

Rancang Bangun Turbin *Cross-flow* sebagai Penggerak Mula Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Piko-hidro Model Drum

Asep Neris Bachtiar^{1)*}, Ahmad Fauzi Pohan²⁾, Riko Ervil³⁾, Irwan Yusti⁴⁾

¹ Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang, Jl. Hamka No. 121 Padang, Indonesia.

² Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Andalas

asepnerisb@sttind.ac.id; ahmadfauzipohan@sci.unand.ac.id; rikopdg01@gmail.com; irwanyusti@gmail.com

ABSTRAK

Sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum menjadi solusi dalam mempercepat pengembangan dan penyebaran pembangkit listrik skala kecil di masyarakat. Penelitian ini berhasil merancang dan membangun turbin *Cross-flow* sebagai penggerak mula untuk sistem pembangkit listrik model drum dengan memanfaatkan potensi head 2,5 m dan debit air 20 L/s yang diproyeksikan mampu membangkitkan energi listrik 400 Watt. Hasil analisis diperoleh spesifikasi komponen turbin *Cross-flow* yaitu, elbow dengan penampang masuk sama dengan penampang keluar yaitu $l_e \times b_e = 120 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. Nozel dengan penampang masuk $l_n \times b_n = 120 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$. Katup, panjang (l_k) = 119 mm, diameter poros katup (d_{pk}) = 10 mm, dan panjang poros katup (l_{pk}) = 210 mm. Runner, diameter luar (D_o) = 80 mm, diameter dalam (D_i) = 54 mm.

Kata kunci: Turbin air, *Cross-flow*, Penggerak mula, Piko-hidro

ABSTRACT

The drum model pico-hydro power generation system is a solution to accelerate the development and deployment of small-scale power plants in the community. The research succeeded in designing and building a Cross-flow turbine as a prime mover for a drum model power generation system by utilizing a potential head of 2.5 m and a water flow of 20 L/s which is projected to be able to generate 400 Watts of electrical energy. The analysis results show that the Cross-flow turbine component specifications are, elbow with the inlet cross-section the same as the exit cross-section, namely $l_e \times b_e = 120 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. Nozzle with inlet cross-section $l_n \times b_n = 120 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$. Valve, length (l_k) = 119 mm, valve shaft diameter (d_{pk}) = 10 mm, and valve shaft length (l_{pk}) = 210 mm. Runner, outer diameter (D_o) = 80 mm, and inner diameter (D_i) = 54 mm.

Keywords: Water turbine, *Cross-flow*, Pico-hydro, Prime mover.

Copyright (c) 2024 Asep Neris Bachtiar, Ahmad Fauzi Pohan, Riko Ervil, Irwan Yusti

DOI: <https://doi.org/10.36275/whm2q157>

PENDAHULUAN

Energi terbarukan dari sumber alam di dunia cukup banyak tersedia dan dapat didayagunakan untuk memperoleh energi listrik (Carravetta, Fecarotta, & Ramos, 2021). Sumber energi terbarukan saat ini yang paling banyak dimanfaatkan adalah energi surya, angin, dan air (Ali et al., 2023). Indonesia yang memiliki ribuan pulau mempunyai potensi sumber daya energi air yang besar antara lain energi gelombang air laut, energi arus pasang-surut, dan energi potensial air (Bachtiar, A. N. et al., 2021). Inovasi teknologi energi terbarukan terus berkembang (Dhaubanjari et al., 2021). Berbagai solusi telah diuji cobakan dan ditawarkan untuk memenuhi kebutuhan energi, namun belum ada jaminan kualitas dan jaminan potensi kapasitas produksi energi, hal ini menjadi tantangan bagi para peneliti (Uchiyama, Honda, Okayama, & Degawa, 2016). Masyarakat di negara-negara berkembang menggunakan kompor

biomassa karena konstruksinya yang sederhana, namun kelemahannya adalah konsumsi bahan bakunya yang tinggi dan efisiensi termal yang masih rendah (Thyer & White, 2023). Pada tahun 2050 target pemanfaatan energi baru dan terbarukan sekitar 31%, hal ini disebabkan potensi energi panas bumi, air, dan bioenergi cukup besar (Verma, Gaba, & Bhowmick, 2017). Inovasi sistem pembangkit terus dilakukan oleh para peneliti diantaranya sistem pembangkit yang dibangun lebih sederhana, lebih kompak, tidak berisik dan pemanfaatannya serbaguna (Satou et al., 2023). Potensi energi air skala kecil (piko-hidro dan mikro-hidro) banyak tersedia di pedesaan, hal ini menarik pemerhati energi terbarukan untuk mengkajinya (Achebe, Okafor, & Obika, 2020). Pembangkit listrik tenaga air skala kecil ini mempunyai beberapa keunggulan sehingga pembangkit listrik tenaga air skala kecil ini menarik untuk diteliti dan dikembangkan (Chaulagain, Poudel, & Maharjan, 2023). Kontruksi bangunan pembangkit energi air skala kecil dapat lebih disederhanakan sehingga biaya investasi menjadi lebih murah. Keunggulan lain, terdapat tiga mesin fluida yang dapat difungsikan sebagai penggerak mula yaitu blower sentrifugal, pompa sentrifugal, dan kompresor sentrifugal (Bahtiar, A. N. et al., 2020). Perkembangan pembangkit skala kecil semakin populer karena persyaratan konstruksi yang lebih ringan, desain dan pengoperasiannya yang sederhana, pemasangan yang lebih mudah, dan dampak lingkungan yang lebih kecil (Chichkhede, Verma, Gaba, & Bhowmick, 2016). Bagi masyarakat di negara-negara berkembang, pembangkit listrik tenaga air skala kecil merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang menjadi pilihan ekonomis (Wu, Wu, Zuo, & Chen, 2022). Minat dan perhatian para peneliti dan masyarakat terhadap pengembangan pembangkit listrik tenaga mikro-hidro dan piko-hidro khususnya penggerak mula dengan head rendah dalam beberapa tahun terus meningkat (Guiamel & Lee, 2020). Penggunaan teknologi pemanfaatan sumber air *head* rendah saat ini sudah cukup berkembang karena kepraktisannya dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Turbin dengan head rendah adalah pilihan populer karena efisiensinya yang tinggi dan kemampuan beroperasi pada debit rendah (Kamal et al., 2023).

Pembangkit listrik tenaga mikro-hidro dan piko-hidro konvensional telah banyak dibangun di banyak pedesaan khususnya di Provinsi Sumatera Barat (Bachtiar, A. N., Pohan, Ervil, & Nofriadiman, 2023). Semua pembangkit konvensional tersebut dibangun dengan konstruksi permanen sehingga lahan yang dibutuhkan cukup luas. Bangunan sipil sistem pembangkit ini lebih dominan baik bahan yang digunakan maupun volume kerjanya saat pembangunan, sehingga biaya investasi dan pemeliharaan relatif lebih mahal. Dengan karakteristik seperti itu menjadi kendala untuk pengembangan dan penyebaran pembangkit mikro dan piko-hidro di masyarakat (Bachtiar, A. N., Pohan, Ervil, & Nofriadiman, 2023). Ini sebuah tantangan, maka melalui sebuah penelitian, peneliti berhasil membangun sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum yang dibangun dengan sistem *knock-down* dimana mulai dari saluran buang sampai saluran pengantar dapat diurai menjadi beberapa komponen, dengan demikian pelaksanaan pembangunan dan perakitan pembangkit model drum di lapangan relatif lebih cepat. Investasi pembangkit model drum relatif lebih murah sehingga menjadi solusi dalam mempercepat pengembangan dan penyebaran pembangkit mikro-hidro dan piko-hidro ke depan. Penggerak mula turbin *Cross-flow* adalah salah satu komponen pembangkit model drum yang sangat penting karena diantara komponen penggerak mula ini terdapat runner sebagai elemen bergerak yang membangkitkan daya dan torsi. Beban kerja penggerak mula ini sangat berat dibanding komponen lainnya dari pembangkit model drum. Dengan demikian, perencanaan penggerak mula turbin *Cross-flow* harus mempertimbangkan banyak aspek dan melibatkan banyak formula yang tepat.

METODE

2.1 Jenis penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen dengan tujuan untuk menghasilkan dokumen rancangan yang menjelaskan tahapan proses mendapatkan dimensi setiap komponen turbin *Cross-flow*. Selanjutnya, dokumen rancangan dijadikan pedoman untuk proses fabrikasi

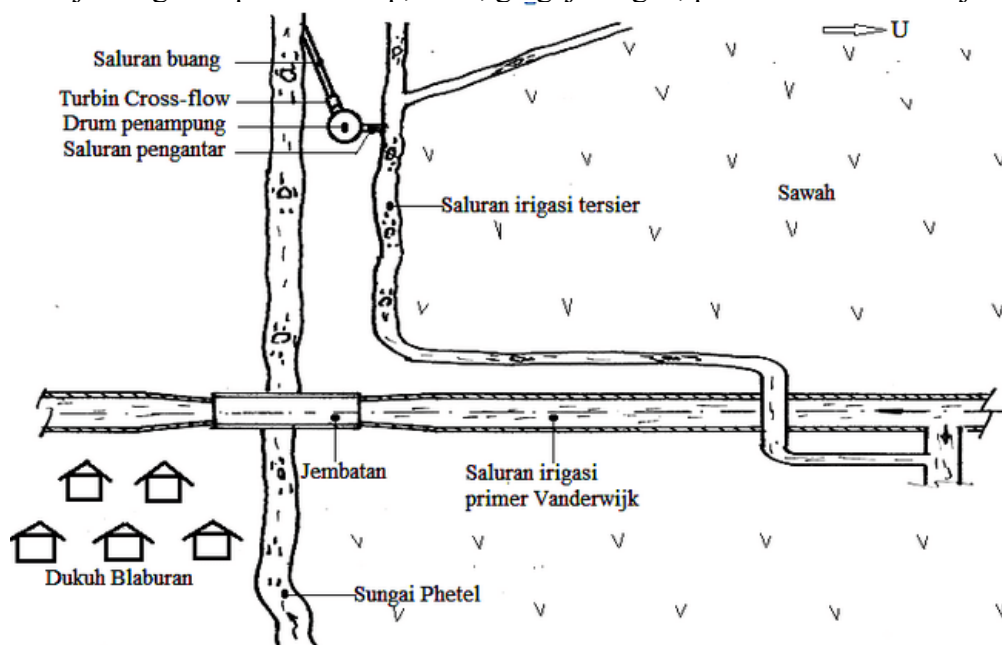
di Laboratorium Proses Produksi untuk menghasilkan unit turbin *Cross-flow* sekaligus merakitnya hingga terbentuk unit turbin yang siap diterapkan pada sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum. Variabel teknis yang terkait dengan proses rancang bangun turbin *Cross-flow* ini diantaranya ialah debit air masuk turbin (Q_t) dan *head* turbin (H_t).

2.2 Lokasi Penelitian

Proses fabrikasi komponen penggerak mula turbin *Cross-flow* dilaksanakan di Laboratorium Proses Produksi Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang dengan melibatkan mesin-mesin bengkel produksi dan peralatan kerja bangku. Sementara pengambilan data sebagai variabel yang diperlukan dalam penelitian ini dilakukan melalui kegiatan survey selama tiga hari di Dukuh Blaburan Bligo, Kecamatan Ngluwar, Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Alhamdulillah sebuah lokasi yang ideal berhasil tim peneliti temukan, lokasinya mudah dijangkau, tinggi jatuh atau *head*nya cukup tinggi sekitar 4 m padahal *head* yang direncanakan sekitar 2,5 m, dan debit air yang mengalir cukup melimpah. Saluran irigasi tersier yang menjadi sumber air pembangkit sumber airnya berasal dari Saluran Irigasi Primer Vanderwijk. Sekitar 150 meter dari hulu saluran irigasi tersier tersebut terdapat lubang pembilas, air bilasan tersebut jatuh ke dasar tebing. Saluran irigasi tersier mengalirkan air dengan debit rata-rata 40 L/s, penambahan dan pengurangan debit dapat dilakukan dengan cara membuka pintu pengatur pada saluran primer Vanderwijk. Air bilasan yang jatuh akan mengalir masuk ke Sungai Phetel yang ada di bawahnya sementara debit air saluran tersier selebihnya dimanfaatkan untuk pengairan sawah. Daerah sekitar lokasi pengujian pembangkit model drum berupa pesawahan, perladangan penduduk, dan sebahagian tanah darat lainnya berupa semak-semak, dan perkampungan penduduk seperti ditunjukkan Gambar 1.

2.3 Alat dan Mesin Fabrikasi

Turbin *Cross-flow* seperti ditunjukkan Gambar 2. terdiri dari 5 komponen utama yaitu elbow (1), katup (2), nozel (3), runner (4), dan tutup turbin (5). Alat yang digunakan dalam proses fabrikasi kelima komponen penggerak mula turbin *Cross-flow* tersebut diantaranya mesin las untuk menyambung bahan logam baja, mesin bor untuk membuat lubang baut-mur, mesin gerinda untuk membersihkan dan menghaluskan permukaan, mesin potong busur gas untuk memotong, membelah dan membentuk, mesin bubut untuk membentuk poros, dan peralatan kerja bangku seperti snai-tap, kikir, gergaji tangan, palu dan landasan baja.



Gambar 1. Lay-out di sekitar lokasi pengambilan data dan pengujian, Dukuh Blaburan, Desa Bligo, Kecamatan Ngluwar, Kabupaten Magelang

2.4 Bahan yang Digunakan Fabrikasi Turbin *Cross-flow*.

Bahan yang digunakan untuk fabrikasi kelima komponen penggerak mula turbin *Cross-flow* diantaranya,

1. Plat baja tebal 3 mm.

Plat baja tebal 3 mm adalah bahan yang dominan diperlukan untuk membangun turbin *Cross-flow*, diantaranya untuk membangun elbow, katup, nozel, rumah turbin, dan tutup turbin.

2. Plat baja tebal 5 mm.

Plat baja tebal 5 mm digunakan untuk membuat ring kiri dan ring kanan runner turbin dengan penampang bulat dengan ukuran diameter sebagai ukuran diameter runner.

3. Baja poros.

Baja poros diameter 1 inchi digunakan untuk membuat poros runner dan baja poros diameter 0,5 inchi digunakan untuk membuat poros katup dan poros pada sistem regulator.

4. Baja strip 3 x 25 mm.

Baja strip 3 x 25 mm difungsikan untuk membuat flange atau sambungan telinga antara rumah turbin dengan elbow dan antara rumah turbin dengan tutup turbin, flange yang terbentuk akan dilengkapi dengan lubang baut-mur.

5. Baja UNP

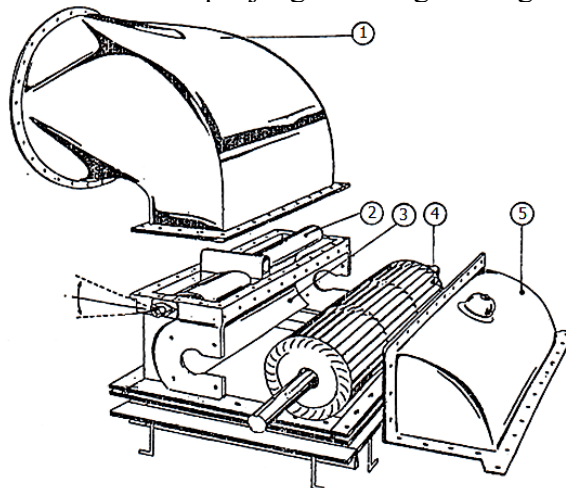
Baja UNP 50 x 38 x 5 mm digunakan untuk membuat dudukan frame atau kaki turbin yang langsung terhubung ke baut angker agar dudukan turbin menjadi mantap.

6. Baja pipa diameter 3 inchi.

Baja pipa diameter 3 unchi digunakan untuk membuat sudu-sudu runner turbin dengan cara membelahnya hingga dihasilkan 20 buah sudu-sudu. Panjang sudu-sudu disesuaikan dengan panjang runner turbin yang direncanakan sedang lebar sudu-sudu yang dibelah disesuaikan dengan hasil perencanaan segitiga kecepatan sebelumnya.

7. Perpak karet tebal 5 mm.

Perpak karet digunakan untuk mempererat sambungan antara flange sehingga dapat terhindari dari risiko bocor di sepanjang sambungan flange.



Gambar 2. Lima komponen utama turbin *Cross-flow*

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Dasar Perencanaan Komponen Turbin Cross-flow

Acuan awal yang menjadi dasar perencanaan komponen turbin *Cross-flow* adalah debit air masuk turbin (Q_t) = 20 L/s = 0,02 m³/s, *head* turbin (H_t) = 2,5 m dan daya bangkit turbin (N_t) = 400 Watt dengan asumsi efisiensi turbin 75%. Selanjutnya, komponen turbin *Cross-flow* yang akan dibahas melalui proses rancang bangun di dalam penelitian ini ialah lima komponen utamanya yaitu elbow, katup, nozel, runner, dan tutup turbin.

3.2 Perencanaan dan Fabrikasi Elbow

Elbow adalah komponen turbin yang berfungsi untuk mengarahkan air saat keluar dari drum penampung dan mengalir masuk ke dalam runner turbin. Untuk memudahkan penyambungan elbow dengan nozel, maka penampang keluar dari elbow dibuat segi empat yang disesuaikan dengan penampang masuk mulut nozel yang berpenampang segi empat pula seperti ditunjukkan Gambar 3.a.

3.2.1 Dimensi Elbow

Direncanakan luas penampang keluar elbow (A_{ek}) sama dengan luas penampang masuk nozel yang berbentuk segiempat (A_n), maka $A_{ek} = A_n = b_e \times l_e$. Direncanakan, kecepatan air saat melalui elbow adalah $V_e = 2,5$ m/s, maka luas penampang keluar elbow dapat dicari dengan rumus (1) (Alshami & Hussein, 2021),

$$A_{ek} = \frac{Q_t}{V_e} \quad (1)$$

Dari persamaan (1) diperoleh $A_{ek} = 0,0080 \text{ m}^2 = 80 \text{ cm}^2$, selanjutnya direncanakan panjang mulut keluar elbow (l_e) = 12 cm, maka lebar elbow (b_e) adalah $b_e = 80 \text{ cm}^2 / 12 \text{ cm} = 6,7 \text{ cm} = 7 \text{ cm}$. Untuk mengura ngi loses, direncanakan luas penampang masuk elbow (A_{em}) lebih besar dari luas penampang keluar elbow (A_{ek}) yaitu $A_{em} = 12 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} = 96 \text{ cm}^2$. Besar tekanan air yang bekerja pada elbow dapat diketahui dari persamaan (2) berikut (Alshami & Hussein, 2021),

$$P_e = \rho_{\text{air}} \times g \times H_e$$

(2)

Diketahui, P_e = tekanan statis air di dalam elbow, ρ_{air} = rapat massa air = 1000 kg/m³, g = percepatan gravitasi bumi = 9,81 m/s², H_e = beda tinggi permukaan air di dalam drum penampung dengan posisi elbow yakni $H_e = 2,5$ m. Dari persamaan (2) diperoleh $P_e = 22.540 \text{ kg m/s}^2 / \text{m}^2 = 22.540 \text{ N/m}^2$. Selanjutnya, dengan rumus (3) dapat ditentukan tebal dan bahan elbow yang ideal yakni (Alshami & Hussein, 2021),

$$t_e = \frac{P_e \times A_{ek}}{P_i \times K_e} \quad (3)$$

Diketahui, t_e = tebal elbow, P_e = tekanan air di dalam elbow = 22.540 N/m², P_i = tekanan kerja izin, untuk elbow dari bahan baja carbon sedang ST.37 yang memiliki kekuatan tekan 3.700 kg/cm², faktor keamanan untuk bahan baja carbon untuk beban tetap atau *steady load* (f_k) = 4, maka tekanan kerja izin adalah,

$$P_i = 3.700 \text{ N/cm}^2 / 4 = 925 \text{ N/cm}^2 = 9250000 \text{ N/m}^2,$$

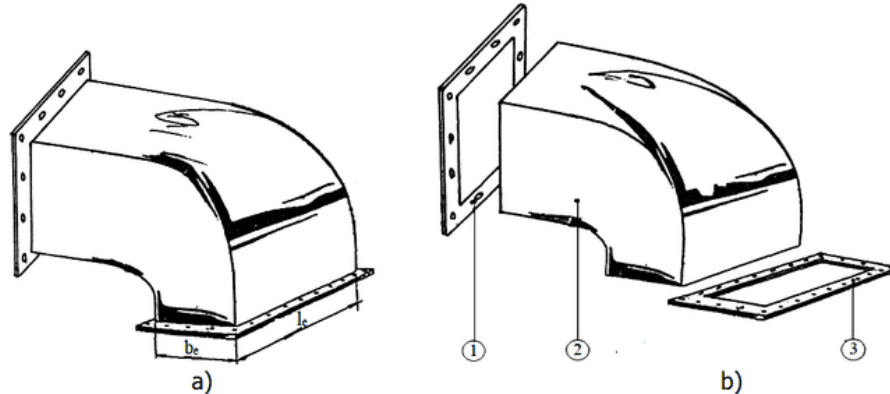
K_e = keliling penampang elbow = $(2 \times 12 \text{ cm}) + (2 \times 7 \text{ cm}) = 38 \text{ cm}$, maka,

$$t_e = (22.540 \text{ N/cm}^2 \times 80 \text{ cm}^2) / 9.250 \text{ N/cm}^2 \times 38 \text{ cm} = 0,054 \text{ cm} = 0,54 \text{ mm}.$$

Berhubung elbow direncanakan dapat digunakan untuk beberapa tahun ke depan dan mempertimbangkan kemudahan dalam proses pembuatannya khususnya pekerjaan pengelasan, maka direncanakan tebal bahan plat elbow (t_e) = 3 mm.

3.2.2 Bahan dan Proses Pembuatan Elbow

Elbow seperti ditunjukkan Gambar 3.b. terdiri dari tiga komponen yaitu flange masuk (1), pipa elbow (2) dan flange keluar (3). Pipa elbow dibuat dari baja carbon sedang ST 37 tebal 3 mm dan flange atau penyambung telinganyanya dibuat dari baja strip 1 inchi sebagaiudukan baut-mur pengikat untuk menghubungkan bagian elbow dengan casing turbin. Setelah ketiga elemen elbow itu dibuat, maka pekerjaan selanjutnya ialah merakitnya dengan menggunakan sambungan las listrik seperti hasilnya ditunjukkan Gambar 3.a.



Gambar 3. Dimensi elbow (a) dan tiga komponen rakitan elbow (b)

3.2.3 Tumbukan Air (*Water Hammer*)

Tumbukan air atau *water hammer* akan terkonsentrasi pada elbow, hal ini disebabkan perubahan kecepatan aliran air secara tiba-tiba. Prosesnya ialah pada awalnya air mempunyai energi kinetik, tiba-tiba berubah menjadi energi potensial. Energi potensial itu langsung menekan dinding elbow yang memungkinkan mengakibatkan deformasi atau perubahan bentuk elbow tersebut. *Water hammer* dapat terjadi pada saat,

1. Bila beban turun mendadak, maka governor akan mengurangi debit air yang masuk ke runner, akibatnya tekanan air dalam elbow akan naik.
2. Bila katup ditutup mendadak karena sesuatu hal misalnya terjadi kerusakan yang tiba-tiba pada turbin, maka aliran air dalam elbow mengalami kejutan dan tumbukan.

Besar kecilnya tumbukan air yang terjadi dapat diketahui dari persamaan (4) berikut (Alshami & Hussein, 2021),

$$P_w = \frac{V_a \times V_e}{g} \quad (4)$$

Diketahui, P_w = *water hammer* yang terjadi dengan satuan ft H₂O, V_e = kecepatan maksimum aliran air dalam elbow = 2,5 m/s = 8,36 ft/s, g = percepatan gravitasi bumi = 32,2 ft/s², sedangkan V_t = kecepatan dari tekanan gelombang dengan satuan inchi/s yang dapat diketahui dengan persamaan (5) yaitu (Alshami & Hussein, 2021),

$$V_t = \frac{4660}{\left(1 + \frac{D_p}{100 \times t_e}\right)^{1/2}} \quad (5)$$

Diketahui, D_p = diameter dalam elbow = $(A_e/0,785)^{1/2} = (80 \text{ cm}^2/0,785)^{1/2} = 10,1 \text{ cm} = 3,97$ inchi, t_e = tebal elbow = 0,54 mm = 0,0212 inchi. Dari persamaan (5) diperoleh $V_t = 4.277$ inchi/s = 356,5 ft/s, sehingga dengan persamaan (4) didapat tekanan *water hammer* yang terjadi adalah, $P_w = 92,55 \text{ ft (H}_2\text{O)} = 28 \text{ m (H}_2\text{O)}$. Konversi satuan menjelaskan bahwa $10 \text{ N/cm}^2 = 10,33 \text{ m (H}_2\text{O)}$, maka, $P_w = 27,15 \text{ N/cm}^2$.

Ternyata tekanan akibat tumbukan air yang terjadi lebih kecil dari tekanan kerja yang diizinkan yaitu $P_w < P_i$ atau $27,15 \text{ N/cm}^2 < 9.250 \text{ N/cm}^2$. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa elbow aman terhadap *water hammer* yang mungkin terjadi.

3.3 Nozel

Nozel seperti ditunjukkan Gambar 4.a. adalah komponen turbin yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan air saat masuk ke dalam runner. Disamping itu nozel berfungsi juga untuk mengarahkan aliran air agar energi kecepatan air fokus termanfaatkan dan tak ada energi kecepatan air yang hilang. Komponen turbin lain yang terkait erat dengan perencanaan nozel ialah katup, karena katup terpasang di dalam nozel dan porosnya menembus dinding nozel sehingga perencanaan katup nantinya harus disesuaikan dengan hasil perencanaan nozel. Gambar 4.b akan memperlihatkan bagaimana keterkaitan perencanaan nozel dengan katup.

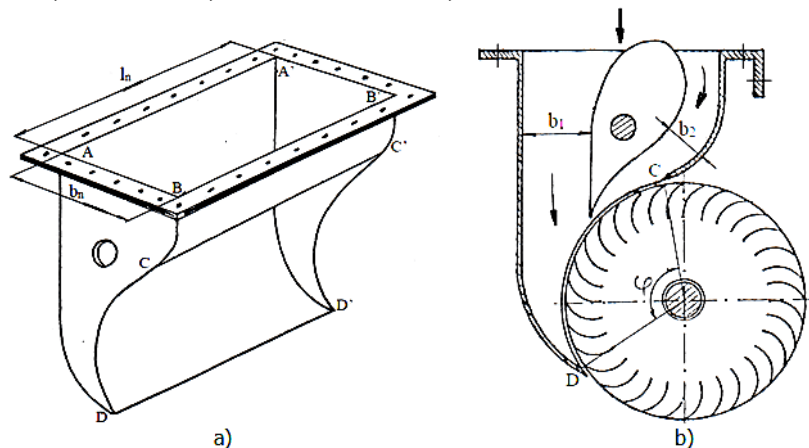
3.3.1 Dimensi Nozel

Untuk memudahkan pemahaman terhadap uraian berikut ini, perhatikan Gambar 4.a. Penampang segi empat A-A' – B'-B merupakan mulut masuk air ke dalam nozel. Ukuran penampang segi empat ini sama dengan ukuran penampang lubang keluar dari elbow, kedua penampang ini nantinya akan menyatu dengan sambungan baut-mur, dengan demikian maka, panjang A – A' = l_n = 12 cm dan lebar A – B = b_n = 7 cm. Sedangkan penampang C-C' – D'-D merupakan penampang keluar dari nozel, ukuran penampang ini adalah, panjang C-C' = D-D' = 12 cm. Busur C-D atau C'-D' merupakan keliling busur pemasukan air ke dalam runner, ukuran busur ini dapat dijelaskan pada uraian berikut nanti.

Gambar 4.b menjelaskan penampang samping dari nozel serta posisi kedua katup yang terpasang di dalamnya. Busur C-D adalah busur lubang air keluar dari nozel dan ϕ adalah sudut dari busur yang dimaksud. Besarnya sudut ϕ berkisar antara 90° sampai 120° , untuk turbin ini direncanakan $\phi = 110^\circ$. b_1 dan b_2 masing-masing adalah lebar laluan air antara dinding nozel dengan katup saat posisi katup tertutup penuh. Lebar b_1 dan b_2 ini masing-masing dapat diketahui melalui persamaan (6) berikut (Alshami & Hussein, 2021),

$$b_1 + b_2 = \frac{Q}{l_n \times V_{dn}} \quad (6)$$

Diketahui, Q = debit air yang keluar dari nozel = $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, l_n = panjang penampang masuk nozel = $0,12 \text{ m}$, V_n = kecepatan air saat melalui celah b_1 atau b_2 pada saat posisi katup terbuka penuh = $6,8 \text{ m/s}$, maka didapat $b_1 + b_2 = 0,024 \text{ m}$. Lebar laluan b_1 dan b_2 direncanakan tidak sama, yakni, $b_1 = 0,0124 \text{ m} = 1,24 \text{ cm}$ dan $b_2 = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$.

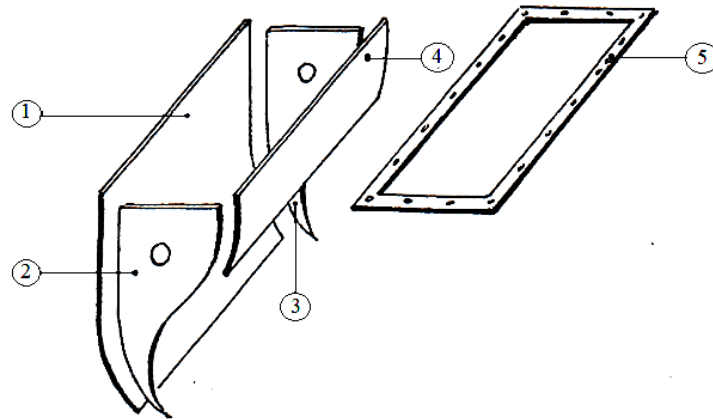


Gambar 4. Nozel (a) dan posisi katup di dalam nozel (b)

3.3.2 Bahan dan Pembuatan Nozel.

Nozel direncanakan dibuat dari bahan plat baja carbon sedang ST. 37 tebal 3 mm. Sebelum dirakit, nozel terdiri dari lima komponen berbentuk plat yang masing-masing memiliki ukuran panjang, lebar dan kelengkungan spesifik yang dibuat sedemikian rupa. Kelima komponen yang dimaksud itu ialah : komponen (1) dan (2) adalah dinding pinggir

nozél sedang komponen (3) dan (4) masing-masing adalah dinding depan dan belakang nozél dan komponen (5) adalah klem penyambung. Untuk menghasilkan komponen (1) dan (4) yang melengkung seperti ditunjukkan pada Gambar 5. dapat dikerjakan dengan cara diroll. Kelima elemen nozél tersebut selanjutnya dirakit menggunakan las listrik, ketelitian selama perakitan harus diperhatikan guna mendapatkan konstruksi nozél yang presisi dan simetris.



Gambar 5. Lima komponen rakitan nozél

3.4 Katup.

Katup berfungsi untuk mengatur debit air yang masuk ke dalam runner dan sekaligus berfungsi sebagai rem yakni memperlambat atau menghentikan sama sekali kerja turbin dengan cara merubah posisi katup melalui perantaraan regulator yang dioperasikan secara manual. Penampang depan katup menyerupai segi empat, tetapi penampang sampingnya mendekati bentuk lonjong yang salah satu ujungnya dibuat tirus seperti ditunjukkan Gambar 6.a. Konstruksi seperti ini berguna agar katup tidak menjadi penghalang terhadap aliran air yang akan masuk ke dalam runner, dan untuk itu pula permukaan katup dibuat serata dan sehalus mungkin. Agar pada saat posisi katup menutup penuh tidak mengalami kebocoran, maka sepanjang jalur A- A' dan B- B' dibuat serata mungkin agar kedua permukaan jalur benar-benar rapat ke dinding nozél.

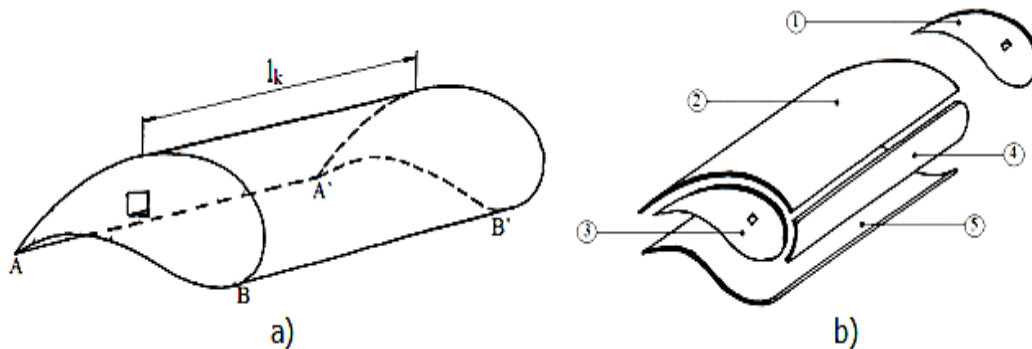
3.4.1 Ukuran Katup

Katup terpasang di dalam nozél, maka panjang katup (l_k) lebih pendek sekitar 1 mm dari panjang lubang masuk nozél yaitu, $l_k = 12 \text{ cm} - 0,1 \text{ cm} = 11,9 \text{ cm}$. Memperhatikan Gambar 6.b. terdapat tiga komponen nozél yang penampangnya melengkung yaitu komponen (2), (4), dan (5), maka dalam menentukan spesifikasi ukuran katup, terdapat tiga kelengkungan dengan jari-jari masing-masing R yang berbeda. Ukuran masing-masing jari-jari dapat diketahui melalui penggambaran skala yang teliti pada dua posisi katup yang berbeda yaitu membuka penuh 100% dan menutup penuh.

3.4.2 Bahan dan Pembuatan Katup.

Katup dibuat dari plat baja carbon sedang ST.37 tebal 3 mm, kecuali untuk kedua dinding sampingnya yang berbentuk lonjong yakni komponen (1) dan (3) dibuat dari plat baja tebal 5 mm. Konstruksi seperti ini diharapkan mampu menerima tekanan air dan dapat bertahan dari keausan akibat gesekan. Ada lima komponen pada proses perakitan katup, pada awalnya ada beberapa komponen tersebut yang harus dilengkungkan dengan busur yang spesifik. Kelima komponen tersebut ialah : komponen (1) dan (3) masing-masing adalah dinding samping kiri dan kanan katup, sedang komponen (2) dan (5) masing-masing adalah selimut atas dan selimut bawah katup, dan komponen (4) adalah punggung katup. Pada penampang komponen (1) dan (3) dibuat lubang segiempat yang merupakan lubang masuk sekaligus berfungsi sebagai pasak dari poros katup. Komponen (2) dan (5) dibentuk melalui

proses pengerollan hingga diperoleh bentuk yang spesifik dengan jari-jari kelengkungan tertentu. Apabila kelima elemen tersebut telah selesai dibentuk, maka pekerjaan selanjutnya ialah merakitnya menjadi satu komponen turbin yaitu katup, perakitan dilakukan dengan las listrik dan untuk melicinkan permukaan katup dapat dilakukan dengan gerinda tangan.



Gambar 6. Posisi ukuran panjang katup (a) dan lima komponen rakitan katup (b)

3.4.3 Ukuran poros Katup.

Pemasangan katup ke dalam nozel dirancang mudah, maka poros dengan katup dipasang tidak permanen artinya poros dapat dilepas dari katup. Agar poros ini dapat menggerakkan katup maka 10 mm dari tepi katup dibuat lubang berulir sebagaiudukan baut pasak M4 yang akan dipasang menembus poros sehingga antara poros dan katup jadi sejiwa. Diameter poros 10 mm panjang 210 mm dan salah satu ujungnya dihubungkan permanen dengan tuas penghubung ke regulator.

3.4.4 Bahan dan Pembuatan Poros Katup.

Poros katup dibuat dari bahan poros diameter 10 mm dari jenis baja carbon ST.45. Di pasaran untuk mendapatkan poros yang kuat dan dapat diproses mesin tidak terlalu sulit, karena bisa memanfaatkan poros-poros bekas permesinan. Proses pembuatan poros ini dilakukan dengan cara dibubut.

3.5 Runner.

Runner turbin *Cross-Flow* seperti ditunjukkan Gambar 7.a. terbentuk dari empat macam komponen yaitu poros (1), ring kiri (2), sudu-sudu (3), dan ring kanan (4). Tahapan proses perakitan turbin *Cross-flow* seperti ditunjukkan Gambar 7.b. dan setelah dirakit, runner turbin *Cross-flow* berbentuk sebuah tabung (*drum shape*) yang di sekelilingnya dipasang sejumlah sudu-sudu. Sudu-sudu tersebut berbentuk segi empat yang bagian lebarnya dilengkungkan dengan sudut busur tertentu. Kedua ujung sudu-sudu ini melekat pada ring kiri dan ring kanan dengan sambungan las, demikian juga hubungan antara poros dengan kedua ring disambungkan dengan konstruksi las.

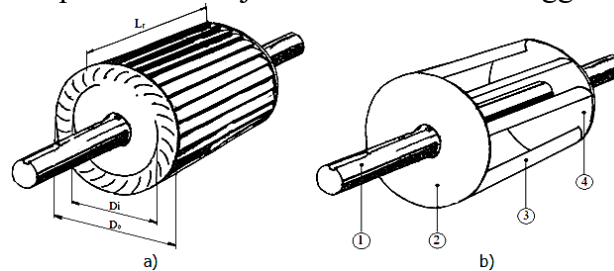
3.5.1 Ukuran Runner.

Telah direncanakan sebelumnya bahwa diameter luar runner $D_o = 80$ mm, direncanakan perbandingan diameter dalam dan diameter luar adalah $D_i/D_o = 2/3$, hal ini sesuai dengan perencanaan Pabrik Turbin Ossberger yang merumuskan bahwa dengan perbandingan diameter seperti di atas akan didapatkan efisiensi turbin terbaik, dengan demikian maka, $D_i = 2/3 \times 80 \text{ mm} = 54 \text{ mm}$. Runner dipasang diluar nozel dan panjang runner direncanakan 5 mm lebih panjang dari panjang penampang keluar nozel yaitu, $L_r = 12 \text{ cm} + 0,5 \text{ cm} = 12,5 \text{ cm}$. Dengan demikian perbandingan panjang runner dengan diameter luar runner adalah $L_r / D_o = 12,5 \text{ cm} / 8 \text{ cm} = 1,56$. Sedangkan perbandingan L_r / D_o yang dianjurkan maksimal sampai 3,5,

maka untuk perencanaan ini masih dalam batas toleransi dan runner aman untuk dilanjutkan ke tahap fabrikasi.

3.5.2 Bahan dan Pembuatan Runner.

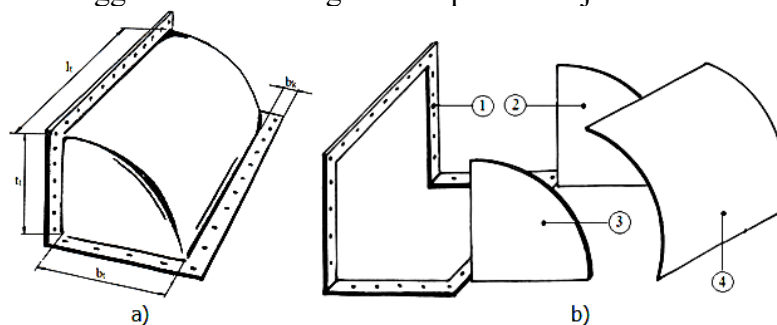
Runner dibentuk dari tiga macam komponen yang terlebih dahulu harus disiapkan yaitu poros, ring, dan sudu-sudu. Ring yang dibutuhkan berjumlah dua buah yang dibuat dari plat baja carbon sedang ST.37 tebal 5 mm dibentuk menggunakan busur api gas. Diameter luar ring tersebut 80 mm dan di tengah-tengahnya dibuat lubang berdiameter 20 mm yang merupakan lubang masuk dari poros runner. Sedangkan sudu-sudu dibuat dari pipa baja mutu tinggi seperti ST.50 yang diharapkan mampu dan tahan menerima tekanan dan tumbukan air. pipa baja yang digunakan tebal 2 mm berdiameter 2 inchi sesuai dengan hasil perencanaan busur sudu dengan sudut masuk $\theta = 15^\circ$. Pipa tersebut setelah dipotong sesuai dengan panjang runner yang direncanakan, lalu dibelah menggunakan busur api gas menjadi beberapa bagian bahan sudu. Jumlah sudu-sudu yang diperlukan berjumlah 32 buah sesuai dengan sudu-sudu yang dipakai untuk turbin *Cross-flow* tipe T₃ yaitu turbin *Cross-flow* putaran cepat. Pekerjaan selanjutnya adalah merakit semua komponen itu menjadi sebuah runner menggunakan las listrik.



Gambar 7. Runner turbin *Cross-flow* (a) dan empat macam komponen rakitan (b)

3.6 Tutup Turbin.

Tutup turbin berfungsi sebagai pelindung agar air tidak berserakan keluar dan juga berfungsi sebagai pengaman proses kerja runner dari kemungkinan gangguan dari luar. Ukuran panjang, lebar dan tinggi tutup turbin disesuaikan dengan konstruksi rumah turbin yang telah ada yakni, panjang (l_t) = 180 mm, tinggi (t_t) = 150 mm, lebar (b_t) = 150 mm, dan lebar flange (b_f) = 22 mm. Tutup turbin dibuat dari plat baja ST 37 tebal 3 mm kecuali klemnya dibuat dari baja strip 1 inchi lebar 22 mm. Tutup turbin seperti ditunjukkan Gambar 8.a. terdiri dari empat komponen, yaitu flange sambungan (1), dinding samping kanan tutup turbin (2), dinding samping kiri tutup turbin (3), dan selimut (4), dan perakitan keempat komponen tersebut dilakukan menggunakan sambungan las seperti ditunjukkan Gambar 8.b.

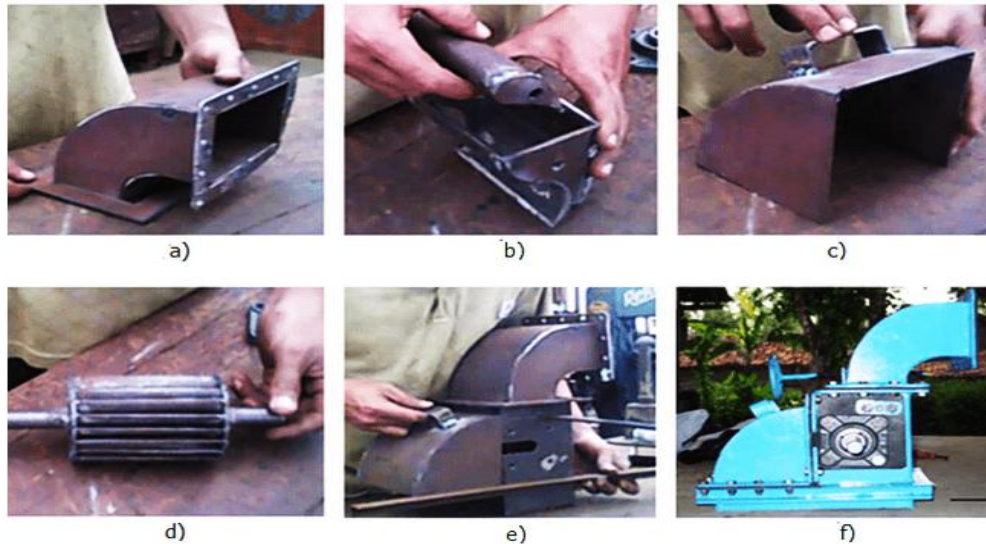


Gambar 8. Tutup turbin (a) dan rakitan empat komponen tutup turbin (b)

3.7 Proses Fabrikasi Turbin *Cross-flow*

Tahap selanjutnya setelah analisis perancangan selesai dilaksanakan ialah tahap fabrikasi turbin *Cross-flow* di laboratorium proses produksi seperti luarannya ditunjukkan Gambar 9.

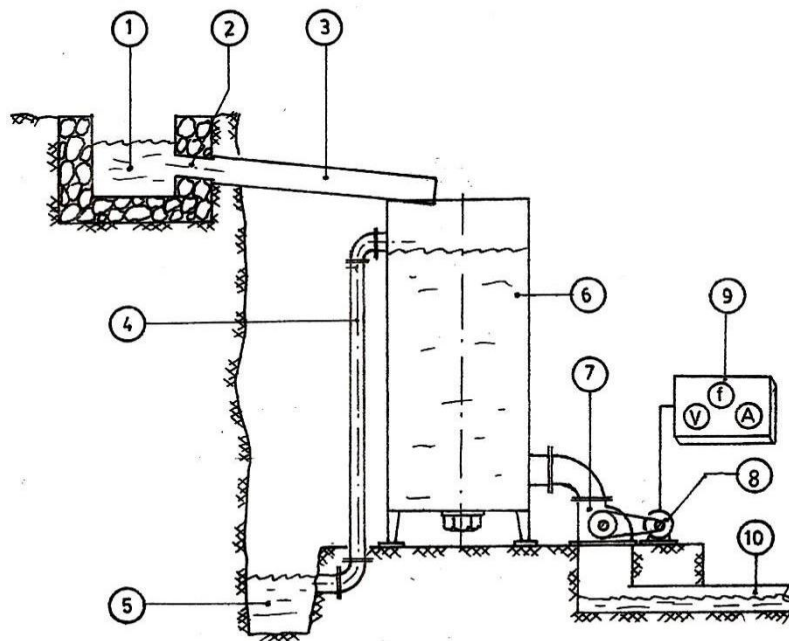
Turbin *Cross-flow* seperti ditunjukkan Gambar 1. terdiri dari 5 komponen utama yaitu elbow (1), katup (2), nozel (3), runner (4), dan tutup turbin (5). Setelah komponen turbin *Cross-flow* dibuat, maka tahap selanjutnya ialah proses perakitan turbin dan melengkapinya dengan sistem transmisi belt-puli dan generator dan langsung memasangkannya pada sistem pembangkit tenaga piko-hidro model drum seperti hasilnya ditunjukkan Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12. Tahap berikutnya ialah melakukan pengujian untuk mengidentifikasi kinerja efisiensi sistem pembangkit dan kinerja efisiensi penggerak mula turbin *Cross-flow*.



Gambar 9. Proses fabrikasi turbin *Cross-flow* : elbow (a), katup-nozel (b), tutup turbin (c), runner (d), uji keserasian (e), dan turbin *Cross-flow* siap dipasang (f)



Gambar 10. Turbin *Cross-flow* dilengkapi dengan sistem transmisi belt-puli dan generator



- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. Saluran irigasi | 6. Drum penampung |
| 2. Lubang pembilas | 7. Penggerak mula turbin |
| 3. Saluran masuk | 8. Generator |
| 4. Saluran impah | 9. Panel kontrol |
| 5. Selokan penampung | 10. Saluran buang |

Gambar 11. Skema sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum dengan turbin *Cross-flow* sebagai penggerak mulanya



Gambar 12. Turbin *Cross-flow* saat terpasang pada sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum di lapangan yang siap untuk diuji

SIMPULAN

Penelitian eksperimen ini menghasilkan dokumen rancangan komponen turbin *Cross-flow* dan dapat mewujudkannya melalui proses fabrikasi di laboratorium proses produksi. Acuan awal yang menjadi dasar perencanaan komponen turbin *Cross-flow* adalah debit air

masuk turbin (Q_t) = 20 L/s = 0,02 m³/s, *head* turbin (H_t) = 2,5 m, dan daya bangkit turbin (N_t) = 400 Watt dengan asumsi efisiensi turbin 75%. Informasi rancangan dan proses fabrikasi ini menjadi inspirasi bagi masyarakat untuk dapat membangun sendiri penggerak mula turbin *Cross-flow* di tempat tinggalnya masing masing untuk diterapkan pada sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro model drum sesuai dengan dukungan peralatan bengkel dan bahan material yang dimilikinya. Kontruksi turbin *Cross-flow* yang sederhana namun sangat strategis ini sangat berperan penting untuk kemandirian pemenuhan energi listrik masyarakat desa. Luaran dari penelitian eksperimen rancang bangun ini ialah informasi data spesifikasi komponen turbin *Cross-flow* yaitu elbow dengan penampang masuk sama dengan penampang keluar yaitu $l_e \times b_e = 120 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. Nozel dengan penampang masuk $l_n \times b_n = 120 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$. Katup, panjang (l_k) = 119 mm, diameter poros katup (d_{pk}) = 10 mm dan panjang poros katup (l_{pk}) = 210 mm. Runner, diameter luar (D_o) = 80 mm, diameter dalam (D_i) = 54 mm, dan panjang (L_r) = 125 mm. Tutup turbin, panjang (l_t) = 180 mm, tinggi (t_t) = 150 mm, lebar (b_t) = 150 mm, dan lebar flange (b_f) = 22 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- Achebe, C. H., Okafor, O. C., & Obika, E. N. (2020). Design and implementation of a crossflow turbine for Pico hydropower electricity generation. *Heliyon*, 6(7), e04523. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04523>
- Ali, A., Yuan, J., Javed, H., Si, Q., Fall, I., Ohiemi, I. E., ... Islam, R. ul. (2023). Small hydropower generation using pump as turbine; a smart solution for the development of Pakistan's energy. *Heliyon*, 9(4), e14993. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14993>
- Alshami, A. H., & Hussein, H. A. (2021). Feasibility analysis of mini hydropower and thermal power plants at Hindiya barrage in Iraq. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1513–1521. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.034>
- Bachtiar, A. N., Pohan, A. F., Ervil, R., & Nofriadiman. (2023). Feasibility Study on the Development of a Pico-hydro Power Plant for Village Electricity Using a Centrifugal Pump as Turbine (PAT) Prime Mover. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(5), 1871–1879. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.13.5.18221>
- Bachtiar, A. N., Pohan, A. F., Ervil, R., Nofriadiman, Santosa, Berd, I., & Dinata, U. G. S. (2021). Effect Of Geometric Differences Impeller Blades On Performance Blower-As-Turbine (Bat) On Pico-Hydro Scale. *International Journal of Renewable Energy Research*, 11(3), 1124–1135. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i3.11943.g8243>
- Bachtiar, A. N., Pohan, A. F., Yusti, I., Ervil, R., Santosa, Berd, I., & Dinata, U. G. S. (2020). Effect of head variations on performance four sizes of blowers as turbines (BAT). *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(1), 343–353. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v10i1.10482.g7879>
- Bachtiar, N., Pohan, A. F., Ervil, R., & Nofriadiman. (2023). Effect of Rotation and Constant Head Variation on Performance of Three Sizes of Pump-as-Turbine (PAT). *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(1). <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i1.13537.g8673>
- Carravetta, A., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2021). Corrigendum to “A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas” [Renewable Energy, 125, 2018, 1003–1014] (Renewable Energy (2018) 125 (1003–1014), (S0960148118302842), (10.1016/j.renene.2018.02.132)). *Renewable Energy*, 167, 966. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.017>

- Chaulagain, R. K., Poudel, L., & Maharjan, S. (2023). A review on non-conventional hydropower turbines and their selection for ultra-low-head applications. *Heliyon*, 9(7), e17753. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17753>
- Chichkhede, S., Verma, V., Gaba, V. K., & Bhowmick, S. (2016). A Simulation Based Study of Flow Velocities across Cross Flow Turbine at Different Nozzle Openings. *Procedia Technology*, 25(Raerest), 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.190>
- Dhaubanjhar, S., Lutz, A. F., Gernaat, D. E. H. J., Nepal, S., Smolenaars, W., Pradhananga, S., ... Immerzeel, W. W. (2021). A systematic framework for the assessment of sustainable hydropower potential in a river basin – The case of the upper Indus. *Science of the Total Environment*, 786, 147142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147142>
- Guiamel, I. A., & Lee, H. S. (2020). Potential hydropower estimation for the Mindanao River Basin in the Philippines based on watershed modelling using the soil and water assessment tool. *Energy Reports*, 6, 1010–1028. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.025>
- Manufacturing*, 35, 1172–1177. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.073>
- Kamal, M. M., Abbas, A., Alam, T., Gupta, N. K., Khargotra, R., & Singh, T. (2023). Hybrid cross-flow hydrokinetic turbine: Computational analysis for performance characteristics with helical Savonius blade angle of 135°. *Results in Engineering*, 20(August), 101610. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101610>
- Satou, E., Uchiyama, T., Takamure, K., Ikeda, T., Okayama, T., Miyazawa, T., & Tsunashima, D. (2023). Changes in power generation performance of an undershot cross-flow-type hydraulic turbine in an irrigation channel due to snow masses passing through the rotor. *Heliyon*, 9(10), e20833. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20833>
- Thyer, S., & White, T. (2023). Energy recovery in a commercial building using pico-hydropower turbines: An Australian case study. *Heliyon*, 9(6), e16709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16709>
- Uchiyama, T., Honda, S., Okayama, T., & Degawa, T. (2016). A Feasibility Study of Power Generation from Sewage Using a Hollowed Pico-Hydraulic Turbine. *Engineering*, 2(4), 510–517. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.007>
- Verma, V., Gaba, V. K., & Bhowmick, S. (2017). An Experimental Investigation of the Performance of Cross-flow Hydro Turbines. *Energy Procedia*, 141, 630–634. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.084>
- Wu, X., Wu, H. N., Zuo, L., & Chen, B. F. (2022). The effect of the blade number on a cross-flow hydrokinetic turbine. *IFAC-PapersOnLine*, 55(27), 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.489>