

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 Performance of Vortex Flow Reaction Turbines

Yovan Alam Akbar Irianto¹, Mokh. Hairul Bahri², Asroful Abidin³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Email : masyovan4@gmail.com

²Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Email : mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

³Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Email : asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Turbin merupakan suatu komponen penggerak yang bias menciptakan energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin vortex. Tiga bentuk sudu yang digunakan dalam penelitian ini adalah sudu L, sudu datar, dan sudu lengkung. Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi putaran turbin, torsi, daya yang dihasilkan, dan efisiensi. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan model turbin vortex dalam kondisi laboratorium yang terkendali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja turbin vortex. Sudu lengkung menghasilkan putaran tertinggi sebesar 175 rpm, diikuti oleh sudu L sebesar 160 rpm, dan sudu datar sebesar 120 rpm. Dalam hal torsi, sudu L menghasilkan torsi tertinggi sebesar 2.1078 Nm, diikuti oleh sudu lengkung sebesar 1.47614 Nm, dan sudu datar sebesar 1.43514 Nm. Daya yang dihasilkan oleh turbin juga menunjukkan variasi berdasarkan bentuk sudu. Sudu lengkung menghasilkan daya tertinggi sebesar 42.52 Watt, diikuti oleh sudu L sebesar 35.34 Watt, dan sudu datar sebesar 22.62 Watt. Efisiensi tertinggi dicapai oleh sudu lengkung sebesar 48.31%, diikuti oleh sudu L sebesar 40.14%, dan sudu datar sebesar 25.69%. Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa sudu lengkung memberikan performa terbaik dalam hal putaran turbin, daya yang dihasilkan, dan efisiensi. Sementara itu, sudu L menunjukkan performa terbaik dalam hal torsi yang dihasilkan.

Kata Kunci: Variasi Sudu, Datar, Lengkung, L, Turbin Vortex.

Abstract

The turbin is a driving component that can create electrical energy. This study aims to analyze the effect of blade shape variations on the performance of vortex turbines. Three blade shapes used in this study are L-shaped blade, flat blade, and curved blade. The performance parameters evaluated include turbine rotation, torque, power generated, and efficiency. Experiments were conducted using a vortex turbine model under controlled laboratory conditions. The results showed that the blade shape has a significant effect on the performance of the vortex turbine. The curved blade produces the highest rotation of 175 rpm, followed by the L blade at 160 rpm, and the flat blade at 120 rpm. In terms of torque, the L blade produces the highest torque of 2.1078 Nm, followed by the curved blade at 1.47614 Nm, and the flat blade at 1.43514 Nm. The power generated by the turbine also shows variations based on the blade shape. The curved blade produces the highest power of 42.52 Watts, followed by the L blade at 35.34 Watts, and the flat blade at 22.62 Watts. The highest efficiency is achieved by curved blades at 48.31%, followed by L blades at 40.14%, and flat blades at 25.69%. From the results of this study, it can be concluded that curved blades provide the best performance in terms of turbine rotation, power generated, and efficiency. Meanwhile, L blades show the best performance in terms of torque generated..

Keywords: Blade Variations, Flat, Curved, L, Vortex Turbine.

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi saat ini sedang menurun akibat konsumsi bahan bakar fosil yang berlebihan di semua sektor. Ilmuwan global sangat menyadari dilema ini dan dengan tekun mengeksplorasi beragam solusi energi alternatif. Di antara pilihan yang ada, pemanfaatan arus air telah muncul sebagai sumber energi yang menonjol. Mengingat status Indonesia sebagai negara agraris dengan kelimpahan air yang konsisten, turbin air telah mendapatkan dukungan lebih besar daripada turbin angin, yang menghadapi (Gultom, S. 2017).

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat dengan berkembangnya penduduk dan kemajuan teknologi dalam masyarakat maupun dunia industri. Keadaan geografis di Indonesia mendukung pemanfaatan sebuah pembangkit tenaga listrik berskala kecil yang biasa dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Bentuk turbin yang tepat untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah turbin vortex (Akbar, F. 2017).

Tantangan-tantangan yang disebutkan di atas memaksa kita untuk mengeksplorasi berbagai cara untuk menciptakan sumber-sumber energi alternatif, dengan tujuan mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang menipis. Upaya ini telah mengilhami banyak orang untuk mencari sumber-sumber energi baru yang berkelanjutan dan juga ramah lingkungan. Saat ini, terdapat banyak sumber daya energi yang belum dimanfaatkan, serta sumber-sumber yang potensinya belum sepenuhnya terwujud.

Salah satu inovator tersebut, Viktor Schaubertger dari Jerman, memelopori pemanfaatan aliran pusaran air sebagai sarana pembangkitan tenaga hidroelektrik. Fenomena ini terjadi ketika suatu cairan mengalami perubahan mendadak di suatu saluran, sehingga menciptakan pusaran. Penelitian perintis Schaubertger memanfaatkan aliran irigasi ini dan mengubahnya menjadi pusaran, yang kemudian menggerakkan bilah-bilah turbin.

Pada roda turbin terdapat sudu yaitu suatu konstruksi lempengan dengan bentuk

dan penampang tertentu, air sebagai fluida kerja mengalir melalui ruang diantara sudu tersebut, dengan demikian roda turbin akan dapat berputar dan pada sudu akan ada suatu gaya yang bekerja. Sudu merupakan bagian dari turbin dimana konversi energi terjadi, sudu kemudian dirangkai sehingga membentuk satu lingkaran penuh, seperti yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sudu datar, lengkung dan sudu L.

Dari latar belakang diatas, dalam penelitian ini maka penulis tertarik melakukan pengembangan turbin air vortex dengan bentuk sudu datar, lengkung dan sudu L untuk mengetahui perbedaan kinerjanya dan dapat mengetahui daya terbaik dari turbin air vortex dengan sudu turbin datar, lengkung dan sudu L. Hasil yang diharapkan di penelitian ini adalah performa dan efisiensi dari sudu datar, lengkung dan sudu L terhadap turbin.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Turbin Air

Turbin adalah mekanisme dinamis yang mampu menghasilkan tenaga listrik. Salah satu bentuk tenaga ini dimanfaatkan menggunakan turbin air, yang memanfaatkan kombinasi sabuk, katrol, dan kotak roda gigi untuk menggerakkan runner melalui gaya aliran air, mengubahnya menjadi energi kinetik. Runner ini kemudian dihubungkan ke generator, yang mengubah energi putar turbin menjadi tenaga listrik. Proses ini pada akhirnya berasal dari tenaga air, yang dimanfaatkan melalui penggunaan turbin air. Operasi dasar turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi tenaga listrik mengkategorikan turbin air menjadi dua kelompok berbeda: turbin impuls dan turbin reaksi. (Harvey, 1993).

Pemilihan turbin air untuk setiap lokasi bergantung pada karakteristik spesifiknya. Faktor utama dalam memilih turbin air meliputi head yang tersedia dan kebutuhan energi, serta kecepatan yang diinginkan untuk menyalakan generator. Setiap turbin air memiliki kualitas yang berbeda dalam hal kecepatan energi dan efisiensi, dengan jenis yang paling sesuai biasanya digunakan untuk efektivitas maksimum pada tingkat head

tertentu. tertentu serta membutuhkan laju aliran tertentu (Harvey, 1993).

B. Jenis-Jenis Turbin

Berdasarkan mekanika dasar pengubahan energi potensial air menjadi energi mekanik, turbin dikategorikan ke dalam dua kelompok berbeda: turbin impuls dan turbin reaksi. Dari kategori ini telah berkembang turbin Pelton dan Crossflow (tipe impuls), selain turbin Francis dan Kaplan (tipe reaksi) yang lazim dalam aplikasi modern. Lebih jauh lagi, iterasi turbin sebelumnya dengan desain yang lebih sederhana menjadi dasar bagi pengembangan ini. Selain itu, penyempurnaan berkelanjutan telah dilakukan untuk menyempurnakan desain turbin Pelton, Crossflow, Francis, dan Kaplan yang ada. (Dietzel, 1990).

Berikut merupakan jenis- jenis turbin air yang perlu diketahui.

1. Turbin Impulse

Turbin impuls adalah mekanisme yang mengubah banyaknya energi dalam air - potensi, kecepatan, dan tekanannya - menjadi energi kinetik yang diperlukan untuk menggerakkan turbin. Proses ini dimulai dengan mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dalam nosel turbin. Selanjutnya, air keluar dari nosel dengan tekanan yang lebih tinggi, menghantam bilah turbin dengan kuat. Tabrakan antara air dan bilah ini berfungsi untuk mengubah arah dan momentum aliran air, sehingga menghasilkan impuls. Contoh menonjol dari turbin impuls tersebut meliputi jenis Pelton dan jenis aliran silang.

2. Turbin Pelton

Turbin Pelton, turbin impuls, terdiri dari serangkaian bilah dayung yang digerakkan oleh semburan air dahsyat yang dikeluarkan dari satu atau lebih nosel. Terkenal karena efisiensinya yang luar biasa, turbin ini sangat cocok untuk aplikasi dengan head tinggi. Bilah yang dirancang dengan cermat, yang menampilkan konfigurasi dua bagian yang simetris, secara khusus direkayasa untuk memastikan bahwa semburan air yang menghantam mengenai bagian tengah bilah. Akibatnya, semburan air diarahkan secara efisien ke dua arah yang berlawanan, secara efektif mengurangi gaya lateral apa pun dan

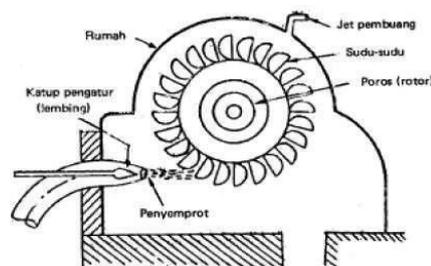
memungkinkan konversi energi kinetik menjadi energi mekanis dengan efisiensi maksimal. Sementara pembangkit listrik skala besar memerlukan head sekitar 150 meter, operasi skala mikro dapat berhasil mencukupi dengan head 20 meter.

Keuntungan turbin pelton:

- a. Daya yang dihasilkan besar.
- b. Konstruksi yang sederhana.
- c. Mudah dalam perawatan.
- d. Teknologi yang sederhana mudah diterapkan di daerah yang terisolir.

Kerugian turbin pelton:

Karena sumber aliran air berada di atas, biasanya dikaitkan dengan waduk atau bendungan air, sehingga memerlukan investasi yang lebih besar. Turbin Pelton dikategorikan sebagai turbin impuls atau turbin tekanan sama. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa tidak ada pengurangan tekanan selama aliran di sepanjang bilah turbin, dengan seluruh perubahan terjadi pada pemandu jet atau nosel. Energi yang disalurkan ke roda jalan adalah dalam bentuk energi kinetik. Saat melintasi roda turbin, energi kinetik ini diubah menjadi kerja poros, dengan sebagian energi dilepaskan dan sebagian digunakan untuk melawan gesekan terhadap bilah turbin. Turbin pelton dapat dilihat pada Gambar 1.



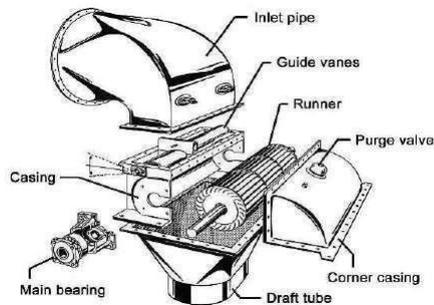
Gambar 1. Skema Turbin Pelton

Sumber: Gibran, 2014

3. Turbin Crossflow

Turbin aliran silang memiliki kemampuan untuk berfungsi dalam rentang aliran 20 liter/detik hingga 10 m³/detik, dan dapat mengakomodasi rentang muka air 1 m hingga 200 m. Turbin ini dilengkapi dengan nosel persegi panjang yang sejajar dengan lebar runner. Saat jet air memasuki turbin, ia menyatu dengan bilah, sehingga mengubah energi kinetik menjadi energi mekanis. Saat

keluar, air memberikan energi yang berkurang ke bilah sebelum meninggalkan turbin. Runner turbin dibangun dari beberapa bilah yang dipasang pada satu set cakram paralel. Turbin crossflow dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Turbin Crossflow

Sumber: Gibran, 2014

4. Turbin Reaksi

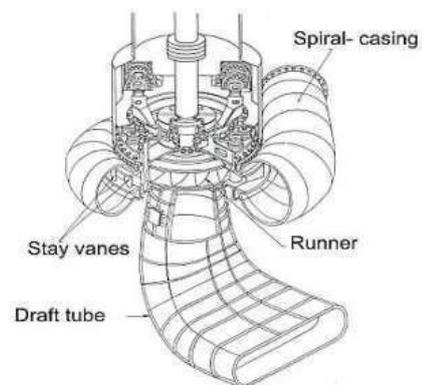
Turbin reaksi adalah perangkat yang berfungsi dengan memanfaatkan energi laten air dan mengubahnya menjadi energi dinamis. Ini adalah jenis turbin yang paling banyak digunakan. Dilengkapi dengan bilah yang dirancang khusus, turbin reaksi menyebabkan penurunan tekanan air saat melintasi bilah. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya yang sangat kuat pada bilah, yang memudahkan putaran runner, komponen yang bertanggung jawab atas gerakan turbin. Turbin yang beroperasi berdasarkan prinsip ini termasuk dalam kategori turbin reaksi, di mana runner sepenuhnya terbenam dalam air dan ditempatkan di dalam turbin.

Turbin reaksi, yang juga dikenal sebagai turbin tekanan berlebih, mendapatkan namanya dari fenomena tekanan air sebelum memasuki roda turbin yang melampaui tekanan saat keluar. Secara konseptual, seseorang dapat menduga bahwa aliran air yang memasuki roda turbin memiliki energi yang tidak berkurang, yang kemudian dimanfaatkan untuk mendorong roda turbin dan mengeluarkan sebagian air ke saluran pembuangan. Iterasi turbin reaksi yang umum mencakup turbin Francis, propeller atau Kaplan, dan vortex (Fritz Dietzel, 1988:17).

5. Turbin Francis

Diciptakan oleh James Francis Bichens dari Inggris, turbin inovatif ini memiliki arah

aliran aksial-radial dan mampu beroperasi pada ketinggian 10 - 650 meter, menghasilkan daya 10 - 750 MW pada kecepatan spesifik 83 - 1000 rpm. Posisi poros vertikal memastikan bahwa rumah generator dan peralatan tambahan terlindungi dari kerusakan akibat air, sementara turbin ditempatkan secara strategis di antara sumber air bertekanan tinggi di saluran masuk dan air bertekanan rendah di saluran keluar. Selain itu, baling-baling pemandu pada turbin Francis dapat dipasang atau disesuaikan sudutnya. Turbin Francis dapat dilihat pada Gambar 3.

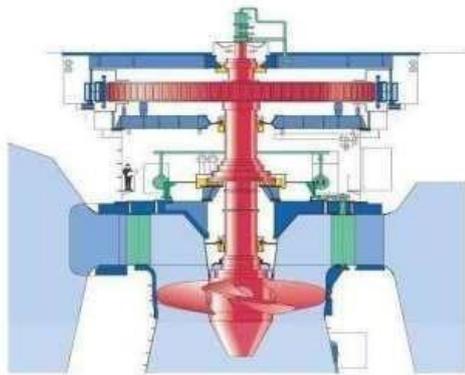


Gambar 3. Skema Turbin Francis

Sumber: Fritz Dietzel, 1988

6. Turbin Kaplan

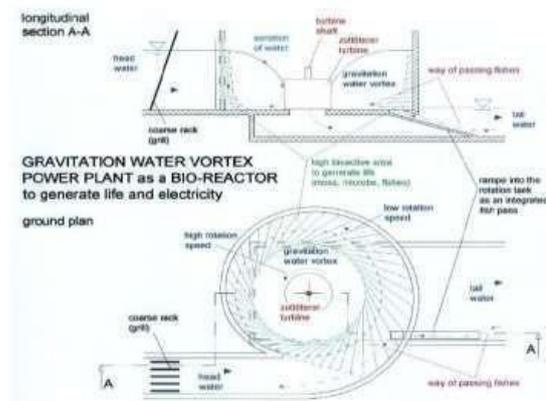
Turbin Kaplan termasuk dalam kategori turbin air reaksi tipe propeller. Yang membedakannya adalah kemampuannya untuk beradaptasi dengan kondisi aliran saat ini dengan menyesuaikan sudut bilah penggeraknya, yang juga dikenal sebagai runner. Fitur ini memungkinkannya untuk mengakomodasi perubahan debit air. Beroperasi dalam rentang head 10 hingga 70 meter, turbin ini mampu menghasilkan daya 5 hingga 120 MW, dengan kecepatan spesifik (Ns) berkisar antara 79 hingga 429 rpm. Pemilihan turbin terutama ditentukan oleh kecepatan spesifiknya, dan turbin Kaplan dibedakan berdasarkan kecepatan spesifiknya yang tinggi. Dirancang khusus untuk kondisi head rendah dengan debit besar, turbin Kaplan unggul dalam pengaturan yang menantang ini. Contoh dari turbin Kaplan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Turbin Kaplan
Sumber: Naveenagrawal, 2009

7. Turbin Vortex

Turbin yang dikembangkan oleh Frans Zotleterer dari Austria telah ditetapkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air Gravitasi (GWVPP). Akan tetapi, turbin ini sering dikenal sebagai turbin pusaran atau turbin pusaran air. Penamaan turbin ini mencerminkan prinsip pengoperasiannya, karena turbin ini berfungsi dengan memanfaatkan energi pusaran air buatan untuk menghasilkan putaran pada bilahnya. Proses ini memerlukan penyaluran air sungai ke dalam saluran masuk yang mengarahkannya ke tangki turbin melingkar, dengan saluran keluar melingkar kecil yang diposisikan di tengah dasar tangki. Saluran pembuangan ini menyebabkan aliran air menciptakan efek pusaran air. Turbin ini dicirikan oleh kesederhanaannya, kemudahan perawatannya, ukurannya yang kecil, kuat, dan tahan lama. Turbin vortex dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema Turbin Vortex
Sumber: Zotleterer, 2002

C. Komponen-komponen Turbin

Komponen-komponen utama pada turbin menurut (Nugroho,2015) adalah sebagai berikut:

a. Stator

Stator turbin terdiri dari dua bagian, yaitu casing dan sudu diam / tetap (fixed blade).

b. Casing

Casing atau shell adalah suatu wadah berbentuk menyerupai sebuah tabung dimana rotor ditempatkan. Di luar casing dipasang bantalan yang berfungsi untuk menyangga rotor.

c. Sudu tetap

Sudu merupakan bagian dari turbin dimana konversi energi terjadi. Sudu terdiri dari bagian akar sudu, badan sudu dan ujung sudu. Sudu kemudian dirangkai sehingga membentuk satu lingkaran penuh.

d. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar terdiri dari poros dan sudu-sudu gerak yang terpasang mengelilingi rotor.

e. Poros

Poros dapat berupa silinder panjang yang solid (pejal) atau berongga (hollow). Pada umumnya sekarang poros terdiri dari silinder panjang yang solid.

f. Sudu gerak

Sudu gerak adalah sudu-sudu yang dipasang disekeliling rotor membentuk suatupiringan.

g. Bantalan

Bantalan berfungsi untuk menyangga rotor, memastikan kestabilannya di dalam casing dan memungkinkan putaran yang aman dan tidak terbatas. Meskipun keberadaan bantalan ini penting untuk mempertahankan posisi rotor turbin, namun hal ini juga mengakibatkan gesekan mekanis dan kerugian berikutnya.

D. Spesifikasi Turbin Vortex

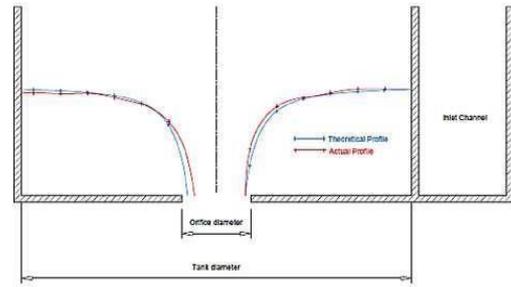
Mekanisme kerja turbin ini didasarkan pada pemanfaatan pusaran air yang dihasilkan oleh perbedaan permukaan air yang minimal. Penjelasan lebih lanjut tentang proses pengoperasiannya sebagai berikut :

1. Air yang berasal sungai masuk ke saluran inlet dibawa ke bak penampung bak ini pada dasarnya memiliki lubang keluar.
2. Tekanan rendah dari dasar tangki dengan kecepatan air yang masuk mempengaruhi kekuatan vortex.
3. Energi potensial lalu diubah menjadi energi kinetik yang selanjutnya di ekstrasi pada turbin sumbu vertikal. Kemudian air keluar melalui saluran outlet.

E. Keunggulan Turbin Vortex

Beberapa keunggulan dari turbin vortex:

1. Cocok dikembangkan di daerah yang memiliki debit aliran yang besar dengan head yang rendah.
2. Memiliki sistem kontrol yang tidak rumit.
3. Tidak merusak ekologi yang terdapat di sungai.
4. Tidak memerlukan drife tube sehingga mengurangi biaya pemasangan dan pembuatan.
5. Memiliki daya yang tinggi, dengan variasi debit yang besar dan sangat baik untuk head yang rendah.
6. Tanpa memasang jarng-jaring sebagai pencegahan benda-benda asing masuk ke dalam turbin dan dapat mengurangi biaya Maintenance.
7. Berikut adalah penemuan fundamental dari penelitian dari Institute of Technology, Sligo in Cilivil Engineering:
8. Bentuk permukaan Pusaran Air dapat digambar secara matematik dan di prediksisecara akurat.
9. Rasio daya dengan efisiensi yang maksimal dapat terjadi antara 14% hingga 18%dengan diameter lubang dan diameter tangki.
10. Tinggi pusaran bervariasi secara linier sesuai dengan debit.
11. Energi keluar maksimum secara teoritis idealnya = ρgQH_v (H_v = Height of Vorteks)
12. Efisiensi Hidrolik maksimum meningkat saat kecepatan impeller setengah dari kecepatan fluida. (lihat Gambar 6).

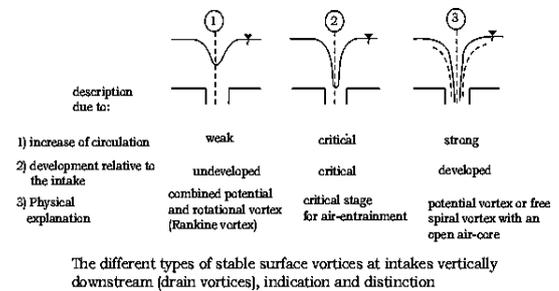


Gambar 6. Bentuk Permukaan Pusaran Air Secara Matematik

Sumber: S.Mulligan,2010

F. Klasifikasi Aliran Vortex

Dalam klasifikasi ada tiga tipe kekuatan vortex dengan melihat bentuk pusaranairdapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Klasifikasi Vortex berdasarkan kekuatannya

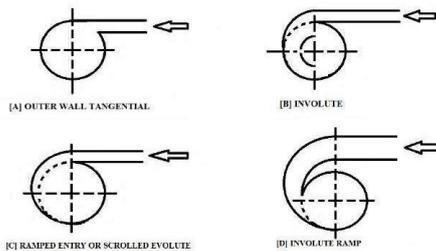
Sumber: Thandaveswara, 2018.

Secara umum, fenomena vortex terbagi atas dua bagian yaitu :

1. Vortex Paksa / Vortex Berotasi
Adalah vortex yang terbentuk karena adanya gaya luar yang berpengaruh pada fluida.
2. Vortex Bebas / Vortex Tak Berotasi
Adalah vortex yang terbentuk karena fenomena natural, tidak terpengaruh oleh gaya dari luar sistem fluida, pada aliran inkompresibel, umumnya terjadi karena adanya lubang keluar.

G. Saluran Masuk (inlet area)

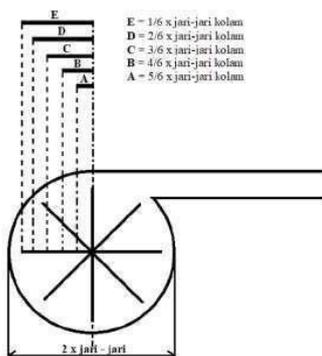
Berbagai jenis area saluran masuk, seperti saluran masuk tipe involute, tipe ramp, dan tipe scroll, telah diidentifikasi sebagai kategori yang ditujukan untuk meningkatkan kinerja turbin. Telah ditemukan bahwa pemanfaatan jenis saluran masuk ini dapat secara efektif mengurangi dampak turbulensi di sepanjang dinding saluran masuk dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Tipe lubang masuk turbin vortex
Sumber: Wahyu, 2018

H. Sudu Pada Turbin

Diameter bilah turbin pusaran dapat disesuaikan pada interval yang mewakili 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, dan 5/6 kali radius kolam pusaran. Daya maksimum yang diberikan pada bilah terjadi saat bilah disesuaikan menjadi 3/6 kali radius kolam, dengan memanfaatkan tujuh bilah bilah. (Yusuf Randabunga, 2013) untuk jelasnya dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Pemilihan diameter sudu turbin
Sumber: Yusuf Randabunga, 2013

I. Pengukuran debit (Q)

Debit aliran air dihitung dengan menggunakan persamaan (M.Bruce,2006)

$$Q = V/t$$

Dimana :

Q = Debit (l/s)

V =Volume (l)

t = Waktu (s)

J. Pengukuran Torsi

Torsi adalah gaya puntir yang kuat yang dihasilkan oleh poros engkol atau kemampuan mesin untuk melakukan tugas. Istilah ini secara khusus mengukur kekuatan gaya puntir yang diberikan pada mesin secara proporsional dengan panjang tuasnya. Biasanya dilambangkan dengan simbol τ , torsi umumnya diukur dalam pound-feet atau pound-inch,

dengan satuan pengukuran tradisional adalah ft.lb (Djuhana,2008).

K. Daya efektif

Perhitungan daya efektif yang dapat ditransmisikan oleh poros dapat dihitung dengan persamaan (M.Bruce, 2006).

$$P=2\pi.N.(T/60)$$

Dimana:

P= Day (Watt)

T= Momen gaya (Nm)

N=Putaran turbin (Rpm)

Atau daya efektif yang dihasilkan oleh pergerakan sudu turbin adalah daya yang sebanding dengan torsi dikali dengan kecepatan sudut sudu.

$$P_{act} = T.\omega$$

Dengan:

Pact = Daya aktual turbin (Watt)

ω = Kecepatan sudut sudu (rad/s)

T =Torsi yang terjadi (RPM)

L. Daya Potensi

Daya hidrolis yang dapat dihasilkan oleh turbin sesuai dengan kapasitas tinggijatuhyang diketahui adalah (Dietzel,1996).

$$P_{pt} = \rho.g.Q.H$$

Keterangan :

Ppt= Daya potensi (Watt)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

g= Gravitasi (m/s²)

H= Tinggi jatuh air (m)

M. Efisiensi

Efisiensi turbin dapat dicari dengan persamaan (M.Bruce,2006).

$$\eta = (P_{eff}/P_{id}) \times 100\%$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)

P_{eff}= Daya Hidrolis (Watt)

P_{id} = Daya Potensi (Watt).

3. METODE

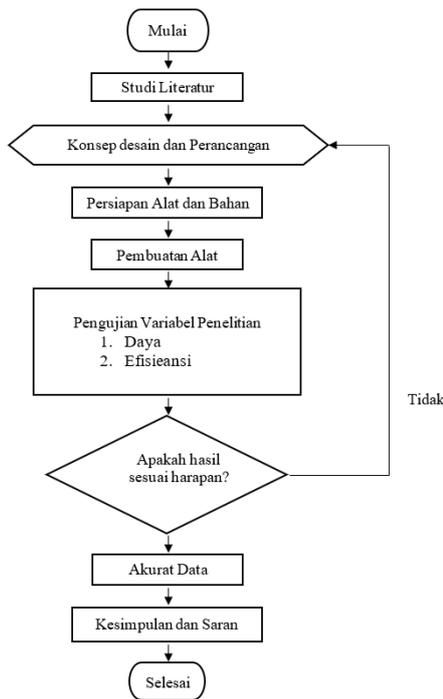
A. Studi Literatur

Sebelum memulai penelitian, sebaiknya dilakukan telaah pustaka secara menyeluruh. Hal ini melibatkan pengumpulan informasi yang terkait dengan topik dengan meninjau pustaka secara ekstensif dari berbagai sumber seperti internet dan perpustakaan, serta mempelajari video eksperimen yang ada

sebagai referensi. Telaah pustaka memungkinkan identifikasi metode dan rumus penelitian yang relevan untuk digunakan dalam proses penelitian dan analisis data. Selain itu, telaah pustaka membantu mengidentifikasi lokasi potensial untuk melakukan pengujian pada turbin vortex.

B. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan peneliti seperti di tunjukan pada diagram alir di bawah ini.



Gambar 10. Diagram alir
Sumber: Data Peneliti, 2024

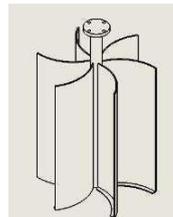
C. Desain dan Perencanaan

Dalam hal ini, peneliti melakukan analisis dengan cara menyandingkan fluktuasi bilah berbentuk L dengan fluktuasi bilah lengkung pada turbin vortex. Diameter bilah turbin vortex dapat diatur berdasarkan penelitian sebelumnya, berkisar antara 1/6 hingga 5/6 dari radius kolam. Berdasarkan hasil temuan Yusuf Randabunga pada tahun 2013, daya optimal diperoleh dengan ukuran bilah sebesar 3/6 dari radius kolam dan tinggi 35 cm. Dengan demikian, penelitian ini menggunakan tinggi bilah 30 cm dan diameter bilah berjari-jari 3/6,

sesuai dengan penelitian tersebut di atas. .Jari-jari sudu dapat dihitung :

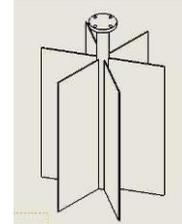
$$r \text{ sudu} = 3/6 \times 30 \text{ cm} = 15 \text{ cm}$$

Maka jari-jari sudu yang digunakan pada penelitian ini adalah 15 cm. Desain dari sudu lengkung dapat dilihat pada Gambar 11 sebagai berikut:



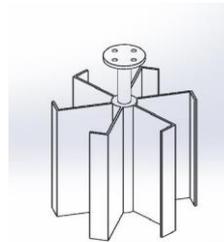
Gambar 11. Sudu Lengkung
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Design dari sudu datar dapat dilihat pada Gambar 12. sebagai berikut:



Gambar 12. Sudu Datar
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Desain dari sudu L dapat dilihat pada Gambar 13 sebagai berikut:



Gambar 13. Sudu L
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Persiapan Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Grinda potong duduk.
2. Las listrik.
3. Las Asitelin.
4. Mesin drill.
5. Mesin bor.
6. Mesin bubut.
7. Alat keselamatan kerja.

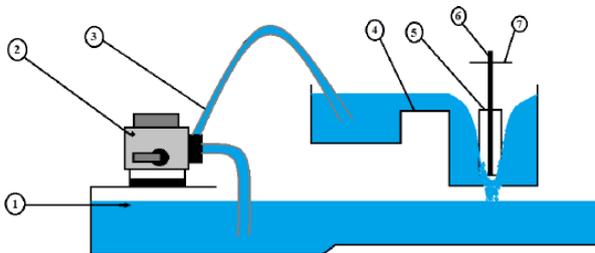
Bahan-bahan yang digunakan untuk

membuat alat penelitian yaitu:

1. Besi siku.
2. PVC
3. Plat 2 mm bahan turbin.
4. Besi pejal.
5. Besi bulat berongga.
6. Pulley.
7. Mur dan baut.
8. Bearing.

D. Pembuatan Alat Pengujian

Untuk mempermudah pemahaman bagian-bagian alat uji coba turbin vortex dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Skema Alat Uji Turbin Vortex

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Keterangan :

1. Saluran air sungai.
2. Pompa air bahan bakar premium.
3. Selang air diameter 2 inchi.
4. Kolam turbin vortex.
5. Turbin vortex.
6. Poros.
7. Pulley.

E. Pengujian Alat

Dalam pengujian alat ada beberapa hal yang diperlukan dan dipersiapkan dalam melakukan pengujian alat:

1. Membersihkan dan mempersiapkan alat yang akan digunakan untuk pengujian.
2. Memasang pipa spiral ke pompa yang berguna untuk sirkulasi penyedotan air ke dalam pompa.
3. Memasang sudu yang akan diuji pada turbin.
4. Memasang poros sudu yang akan diuji keudukan poros turbin.
5. Mengalirkan air ke dalam bejana penampungan menggunakan selang air.
6. Menetapkan head yang ditentukan pada bejana penampungan, kemudian air di alirkan ke dalam bejana turbin vortex

untuk menggerakkan sudu.

7. Menyiapkan alat – alat ukur untuk mengambil data turbin.
8. Mempersiapkan alat tulis untuk menulis data pengujian.

F. Analisis Hasil Pengujian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa proses pengambilan data yaitu:

Pengambilan Data Debit Air (Q)

Untuk pengambilan data debit air dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

1. Pertama-tama, siapkan stopwatch, kertas, dan pena untuk mengumpulkan data debit air.
2. Arahkan selang pompa air ke dalam wadah yang cukup besar dan nyalakan pengatur waktu bersamaan dengan aliran air, hitung durasi dari awal pengisian hingga titik jenuh air penuh.
3. Kumpulkan data berdasarkan waktu yang tercatat dari stopwatch dan hitung laju aliran air.

G. Pengambilan Data Putaran Poros Turbin

Proses pengambilan data putaran poros turbin dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Pertama-tama, takometer, yaitu alat yang dirancang untuk mengukur kecepatan putaran poros turbin, yang akan digunakan untuk pengujian, harus disiapkan.
2. Alat yang digunakan harus dipastikan berfungsi dengan baik dan dalam kondisi siap pakai.
3. Penting untuk menempelkan stiker kecil pada poros, karena ini akan memudahkan pembacaan putaran pada takometer.
4. Saat poros berputar, arahkan ujung takometer dan tekan tombol yang sesuai untuk memastikan sinar laser mengenai stiker. Ini akan memungkinkan Anda untuk menangkap data kecepatan putaran poros turbin, yang akan ditampilkan pada monitor takometer. Catat waktu yang dihasilkan sesuai kebutuhan.

H. Pengambilan Data Torsi (τ)

Pada pengambilan data ini pengukuran

torsi menggunakan metode prony brake, yaitu dengan cara:

1. Tali dililitkan di sekitar alur katrol yang terhubung ke poros turbin alat ukur gaya pegas atau timbangan digital, yang dipasang timbangan digital di ujungnya.
2. Saat poros mengalami rotasi, tali yang diikatkan menyebabkan timbangan tertarik, sehingga menghasilkan pengukuran gaya yang diberikan pada katrol. Data yang diperoleh dari berat beban yang tercatat kemudian harus didokumentasikan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pembuatan Turbin Vortex

Rumah turbin dan bak penampung dibuat dari drum oli bekas yang dipotong, dengan rumah turbin berdiameter 50 cm dan tinggi 40 cm, serta bak penampung berdiameter 50 cm dan tinggi 30 cm. Penggunaan drum oli bekas dipilih untuk efisiensi biaya dan kemudahan akses. Rumah turbin dipasang pada rangka besi L yang dirancang sesuai dengan desain *SolidWorks* untuk memastikan kekuatan dan stabilitas. Saluran pembawa air, yang terbuat dari plat besi dengan ketebalan 2 mm, dirancang untuk meningkatkan efek pusaran dengan mengarahkan air masuk dari sisi samping dan memusatkan aliran di tengah kolam turbin vortex. Sudu turbin, yang terbuat dari besi pejal dan bulat berongga serta plat besi, memiliki diameter 30 cm dan tinggi 35 cm. Tiga bentuk sudu yang diuji adalah L, lengkung, dan lengkung bersirip. Gambar-gambar dari rumah turbin, bak penampung, saluran pembawa air, dan sudu turbin dapat dilihat pada Gambar 15, serta detail lebih lanjut tersedia pada Lampiran.



Gambar 15. Hasil Pembuatan turbin Vortex
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

B. Hasil Penelitian

Dalam analisis dampak bentuk bilah pada efisiensi turbin vortex, berbagai parameter penting ikut berperan, seperti tinggi muka, debit, massa bilah, dan vortisitas. Dimensi bilah, yang secara langsung memengaruhi massanya, sangat penting karena dimensi yang lebih besar menghasilkan produksi massa yang lebih besar, sehingga meningkatkan momen inersia yang perlu diatasi oleh aliran vortex. Lebih jauh, vortisitas, sebuah konsep dasar dalam dinamika fluida yang menggambarkan kecenderungan elemen fluida untuk berputar karena perbedaan tekanan antara dua daerah aliran, juga memengaruhi kinerja turbin. Pada bagian luar pusaran, kecepatan aliran lebih lambat dibandingkan dengan kecepatan di bagian tengah dan dalam pusaran. Variasi dalam kecepatan aliran ini mempengaruhi efisiensi konversi energi oleh turbin vortex, yang bergantung pada bentuk sudu yang digunakan.

C. Pengukuran Debit

Pengukuran debit air dilakukan untuk menentukan seberapa banyak air yang mengalir melalui turbin vortex per satuan waktu. Rumus yang digunakan untuk menghitung debit adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Di mana:

Q = Debit (m³/s)

V = Volume air (m³)

t = Waktu (detik)

Dalam percobaan ini, air dialirkan ke dalam wadah ukur dengan volume 22 liter. Waktu yang diperlukan untuk mengisi penuh wadah tersebut adalah 2,45 detik. Untuk menghitung debit air yang keluar dari turbin vortex, langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:

1. Konversi Volume ke Meter Kubik:

Volume air V dalam liter dikonversi ke meter kubik menggunakan konversi 1 liter = 0,001 m³:

$$V = 22 \text{ liter} \times 0,001 \text{ m}^3/\text{liter} = 0,022 \text{ m}^3$$

2. Hitung Debit dalam Meter Kubik per Detik (m³/s):

Menggunakan rumus debit:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Substitusi nilai volume dan waktu ke dalam rumus:

$$Q = \frac{0,022 \text{ m}^3}{2,45 \text{ detik}} = 0,00898 \text{ m}^3/\text{s}$$

Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan, debit air yang keluar dari turbin vortex dengan volume 22 liter dan waktu 2,45 detik adalah sekitar 0,00898 m³/s atau 8,98 L/s.

D. Pengaruh Variasi Bentuk Sudu terhadap Putaran Turbin

Dalam penelitian ini, variasi bentuk sudu pada turbin vortex dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya dan efisiensi. Tiga variasi bentuk sudu yang digunakan adalah sudu datar, sudu lengkung, dan sudu L. Berikut adalah deskripsi dan perbandingan kinerja dari setiap variasi sudu berdasarkan putaran turbin (rpm) yang dihasilkan, Berikut adalah tabel yang menunjukkan data pengaruh variasi bentuk sudu terhadap putaran turbin:

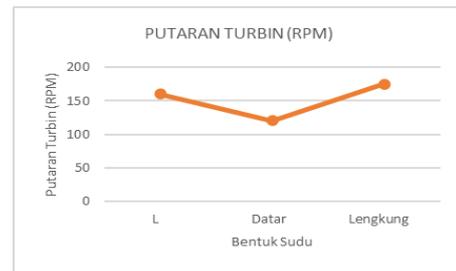
Tabel 1. Data Hasil Putaran Turbin

Debit(L/s)	Bentuk Sudu	PutaranTurbin (rpm)
8,98	L	160
8,98	Datar	120
8,98	Lengkung	175

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Sudu datar menunjukkan putaran turbin sebesar 120 rpm. Bentuk sudu ini menghasilkan putaran yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan variasi sudu lainnya. Sudu lengkung menunjukkan putaran turbin yang tertinggi, yaitu 175 rpm. Bentuk sudu ini memungkinkan aliran air mengalir lebih efisien dan menghasilkan putaran yang lebih tinggi. Sudu berbentuk L menghasilkan putaran turbin sebesar 160 rpm. Bentuk sudu ini memberikan hasil yang lebih baik daripada sudu datar namun tidak seoptimal sudu lengkung.

Berikut grafik dari perhitungan putaran turbin (rpm) :



Gambar 16.. Grafik Hasil Putaran Turbin

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

Berdasarkan data di atas, dapat disimpulkan bahwa variasi bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap putaran turbin vortex. Sudu lengkung menunjukkan performa terbaik dalam hal putaran turbin, diikuti oleh sudu L dan sudu datar.

E. Pengaruh Variasi Bentuk Sudu terhadap Torsi

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi bentuk sudu pada turbin vortex terhadap torsi yang dihasilkan. Tiga bentuk sudu yang digunakan adalah sudu L, sudu datar, dan sudu lengkung. Hasil percobaan menunjukkan variasi yang signifikan dalam torsi yang dihasilkan oleh masing-masing bentuk sudu.

Torsi (T) merupakan gaya putar yang dihasilkan oleh turbin, dan perhitungannya didasarkan pada gaya (F) yang bekerja pada jari-jari (r) turbin. Gaya (F) sendiri dihitung dari selisih massa beban setelah putaran (m₂) dan massa beban awal (m₁), dikalikan dengan percepatan gravitasi (g). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$F=(m_2-m_1) \cdot g \quad T=F \cdot r$$

Berikut adalah hasil perhitungan torsi untuk setiap bentuk sudu didasarkan data percobaan. Untuk sudu L, massa beban setelah putaran adalah 1,678 kg dan massa beban awal adalah 0,245 kg. Dengan jari-jari turbin sebesar 0,15 m, perhitungan gaya dan torsi adalah sebagai berikut:

$$F = (1,678 \text{ kg} - 0,245 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 1,433 \cdot 9,81$$

$$= 14,052 \text{ N}$$

$$T = 14,052 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m}$$

$$= 2,1078 \text{ Nm}$$

Untuk sudu datar, massa beban setelah putaran adalah 1,543 kg dan massa beban awal adalah 0,567 kg. Dengan jari-jari turbin sebesar

0,15 m, perhitungan gaya dan torsi adalah sebagai berikut:

$$F = (1,543 \text{ kg} - 0,567 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 0,976 \cdot 9,81$$

$$= 9,5676$$

$$T = 9,5676 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m}$$

$$= 1,43514 \text{ Nm}$$

Untuk sudu lengkung, massa beban setelah putaran adalah 1,324 kg dan massa beban awal adalah 0,321 kg. Dengan jari-jari turbin sebesar 0,15 m, perhitungan gaya dan torsi adalah sebagai berikut:

$$F = (1,324 \text{ kg} - 0,321 \text{ kg}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 1,003 \cdot 9,81$$

$$= 9,84093$$

$$T = 9,84093 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m}$$

$$= 1,47614 \text{ Nm}$$

Berikut adalah tabel hasil perhitungan torsi untuk setiap variasi sudu:

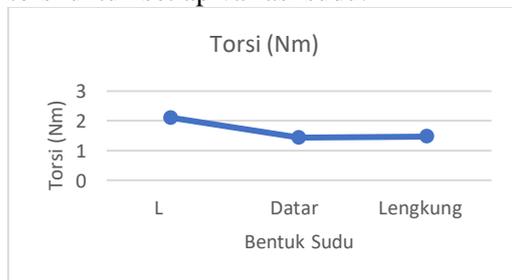
Tabel 2. Hasil Perhitungan Torsi

Bentuk Sudu	Putaran Turbin (rpm)	(m ² - m ¹) (kg)	Torsi (Nm)
L	160	1,433	2,1078
Datar	120	0,976	1,43514
Lengkung	175	1,003	1,47614

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Berdasarkan hasil perhitungan, variasi bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin vortex. Sudu L menghasilkan torsi tertinggi sebesar 2,1078 Nm, diikuti oleh sudu lengkung dengan torsi 1,47614 Nm, dan sudu datar dengan torsi 1,43514 Nm.

Berikut adalah grafik hasil perhitungan torsi untuk setiap variasi sudu:



Gambar 17. Grafik Hasil Perhitungan Torsi
Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

Berdasarkan hasil perhitungan, variasi bentuk sudu mempengaruhi torsi yang

dihasilkan oleh turbin vortex. Sudu L menghasilkan torsi tertinggi, diikuti oleh sudu lengkung dan sudu datar. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja mekanik turbin vortex.

F. Pengaruh Variasi Bentuk Sudu terhadap Daya

Dalam penelitian ini, variasi bentuk sudu pada turbin vortex dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya yang dihasilkan. Tiga bentuk sudu yang digunakan adalah sudu L, sudu datar, dan sudu lengkung. Hasil percobaan menunjukkan variasi yang signifikan dalam daya yang dihasilkan oleh masing-masing bentuk sudu.

Daya (P) dihitung menggunakan rumus dasar daya mekanik:

$$P = 2\pi NT60$$

Di mana:

$$P = \text{Daya (Watt)}$$

$$N = \text{Kecepatan putaran (rpm)}$$

$$T = \text{Torsi (Nm)}$$

Berikut adalah hasil perhitungan daya untuk setiap bentuk sudu berdasarkan data percobaan:

Sudu L menghasilkan kecepatan putaran sebesar 160 rpm dan torsi 2,1078 Nm.

Dengan menggunakan rumus :

$$P = 2\pi \times 160 \times 2,1078 \cdot 60$$

$$= 2119,68 \pi 60$$

$$= 35,34 \text{ Watt}$$

Sudu datar menunjukkan kecepatan putaran sebesar 120 rpm dan torsi 1,43514 Nm.

Perhitungan daya menunjukkan bahwa :

$$P = 2\pi \times 120 \times 1,43514 \cdot 60$$

$$= 1080,408 \pi 60$$

$$= 22,62 \text{ Watt}$$

Sudu lengkung menghasilkan kecepatan putaran tertinggi sebesar 175 rpm dan torsi 1,47614 Nm.

Daya yang dihasilkan oleh sudu lengkung adalah :

$$P = 2\pi \times 175 \times 1,47614 \cdot 60$$

$$= 1625,365 \pi 60$$

$$= 42,52 \text{ Watt}$$

Berikut adalah tabel hasil perhitungan daya untuk setiap variasi sudu:

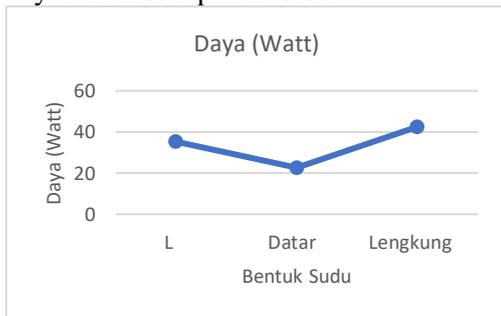
Tabel 3. Hasil Perhitungan Daya

Bentuk Sudu	Putaran Turbin (rpm)	Torsi (Nm)	Daya (Watt)
L	160	2,107	35,34
Datar	120	1,435	22,62
Lengkung	175	1,476	42,52

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Berdasarkan hasil perhitungan, variasi bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin vortex. Sudu lengkung menghasilkan daya tertinggi sebesar 42,52 Watt, diikuti oleh sudu L dengan daya 35,34 Watt, dan sudu datar dengan daya 22,62 Watt. Hasil ini menunjukkan bahwa bentuk sudu lengkung lebih efisien dalam menghasilkan daya dibandingkan dengan sudu lainnya dalam konteks penelitian ini.

Berikut adalah Grafik perhitungan daya untuk setiap variasi sudu:



Gambar 18. Grafik. Perhitungan Daya

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

Daya yang dihasilkan oleh turbin bervariasi berdasarkan bentuk sudu. Sudu lengkung menghasilkan daya tertinggi sebesar 42.52 Watt, diikuti oleh sudu L dengan 35.34 Watt, dan sudu datar dengan 22.62 Watt.

G. Pengaruh Variasi Bentuk Sudu terhadap Efisiensi Turbin Vortex

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk sudu pada turbin vortex terhadap efisiensi turbin. Tiga bentuk sudu yang diuji adalah sudu L, sudu datar, dan sudu lengkung. Efisiensi turbin (η) dihitung untuk menentukan seberapa efektif turbin vortex dalam mengkonversi energi Potensial dari aliran air menjadi energi mekanik.

Efisiensi dihitung menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{P_{\text{eff}}}{P_{\text{hid}}} \times 100\%$$

Di mana:

η (eta) = Efisiensi (%)

P_{eff} = Daya efektif yang dihasilkan oleh turbin (Watt)

P_{hid} = Daya hidraulik yang tersedia dari aliran air (Watt)

Daya Potensial (P_{hid}) dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{\text{hid}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Di mana:

ρ = Densitas air (1000 kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Q = Debit air (m³/s)

H = Tinggi jatuh air (m)

Dalam percobaan ini, tinggi jatuh air (H) adalah 1 meter dan debit air (Q) adalah 8,98L/s (0,00898m³/s):

$$P_{\text{hid}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,00898 \cdot 1 = 88,03 \text{ Watt}$$

Hasil perhitungan daya efektif (P_{eff}) dan efisiensi (η) untuk setiap bentuk sudu adalah sebagai berikut:

1. Sudu L

- Daya efektif : 35,34 Watt

- Daya Potensial : 88,03 Watt

$$\eta = \frac{35,34}{88,03} \times 100\% = 40,14\%$$

2. Sudu Datar

- Daya efektif : 22,62 Watt

- Daya hidraulik : 88,03 Watt

$$\eta = \frac{22,62}{88,03} \times 100\% = 25,69\%$$

3. Sudu Lengkung

- Daya efektif : 42,52 Watt

- Daya hidraulik : 88,03 Watt

$$\eta = \frac{42,52}{88,03} \times 100\% = 48,31\%$$

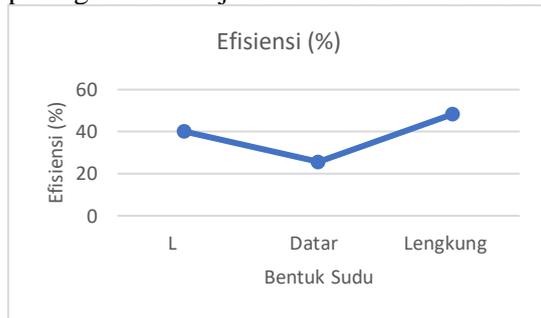
Berikut adalah tabel hasil perhitungan efisiensi untuk setiap variasi sudu:

Tabel 4. Hasil perhitungan efisiensi

Bentuk Sudu	Daya Efektif (Watt)	Daya Potensial (Watt)	Efisiensi (%)
L	35,34	88,03	40,14
Datar	22,62	88,03	25,69
Lengkung	42,52	88,03	48,31

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Berdasarkan hasil perhitungan, variasi bentuk sudu memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi turbin vortex. Sudu lengkung menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 48,31%, diikuti oleh sudu L dengan efisiensi 40,14%, dan sudu datar dengan efisiensi 25,69%. Efisiensi yang lebih tinggi pada sudu lengkung menunjukkan bahwa desain sudu tersebut lebih efektif dalam memanfaatkan energi aliran air, yang berdampak pada peningkatan kinerja keseluruhan turbin vortex.



Gambar 18. Grafik Perhitungan Efisiensi

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

Efisiensi turbin vortex dipengaruhi oleh bentuk sudu. Sudu lengkung menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 48.31%, diikuti oleh sudu L dengan efisiensi 40.14%, dan sudu datar dengan efisiensi 25.69%.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menganalisis pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin vortex dengan fokus pada putaran turbin, torsi, daya yang dihasilkan, dan efisiensi. Berikut adalah kesimpulan deskriptif dari hasil penelitian:

A. Pengaruh terhadap Daya, Sudu Lengkung Menghasilkan daya tertinggi sebesar 42.52 Watt. Ini menunjukkan bahwa sudu lengkung memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi dalam hal daya yang dihasilkan. Sudu L Menghasilkan daya sebesar 35.34 Watt. Sudu L menunjukkan performa yang baik dalam menghasilkan daya, meskipun tidak sebaik sudu lengkung. Sudu Datar Menghasilkan daya terendah sebesar 22.62 Watt. Sudu datar kurang

efisien dalam mengkonversi energi hidraulik menjadi energi mekanik.

B. Pengaruh terhadap Efisiensi, Sudu Lengkung Menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 48.31%. Ini menunjukkan bahwa sudu lengkung paling efektif dalam mengkonversi energi hidraulik menjadi energi mekanik dibandingkan dengan bentuk sudu lainnya. Sudu L Menunjukkan efisiensi sebesar 40.14%. Sudu L memiliki efisiensi yang baik, meskipun tidak sebaik sudu lengkung. Sudu Datar Menunjukkan efisiensi terendah sebesar 25.69%. Sudu datar kurang efisien dalam mengkonversi energi hidraulik menjadi energi mekanik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ariprasetya, S., & Adiwibowo, P. H. 2018. Eksperimental Pengaruh Kemiringan Sudut Sudu Berpenampang Plat Datar Terhadap Kinerja Turbin Aliran Vortex. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(1).
- Dietzel, F., & Sriyono, D. 1988. Turbin, Pompa dan Kompresor. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Hakim, M. F. R., & Adiwibowo, P. H. 2018. Uji Eksperimental Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Tipe Sudu Berpenampang L Dengan Variasi Tinggi Sudu. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(1).
- Mulligan, S. 2010. Energy, Environment, and Security: Critical Links in a Post-Peakworld. *Global Environmental Politics*, 10(4), 79-100.
- Nugroho, H. Y. S. H., & Sallata, M. K. 2015. PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro): Panduan Lengkap Membuat Sumber Energi Terbarukan Secara Swadaya. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Perdana, A. R. Y. 2021. Rancang Bangun Turbin Vortex Dengan Sudu Berbentuk Flat dan Lengkung Upaya Meningkatkan Efisiensi. Doctoral Dissertation, Universitas Islam

Kalimantan MAB.

- Prasetyo, W. D. 2018. Rancang Bangun Turbin Vortex Skala Kecil dan Pengujian Pengaruh Bentuk Penampang Sudu Terhadap Daya, Doctoral Dissertation, Universitas Islam Yogyakarta.
- Randabunga, Y. 2013. Pengaruh Lebar Sudu Terhadap Kinerja Turbin Vorteks Doctoral Dissertation, Universitas Gadjah Mada.
- Sutrimo, D., & Adiwibowo, P. H. 2019. Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Berpenampang L Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Crossflow Poros Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1)
- Wibawanto, H. H., & Adiwibowo, P. H. 2018. Uji Eksperimental Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex Tipe Sudu Berpenampang L Dengan Variasi Lebar Sudu. *Jurnal Teknik Mesin*, 6(1).