

Design of a 100 KW Kaplan Turbin: A Case Study on a Small-Scale Hydropower System

Rancangan Turbin Kaplan 100 kW: Studi kasus pada sistem PLTA skala kecil

Mohamad Saidiman¹⁾, Rimba Krisnha Dewi¹⁾ dan Toto Supriyono^{2*)}

¹⁾Teknik Industri, Universitas Teknologi Bandung, Bandung, 40235

Email: aturihza@gmail.com

Email: rimbakrisnha80@gmail.com

²⁾Teknik Mesin, Universitas Pasundan, Bandung, 40153

Email: supriyono.toto@unpas.ac.id

*) supriyono.toto@unpas.ac.id

Abstract: *Indonesia possesses abundant water energy resources that can be utilized for hydroelectric power generation. One of the technologies that can harness this potential is the water turbine. This study focuses on the design of a Kaplan-type water turbine with a design output power of 100 kW, operating with axial flow. The turbine design was carried out through analytical calculations, considering a minimum effective head of 5 meters and a minimum theoretical discharge of 4.25 m³/s. The blade profile used is Go 480, with a tip radius of 450 mm, a hub radius of 200 mm, and a blade weight of 91.72 N per unit. The analysis results indicate that the designed Kaplan turbine can theoretically generate a maximum power of 170 kW. The water flow on the blades generates a reaction force of 11,996 N due to centrifugal force and 1,073 N due to axial force, producing a torque of 775 Nm. The estimated construction cost required is Rp. 11,454,065,434, with a Return on Investment (ROI) of 11.05% and a payback period of approximately 9.1 years. Future research can focus on optimizing blade design by considering more efficient aerodynamic profile variations to enhance turbine performance. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and experimental prototype testing should be conducted to obtain the optimal blade geometry. Additionally, exploring alternative materials with greater strength and corrosion resistance, as well as conducting a more detailed ROI and payback period analysis, will further demonstrate the feasibility of this investment.*

Keywords: *Design, axial turbine, draft tube, Kaplan, hydraulic, micro-hydro*

Abstrak: Indonesia memiliki sumber daya energi air yang melimpah, yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga air. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan potensi ini adalah turbin air. Penelitian ini berfokus pada perancangan turbin air jenis Kaplan dengan keluar daya disain sebesar 100 kW, yang beroperasi dengan aliran aksial. Perancangan turbin dilakukan melalui perhitungan analitik dengan mempertimbangkan ketinggian efektif (head) minimal 5 meter dan debit teoritis minimal 4,25 m³/s. Profil sudu yang digunakan adalah Go 480, dengan radius tip 450 mm, radius hub 200 mm, dan berat setiap sudu sebesar 91,72 N. Hasil analisis menunjukkan bahwa turbin Kaplan yang dirancang dapat menghasilkan daya maksimum secara teoritis sebesar 170 kW. Aliran air pada sudu menimbulkan gaya reaksi sebesar 11.996 N akibat gaya sentrifugal dan 1.073 N akibat gaya aksial, menghasilkan torsi sebesar 775 Nm. Estimasi biaya pembangunan yang diperlukan sebesar Rp. 11.454.065.434, ROI sebesar 11.05 %, dan pay back periode sekitar 9.1 tahun. Penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan adalah fokus pada optimasi desain sudu dengan mempertimbangkan variasi profil aerodinamis yang lebih efisien untuk meningkatkan kinerja turbin, simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dan pengujian prototip secara eksperimental dilakukan untuk mendapatkan geometri sudu yang optimal, mengeksplorasi alternatif material dengan kekuatan dan ketahanan korosi yang lebih baik, perhitungan ROI dan PBP yang lebih detail untuk menunjukkan bahwa investasi ini layak dijalankan.

Kata Kunci: Desain, turbin aksial, draft tube, Kaplan, hidrolis, mikrohidro.

DOI: <http://doi.org/10.37577/sainteks.v7i01.864>

Received: 08, 2024. Accepted: 01, 2025.

Published: 03, 2025

1. PENDAHULUAN

Energi fosil memberikan dampak buruk pada lingkungan seperti polusi udara dan pemanasan global mendorong pemanfaatan sumber energi lain yang ramah lingkungan (Supriyono et al., 2024). Pemanfaatan energi air yang melimpah pada sebagian alam Indonesia dengan curah hujan yang cukup tinggi adalah salah satu usaha pengoptimalan sumber kekayaan alam disamping sebagai usaha pendiversifikasian sumber daya alam terutama sumber energi ramah lingkungan. Dalam era industrialisasi yang mengacu pada kesehatan lingkungan hidup, tidaklah berlebihan jika dikatakan bahwa energi listrik adalah yang paling aman dalam konteks ini. Turbin air adalah suatu perangkat utama dari bagian integral mesin konversi energi mekanik – listrik yang dalam perjalanannya terus mengalami pembaruan seiring dengan kemajuan teknologi yang menyertainya. Dengan jenis dan karakteristik masing-masing turbin yang beraneka ragam, memungkinkan untuk memanfaatkan sumber daya air dengan kondisi yang berbeda-beda. Studi mengenai mesin-mesin turbo telah dan sedang dilakukan oleh orang perorang atau Lembaga yang berlatar belakang ilmu Teknik. Konsekuensinya, suatu penelitian atau perencanaan terhadap suatu jenis mesin turbo melibatkan ilmu pengetahuan lain yang tidak hanya berlatar konversi energi. Proses produksi yang disertai ilmu pengetahuan bahan adalah salah satu pengetahuan pendukung untuk keberhasilan suatu perancangan produk teknologi disamping mekanika Teknik dan ilmu-ilmu lainnya yang saling melengkapi. Perancangan ini diharapkan dapat dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik yang sesuai dengan kondisi alam ataupun kebutuhan (Oktoyoki et al., 2023).

Turbin air memainkan peran penting dalam pembangkitan energi terbarukan dengan memanfaatkan energi kinetik dari aliran air untuk menghasilkan listrik. Seiring dengan meningkatnya permintaan sumber energi bersih, pentingnya turbin air dalam sektor energi terbarukan tidak dapat dipandang sebelah mata. Turbin-turbin ini tidak hanya menyediakan sumber energi yang berkelanjutan tetapi juga membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi dampak perubahan iklim. Selain itu, kemampuan untuk mengatur keluaran daya dari turbin air menjadikannya komponen penting dalam memastikan pasokan energi yang stabil dan dapat diandalkan bagi komunitas di seluruh dunia. Turbin air memainkan peran penting dalam menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan kekuatan air untuk menghasilkan listrik. Dengan kemajuan teknologi, turbin-turbin ini telah menjadi lebih efisien dan hemat biaya, menjadikannya pilihan yang layak untuk memenuhi permintaan energi yang semakin meningkat dari masyarakat modern. Dengan berinvestasi dalam teknologi turbin air, berupaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan beralih ke sistem energi yang lebih bersih dan ramah lingkungan untuk generasi mendatang (Fajarisman & Supriyono, 2018; Kusnadi et al., 2018; Mulqi et al., 2019; Rusdiansyah & Supriyono, 2012).

Salah satu jenis turbin air yang paling umum digunakan adalah turbin Kaplan, yang dikenal karena efisiensi tinggi dan kemampuannya beradaptasi dengan kondisi aliran air yang bervariasi. Penelitian tentang turbin air Kaplan telah berfokus pada perbaikan desainnya untuk memaksimalkan keluaran energi dan meminimalkan dampak lingkungan. Studi-studi juga telah meneliti potensi untuk mengintegrasikan turbin-turbin ini ke dalam pembangkit listrik tenaga air yang sudah ada untuk meningkatkan efisiensi keseluruhannya. Selain itu, para peneliti telah mengeksplorasi penggunaan turbin Kaplan dalam proyek pembangkit listrik tenaga air skala kecil untuk menyediakan solusi energi bersih bagi komunitas terpencil atau yang tidak terhubung dengan jaringan listrik. Secara keseluruhan, penelitian tentang turbin air Kaplan menyoroti potensi mereka untuk berperan penting dalam transisi menuju masa depan energi yang lebih berkelanjutan. Dengan memanfaatkan energi aliran air, turbin Kaplan menawarkan sumber energi yang dapat diandalkan dan terbarukan yang dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Seiring dengan kemajuan teknologi, turbin-turbin ini semakin efisien dan

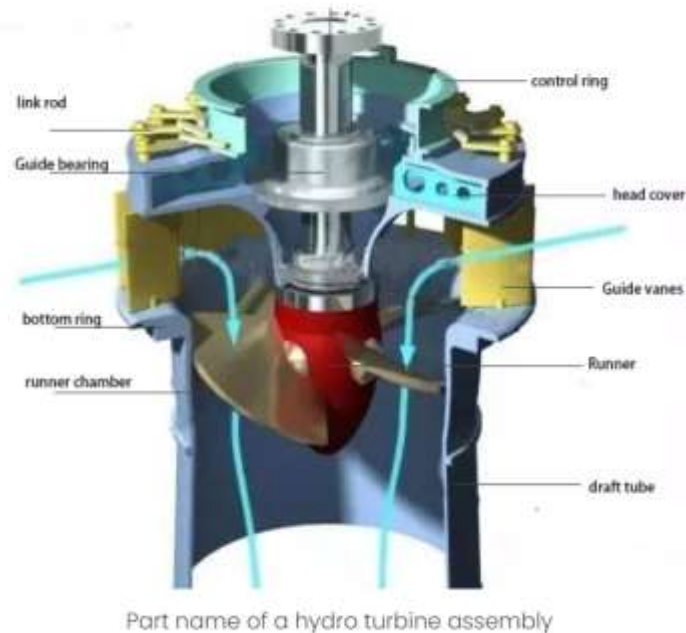
hemat biaya, menjadikannya pilihan yang menarik untuk pembangkit listrik. Dengan penelitian dan pengembangan lebih lanjut, turbin air Kaplan memiliki potensi untuk merevolusi cara memproduksi listrik dan membuka jalan menuju masa depan yang lebih hijau dan berkelanjutan (Khalid Mohammed Ridha et al., 2023; Rusdiansyah & Supriyono, 2012).

Turbin air Kaplan ditemukan oleh insinyur Austria Viktor Kaplan pada awal abad ke-20. Awalnya dirancang untuk meningkatkan efisiensi turbin air di pembangkit listrik tenaga air, turbin Kaplan dengan cepat mendapatkan popularitas karena kemampuannya untuk beroperasi dalam berbagai kondisi aliran air. Selama bertahun-tahun, kemajuan dalam material dan desain telah mengarah pada pengembangan turbin Kaplan modern yang bahkan lebih efisien dan andal. Saat ini, turbin ini banyak digunakan di pembangkit listrik tenaga air di seluruh dunia, menyediakan energi bersih dan terbarukan bagi jutaan orang. Selain efisiensinya, turbin Kaplan modern juga dirancang untuk ramah lingkungan, dengan dampak minimal terhadap kehidupan akuatik dan ekosistem. Fleksibilitas turbin ini memungkinkan pembangkit listrik di berbagai lokasi, mulai dari bendungan skala besar hingga instalasi berbasis sungai yang lebih kecil. Dengan semakin meningkatnya fokus pada sumber energi berkelanjutan, turbin Kaplan terus memainkan peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi dunia sambil mengurangi emisi karbon dan melestarikan sumber daya alam. Warisan sebagai teknologi perintis di bidang pembangkit listrik tenaga air tidak dapat disangkal, dan dampaknya terhadap lanskap energi global kemungkinan bertahan selama bertahun-tahun mendatang (Jakfar & Fatah, 2022; Rajab et al., 2024)

Turbin air Kaplan adalah jenis turbin air yang dirancang untuk aplikasi dengan head rendah, biasanya berkisar antara 5 hingga 70 meter. Turbin ini dikenal karena sudunya yang dapat disesuaikan, yang memungkinkan efisiensi optimal pada berbagai laju aliran. Desain turbin Kaplan memungkinkan tingkat kontrol yang tinggi atas keluaran daya, menjadikannya pilihan populer untuk pembangkit listrik tenaga air. Selain itu, turbin Kaplan sering digunakan dalam proyek run-of-river di mana aliran airnya konsisten. Suduh yang dapat disesuaikan pada turbin Kaplan mampu mengubah sudut kemiringannya untuk beradaptasi dengan kondisi aliran yang berbeda, memastikan bahwa turbin beroperasi pada efisiensi puncak terlepas dari laju aliran air. Fleksibilitas ini adalah keuntungan utama dari turbin Kaplan dibandingkan dengan jenis turbin air lainnya. Kemampuan untuk mengontrol keluaran daya turbin juga membuatnya sangat cocok untuk stabilisasi jaringan dan aplikasi penyesuaian beban, di mana permintaan listrik berfluktuasi sepanjang hari. Secara keseluruhan, turbin air Kaplan adalah pilihan yang serbaguna dan efisien untuk memanfaatkan kekuatan aliran air dalam produksi energi bersih (Khalid Mohammed Ridha et al., 2023).

Gambar 1 memperlihatkan turbin Kaplan. Turbin Kaplan beroperasi berdasarkan prinsip mengubah energi kinetik dari aliran air menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi listrik melalui generator. Proses ini sangat efisien, dengan kemampuan untuk memanfaatkan energi dari laju aliran air yang rendah hingga tinggi. Sudu turbin dapat disesuaikan, memungkinkan kinerja optimal dalam berbagai kondisi dan memaksimalkan keluaran energi. Selain itu, desain turbin Kaplan meminimalkan dampak lingkungan dengan mengurangi angka kematian ikan dan menjaga kualitas air di ekosistem sekitarnya. Secara keseluruhan, prinsip-prinsip operasi turbin Kaplan menyoroti efektivitas dan keberlanjutannya sebagai sumber energi terbarukan. Dengan kemampuannya untuk secara efisien mengubah energi kinetik dari aliran air menjadi listrik, turbin Kaplan telah menjadi pilihan populer untuk pembangkit listrik tenaga air. Sudunya yang dapat disesuaikan membuatnya dapat beradaptasi dengan berbagai laju aliran air, memastikan kinerja yang konsisten dan memaksimalkan produksi energi. Selain itu, desain ramah lingkungannya membantu melestarikan kehidupan akuatik lokal dan menjaga keseimbangan ekologi keseluruhan dari lingkungan sekitarnya. Sebagai kesimpulan, turbin Kaplan merupakan contoh perpaduan yang sukses antara efektivitas dan keberlanjutan dalam teknologi energi terbarukan. Aplikasi di pembangkit listrik tenaga air mencakup penggunaan turbin Kaplan baik dalam proyek skala kecil maupun besar. Turbin ini dapat ditemukan di fasilitas run-of-the-river, di mana aliran alami sungai dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, serta di pembangkit berbasis reservoir, di mana air disimpan dan dilepaskan untuk menghasilkan tenaga selama

periode permintaan puncak. Versatilitas dan efisiensi turbin Kaplan menjadikannya aset berharga dalam transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian dan pengembangan yang sedang berlangsung difokuskan pada peningkatan lebih lanjut kinerja dan keandalan turbin ini, memastikan relevansinya yang berkelanjutan di bidang teknologi energi terbarukan yang berkembang pesat (Khalid Mohammed Ridha et al., 2023; Wahyudi et al., 2024).



Gambar 1. Turbin Kaplan (Khalid Mohammed Ridha et al., 2023)

Pemilihan jenis turbin yang sesuai dengan kondisi aliran sungai menjadi faktor kunci dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air. Turbin Kaplan adalah pilihan yang tepat untuk area dengan head rendah hingga sedang dan debit air tinggi karena kemampuannya untuk mengatasi aliran aksial dengan efisiensi tinggi. Namun, ada beberapa tantangan dalam penerapannya, seperti mengoptimalkan desain sudu turbin untuk memaksimalkan kinerja dan memilih bahan yang tepat untuk meningkatkan daya tahan turbin terhadap korosi dan keausan. Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas desain dan analisis turbin Kaplan dalam skenario operasional yang berbeda. Studi yang dilakukan oleh Wahyudi et al. (2024) menunjukkan bahwa adanya pengaruh variasi sudu yaitu penambahan berat pada sudu terhadap peningkatan daya dan torsi, namun jumlah sudu tidak selalu mempengaruhi peningkatan daya dan torsi karena setiap peningkatan sudu perlu menyesuaikan besarnya debit air yang digunakan sebagai potensi penghasil energy mekanik. Selanjutnya, penelitian Alam et al. (2024) menyoroti pengaruh variasi sudu datar, lengkung dan Sudu L terhadap kinerja turbin reaksi aliran Vortex. Namun, penelitian untuk mengoptimalkan desain sudu yang disesuaikan dengan aliran sungai lokal dan memilih bahan yang efisien dan tahan lama untuk sudu turbin masih menghadapi keterbatasan.

Tabel 1 di bawah ini memperlihatkan spesifikasi turbin yang dirancang. Turbin dirancang menerima aliran air dari ketinggian 5 meter, putaran turbin sebesar 600 rpm dan keluaran daya yang diperlukan adalah 100 kW. Dari spesifikasi tersebut diperoleh rumusan masalah yang berkaitan dengan perencanaan turbin ini, yaitu 1) bagaimana tahapan perancangan turbin untuk mendapatkan dimensi turbin yang menghasilkan daya sebesar 100 kW, 2) bagaimana bentuk sudu/bilah turbin, 3) berapa debit aliran air yang diperlukan untuk menghasilkan keluaran daya turbin di atas 100 kW.

Tujuan penelitian ini adalah menentukan dimensi turbin untuk menghasilkan daya sekitar 100 kW, jumlah aliran air yang diperlukan, bentuk dan jumlah sudu turbin. Selain itu juga dalam penelitian ini dianalisis kekuatan sudu turbin dan teknoekonominya. Mengoptimalkan sudut kemiringan sudu turbin Kaplan untuk memaksimalkan efisiensi konversi energi dalam berbagai kondisi aliran air. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan untuk memberikan pemahaman baru mengenai performa turbin air jenis Kaplan pada kondisi debit rendah, yang selama ini belum dieksplorasi secara komprehensif. Menyediakan data disain mengenai penggunaan material pada sudu turbin Kaplan, yang dapat menjadi referensi bagi pengembangan material turbin di masa depan. Menghasilkan desain sudu yang lebih efisien dan adaptif terhadap perubahan debit air, yang dapat diimplementasikan pada proyek-proyek pembangkit listrik tenaga air dengan turbin jenis Kaplan.

Tabel 1. Spesifikasi turbin

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Head total	H	5	meter
Kecepatan putar	N	600	rpm
Daya turbin	N	100	kW

2. METODOLOGI

Tahapan perencanaan turbin Kaplan secara skematis diperlihatkan pada diagram alir pada Gambar 2. Diagram alir yang menggambarkan proses perancangan dan analisis turbin kaplan dari awal hingga akhir. Perancangan dimulai dari mempelajari spesifikasi yang diperlukan, yaitu keluaran daya dan putaran turbin yang diinginkan, serta energi air yang tersedia yang dikenal dengan head air. Parameter ini sangat penting karena mempengaruhi desain keseluruhan turbin. Tahap berikutnya adalah menentukan putaran spesifik (n_s) yang diperlukan untuk menentukan jenis turbinnya. Selanjutnya menentukan kecepatan tangensial air masuk sudu turbin. Kemudian dilanjutkan dengan menentukan diameter sudu (D), analisis kecepatan sudu, profil sudu, daya turbin (P_t), efisiensi turbin, analisis kekuatan sudu, dan draft tube, yang berfungsi mengarahkan air keluar dari turbin dengan kehilangan energi minimal. Tahap terakhir setelah spesifikasi turbin diperoleh adalah analisis ekonomi dan teknis untuk memastikan bahwa desain turbin tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga layak secara ekonomi. Semua perhitungan dilakukan menggunakan aplikasi Excell. Luaran dari perancangan ini adalah rangkuman dari spesifikasi turbin, Kekuatan turbin, dan Analisis Finansial untuk memastikan apakah proyek ini layak dari segi biaya dan keuntungan.

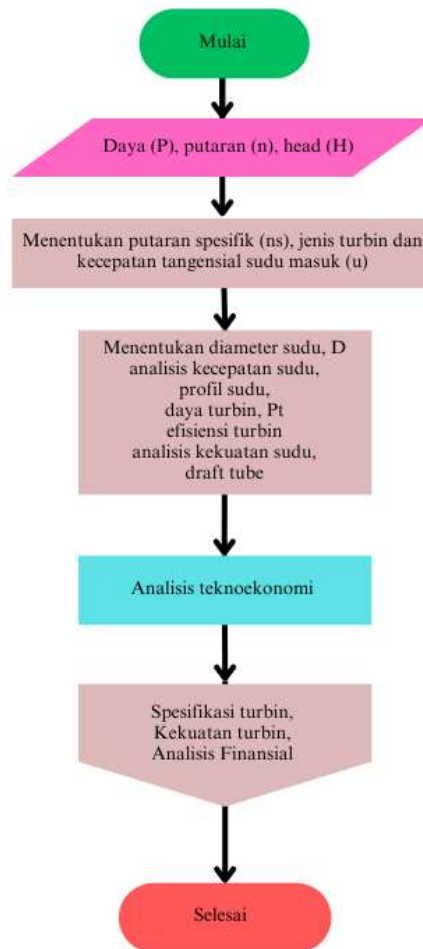
2.1 Kecepatan spesifik

Suatu parameter yang digunakan untuk menentukan jenis turbin adalah putaran spesifik (specific speed). Kecepatan spesifik didefinisikan sebagai kecepatan turbin homolog yang mengembangkan satu metrik tenaga kuda (horse power) pada head satu meter. Kecepatan spesifik dapat ditentukan menggunakan persamaan 1 (Oo, 2019):

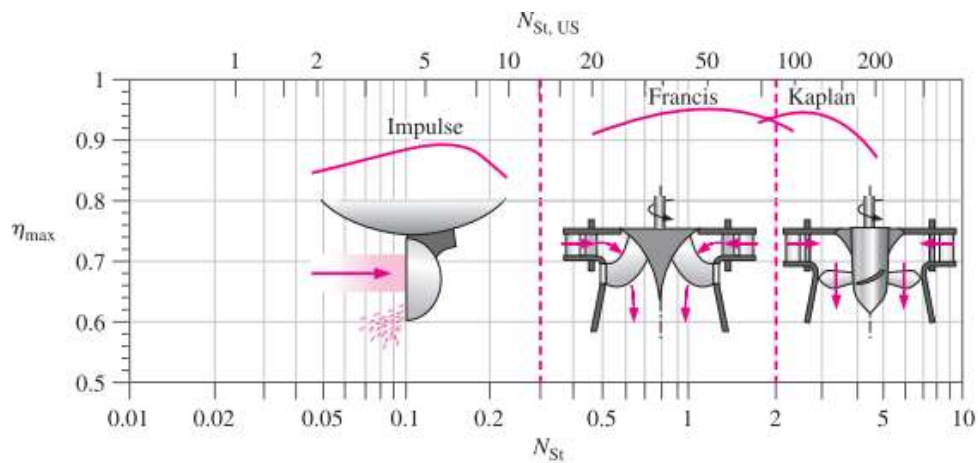
$$n_s = \frac{n P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad 1$$

Di mana: n_s = kecepatan spesifik, n (rpm) = putaran turbin (perencanaan), P = daya turbin (W), dan H = head yang tersedia (m). Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara putaran spesifik, jenis turbin dan efisiensinya. Sumbu horisontal atas menunjukkan putaran spesifik untuk satuan U.S atau British ($N_{st US}$). Pemilihan jenis turbin secara praktis dapat menggunakan gambar 4. Dari persamaan 1, Gambar 3 dan Gambar 4 dapat disimpulkan bahwa turbin Kaplan dapat

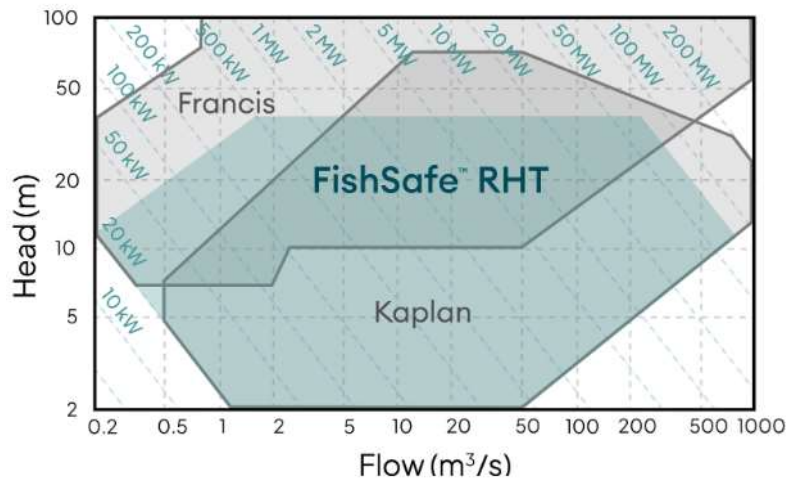
digunakan untuk head rendah, turbin Francis untuk head menengah, dan turbin Pelton untuk head tinggi.



Gambar 2. Diagram alir tahapan perancangan



Gambar 3. Putaran spesifik dan efisiensi turbin (Cengel & Cimbala, 2006)



Gambar 4. Chart pemilihan jenis turbin (Natel, 2024)

2.2 Persamaan dasar mesin turbo

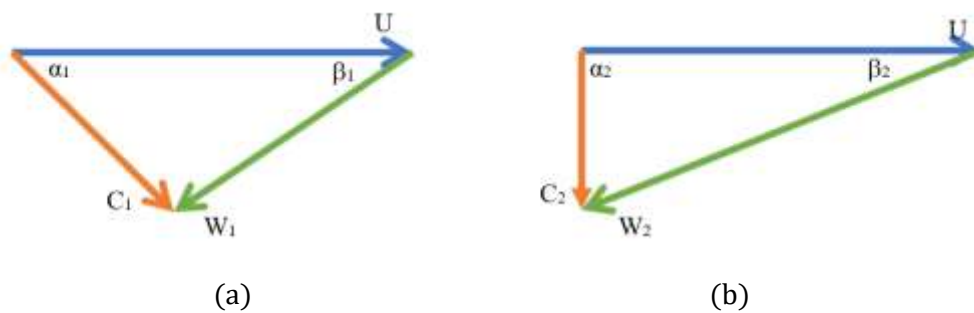
Sebuah persamaan dasar yang melukiskan dinamika dari fluida mesin turbo adalah persamaan momentum. Persamaan ini menyatakan bahwa jumlah torsi luar yang bekerja pada fluida pada suatu volume atur adalah sama dengan besar perubahan momentum angularnya. Pada aliran steady, torsi total volume atur sebuah mesin turbo dapat ditentukan menggunakan persamaan 2 berikut ini:

$$T_s = \rho Q(r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1}) \quad 2$$

Di mana: r = jari-jari sudu (m), V_n = kecepatan normal air (m/s), V_t = kecepatan tangensial air (m/s), ρ = massa jenis fluida (kg/m^3), Q = debit air (m^3/s), T_s = torsi poros (N.m).

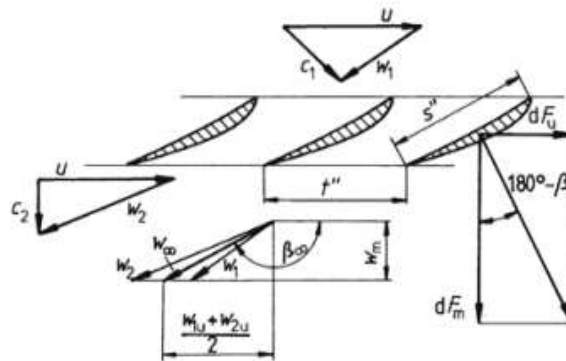
2.3 Segi Tiga Kecepatan

Dalam turbin air aliran aksial, aliran air masuk dan keluar dari turbin dalam arah aksial. Dalam barisan sudu yang berputar, perubahan kecepatan tangensial air menyebabkan perpindahan energi dari air ke rotor. Barisan sudu tetap menyebabkan perubahan arah aliran air agar memiliki komponen kecepatan mutlak air masuk sudu secara aksial dan tangensial. Air masuk sudu pengarah membentuk sudut α_1 terhadap arah tangensial, sedangkan air yang keluar dari sudu gerak membentuk sudut α_2 terhadap arah tangensialnya. Gambar 5 memperlihatkan segitiga kecepatan pada seksi masuk dan keluar. Sudut β_1 dan β_2 memperlihatkan sudut kecepatan relatif air masuk dan keluar sudu.



Gambar 5. Segi tiga kecepatan: (a) seksi masuk, dan (b) seksi keluar

Gambar 6 memperlihatkan gaya-gaya pada sudu yang ditimbulkan oleh aliran air di sekitar sudu. Tergambarkan sudu gerak berada dalam air yang bergerak relatif terhadapnya, dengan kecepatan relatif W tertentu dan stasioner. Pada sudu gerak bekerja dua macam gaya, yaitu gaya angkat, dengan arah gerak tegak lurus arah kecepatan aliran relatif, gaya gesek, dengan arah sejajar arah kecepatan aliran relatif. Gaya-gaya ini dapat diproyeksikan ke sumbu tangensial dan aksial, sehingga diperoleh gaya-gaya pada sudu gerak dalam arah tangensial (dF_u) dan aksial (dF_m). Gaya tangensial merupakan gaya yang dimanfaatkan untuk menggerakkan generator dan gaya aksial menjadi beban bantalan.



Gambar 6. Gaya angkat dan gaya tahan pada sudu (Cho Khaing et al., 2019)

Besarnya gaya tangensial dan gaya aksial dapat ditentukan menggunakan persamaan 3 dan 4 berikut ini:

$$dF_u = C_l \frac{\rho W_\infty^2}{2} L \cdot b \quad 3$$

$$dF_m = C_p \frac{\rho W_\infty^2}{2} L \cdot b \quad 4$$

Dimana: C_L = koefisien gaya angkat, C_p = koefisien gaya gesek, ρ = massa jenis fluida (kg/m^3), W_∞ = kecepatan relative aliran (m/s), L = Panjang sudu (m), dan b = lebar sudu (m).

2.4 Perhitungan kekuatan

Momen inertia

$$I_x = \sum_i^n A_i \cdot Y_i^2$$

$$I_y = \sum_i^n A_i \cdot X_i^2$$

Tegangan Normal

$$\sigma_i = \frac{F_a \cdot l_a \cdot Y_i}{I_x}$$

Tegangan Geser

$$\tau_{xy} = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$$

Tegangan Maksimum

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Analisa Bahan

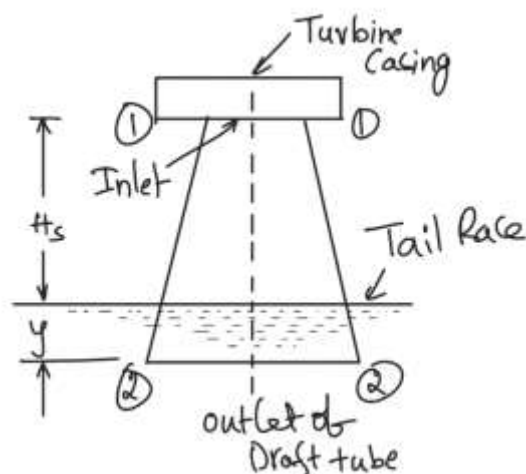
$$\sigma_{bol} = \frac{\sigma_B}{S_N \cdot c} \cdot 75\%$$

2.5 Draft tube

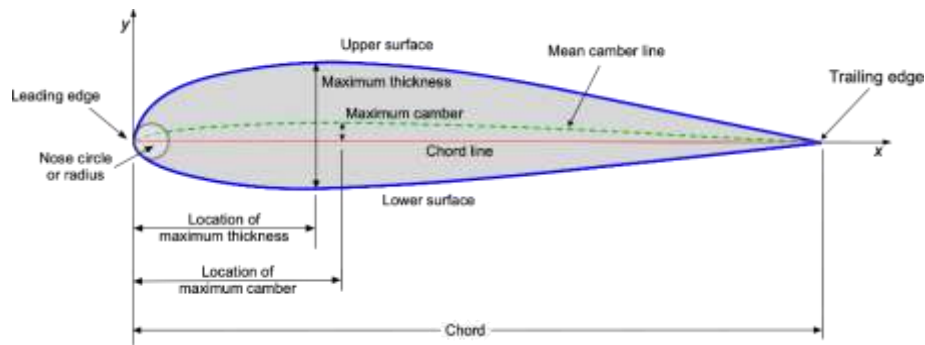
Draft tube adalah bagian integral dari pada turbin reaksi, dan kriteria disainnya bergantung pada pabrik pembuatnya. Draft tube mempunyai dua fungsi. Pertama adalah untuk dapat menempatkan posisi turbin sedemikian rupa terhadap posisi ketinggian air buangan tanpa kehilangan head-nya. Dengan memakai draft tube tidak akan terjadi aliran air yang terpecah dari hulu hingga hilir sistem turbin. Fungsi yang kedua dari draft tube adalah untuk mengurangi head loss pada bagian sambungan saluran untuk sedemikian rupa meningkatkan head netto yang mungkin terjadi pada runner turbin. Hal ini disempurnakan dengan memakai tube bercabang yang berangsur-angsur mengecil (Admin, 2023; Agarwal et al., 2017).

Gambar 7 memperlihatkan contoh dari sebuah draft tube. Conical draft tube lebih efisien dibandingkan dengan jenis draft tube lainnya. melingkar dan outlet persegi panjang membutuhkan lebih sedikit ruang dibandingkan dengan tabung draft lainnya (Sundar, 2024) . Conical draft tube seperti disajikan pada Gambar 7 adalah komponen hidrolik yang umum digunakan dalam sistem turbin. Bentuk kerucutnya yang khas menampilkan penampang yang secara bertahap meluas dari saluran masuk ke saluran keluar. Desain ini secara efektif mengubah energi kinetik berkecepatan tinggi dari air yang keluar dari turbin menjadi energi tekanan yang berguna. Tabung draft berbentuk kerucut sangat cocok untuk kondisi kepala rendah hingga sedang dan dikenal karena kesederhanaan dan efisiensinya dalam memaksimalkan kinerja turbin (Admin, 2023) .

Agarwal et al. (2017) dalam analisis numetir yang divalidasi secara eksperimental menyarankan sudut kerucut sebesar 8° untuk memperoleh efisiensi draft tube yang tinggi. Selain itu, zona tekanan tinggi diidentifikasi dalam tabung draft berbentuk kerucut dan siku, meskipun, tekanan keseluruhan kurang dari tekanan atmosfer. Efisiensi turbin Francis menggunakan sudut kerucut 8 derajat memberikan efisiensi yang lebih tinggi. Untuk sudut yang lebih besar dari 8 derajat, aliran balik diamati. Untuk kondisi pelepasan variabel (*part load*), tabung draft siku dapat digunakan karena variasi efisiensi yang lebih rendah pada laju aliran yang berbeda.



Gambar 7. Conical draft tube (Sundar, 2024)



Gambar 8. Titik berat penampang sudu (Admin, 2024)

2.6 Perancangan Sudu Gerak

Tabel 2 di bawah ini memperlihatkan parameter desain turbin air yang dirancang sedangkan Gambar 8 menyajikan bentuk geometri sudu yang akan digunakan dan Gambar 9 memperlihatkan arah momen lentur sudu. Head total dalam perancangan ini adalah 5 m. Head total adalah energi potensial air yang tersedia untuk dikonversi menjadi energi mekanik. Head ini mencakup energi ketinggian air sebelum memasuki turbin. Putar rotor atau runner turbin sebesar 600 rpm. Putaran ini dirancang untuk menghasilkan sinkronisasi dengan generator listrik jika terhubung langsung. Daya, N ditentukan dari debit air yang melewati turbin, head efektif, dan efisiensi turbin sebesar 100 kW. Diameter ujung luar runner atau rotor turbin (D_e) memengaruhi kecepatan perifer dan efisiensi aliran, ditentukan sebesar 0.9 m. β_{0a} , sudut di mana air disemprotkan ke blade turbin. Sudut ini memengaruhi arah aliran air masuk dan distribusi energi kinetik ke runner, ditentukan sebesar 20° . Efisiensi turbin adalah rasio antara daya mekanis yang dihasilkan turbin dengan daya hidrolik dari air: η_h ditentukan sebesar 0.8. Jumlah blade pada runner (z) memengaruhi pola aliran air dan pembagian energi antara blade. Koefisien empiris (k) yang digunakan untuk perhitungan daya, efisiensi, atau kinerja aliran dalam desain spesifik turbin, dipilih sebesar 0.8025. Kecepatan spesifik turbin (n_s) dalam kondisi yang dinormalisasi, yaitu rasio kecepatan turbin terhadap diameter dan head. Ini digunakan untuk mengklasifikasikan tipe turbin dan menilai kinerjanya. Dari hasil perhitungan diperoleh n_s sebesar 0.86. Perbandingan antara debit aktual air yang melewati turbin dengan debit yang dinormalisasi ($Q/Q_{1/1}$) mencerminkan kondisi operasi relatif terhadap desain awal, diperoleh sebesar 0.60. Parameter rasio debit lainnya adalah $\zeta/q_{1/1}$, sering digunakan untuk menyempurnakan desain aliran dan distribusi energi.

Tabel 2. Parameter disain

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Head total	H	5	meter
Kecepatan putar	n	600	rpm
Daya turbin	N	100	kW
Diameter tip	D_e	0.9	meter
Sudut nozel	β_{0a}	20°	derajat
Efisiensi	η_h	0.80	-
Jumlah sudu	z	4	buah
	k	0.8025	-
	$n_{1/1}$	0.86	-
Rasio debit	$Q/Q_{1/1}$	0.60	-
	$\zeta n_{q1/1}$	0.64	-

2.7 Daya Turbin

Daya turbin teoritis dapat ditentukan dengan tahapan berikut: Energi yang tersedia, Y:

$$Y = g \cdot H$$

$$Y = 49.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Energi persatuan massa air, Ysd:

$$Y_{sd} = \eta_h \cdot Y$$

$$Y_{sd} = 39.24 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Debit air, Q

$$Q = \frac{N}{\rho g H \eta_h}$$

$$Q = 2.55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit teoritis, $Q_{1/1}$

$$Q_{1/1} = \frac{Q}{0,6}$$

$$Q_{1/1} = 4.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dengan demikian daya turbin teoritis adalah 170 kW. Spesifikasi dimensi utama sudu gerak turbin disajikan pada Tabel 3. Hasil perhitungan lainnya disajikan pada Tabel 4 memperlihatkan perkiraan prestasi turbin. Sedangkan Tabel 5 memperlihatkan dimensi utama sudu pengarah. Dimensi utama draft tube disajikan pada Tabel 6 dan gaya-gaya yang bekerja pada sudu diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 3. Dimensi utama sudu gerak

Sudut kecepatan relatif	β_{-}	35.33 ⁰	degree
Jarak bagi dari sudu	ξ	314	mm
Koefisien angkat	C_L	0.7125	
Koefisien drag	C_D	0.01125	
Panjang chord	L	209.33	mm
Tebal maksimum hub	Y_{max}	3	cm
Tebal maksimum tip	Y_{max}	1	cm
Sudut angkat	δ	0.26	degree
Faktor penebalan	F_0	1.0273	
Sudut staggered	ψ	54.4	degree
Sudut masuk	α_3	68.7	degree
Sudut keluar	β_0	31.84	degree
Efisiensi sudu	η_u	0.9606	

Tabel 4. Estimasi prestasi turbin

Torsi pada sudu gerak	T	775	Nm
Daya turbin	N	170	kW
Efisiensi turbin	η_h	0.9360	

Tabel 5. Dimensi utama sudu pengarah

Besar sudut pengarah	α_3	80.2	degree
Besar kecepatan mutlak	V_0	4.05	m/s
Jumlah sudu pengarah	Z	16	buah
Tinggi sudu pengarah	b	0.374	m

Tabel 6. Draft tube

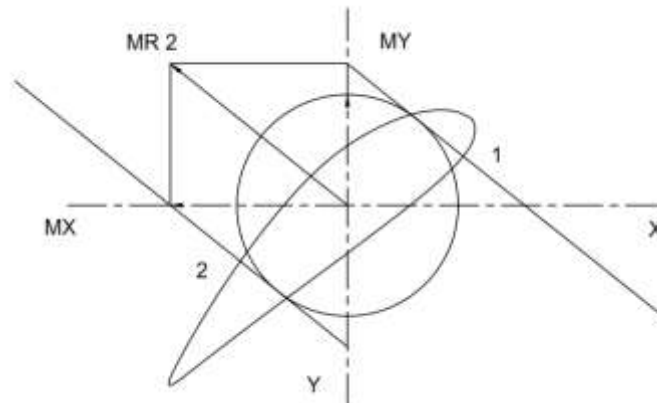
Tinggi hisap maksimum	ZB	5.06	m
Sudut draft tube	θ	20	degree

Tabel 7. Perhitungan gaya pada sudu

Gaya berat	FB	91.72	N
Gaya sentrifugal	Fr	11.99	N
Gaya aksial	$F\alpha$	1073.13	N
Gaya tangensial	Ft	658.73	N

Tabel 8. Momen inersia penampang sudu

Luas penampang	A	4962	mm ²
Titik berat arah X	Xc	129,63	mm
Titik berat arah Y	Yc	78,88	mm
Momen inersia sumbu X	Ix	3646,85	cm ⁴
Momen inersia sumbu Y	Iy	9537,35	cm ⁴



Gambar 9. Arah momen lentur pada kaki sudu

Tabel 9. Analisa kekuatan sudu

Tegangan tarik total titik 1	σ_{1tot}	719	N/cm ²
Tegangan tarik total titik 2	σ_{2tot}	638	N/cm ²
Tegangan geser	τ_R	387.45	N/cm ²
Tegangan maksimum penampang A	τ_{max}	1458.4	N/cm ²

2.8 Analisa bahan

Bahan untuk sudu gerak yang digunakan adalah besi cor kelabu dengan karakteristik

$$\sigma_B = 12 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{BHN} = 137$$

Dengan asumsi faktor pembebanan, $c = 2$, factor keamanan untuk batas kekuatan netto $S_N = 2$, porositas 75%, maka tegangan yang diperbolehkan adalah:

$$\sigma_{bol} = \frac{\sigma_B}{S_N \cdot c} \cdot 75\%$$

$$\sigma_{bol} = 2207,25 \text{ N/cm}^2$$

Karena tegangan maksimum yang mungkin terjadi adalah 1458,4 N/cm², maka sudu aman.

2.9 Analisis Teknoekonomi

Perhitungan biaya investasi dan analisis finansial produk diperlukan untuk mengetahui biaya produksi dan nilai investasi apakah layak untuk dikembangkan atau tidak (Fauzi & Hermanto, 2021). Produk turbin diharapkan dapat menghasilkan daya sesuai dengan rancangan. Pembuatan turbin ini memiliki komponen biaya sebagai berikut:

Tabel 10. Biaya investasi

No.	Uraian	Vol	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
Tahap I					
1.	Pekerjaan Sipil	1	Ls	6.302.896.554	6.302.896.554
2.	Pekerjaan Mechanical Electrical Tahap 1	1	Ls	1.680.548.270	1.680.548.270
Tahap I					7.983.444.824
Tahap II					
3.	Pekerjaan Metal	1	Ls	1.299.520.610	1.299.520.610
4.	Pekerjaan Mechanical Electrical Tahap 2	1	Ls	2.171.100.000	2.171.100.000
Tahap II					3.470.620.610
Harga total					11.454.065.434

Investasi instalasi turbin memperhitungkan komponen utama yang dirangkum dalam dua tahapan penugasan. Tahap pertama melibatkan pekerjaan sipil dan pekerjaan mechanical electrical tahap 1. Sedangkan tahap kedua melibatkan pekerjaan metal dan mechanical electrical tahap 2. Bila investasi ini dijalankan, maka diharapkan laju pengembalian investasi ini dapat terukur (Subekti, 2015). Dari perhitungan nilai yang diperoleh berdasarkan besaran energi yang dihasilkan yakni 100 kWh, artinya turbin air ini dapat menghasilkan listrik sebesar 2400 kWh per hari. Dengan demikian selama setahun dapat menghasilkan 876.000 kWh. Apabila nilai energi yang dihasilkan dikonversi sesuai harga listrik yang dikeluarkan PLN dengan skala rumah tangga, dapat menghasilkan Rp. 1.265.557.200 dalam setahun. Analisis ROI (Return On Investment) turbin air ini adalah:

$$ROI = \frac{Net\ Income}{Cost\ of\ Investment} \times 100\%$$

$$ROI = \frac{1.265.557.200}{11.454.065.434} \times 100\%$$

$$ROI = 11,05 \%$$

Berdasarkan perhitungan di atas, tingkat pengembalian yang bisa didapatkan dalam investasi ini adalah 11,05%. Artinya Investasi ini layak untuk dijalankan. Untuk proyek energi terbarukan, ROI tahunan sebesar 10–15% sudah dianggap layak dan aman (Supriyono, 2017). Selain analisis ROI diperlukan analisis pendamping yakni analisis Payback Period untuk menentukan periode pengembalian investasi ini.

$$PBP = \frac{Investasi\ Awal}{Arus\ Kas\ /th}$$

$$PBP = \frac{11.454.065.434}{1.265.557.200} = 9,05\ Th = 108,6\ Bulan = 109\ Bulan$$

3. HASIL PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN

Perhitungan di atas menunjukkan pengembangan instalasi turbin ini memberikan investasi yang menguntungkan. Faktor-faktor yang mempengaruhi desain turbin air Kaplan meliputi kondisi lokasi yang spesifik, seperti laju aliran dan tinggi air dari sumbernya, serta output daya yang diinginkan dan tujuan efisiensi. Desain juga harus mempertimbangkan aspek lingkungan, seperti jalur ikan dan transportasi sedimen, untuk meminimalkan dampak pada ekosistem lokal. Selain itu, faktor-faktor seperti kebutuhan pemeliharaan, efisiensi biaya, dan kemudahan instalasi memainkan peran penting dalam menentukan desain optimal untuk sistem turbin Kaplan. Dengan mempertimbangkan semua hal ini dalam proses desain, diharapkan dapat menciptakan sistem turbin Kaplan yang tidak hanya efisien dan ramah lingkungan, tetapi juga tangguh dan hemat biaya dalam jangka panjang. Pendekatan komprehensif ini pada akhirnya mengarah pada integrasi energi terbarukan yang sukses ke dalam jaringan listrik lokal, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi dampak perubahan iklim.

Turbin Kaplan dengan kapasitas 100 kW telah dirancang untuk memanfaatkan aliran air dengan head sebesar 5 meter dan kecepatan putar 600 rpm. Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi hidraulik sebesar 80% dan parameter teknis lainnya yang disesuaikan dengan kondisi operasi. Hasil utama dari perancangan meliputi: Diameter tip (D_e) runner ditetapkan sebesar 0,9 meter untuk memastikan kapasitas daya yang memadai dengan aliran air pada kondisi desain. Diameter ini diperoleh berdasarkan rasio kecepatan spesifik (*specific speed ratio*) dan kebutuhan daya keluaran. Runner dirancang dengan 4 (empat) sudu utama untuk menjaga kestabilan aliran dan konversi energi yang optimal. Sudut nozel (β_{oa}) ditentukan sebesar 20° untuk mengarahkan aliran air secara efisien menuju sudu-sudu runner, mengurangi kerugian energi, dan memaksimalkan torsi. Debit desain disesuaikan untuk menghasilkan kapasitas daya 100 kW. Dengan rasio debit $Q/Q_{1/1}$ sebesar 0.60, sistem ini mampu menjaga performa optimal pada fluktuasi debit air, yang sering terjadi pada pembangkit listrik tenaga air berkapasitas kecil. Efisiensi hidraulik turbin (η_h) sebesar 80% dicapai melalui desain runner dan draft tube yang optimal. Faktor performa lainnya, seperti nilai k sebesar 0.8025 dan $n_{1/1}$ sebesar 0.64, menunjukkan bahwa turbin dirancang untuk beroperasi secara stabil di kondisi rendah head dan kecepatan tinggi.

Turbin Kaplan dipilih karena kemampuannya bekerja secara efisien pada kondisi head rendah dan debit besar. Dengan kecepatan spesifik tinggi, tipe ini cocok untuk sungai dengan aliran stabil, seperti yang diharapkan pada lokasi implementasi. Efisiensi hidraulik sebesar 80%

menunjukkan bahwa desain sudu runner, sudut nozel, dan draft tube telah dioptimalkan untuk meminimalkan kerugian energi. Kombinasi efisiensi hidraulik dan efisiensi mekanis dari generator memberikan efisiensi keseluruhan sekitar 76%, yang cukup tinggi untuk sistem tenaga air skala kecil. Dengan nilai rasio debit $Q/Q_{1/1}$ sebesar 0.60, turbin mampu beradaptasi dengan variasi debit tanpa penurunan signifikan dalam performa. Hal ini penting untuk menjaga stabilitas daya keluaran di lokasi dengan variasi aliran musiman. Kavitasasi menjadi perhatian utama pada turbin Kaplan karena desainnya yang terbuka untuk aliran air. Berdasarkan analisis bilangan Thoma, margin bebas kavitasasi tercapai dengan draft tube berbentuk konvergen-divergen, yang memaksimalkan pemulihan tekanan pada aliran keluar. Desain runner dengan 4 (empat) sudu memastikan keseimbangan antara konversi energi yang efisien dan kekuatan mekanis. Bahan runner dipilih dari paduan baja tahan karat untuk menghindari korosi dan memperpanjang umur operasi turbin. Walaupun efisiensi desain sudah mencukupi, potensi optimasi dapat dilakukan pada sistem kontrol sudut sudu (*blade pitch angle*) untuk meningkatkan fleksibilitas operasi. Sistem kontrol ini memungkinkan turbin menghasilkan daya optimal pada berbagai kondisi debit dan beban.

Putra et al. (2024) dalam artikelnya yang berjudul “Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Desa Negeri Gugung Sibolangit” memperoleh hasil analisis keluaran daya turbin sebesar 28 kW pada debit air 0,95 m³/s dan head 7,5 m. Sedangkan dalam penelitian ini, keluaran daya yang dihasilkan sebesar 170 kW, debit air sebesar 4.25 m³/s, dan head sebesar 5 m. Dibandingkan dengan hasil analisis Putra et al. (2024), hasil kajian yang telah dilakukan memberikan keluaran daya yang lebih besar karena debit air yang mengalir lebih besar walaupun headnya lebih kecil. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Milasi et al. (2024), PLTM dengan debit sebesar 7,92 m³/s dan head air sebesar 4.65 m menghasilkan keluaran daya turbin sebesar 259 kW. Biaya pembangunan diperkirakan sebesar Rp. 13.436.550.000. Hal ini menunjukkan hasil kajian penelitian yang telah dilakukan memberikan hasil yang tidak jauh berbeda dengan berbagai penelitian lainnya.

Salah satu aspek kunci dalam desain turbin yang harus diprioritaskan adalah efisiensi dan kinerja. Agar turbin benar-benar efektif dalam menghasilkan energi bersih, ia harus mampu mengubah sebanyak mungkin energi air yang tersedia menjadi listrik. Ini memerlukan pertimbangan yang cermat terhadap faktor-faktor seperti desain sudu, ukuran rotor, dan efisiensi generator. Selain itu, turbin harus mampu beroperasi secara konsisten dan dapat diandalkan dalam berbagai kondisi aliran air.

Dengan mempertimbangkan aspek-aspek desain tersebut dapat dipastikan turbin beroperasi secara optimal, dan menjadikannya aset berharga dalam transisi menuju masa depan energi yang lebih berkelanjutan. Selain itu, pemeliharaan dan pemantauan rutin terhadap turbin sangat penting untuk memastikan kinerja optimal selama masa pakainya. Faktor-faktor seperti keausan, kondisi lingkungan, dan kemungkinan kerusakan harus dikelola dengan hati-hati untuk mencegah gangguan dalam produksi energi. Dengan berinvestasi pada bahan dan teknologi berkualitas tinggi, serta menerapkan protokol pemeliharaan yang efisien, turbin dapat terus beroperasi dengan baik dan memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

4. SIMPULAN

Rancangan turbin Kaplan dengan kapasitas 100 kW menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan daya yang stabil pada head rendah dengan efisiensi yang tinggi. Simulasi dan analisis teknis menunjukkan bahwa desain ini bebas dari risiko kavitasasi dan memiliki fleksibilitas operasional yang baik. Dengan beberapa optimasi tambahan, turbin ini diharapkan dapat memberikan kinerja yang andal untuk pembangkit listrik tenaga air skala kecil.

Hasil disain turbin memberikan parameter disain menentukan diameter turbin: Diameter hub: 400 mm, Diameter tip: 900 mm, Sudu gerak jenis Kaplan berjumlah empat buah, dan Sudu pengarah jenis pelat berjumlah 16 buah. Kondisi disain turbin meliputi: Head: 5 meter, putaran: 600 rpm, Daya: 170 kW, Debit air: 4.25 m³/s, efisiensi: 80%, range head untuk mempertahankan

daya output adalah 4-6 m, range perputaran sudut staggerd untuk mempertahankan daya output adalah 55.15-6.26° terhadap kecepatan tangensial. Tegangan maksimum yang mungkin terjadi adalah 1458,4 N/cm², dan Tegangan yang dibolehkan terhadap material sudu adalah 2207,25 N/cm². Bahan untuk sudu gerak adalah besi cor kelabu dengan $\sigma_B = 12 \text{ kgf/mm}^2$ dan BHN = 137. Hasil perhitungan ROI = 11.05% dan PBP = 109 bulan (9.1 tahun) maka investasi ini layak untuk di jalankan, terlebih kebutuhan instalasi dan energi listrik di pedalaman sangat dibutuhkan. Pola dibuat dari kayu dengan bentuk lempengan-lempengan yang dipotong menurut batas dari koordinat tiga dimensi. Cetakan dibuat dari pasir kering yang dicampur dengan asam fosfor dengan penguat resin furan. Material untuk sudu dicairkan dalam kupola dan dituangkan ke dalam cetakan dengan aturan seperti layaknya proses pengecoran.

Saran untuk penelitian selanjutnya antara lain: Fokus pada optimasi desain sudu dengan mempertimbangkan variasi profil aerodinamis yang lebih efisien untuk meningkatkan kinerja turbin, terutama pada kondisi operasi dengan variasi head dan debit yang lebih luas. Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dan pengujian eksperimental dapat dilakukan untuk mendapatkan geometri sudu yang optimal; Meskipun besi cor kelabu telah digunakan sebagai material sudu, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi alternatif material dengan kekuatan dan ketahanan korosi yang lebih baik, seperti paduan stainless steel atau material komposit. Hal ini penting untuk meningkatkan umur operasional turbin, terutama di lingkungan air yang bersifat abrasif atau korosif; Simulasi teknis telah memberikan gambaran kinerja turbin, namun pengujian eksperimental pada model skala laboratorium atau prototipe perlu dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi. Pengukuran langsung terhadap parameter seperti efisiensi, tegangan mekanis, dan keandalan sistem sangat penting untuk meningkatkan akurasi model desain; Perhitungan ROI dan PBP menunjukkan bahwa investasi ini layak dijalankan. Namun, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor ekonomi lain, seperti biaya operasional, pemeliharaan, serta dampak lingkungan dan sosial dari instalasi turbin Kaplan ini di daerah terpencil.

DAFTAR PUSTAKA

- Admin. (2023). *Draft tube*. Testbook. <https://testbook.com/mechanical-engineering/draft-tube-definition-construction-and-types#:~:text=Moody Spreading Draft Tube,-Fig 4: Moody&text=This design optimises the conversion,minimising energy losses are critical.>
- Admin. (2024). *Introduction to aerospace flight vehicle*. Embry-Riddle. <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/airfoil-geometries/>
- Agarwal, T., Chaudhary, S., & Verma, S. (2017). Numerical and Experimental Analysis of Draft Tubes for Francis Turbine. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(21), 1–11. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i23/115566>
- Alam, Y., Irianto, A., Bahri, M. H., & Abidin, A. (2024). Pengaruh Variasi Sudu Datar, Lengkung dan Sudu L Terhadap Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex The Effect of Flat, Curved and L-angle Blade Variations on The Peformance of Vortex Flow Reaction Turbines. 5(5), 630–644. <http://103.242.78.149/index.php/JST/article/view/23472/5003>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics, Fundamental and Applications* (S. Jeans (ed.); 1st ed.). McGraw Hill. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Cho Khaing, C., Min Than, P., & Sein Mya, N. (2019). Design and Simulation with CFD of 10 kW Kaplan Turbine for Micro-Hydropower Plant (Runner). *IRE Journals*, 3(2), 116–121. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701488.pdf>
- Fajarisman, M. D., & Supriyono, T. (2018). *Perancangan pembangkit listrik tenaga air* [Fakultas Teknik Unpas]. <http://repository.unpas.ac.id/39556/>
- Fauzi, F., & Hermanto, A. (2021). Analisis Kelayakan Ekonomi Dan Finansial Pembangkit

- Listrik Tenaga Air (PLTA) Dengan Menggunakan Software Visual Basic for Applications (VBA). *Barometer*, 6(2), 335–342. <http://www.journal.unsika.ac.id>
- Jakfar, A., & Fatah, M. (2022). Modification of Kaplan Turbine with Variation of Guide Angle (Guide Vanes) to Generate Electric Power. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 4(3), 269–282. <https://motivection.imeirs.org/index.php/motivection/article/view/153>
- Khalid Mohammed Ridha, W., Reza Kashyzadeh, K., & Ghorbani, S. (2023). Common Failures in Hydraulic Kaplan Turbine Blades and Practical Solutions. *Materials*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/ma16093303>
- Kusnadi, Mulyono, A., Pakki, G., & Gunarko, G. (2018). Rancang Bangun Dan Uji Performansi Turbin Air Jenis. *Jurnal Teknik Mesin Universitas*, 7(2), 207. Rancang Bangun Dan Uji Performansi Turbin Air Jenis. J
- Milasi, S., Fauzan, & Zulfadli, T. (2024). Perencanaan pembangkit listrik tenaga minihidro (pltm) pada krueng meureudu desa lhoksandeng. *Jurnal Tektro*, 8(1), 90–98. <https://e-jurnal.pnl.ac.id/TEKTRO/article/view/5675>
- Mulqi, R. T. M., Supriyono, T., & Permana, M. S. (2019). *Pengujian turbin air aksial* [Fakultas Teknik Unpas]. [https://repository.unpas.ac.id/43208/1/SKRIPSI RESTU TRIKA %28133030010%29.pdf](https://repository.unpas.ac.id/43208/1/SKRIPSI_RESTU_TRIKA%28133030010%29.pdf)
- Natel. (2024). *FishSafe™ engineering by Natel, manufacturing by trusted industry partners*. Natelenergy. <https://www.natelenergy.com/turbines>
- Oktoyoki, H., Safnizar, S., & Ansiska, P. (2023). Refleksi Kontribusi Pembangunan Lingkungan Hidup Dan Ketahanan Energi Dari Bengkulu Untuk Indonesia. *Geoforum*, 2(1), 50–59. <https://doi.org/10.30598/geoforumvol2iss1pp50-59>
- Oo, M. M. (2019). Design of 50 kW Kaplan Turbine for Micro hydro Power Plant. *Iconic Research And Engineering Journals*, 3(2), 264–270. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701517.pdf>
- Putra, M. A. K., & Hamdani. (2024). Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Desa Negeri Gugung Sibolangit. *Jurnal Orang Elektro*, 13(1), 41–45. <https://ejournal.poltekharber.ac.id/index.php/powerELEKTRO/article/view/6513/2791>
- Rajab, A., Mahmuddin, M., & Habiba, S. (2024). Karakteristik Daya Turbin Kaplan dengan Variasi Jumlah Sudu Turbin. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(2), 9137–9149. <https://j-innovative.org/index.php/Innovative/article/view/10654>
- Rusdiansyah, D., & Supriyono, T. (2012). *Perancangan turbin air dengan daya 100 W* [Fakultas Teknik Unpas]. <http://repository.unpas.ac.id/28803/>
- Subekti, R. A. (2015). Studi Kelayakan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro Di Desa Sukamaju Kabupaten Garut Jawa Barat. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 6(2), 105–116. <https://jurnalth.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/view/515/379>
- Sundar. (2024). *How to calculate the efficiency of draft tube*. Exstrudesign. <https://extrudesign.com/how-to-calculate-the-efficiency-of-draft-tube/>
- Supriyono, T. (2017). Optimum disain PLTS hybrid 10 MW dengan turbin gas. *Prosiding SNMI*, 11 (ISBN 978-602-71459-7-9), TM-36. <http://repository.unpas.ac.id/56929/>
- Supriyono, T., Omar, G., Tamaldin, N., Soetikno, P., Sumartono, M. R., Romano, A., & Yamin, M. (2024). Performance comparison of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules before testing with a cooling system. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2430426>
- Wahyudi, A., Mahmuddin, M., & Habiba, S. (2024). Peningkatan Daya Turbin Kaplan dengan Variasi Massa Turbin. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(2), 9150–9164. <https://j-innovative.org/index.php/Innovative/article/view/10655/7347>