Putaran
1	600	Kincir	3
2	200	Transmisi-1	
3	600	Transmisi-1	4
4	150	Transmisi-2	
5	600	Transmisi-2	4,8
6	125	Generator	

Jika perbandingan putaran ideal dinyatakan dengan R_I dan perbandingan putaran aktual dinyatakan dengan R_A , maka slip S dapat dihitung dengan persamaan:

$$S = \frac{R_I - R_A}{R_I} \times 100\% \quad (8)$$

Slip dapat dihitung pada masing-masing tingkat transmisi, maupun pada sistem secara keseluruhan. Untuk masing-masing tingkat digunakan perbandingan putaran poros yang terhubung pada masing-masing sabuk, sementara untuk sistem transmisi secara

keseluruhan digunakan perbandingan putaran antara poros generator dan poros kincir. Jika slip total diketahui, maka efisiensi sistem transmisi dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta_R = 100\% - S = \frac{R_A}{R_I} \times 100\% \quad (9)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa perubahan debit akibat perubahan pembukaan pintu air berpengaruh terhadap daya hidrolik. Hal ini dapat dikonfirmasi pada Gambar 3 yang menunjukkan bahwa semakin besar pembukaan pintu air, semakin besar pula debit yang masuk ke saluran kincir sehingga daya hidrolik juga meningkat.

Gambar 3. Hubungan antara pembukaan pintu air dan daya hidrolik.

Pada PLTAS, daya hidrolik aliran air diubah menjadi energi listrik melalui suatu sistem yang terdiri dari kincir air, transmisi putaran, dan generator. Besarnya energi listrik yang dihasilkan pembangkit tergantung pada daya input (daya hidrolik) dan kapasitas penyerapan daya yang ditentukan oleh beban terpasang. Gambar 4 menunjukkan pengaruh beban terpasang terhadap daya yang dihasilkan pembangkit. Untuk pembukaan pintu air tertentu, semakin besar beban terpasang, daya listrik yang dihasilkan cenderung meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar beban terpasang, semakin besar daya pembangkit yang dapat diserap oleh beban. Namun demikian, jika beban terpasang melewati nilai tertentu daya yang dihasilkan cenderung turun. Penurunan daya ini berhubungan dengan penurunan efisiensi sistem transmisi yang disebabkan karena meningkatnya slip pada saat beban pada generator meningkat.

Pada Gambar 4 juga dapat dilihat bahwa untuk beban terpasang yang sama, semakin besar pembukaan pintu air, semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Peningkatan daya listrik ini disebabkan oleh peningkatan daya hidrolik akibat peningkatan debit aliran air yang masuk

ke saluran kincir. Perlu diperhatikan juga bahwa pada kondisi operasi yang memungkinkan pada saat penelitian dilakukan, daya listrik maksimum yang dihasilkan pembangkit adalah 1889 W pada pembukaan pintu air 40 cm dengan beban terpasang sebesar 2100 W.

Gambar 4. Pengaruh beban terpasang pada daya listrik pembangkit.

Untuk mengetahui unjuk kerja pembangkit dalam mengubah daya hidrolik menjadi daya listrik, efisiensi total pembangkit dihitung menggunakan persamaan (1) dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 5. Di sini dapat dilihat bahwa efisiensi total pembangkit memiliki kecenderungan yang sama dengan daya listrik yang dihasilkan. Efisiensi total pembangkit cenderung meningkat dengan meningkatnya beban terpasang. Namun setelah beban terpasang melewati nilai tertentu, efisiensi total pembangkit menurun. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, efisiensi total pembangkit relatif rendah, dengan nilai maksimum sekitar 15%.

Gambar 5. Pengaruh beban terpasang pada efisiensi total pembangkit.

Untuk mempelajari penyebab rendahnya efisiensi ini, perlu diingat bahwa efisiensi total pembangkit tergantung pada efisiensi kincir air, efisiensi sistem transmisi dan efisiensi generator. Efisiensi generator biasanya cukup tinggi dan di

sini diasumsikan sebesar 80%. Sedangkan efisiensi sistem transmisi ditentukan dengan mengukur kecepatan putar pada poros kincir dan poros generator. Berdasarkan persamaan (8) dan (9), efisiensi sistem transmisi dapat ditentukan dan ditampilkan pada Gambar 6. Di sini tampak bahwa efisiensi transmisi berkisar antara 60% sampai 95%. Selain itu dapat diamati juga bahwa semakin besar beban terpasang efisiensi transmisi semakin kecil. Hal ini disebabkan karena semakin besar beban terpasang, torsi pada generator semakin meningkat dan slip antara sabuk dan puli juga semakin meningkat. Peningkatan slip inilah yang menyebabkan penurunan daya pembangkit pada saat beban melewati nilai tertentu.

Gambar 6. Pengaruh beban terpasang pada efisiensi transmisi.

Slip dapat dikurangi dengan mengatur posisi poros transmisi sehingga tegangan sabuk meningkat. Oleh karena itu, pada beban terpasang yang relatif besar, disarankan untuk meningkatkan tegangan sabuk agar slip bisa dikurangi. Perlu diperhatikan bahwa ketika slip terjadi, sabuk dan puli akan menjadi panas akibat gesekan, sehingga sabuk akan cepat rusak.

Selanjutnya, berdasarkan efisiensi total, efisiensi generator dan efisiensi sistem transmisi, efisiensi kincir air dapat dihitung menggunakan persamaan (7) dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 7. Di sini efisiensi kincir diplot terhadap kecepatan putar relatif yang merupakan rasio antara kecepatan putar kincir pada beban tertentu terhadap putaran kincir tanpa beban. Hal ini dilakukan karena secara teoritis efisiensi kincir air tergantung pada kecepatan putar relatif[4]. Perlu diperhatikan bahwa kecepatan putar relatif ini tergantung pada pembukaan pintu air dan beban terpasang. Untuk pembukaan pintu air tertentu, semakin besar beban terpasang, semakin kecil kecepatan putar relatif.

Gambar 7. Perkiraan efisiensi kincir air pada berbagai kecepatan putar relatif.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 7, dalam jangkauan kondisi operasi yang dapat diwujudkan pada saat pengujian, kecepatan putar relatif kincir berkisar antara 0,5 sampai dengan 1,0. Dalam rentang ini, secara umum efisiensi kincir meningkat jika kecepatan putar relatif turun, kecuali untuk kondisi pembukaan pintu air 30 cm dan 40 cm. Perlu diperhatikan bahwa kincir air yang digunakan pada prototipe PLTAS ini adalah kincir air tipe *undershot*, yang telah ditunjukkan secara teoritis[4] maupun secara eksperimental[5, 6] bahwa efisiensi maksimumnya terjadi pada kecepatan putar relatif sekitar 0,5. Kecenderungan perubahan efisiensi kincir pada prototipe PLTAS ini secara kualitatif sesuai dengan hasil penelitian di atas.

Perlu diperhatikan bahwa efisiensi kincir air yang mencapai nilai maksimum 25% masih jauh dari harapan. Secara teoritis ditunjukkan bahwa untuk sudu lurus, efisiensi maksimum bisa mencapai 30% pada kecepatan putar relatif 0,5[4]. Untuk sudu melengkung, misalnya kincir Zuppinger, efisiensinya mencapai 77%[5]. Kincir air pada prototipe PLTAS ini menggunakan sudu yang melengkung, tetapi efisiensinya masih di bawah nilai yang dapat dicapai kincir dengan sudu lurus. Dengan demikian, pengembangan kincir air yang lebih efisien sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi prototipe PLTAS.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan penelitian untuk mempelajari perubahan unjuk kerja prototipe PLTAS di Sungai Buduk, RT Mensibu, Dusun Nibung, Desa Sahan, Kecamatan Seluas, Kabupaten Bengkayang. Data hasil pengukuran kecepatan air, kecepatan putar poros kincir dan sistem transmisi, serta frekuensi, tegangan dan

arus listrik yang dihasilkan generator dianalisa untuk menentukan daya hidrolik, daya listrik, efisiensi sistem transmisi dan efisiensi total pembangkit. Dari hasil analisa dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- Daya yang dihasilkan PLTAS cenderung meningkat dengan penambahan pembukaan pintu air.
- Pada kondisi pembukaan pintu air tertentu, penambahan beban listrik pada generator akan meningkatkan daya listrik yang dihasilkan. Namun jika beban melewati nilai tertentu daya yang dihasilkan akan turun.
- Penurunan daya pada beban yang relatif besar berhubungan dengan penurunan efisiensi sistem transmisi.
- Prototipe PLTAS dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 1889 W dengan efisiensi kincir 25%, efisiensi sistem transmisi 80% dan efisiensi total pembangkit sekitar 15%.
- Diperlukan pengembangan kincir air yang lebih efisien untuk meningkatkan unjuk kerja PLTAS.

Daftar Pustaka

- [1] Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Statistik Ketenagalistrikan 2014, Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2015.
- [2] A. Sunarso, H. Sihombing, Agato dan I. G. Widodo, "Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Sungai Untuk Mendukung Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Kalimantan Barat," Laporan Akhir PENPRINAS MP3EI POLNEP, Pontianak, 2012.
- [3] A. Sunarso, H. Sihombing, Agato, I. G. Widodo dan D. Sulistiono, "Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Sungai Untuk Mendukung Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Kalimantan Barat," Laporan Akhir PENPRINAS MP3EI POLNEP, Pontianak, 2014.
- [4] M. Denny, "The efficiency of overshot and undershot waterwheels," *European Journal of Physics*, vol. 25, p. 193–202, 2004.
- [5] G. Muller and K. Kauppert, "Performance characteristics of water wheels," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 42, no. 5, p. 451–460, 2004.
- [6] S. Turnock, G. Muller, R. Nicholls-Lee, S. Denchfield, S. Hindley, R. Sheldermine and S. Stevens, "Development," in *Proceeding of European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, 2007.