

EXPERIMENTAL STUDY OF CROSSFLOW TURBINES WITH VARIATIONS FLOW GUIDE IN RUNNER FOR SEA WAVE POWER PLANTS

Rizky Risdianto*, Ismail dan Erlanda Augupta Pane

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila

*Corresponding author: rizkyRRisdianto@gmail.com

Abstract. *The working principle of the technology to convert ocean wave energy potential into electrical energy that will be designed is to change the potential of the up and down motion of sea water waves to drive pumps that will supply water to drive turbines. This research is more focused on the calculation, design and experimental testing of crossflow turbines because it becomes one of the main components that is very important and is directly related to generators that will produce electrical energy. The design of crossflow turbines in this study will maximize the flow of water that will come out of the first level turbine blades by adding a directional flow at the side of the turbine runner so that the power from the water can be absorbed maximally by the turbine blade at the second level. The research method carried out in this thesis is the collection of data obtained from the study of the literature and then analyze the performance of the performance of the crossflow turbine flow directional variant by means of experimental tests of prototype crossflow turbine. Determination of the angle variant for the directional flow at the runner will refer to the results of the calculation of the velocity triangle for absolute angles (α). Variants in this study are distinguished by the angle at the directional flow in the runner that is equal to 0° , 25.6° , 51.2° and 76.8° . The results of tests conducted in 3 days and 3 times ie morning, afternoon and evening show variant 3 with an angle of 51.2° has the best test results with the resulting value of the highest turbine rotation of 190 rpm. The third variant produces the best position of falling water to the turbine blade at the second level of the turbine blade at the first level. The flow of water coming from the turbine blade at the first level is entirely in the direction of the flow so that the position of falling water is more focused. The directional angle of flow in the runner on the crossflow turbine is very influential on the rotation and efficiency of the crossflow turbine. Choosing the right angle can maximize the rotation of the crossflow turbine.*

Abstrak. Prinsip kerja dari teknologi pengkonversi potensi energi gelombang laut menjadi energi listrik yang akan dirancang ini adalah mengubah potensi dari gerakan naik dan turun pada gelombang air laut untuk menggerakkan pompa yang akan men-supply air untuk menggerakkan turbin. Penelitian ini lebih difokuskan kepada perhitungan, perancangan serta uji eksperimental turbin *crossflow* karena menjadi salah satu komponen utama yang sangat penting dan berhubungan langsung dengan generator yang akan menghasilkan energi listrik. Perancangan turbin *crossflow* pada penelitian ini akan memaksimalkan aliran air yang akan keluar dari sudu turbin tingkat pertama dengan menambahkan pengarah aliran pada sisi *runner* turbin sehingga tenaga dari air dapat terserap maksimal oleh sudu turbin di tingkat kedua. Metode penelitian yang dilakukan pengumpulan data-data yang didapat dari proses studi literatur kemudian menganalisis performansi dari kinerja varian pengarah aliran turbin *crossflow* dengan cara uji eksperimental terhadap prototype turbin *crossflow*. Penentuan varian sudut untuk pengarah aliran pada *runner* akan mengacu pada hasil perhitungan segitiga kecepatan untuk sudut absolut (α). Varian pada penelitian ini dibedakan dengan sudut pada pengarah aliran dalam *runner* yaitu sebesar 0° , $25,6^\circ$, $51,2^\circ$ dan $76,8^\circ$. Hasil pengujian yang dilakukan dalam 3 hari dan 3 waktu yaitu pagi, siang dan sore menunjukkan varian 3 dengan sudut $51,2^\circ$ memiliki hasil uji terbaik dengan nilai yang dihasilkan yaitu putaran turbin tertinggi sebesar 190 rpm. Varian ketiga menghasilkan posisi terbaik jatuh air ke sudu turbin di tingkat kedua dari sudu turbin di tingkat pertama, Aliran air yang berasal dari sudu turbin di tingkat pertama sepenuhnya berada dalam pengarah aliran sehingga posisi jatuh air lebih terfokuskan. Sudut pengarah aliran dalam *runner* pada turbin *crossflow* sangat berpengaruh terhadap putaran dan efisiensi dari turbin *crossflow*. Pemilihan sudut yang tepat dapat memaksimalkan putaran dari turbin *crossflow*.

Kata kunci: Turbin *Crossflow*, Pengarah Aliran, PLTGAL

Pendahuluan

Kebutuhan energi yang terus meningkat turut mempengaruhi kelangsungan hidup manusia jika tidak ada inovasi dalam hal pengembangan energi. Pengembangan sumber energi terbarukan dituntut agar kebutuhan energi di Indonesia dapat terpenuhi. Energi laut yang dihasilkan dari sifat pergerakan angin dan suhu yang ada di laut yang menyebabkan pergerakan aliran air laut adalah sumber energi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi pasang surut air laut, energi gelombang air laut, energi arus laut ataupun energi perbedaan suhu lapisan laut [1].

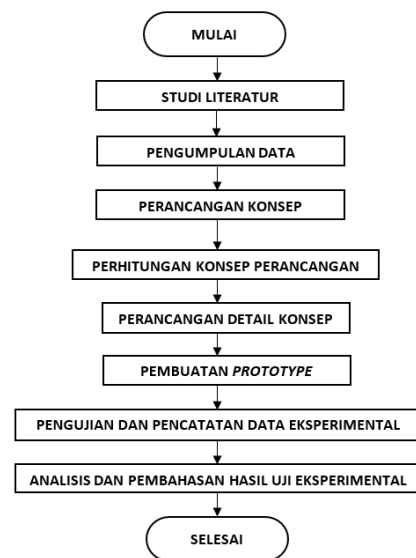
Teknologi yang digunakan dalam perancangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini adalah turbin, sistem pendulum dan pompa. Prinsip kerja teknologi pengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik yang dirancang adalah mengubah potensi dari gerakan naik turun pada gelombang laut untuk menggerakkan pompa yang akan *supply* air untuk menggerakkan turbin. Pembangkit listrik ini memanfaatkan potensi gelombang air laut di daerah pelabuhan Nizam Zachman Muara Baru Jakarta sebagai sumber energi. Pemilihan daerah tersebut sebagai area uji coba penelitian ini dikarenakan adanya garis pemecah ombak, dimana pada area tersebut ombak besar yang datang dari arah laut lepas akan bertabrakan dengan dinding pemecah ombak sehingga memiliki potensi ombak yang cukup besar.

Penelitian ini lebih difokuskan kepada perhitungan, perancangan serta uji eksperimental turbin karena menjadi salah satu komponen utama yang sangat penting dan berhubungan langsung dengan generator yang akan menghasilkan energi listrik. Jenis turbin yang akan dianalisis adalah turbin aliran silang (*crossflow*). Permasalahan pada design turbin *crossflow* standar bahwa aliran air pada *runner* setelah melewati sudu di tingkat pertama aliran airnya tidak terarah dengan baik, aliran ini dapat mengganggu kinerja putaran dari turbin *crossflow*. Perancangan turbin *crossflow* pada penelitian ini akan memaksimalkan aliran air yang akan keluar dari turbin dengan menambahkan pengarah pada sisi *runner* turbin sehingga tenaga dari air dapat terserap maksimal oleh turbin.

Tujuan dari penelitian ini adalah Merancang pengarah aliran dalam *runner* pada turbin *crossflow* yang tepat pada pembangkit listrik gelombang laut berdasarkan perhitungan terhadap gejala-gejala mekanik yang terjadi untuk mendapatkan bentuk serta performansi terbaik dan Melakukan uji eksperimental terhadap *prototype* turbin *crossflow* sesuai dengan parameter potensi daya yang tersedia untuk menganalisis performansi variasi pengarah aliran pada *runner* turbin.

Metode Penelitian

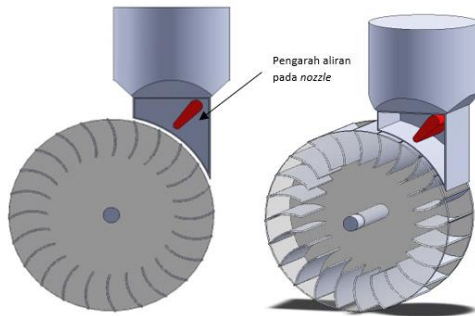
Diagram Alir. Penelitian yang dilakukan terfokuskan pada menganalisis performansi dari kinerja varian pengarah aliran turbin *crossflow* dengan cara uji eksperimental terhadap *prototype* turbin *crossflow*. Sebelum menentukan varian bentuk pengarah dari turbin *crossflow*, dilakukan perhitungan dan pemodelan bentuk 3D. Setelah bentuk dan dimensi sudah ditentukan kemudian dibuatkan *prototype* turbin *crossflow*, setelah itu baru dilakukan uji eksperimental terhadap *prototype* yang sudah dibuat dan dianalisis hasilnya.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

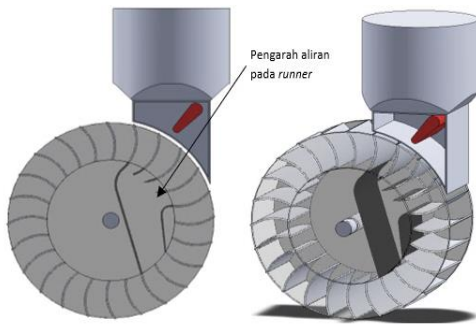
Perancangan Konsep. Berdasarkan data-data referensi pada kegiatan studi literatur dan penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, varian yang akan dijadikan bahan dalam penelitian ini adalah pengarah aliran pada *runner*.

Penambahan pengarah aliran air diposisi *runner* turbin dikarenakan perilaku aliran air pada area *runner* turbin, yaitu terjadi perpotongan aliran yang keluar dari sudu tingkat pertama menuju tingkat kedua, perpotongan aliran tersebut yang menghambat aliran masuk ke sudu di tingkat kedua. Pemasangan pengarah aliran di area *runner* turbin, menjadikan performansi turbin arus lintang menjadi lebih maksimal dan bertekanan pada saat masuk sudu di tingkat kedua. Kemudian, terlihat bahwa karakteristik aliran yang akan masuk sudu di tingkat kedua sudah mengikuti garis pengarah aliran dan tidak lagi saling berpotongan dan tidak terarah [2]. Turbin *crossflow* dengan desain standar tidak menggunakan pengarah aliran (*guide vane*) pada sisi *runner*, pengarah aliran hanya terdapat pada sisi *nozzle* yang biasanya dapat diatur sudut kemiringannya.



Gambar 2. Turbin *Crossflow* Desain Standar

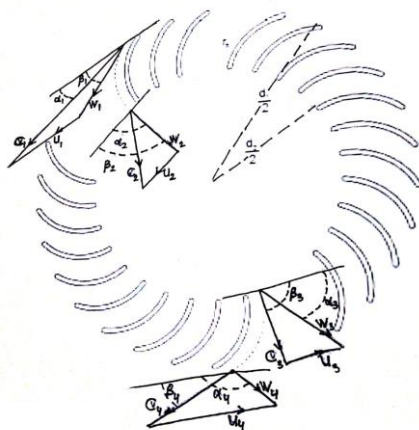
Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya mengenai pengaruh aliran (*guide passage gate vane*), Turbin *crossflow* pada penelitian ini akan diuji eksperimental dengan varian sudut pada pengaruh aliran (*guide vane*) di sisi *runner* turbin yang bertujuan untuk mengetahui desain pengaruh aliran (*guide vane*) dengan performansi terbaik.



Gambar 3. Turbin *Crossflow* Dengan Pengaruh Aliran

Perhitungan Perancangan. Penelitian ini mencari hasil dari persamaan-persamaan segitiga kecepatan turbin *crossflow*, ukuran dimensi dari turbin *crossflow* dan jarak pancaran aliran air dari poros serta diameter dalam turbin.

Perhitungan segitiga kecepatan turbin *crossflow* pada penelitian ini menggunakan persamaan-persamaan berdasarkan gambar 4 sebagai berikut [3]:



Gambar 4. Segitiga Kecepatan Turbin *Crossflow* [3]

$$\text{Kecepatan Absolut di Bidang A } (C_1) \\ C_1 = \sqrt{2 g H} \quad (1) \\ \text{Dengan :}$$

$$g = \text{gravitasi} = 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)} \\ H = \text{Tinggi jatuh air (m)}$$

$$\text{Kecepatan Tangensial di Bidang A } (U_1) \\ U_1 = \frac{C_1}{2} \quad (2)$$

$$\text{Sudut Relatif di Bidang A } (\beta_1) \\ \text{tg } \beta_1 = 2 \text{ tg } \alpha_1 \quad (3) \\ \text{Dengan :}$$

$$\alpha_1 = \text{sudut absolut masuk tingkat pertama (berdasarkan pada penelitian terdahulu, hasil optimum berkisar } 14^\circ - 20^\circ\text{)}$$

$$\text{Kecepatan Putaran Penggerak Pada Titik Jatuh Air di Bidang A } (Cu_1) \\ Cu_1 = C_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (4)$$

$$\text{Kecepatan absolut di Bidang B } (C_2) \\ C_2 = 0,528 \cdot C_1 \quad (5)$$

$$\text{Kecepatan Aliran di Bidang A } (Cm_1) \\ Cm_1 = C_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad (6)$$

$$\text{Kecepatan Relatif di Bidang A } (W_1) \\ W_1 = \frac{Cm_1}{\sin \beta_1} \quad (7)$$

$$\text{Kecepatan Tangensial di Bidang B } (U_2) \\ U_2 = \frac{D_2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (8)$$

$$\text{Sudut Absolut di Bidang B } (\alpha_2) \\ \tan \alpha_2 = \frac{1,147 \cdot W_1}{U_1} \quad (9)$$

$$\text{Kecepatan Putaran Penggerak Pada Titik Jatuh Air di Bidang B } (Cu_2) \\ Cu_2 = C_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (10)$$

$$\text{Kecepatan Aliran di Bidang B } (Cm_2) \\ Cm_2 = C_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (11)$$

$$\text{Kecepatan Putaran Penggerak Pada Titik Jatuh Air di Bidang D } (Cu_4) \\ Cu_4 = C_4 \cdot \cos \alpha_4 \quad (12)$$

$$\text{Kecepatan Aliran di Bidang C } (Cm_3) \\ Cm_3 = C_3 \cdot \sin \alpha_3 \quad (13)$$

Perhitungan dimensi turbin *crossflow* pada penelitian ini menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut [4]:

Diameter Luar Runner (D_1)

$$D_1 = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \cdot N} \quad (14)$$

Diameter Nominal (d)

$$d = \frac{1 - \sin \alpha_1}{2 \cos \beta (1 + \sin \alpha_1)} D_1 \quad (15)$$

Diameter Dalam Runner (D_2)

$$D_2 = \frac{2}{3} \cdot D_1 \quad (16)$$

Panjang Turbin (L)

$$L = \frac{144 \cdot Q \cdot N}{862 \cdot H^{\frac{1}{2}} \cdot C \cdot k \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

Dengan :

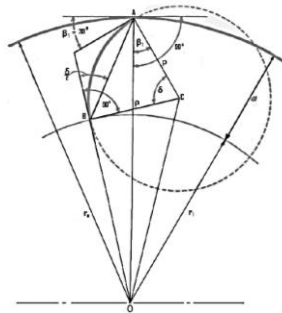
- Q = Debit aliran air (m^3/s)
- C = Koefisien Nosel = 0,98
- k = Faktor koreksi = 0,087

Jari-jari Kelengkungan Sudu (ρ)

$$\rho = 0,326 \cdot r_1 \quad (18)$$

Dengan :

r_1 = jari-jari luar runner (m)



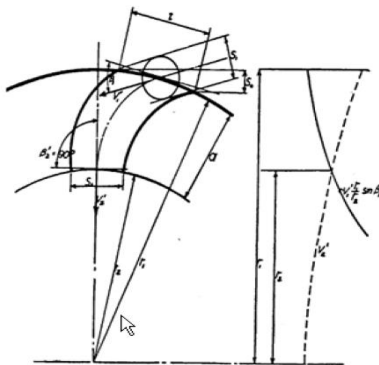
Gambar 5. Penentuan Kelengkungan Sudu [4]

Jarak antar sudu (t)

$$s_1 = k \cdot D_1 \quad (19)$$

$$s_2 = t \cdot \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (20)$$

$$t = \frac{s_1}{\sin \cdot \beta_1} \quad (21)$$



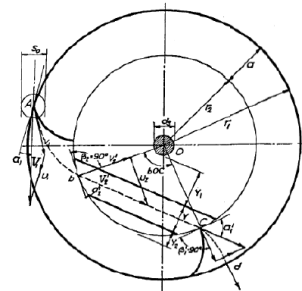
Gambar 6. Jarak Antar Sudu [4]

Jumlah Sudu

$$n = \pi \cdot \frac{D_1}{t} \quad (22)$$

Jarak pancaran aliran pada turbin *crossflow* terbagi atas dua macam, yaitu jarak pancaran yang diukur dari poros (y_1) dan jarak pancaran yang diukur dari keliling diameter dalam (y_2), kemudian selisih dari kedua jarak tersebut akan mendapatkan lebar dari pancaran aliran air (y).

Hasil perhitungan jarak pancaran aliran akan dijadikan acuan dasar dalam penentuan varian. Persamaan dalam penentuan jarak pancaran adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Jarak Pancaran Aliran Air [5]

Jarak Pancaran dari Poros (y_1)

$$y_1 = (0,1986 - 0,945 \cdot k) \cdot D_1 \quad (23)$$

Dengan :

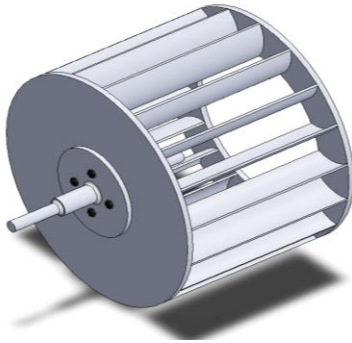
Dengan :

k = Faktor koreksi = 0,087

Jarak Pancaran dari Keliling Diameter Dalam (y_2)

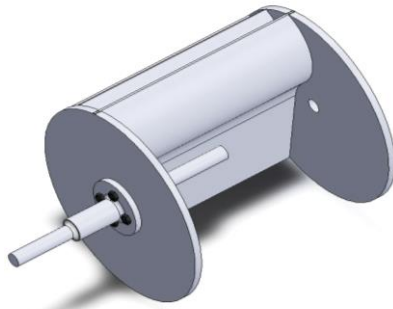
$$y_2 = (0,1314 - 0,945 \cdot k) \cdot D_1 \quad (24)$$

Perancangan Detail Konsep. Berdasarkan proses perhitungan yang sudah dilakukan, maka data-data yang didapatkan akan menjadi acuan dalam perancangan bentuk dan dimensi turbin *crossflow*. Komponen turbin *crossflow* dalam penelitian ini secara garis besar terbagi atas dua bagian. Pertama adalah komponen sudu turbin, komponen ini adalah komponen berputar (rotor) dalam turbin *crossflow* yang memiliki sudu-sudu untuk menangkap potensi energi yang dibawa oleh air untuk memutar turbin *crossflow*.



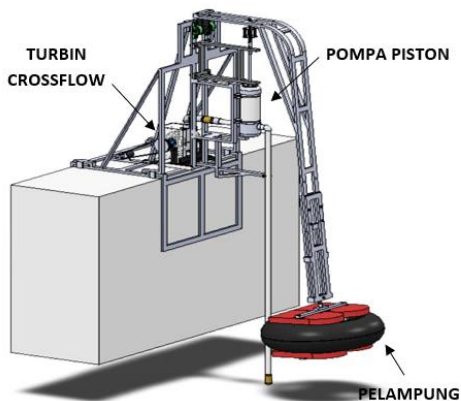
Gambar 8. Sudu Turbin (rotor)

Kedua adalah komponen pengarah aliran air dalam *runner*. Komponen ini berguna mengalirkan aliran air secara terarah dari sudu-sudu di tingkat pertama menuju sudu-sudu di tingkat kedua. Komponen ini adalah komponen diam (stator) dalam turbin *crossflow*.



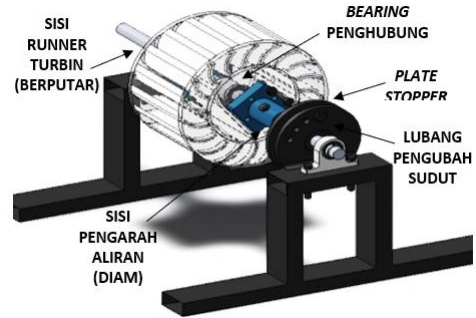
Gambar 9. Pengarah Aliran Turbin (stator)

Skema kerja dari prototype keseluruhan yang akan diuji dimulai dari pergerakan naik turun pelampung, kemudian akan menggerakkan pompa piston yang akan men-supply air untuk memutar turbin *crossflow*, skemanya dapat dilihat pada gambar 10.

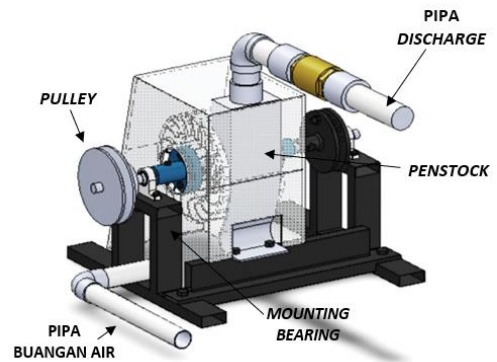


Gambar 10. Skema Prototype Keseluruhan

Pengubah varian pada penelitian ini diubah dengan memutar stopper pengarah aliran dan memasangnya pada lubang pengarah aliran yang terdapat pada mounting bearing, skemanya dapat dilihat pada gambar 11.

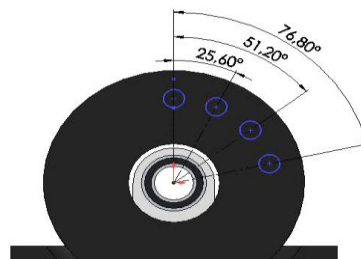


Gambar 11. Skema Pengubah Sudut Pengarah Aliran

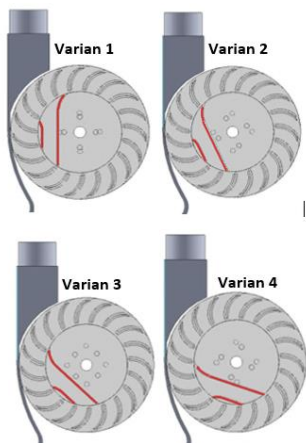


Gambar 11. Skema Prototype Turbin Crossflow

Variasi pengarah aliran air pada penelitian ini adalah perbedaan sudut pengarahnya. Variasi pengarah aliran air 1 memiliki sudut pengarah aliran sebesar 0° diukur dari sumbu vertikal. Variasi pengarah aliran air 2 memiliki sudut pengarah aliran sebesar $25,6^\circ$ diukur dari sumbu vertikal yang didapat berdasarkan perhitungan antara sudut variasi ketiga dikalikan 0,5. Variasi pengarah aliran air 3 memiliki sudut pengarah aliran sebesar $51,2^\circ$ diukur dari sumbu vertikal, Nilai variasi ini didapat berdasarkan perhitungan segitiga kecepatan untuk sudut absolut pada jarak aliran air (α_2') yang nilainya sama dengan nilai sudut absolut pada sudu turbin di tingkat kedua (α_2). Variasi pengarah aliran air 4 memiliki sudut pengarah aliran sebesar $76,8^\circ$ diukur dari sumbu vertikal yang didapat berdasarkan perhitungan antara sudut variasi ketiga dikalikan 1,5. Skema lubang pengubah sudut pengarah aliran dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Skema Lubang Pengubah Sudut



Gambar 13. Kondisi Perubahan Pengarah Aliran

Pembuatan Prototype. Proses pembuatan *prototype* dalam penelitian ini mengacu pada hasil perhitungan perancangan turbin *crossflow* sehingga hasil pengujian eksperimental pada *prototype* turbin *crossflow* akan dibandingkan dengan hasil perhitungan perancangan.

Alat yang digunakan dalam pembuatan *prototype* sebagai berikut:

Tabel 1. Alat dalam Pembuatan *Prototype*

No.	Nama Alat	Fungsi
1.	Mesin Laser Cutting	Digunakan untuk membuat profile guide untuk sudu-sudu turbin pada dinding turbin <i>crossflow</i> .
2.	Mesin Bubut	Digunakan untuk membuat dudukan turbin <i>crossflow</i> terhadap poros turbin.
3.	Mesin Las	Mesin las digunakan untuk menyambungkan plate dudukan dinding turbin dengan dudukan poros turbin.
4.	Mesin Gerinda Tangan	Mesin Gerinda tangan digunakan untuk memotong pipa yang akan dijadikan sudu-sudu turbin.
5.	Kunci Pas Set	Kunci pas digunakan untuk mengencangkan baut dan mur pada proses pemasangan dudukan dinding turbin dengan poros turbin.

Bahan yang digunakan dalam pembuatan *prototype* sebagai berikut:

Tabel 2. Bahan dalam Pembuatan *Prototype*

No.	Nama Bahan	Fungsi	Spesifikasi
1.	Plate Acrylic	Dinding Turbin	Tebal 5 mm
2.	Pipa PVC	Sudu Turbin	Type D tebal 1,8 mm
3.	Cylinder Stainless Steel	Shaft Turbin	Diameter 12 mm

4.	Plate dan Cylinder Baja	Dudukan dinding dan shaft turbin	Plate tebal 8 mm Dan Shaft Dia. 16 mm
5.	Baut dan Mur	Pengikat 2 benda	HS M6×20

Proses Uji Eksperimen. Proses pengujian eksperimental pada *prototype* turbin *crossflow* dimaksudkan untuk mengetahui performansi, fungsi kerja *prototype* dan kesalahan yang mungkin terjadi pada sistem *prototype* turbin *crossflow*. Pencatatan data hasil uji eksperimental yang dilakukan pada *prototype* bertujuan untuk mengetahui hasil *output* yang bisa dihasilkan oleh *prototype* yang dibuat.

Alat yang digunakan dalam proses uji eksperimental sebagai berikut:

Tabel 3. Alat Uji Eksperimen

No.	Nama Alat	Type/Merk	Spesifikasi
1.	Tachometer	SANWA SE300	pembacaan 30-99999 rpm dan jarak deteksi 50-500 mm
2.	Multitester	ZOTEK ZT101	tegangan maksimum yang dapat diukur 1000 V dan arus maksimum yang dapat diukur 10 A
3.	Stopwatch	STD	STD
4.	Kamera	SAMSUNG S9+	kamera 12 Megapiksel dual aperture F1,5 dan F/1,4 serta resolusi video 1080p

Variable output yang ditargetkan dalam uji eksperimental adalah sebagai berikut:

- Pengamatan terhadap pergerakan aliran air dalam *runner*.
- Debit aktual yang dihasilkan pompa.
- Kecepatan putar turbin aktual.
- Tegangan listrik yang dihasilkan generator.

Prosedur Pengambilan Data Uji. Langkah-langkah dalam melakukan pengujian dan pengambilan data yaitu :

- Proses perizinan untuk melakukan uji coba alat di kantor wilayah pelabuhan Nizam Zachman Muara Baru Jakarta.
- Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan dalam uji eksperimental seperti turbin yang sudah dirangkai beserta *pully* dan generator, *Tachometer* dan *stopwatch*.

3. Menyatukan rumah turbin dengan pipa pesat (*penstock*) atau pipa *outlet* dari pompa.
4. Setelah turbin dan pipa *outlet* tersambung maka dapat mulai untuk mencoba pengujian. *Stroke* pompa yang awalnya diam akan bergerak naik turun mengikuti pergerakan dari pelampung yang terkena ombak.
5. Setelah itu biarkan air mengalir normal agar putaran turbin menjadi stabil berputar, sebelumnya dilakukan juga pengambilan data untuk debit yang keluar dengan menggunakan ember dan *stopwatch*.
6. Mengambil data putaran turbin dengan tachometer.
7. Mengamati pergerakan aliran air pada *runner* kemudian difoto dan video agar bisa dibandingkan antara varian.
8. Mengambil data daya *output* generator dengan multimeter.
9. Setelah mendapatkan hasil pengujian berupa debit aktual pompa, putaran turbin dan daya *output* generator, maka dapat memasukkannya kedalam tabel pencatatan data eksperimental.

Hasil dan Pembahasan

Perhitungan perancangan. Perhitungan dalam penelitian ini mengacu pada hasil perhitungan pada penelitian sebelumnya mengenai *Head*, debit dan kecepatan aliran air berdasarkan potensi gelombang laut yang terjadi di daerah pesisir Muara Baru Jakarta.

Hasil perhitungan segitiga kecepatan dapat dilihat dalam tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Segitiga Kecepatan

PARAMETER	NILAI
Kecepatan absolut di bidang A	$C_1 = 1,17 \text{ m/s}$
Kecepatan tangensial di bidang A	$U_1 = 0,59 \text{ m/s}$
Sudut absolut antara v_1 dan u_1	$\alpha_1 = 16^\circ$
Kecepatan putaran penggerak pada titik jatuh air pada bidang A	$Cu_1 = 1,12 \text{ m/s}$
Kecepatan absolut di bidang B	$C_2 = 0,62 \text{ m/s}$
Kecepatan aliran di bidang A	$Cm_1 = 0,32 \text{ m/s}$
Kecepatan relatif di bidang A	$W_1 = 0,64 \text{ m/s}$
Kecepatan tangensial di bidang B	$U_2 = 0,38 \text{ m/s}$
Sudut absolut antara v_2 dan u_2	$\alpha_2 = 51,2^\circ$
Kecepatan putaran penggerak pada titik jatuh air pada bidang B	$Cu_2 = 0,38 \text{ m/s}$
Kecepatan aliran di bidang B	$Cm_2 = 0,48 \text{ m/s}$

Sudut absolut antara v_3 dan u_3	$\alpha_3 = \alpha_2 = 51,2^\circ$
Sudut relatif di bidang B dan C	$\beta_2 = \beta_3 = 90^\circ$
Kecepatan absolut di bidang C	$C_3 = C_2 = 0,62 \text{ m/s}$
Kecepatan putaran penggerak pada titik jatuh air pada bidang C	$Cu_3 = Cu_2 = 0,38 \text{ m/s}$
Kecepatan putaran penggerak pada titik jatuh air pada bidang D	$Cu_4 = 0,06 \text{ m/s}$
Kecepatan aliran di bidang C	$Cm_3 = 0,48 \text{ m/s}$
Sudut absolut antara v_4 dan u_4	$\alpha_4 = 90^\circ$
Sudut relatif di bidang D	$\beta_4 = \beta_1 = 30^\circ$
Kecepatan relatif di bidang D	$W_4 = W_1 = 0,64 \text{ m/s}$
Kecepatan tangensial di bidang C	$U_3 = U_2 = 0,38 \text{ m/s}$
Kecepatan tangensial di bidang D	$U_4 = u_1 = 0,59 \text{ m/s}$

Nilai-nilai segitiga kecepatan yang sudah didapatkan, akan dijadikan acuan dalam menghitung ukuran dimensi dalam proses perancangan turbin *crossflow*. Hasil perhitungan ukuran dimensi dapat dilihat dalam tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Dimensi Turbin

PARAMETER	NILAI
Diameter luar turbin	$D_1 = 0,14 \text{ m}$
Diameter nominal	$d = 0,08 \text{ m}$
Diameter dalam turbin	$D_2 = 0,09 \text{ m}$
Jarak antar sudu	$t = 0,024 \text{ m}$
Jumlah Sudu	$n = 19 \text{ buah}$
Panjang Turbin	$L = 0,08 \text{ m}$
Jari-jari kelengkungan sudu	$\rho = 0,023 \text{ m}$

Lebar ukuran pancaran aliran air yang melewati sisi *runner* sudu turbin *crossflow* didapatkan berdasarkan jarak antara pancaran aliran air dari poros (y_1) dan jarak antara pancaran aliran air dari diameter dalam turbin (y_2). Hasil dari perhitungan ini akan dijadikan dasar dalam perancangan lebar bukaan pengarah aliran dalam *runner*. Hasil perhitungan lebar pancaran air dapat dilihat dalam tabel 6.

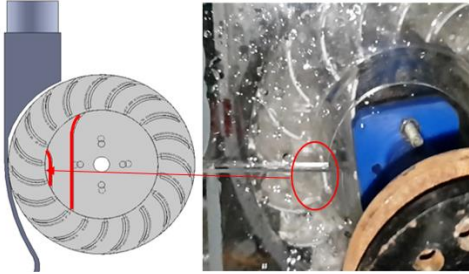
Tabel 6. Hasil Perhitungan Lebar Pancaran Air

PARAMETER	NILAI
Jarak pancaran aliran air dari poros	$y_1 = 0,0151 \text{ m}$
Jarak pancaran aliran air dari diameter dalam turbin	$y_2 = 0,006 \text{ m}$
Lebar ukuran pancaran aliran air	$y = 0,0179 \text{ m}$

Analisis Pergerakan Aliran. Analisis yang dilakukan mengamati aliran air yang melewati *runner* setelah jatuh dari sudu turbin di tingkat

pertama menuju sudu turbin di tingkat kedua. Pengujian dilakukan terhadap 4 varian sudut pengarah aliran air.

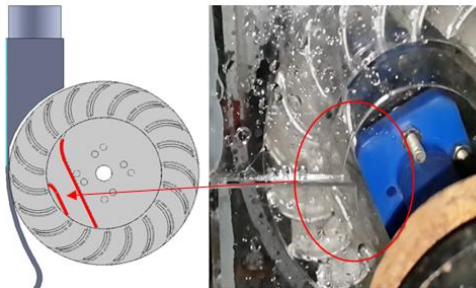
Kondisi pengarah aliran pada varian pertama memiliki sudut sebesar 0° diukur dari sumbu vertikal.



Gambar 14. Kondisi Pergerakan Aliran Air Varian 1

Aliran air yang melewati *runner* turbin *crossflow* pada varian 1 belum sepenuhnya melewati sisi pengarah aliran. Sisi yang dilingkari merah pada gambar 14 menunjukkan bahwa aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua dari sudu di tingkat pertama sebagian masih mengalir diluar pengarah aliran dalam *runner* sehingga aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua belum terfokuskan dan membuat putaran turbin sedikit terganggu.

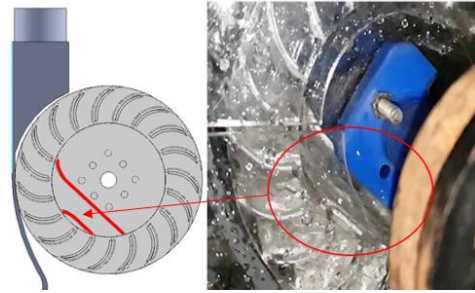
Kondisi pengarah aliran pada varian kedua memiliki sudut sebesar $25,6^\circ$ diukur dari sumbu vertikal.



Gambar 15. Kondisi Pergerakan Aliran Air Varian 2

Aliran air yang melewati *runner* turbin *crossflow* pada varian 2 hampir keseluruhannya sudah melewati sisi dalam pengarah aliran. Sisi yang dilingkari merah pada gambar 15 menunjukkan bahwa aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua dari sudu di tingkat pertama sudah mengalir didalam pengarah aliran dalam *runner* sehingga aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua sudah terfokuskan dan membuat putaran turbin menjadi lebih cepat.

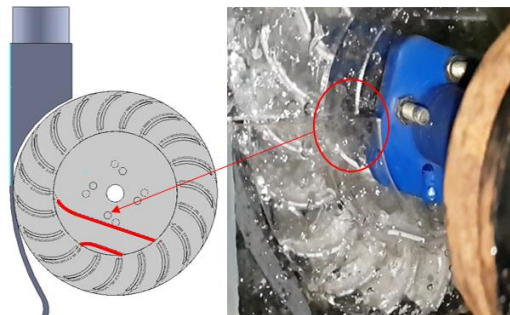
Varian ketiga memiliki sudut pengarah sebesar $51,2^\circ$ diukur dari sumbu vertikal.



Gambar 16. Kondisi Pergerakan Aliran Air Varian 3

Aliran air yang melewati *runner* turbin *crossflow* pada varian 3 keseluruhannya sudah melewati sisi dalam pengarah aliran. Sisi yang dilingkari merah pada gambar 16 menunjukkan bahwa aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua dari sudu di tingkat pertama sudah mengalir didalam pengarah aliran dalam *runner* sehingga aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua sudah terfokuskan dan membuat putaran turbin menjadi lebih cepat.

Kondisi pengarah aliran pada varian keempat memiliki sudut sebesar $76,80^\circ$ diukur dari sumbu vertikal.



Gambar 17. Kondisi Pergerakan Aliran Air Varian 4

Aliran air yang melewati *runner* turbin *crossflow* pada varian 4 belum sepenuhnya melewati sisi pengarah aliran. Sisi yang dilingkari merah pada gambar 17 menunjukkan bahwa aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua dari sudu di tingkat pertama sebagian masih mengalir diatas pengarah aliran dalam *runner* sehingga aliran air akan jatuh pada sisi sudu di tingkat kedua yang sudah tidak dapat menerima potensi energi dan mengakibatkan putaran turbin sedikit terganggu.

Hasil Uji Eksperimen. Pengujian alat uji di area pemecah ombak timur pelabuhan Nizam Zachman Muara Baru Jakarta dilakukan dalam 3 kali (3 hari) yaitu pada tanggal 17, 18 dan 22 juli 2019 dengan waktu yang diambil adalah pagi, siang dan sore.

Uji eksperimen pagi hari dilakukan pada pukul 08:00–09:30 WIB, uji eksperimen siang hari dilakukan pada pukul 12:30–13:30 WIB dan uji eksperimen sore hari dilakukan pada pukul 16:00–17:30 WIB. Data yang disajikan pada tabel hasil uji

merupakan hasil rata-rata yang didapat selama proses pengujian berlangsung. Debit dan daya teoritis dihitung berdasarkan pergerakan rata-rata dari travel *stroke* pompa pada pagi, siang dan sore hari.

Dilihat pada tabel 7, 8 dan 9 hasil uji rata-rata bahwa varian ketiga menghasilkan *output* terbesar dibandingkan varian lainnya. Melihat dari hasil analisis aliran air yang melewati *runner* dari sudu di tingkat pertama ke sudu di tingkat kedua, putaran turbin akan meningkat seiring dengan posisi sudut jatuh air yang tepat dan semakin terfokuskannya aliran air yang akan menuju sudu di tingkat kedua. Nilai efisiensi didapat berdasarkan perbandingan antara daya *output* teoritis dan daya *output* aktual dengan kondisi travel *stroke* yang sama. Hasil *output* daya belum sepenuhnya maksimal karena travel *stroke* pompa aktual rata-rata bekerja masih dibawah travel *stroke* pompa yang direncanakan yaitu 150 mm.

Berdasarkan uji eksperimen yang sudah dilakukan, didapatkan hasil uji rata-rata dari total 3

kali (3 hari) pengujian dan penentuan varian ketiga dengan sudut $51,2^\circ$ sebagai varian terbaik karena memiliki nilai *output* terbesar dibandingkan varian lainnya. Hasil uji rata-rata tersebut akan dibandingkan dengan perhitungan daya *output* teoritis perancangan agar mengetahui efisiensi total dari alat uji. Berdasarkan perbandingan data pada tabel 10 dapat dilihat bahwa pengujian yang dilakukan belum mencapai hasil yang maksimal, Hal ini disebabkan pengaruh kondisi gelombang laut dan frekuensi gelombang laut yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi ketika melakukan studi lapangan untuk dijadikan dasar perancangan teoritis. Travel *stroke* pompa yang mengikuti pergerakan dari gelombang air laut berpengaruh terhadap debit yang dihasilkan oleh pompa piston sehingga akan berpengaruh juga ke putaran dan *output* daya yang dapat dihasilkan oleh turbin *crossflow*.

Tabel 7. Hasil Uji Rata-Rata Eksperimen di Pagi Hari

Var.	Travel Stroke (mm)	Debit Aktual (m ³ /s)	Putaran Turbin (rpm)	Output Generator			Daya Teoritis (Watt)	efisiensi
				Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)		
1	33,3	0,00000242	61	2,156	0,167	0,360	0,686	52%
2	33,3	0,00000242	67	2,667	0,186	0,496	0,686	72%
3	33,3	0,00000242	69	2,958	0,190	0,562	0,686	81%
4	33,3	0,00000242	44	2,173	0,112	0,243	0,686	35%

Tabel 8. Hasil Uji Rata-Rata Eksperimen di Siang Hari

Var.	Travel Stroke (mm)	Debit Aktual (m ³ /s)	Putaran Turbin (rpm)	Output Generator			Daya Teoritis (Watt)	efisiensi
				Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)		
1	56,6	0,00000455	112	4,320	0,272	1,175	2,170	53%
2	56,6	0,00000455	134	5,150	0,315	1,622	2,170	73%
3	56,6	0,00000455	157	5,672	0,366	2,076	2,170	90%
4	56,6	0,00000455	75	3,988	0,197	0,786	2,170	35%

Tabel 9. Hasil Uji Rata-Rata Eksperimen di Sore Hari

Var.	Travel Stroke (mm)	Debit Aktual (m ³ /s)	Putaran Turbin (rpm)	Output Generator			Daya Teoritis (Watt)	efisiensi
				Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)		
1	57,3	0,00000575	139	5,134	0,329	1,689	2,795	60%
2	57,3	0,00000575	158	5,845	0,375	2,191	2,795	79%
3	57,3	0,00000575	182	6,554	0,414	2,713	2,795	93%
4	57,3	0,00000575	100	3,700	0,237	0,876	2,795	31%

Tabel 10. Data Perbandingan Hasil Uji Eksperimen Varian Ketiga

Waktu Uji	Travel Stroke Aktual (mm)	Travel Stroke Teoritis (mm)	Periode Satu Gel. Aktual (s)	Periode Satu Gel. Teoritis (s)	Debit Aktual (m ³ /s)	Debit Teoritis (m ³ /s)	Daya Output Aktual (Watt)	Daya Output Teoritis (Watt)	Efisiensi
Pagi	33,3	150	1,97	1,49	0,00000 242	0,0000 177	0,562	18,5	3 %
Siang	56,6	150	1,80	1,49	0,00000 455	0,0000 177	2,076	18,5	11 %
Sore	57,3	150	1,43	1,49	0,00000 575	0,0000 177	2,713	18,5	14 %

Kesimpulan

Berdasarkan pengujian secara eksperimen yang telah dilakukan dalam penelitian variasi sudut pengarah aliran dalam *runner*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Varian ketiga dengan sudut pengarah aliran sebesar 51,2° menghasilkan posisi terbaik jatuh air ke sudu turbin di tingkat kedua dari sudu turbin di tingkat pertama, Aliran air yang berasal dari sudu turbin di tingkat pertama sepenuhnya berada dalam pengarah aliran sehingga posisi jatuh air lebih terfokuskan.
2. Hasil Uji menunjukkan varian ketiga menghasilkan *output* terbesar dibandingkan dengan varian lainnya. Hasil Pengujian yang dilakukan belum mendapatkan hasil yang maksimal karena pengaruh kondisi gelombang dan frekuensi yang rendah. Nilai *output* dari turbin crossflow dapat berubah dengan semakin tingginya potensi ombak yang terdapat di lokasi pengujian.
3. Melihat hasil dari analisis dan uji eksperimen terhadap alat uji turbin crossflow dapat disimpulkan bahwa sudut pengarah aliran dalam runner pada turbin crossflow sangat berpengaruh terhadap putaran dan efisiensi dari turbin crossflow. Pemilihan sudut yang tepat dapat memaksimalkan putaran dari turbin crossflow.

Daftar Pustaka

- [1] P. Parjiman, M. Subekti, D. Daryanto, and M. Rifan, "Simulasi Gelombang Laut Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL)," *J. Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 2, Jan. 2015.
- [2] J. Haurissa, "Performance Analysys Of Cross Flow Turbine : Without Using Shaft In Runner Turbine With Add 'Guide Passage Gate Vane,'" *Pros. SENIATI*, vol. 4, no. 2, pp. 170–175, Feb. 2018.
- [3] S. Simanjuntak and L. O. M. Firman, "Analisis Perhitungan Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)," *TEKNOBIZ J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 24 – 29, 2012.
- [4] Y. Kurniawan, D. M. Kurniawati, D. Danardono, and D. P. Tjahjana, "Studi Eksperimental Pengaruh Aspek Rasio Terhadap Unjuk Kerja Turbin ANGIN Crossflow," *Pros. SNITT POLTEKBA*, vol. 3, no. 1, pp. 339–343, 2018.
- [5] Y. A. Padang, I. Okariawan, and M. Wati, "Analisis Variasi Jumlah Sudu Berengsel Terhadap Unjuk Kerja Turbin Cross Flow Zero Head," *Din. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, Jan. 2014.