



SIMULASI TURBIN PORTABEL JENIS CROSS FLOW UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO (PLTPH)

Budi Triyono¹, Moh Azmil Yudrika¹, Dibyo Setiawan^{2a}.

¹Program Studi Sarjana Terapan Teknik Perancangan & Konstruksi Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

²Program Studi Sarjana Terapan Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Korespondensi:

^a Program Studi Sarjana Terapan Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung
dibyo.setiawan@polban.ac.id

ABSTRAK

Di Indonesia khususnya Provinsi Jawa Barat mempunyai cukup banyak daerah aliran sungai dengan kontur daratan yang memiliki beda ketinggian (elevasi), umumnya daerah aliran sungai tersebut dijadikan sebagai tempat wisata yang posisinya jauh dari pemukiman. Untuk memenuhi kebutuhan listrik di sana, alternatifnya adalah mengubah aliran sungai tersebut menjadi aliran listrik, baik digunakan sebagai penerangan ataupun untuk sekedar mengisi daya alat elektronik seperti gawai. Salah satu solusinya adalah membuat turbin kecil yang bisa dipindahkan serta dapat diproduksi secara banyak. Melalui penelitian ini dilakukan analisis simulasi terhadap rancangan turbin air jenis crossflow portabel yang ringan dan dirancang untuk beroperasi pada head rendah yaitu 3 meter dan debit 3,08 liter per detik. Tahapan kegiatan yang dilakukan meliputi tahap kajian terhadap simulasi menggunakan CFD untuk mengetahui kekurangan kinerja alirannya dan sekaligus menjadi bahan evaluasi terhadap rancangan selanjutnya. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin dapat menghasilkan daya poros sebesar 29,09 watt pada putaran 579 rpm dengan efisiensi sebesar 30,19%. Hasil investigasi pola aliran menunjukkan bahwa kecepatan air mengalami penurunan saat akan mengenai sudu turbin cross flow sehingga aliran tidak dalam kecepatan dan arah optimalnya. Untuk meningkatkan kinerja turbin direkomendasikan untuk dilakukan modifikasi bentuk *inlet* atau *nozle* dan ruang penyalur sehingga proses konversi energi kinetik dari inlet menjadi energi mekanik oleh runner secara dapat lebih efisien.

Kata kunci: CFD, aliran, simulasi.

ABSTRACT

In Indonesia, especially West Java Province, there are quite a lot of river basins with land contours that have different heights, generally, these river basins are used as tourist attractions which are located far from residential areas. To meet electricity needs there, an alternative is to convert the river flow into electricity, either used for lighting or simply to charge electronic devices such as gadgets. One solution is to make small turbines that can be moved and can be produced in large quantities. Through this research, a simulation analysis was carried out on the design of a lightweight, portable crossflow type water turbine designed to operate at a low head of 3 meters and a flow rate of 3.08 liters per second. The stages of activities carried out include the study stage of simulations using CFD to determine deficiencies in inflow performance and also serve as material for the evaluation of subsequent designs. The simulation results show that the turbine can produce 29.09 watts of shaft power at 579 rpm with an efficiency of 30.19%. The results of the flow pattern investigation show that the water speed decreases when it hits the cross-flow turbine blade so the

flow is not at its optimal speed and direction. To improve turbine performance, it is recommended to modify the shape of the inlet or nozzle and distribution chamber so that the process of converting kinetic energy from the inlet into mechanical energy by the runner can be more efficient.

Keywords: CFD, flow, simulation.

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan sumber daya air pada obyek wisata seperti air terjun, bendungan, bendung dan drainase dapat menjadi solusi bagi isu transisi energi untuk pengadaan energi listrik dari PLN. Daerah wisata cukup penting untuk dilakukan pengadaan sumber listrik supaya menjadi salah satu daya tarik bagi pengunjung yang biasanya sulit menemukan sumber listrik untuk sekedar mengisi peralatan elektronik portabel seperti gawai pada tempat wisata khususnya yang jauh dari pemukiman [1]. Karakteristik daerah yang memiliki kontur dan ketersediaan sumber daya air Indonesia memiliki potensi akan pemanfaatan sumber daya air untuk produksi energi [2]. Transisi energi merupakan isu yang hangat di perbincangkan, pemerintah melalui Kementerian/Lembaga serta Lembaga non Pemerintah telah aktif melaksanakan sosialisasi dalam rangka migrasi dari penerapan sumber energi fosil ke energi bersih [3]. Salah satu energi bersih yang dimaksud adalah sistem pembangkit listrik tenaga air, dimana sumbernya berasal dari ketersediaan air dan tinggi jatuh air [4].

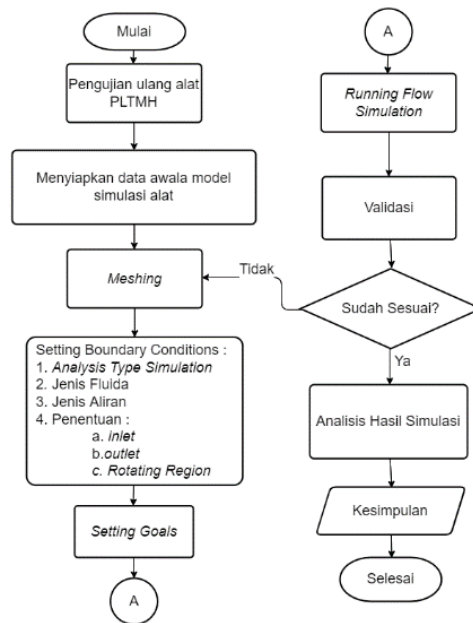
Pemerintah melalui Badan Standardisasi Nasional telah menyusun dokumen standard tentang pembangkit listrik tenaga air, besaran luaran daya telah di klasifikasikan [5]. dari besaran luaran daya yang ada memiliki keterkaitan dengan pemilihan jenis turbin, salah satu jenis turbin yang cukup terkenal adalah turbin *banki* atau *crossflow* dimana dokumen standard spesifikasinya telah di tertuang pada dokumen Spesifikasi turbin *cross-flow* PLTMH kelas A [6]. Selanjutnya pemerintah pada instansi pendidikan salah satunya di Politeknik Negeri Bandung juga telah mengindahkan program pemerintah pusat terkait transisi energi, menuangkan dalam dokumen rencana strategis dan rencana induk penelitian [7] agar akademisi turut serta mengimplementasikan kebijakan pemerintah sesuai Standard Nasional Pendidikan Tinggi [8].

Pada tahun 2021 telah dibuat turbin air jenis *cross flow* portabel melalui skema riset tugas akhir yang dilakukan oleh Dzulfikri [9], dengan daya rencana sebesar 12 watt sehingga cukup untuk mengisi alat elektronik yang relatif kecil. Prototipe dibuat dengan menggunakan material ABS dengan metode *3D Printing*. Capaian dari pengujian yang telah dilakukan terhadap alat yaitu menghasilkan daya luaran sebesar 4,79 watt pada debit air sebesar 2,99 liter/detik dengan tinggi jatuh air diterapkan setinggi 3 meter dan menghasilkan putaran turbin sebesar 816 rpm. Hasil dari pengujian yang dilakukan terhadap alat, diperoleh bahwa alat belum mencapai daya yang di rencanakan yaitu 12 watt. Untuk meningkatkan kinerja alat dapat dilakukan melalui tahapan rekayasa ulang melalui pendekatan simulasi yang diterapkan pada alat yang telah tersedia. Simulasi dapat mengidentifikasi kekurangan yang terjadi pada pola alirannya sehingga dapat menjadi rujukan dalam peningkatan pada rancangan [10]. Kegiatan simulasi dilaksanakan guna mengidentifikasi kekurangan alat sebelumnya yang merupakan salah satu tahapan awal dari rangkaian kegiatan rekayasa ulang atau *reverse engineering*.

Berdasarkan hasil studi literatur dan kajian produk di pasaran, turbin air kecil yang ada saat ini umumnya baru dikembangkan pada skala laboratorium dengan nilai efiesensi yang masih rendah. Produk turbin air kecil di pasaran hanya tersedia untuk keperluan hobi dan mainan / alat peraga saja. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan tujuan untuk menginvestigasi pola aliran dan kecepatan mengacu pada bentuk geometri rancangan turbin air jenis *crossflow* portabel agar dapat diketahui hal-hal yang belum optimal dan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan rancangan Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (PLTPH) portabel dengan kinerja yang lebih baik. Pada penelitian ini juga dilakukan juga eksperimen untuk menguji kinerja turbin dan data pengujian tersebut selanjutnya dijadikan sebagai data untuk validasi hasil simulasi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

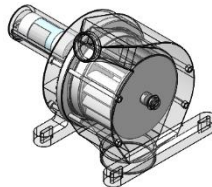
Dalam kegiatan simulasi turbin air *portabel* jenis *cross flow* dilakukan beberapa tahapan untuk mengidentifikasi kekurangan pada pola aliran dengan simulasi aliran untuk mengiterasi peningkatan luaran daya rancangan [11]. Secara umum identifikasi simulasi yang dilaksanakan terbagi menjadi beberapa tahapan antara lain tahap *pre-processing*, tahap *solution solver*, dan tahap *post-processing*. Dapat dilihat untuk uraian metodologi pada Gambar1:



Gambar 1. Diagram alir kegiatan

2.1 Tahap *Pre-Processing*

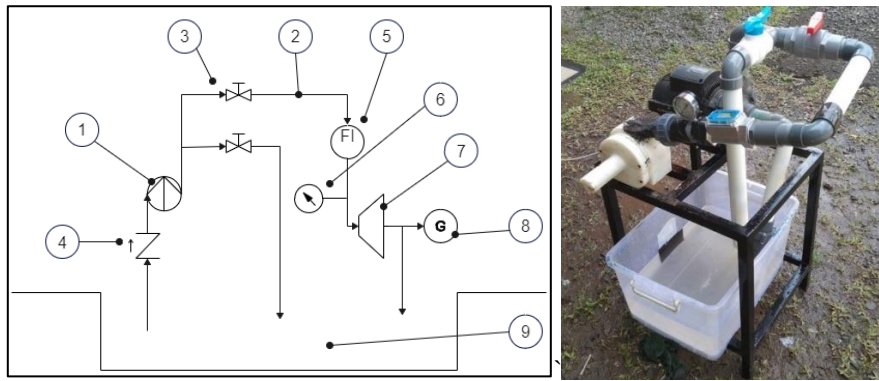
Tahapan pertama yaitu tahap *pre-processing*, tahap tersebut membutuhkan persiapan data awal yang dibutuhkan untuk simulasi, persiapan model yang akan digunakan dalam simulasi, *meshing* terhadap model simulasi, penentuan material dan model dalam simulasi, serta pendefinisian *boundary condition* pada model simulasi. Proses simulasi yang akan dilakukan sesuai dengan metodologi yang telah disusun sebelumnya yang terdiri dari tiga tahap mulai dari tahap *pre-processing*, *solution solver*, dan *post-processing* [12].



Gambar 2 Rancangan PLTPH portabel jenis *crossflow*

2.1.1 Tahap *Pengujian Prototipe Turbin Crossflow portabel*

Untuk keperluan validasi data simulasi, terlebih dahulu perlu dilakukan eksperimen atau pengujian terhadap prototipe turbin cross flow portabel sehingga diperoleh data yang dibutuhkan untuk validasi model dan kondisi simulasi [13]. Pengujian terhadap alat dilakukan dengan menyusun suatu instalasi pengujian [14] dengan pemberian tekanan dapat diatur [15] sesuai dengan yang bukaan katup [16]. Gambar 3 menunjukkan instalasi pengujian yang digunakan untuk menguji alat PLTPH portabel.



Keterangan:

1. Pompa : Untuk menaikkan tekanan pada aliran air
2. Pipa : Saluran tempat air mengalir
3. Gate valve : Mengatur debit dan tekanan air yang mengalir
4. Check valve : Mencegah arus air turun kembali
5. Flow meter : Menghitung debit air yang mengalir
6. Pressure Gauge : Mengukur tekanan pada air
7. Turbine : Mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik
8. Generator : Mengubah energi mekanik menjadi energi listrik
9. Tangki Air : Wadah penampung air

Gambar 3 Skema dan Instalasi Pengujian PLTMH

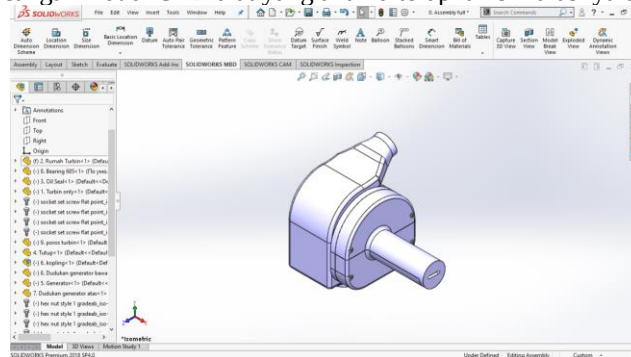
2.1.2 Tahap Menyiapkan data awal dan model simulasi alat

Selanjutnya persiapan data awal yang dibutuhkan serta *model CAD* alat yang akan diterapkan simulasi. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan diperoleh data masukan pada simulasi yaitu sebagai berikut:

Tabel 1 Data untuk simulasi

Notasi	Nama	Nilai	Satuan
H	Tinggi jatuh air	3	Meter
P	Tekanan aliran masuk	130755	Pa
V	Kecepatan putaran turbin	579	Rpm
Q	Debit	3,078	Liter/detik

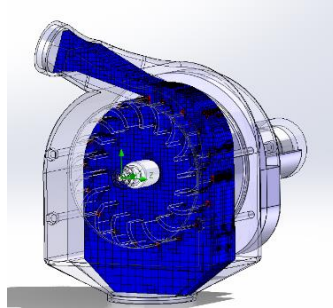
Kemudian disediakan rancangan *model CAD* alat yang akan diterapkan simulasi yaitu sebagai berikut:



Gambar 4 Model CAD alat

2.1.3 Meshing

Dilakukan *meshing* terhadap model sehingga akan didapat hasil simulasi yang mendekati kondisi aktual. Dilakukan *meshing* terlebih dahulu pada model simulasi yaitu sebagai berikut:



Gambar 5 *Meshing* pada simulasi PLTMH

2.1.4 Setting boundary conditions

Penyetelan batas kondisi simulasi juga di terapkan dalam rangka membatasi ruang lingkup simulasi. Adapun Batasan yang dimaksud adalah sebagai berikut:

- Analysis Type Simulation* : aliran internal;
- Jenis fluida : fluida air (massa jenis : 997 kg/m^3);
- Jenis aliran : dari perhitungan yang dilakukan didapat nilai $Re > 2300$ sehingga aliran termasuk jenis aliran turbulen;
- Penentuan *inlet*, *outlet*, serta *rotating region*.

Penentuan tipe analisis, material fluida, serta model yang digunakan dalam simulasi.

- Analysis Type Simulation*, tipe analisis yang digunakan.
- Jenis fluida, ditentukan jenis fluida yang digunakan.
- Jenis aliran, jenis aliran yang digunakan dilihat menurut besarnya bilangan *reynolds* yang terjadi dengan rumus sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Dimana:

Re = Bilangan *reynolds*

V_s = Kecepatan rata-rata fluida (m/s)

ρ = Massa jenis (Kg/m^3)

D = Diameter dalam pipa (m)

μ = Viskositas dinamik (Kg/m.s.)

Penetapan *inlet*, *outlet*, serta *rotating region*.

a. *Inlet*

Ditentukan lubang *inlet* yang menjadi tempat masuknya aliran air serta dimasukkan parameter tekanan yang telah didapatkan dari simulasi. Selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap intensitas turbulensi dengan formula berikut:

$$I_t = \frac{0,16}{Re^{1/8}} \times 100\%$$

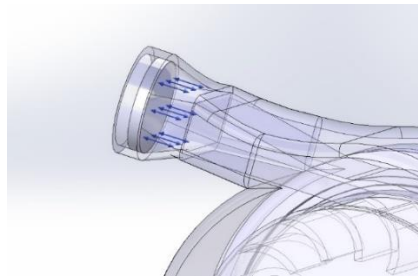
Dimana:

I_t = Intensitas *turbulen*

Re = Bilangan *reynolds*

Telah dilakukan perhitungan terhadap intensitas turbulennya yaitu sebesar 3 %.

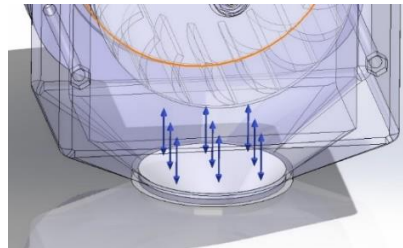
Berikut ini merupakan domain *inlet* untuk simulasi:



Gambar 6 Domain *inlet* simulasi

b. *Outlet*

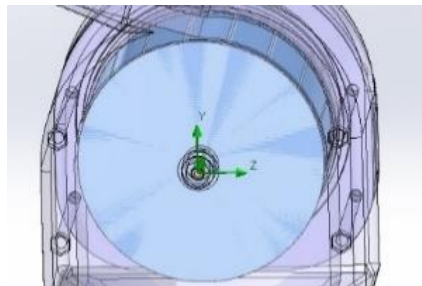
Ditentukan juga *outlet* atau saluran keluaran aliran air serta parameter tekanannya yaitu tekanan atmosfer. Berikut ini merupakan domain *outlet* untuk simulasi:



Gambar 7 Domain *outlet* simulasi

c. *Rotating Region*

Rotating region yaitu daerah yang mengalami perputaran atau rotasi pada alat. Berikut ini merupakan domain *rotating region*:



Gambar 8 *Rotating region* simulasi

2.2 Tahap *Solution Solver*

Pada tahap *solution solver* dilakukan *running* algoritma pada persamaan simulasi pola aliran yang telah disusun sebelumnya, *running* algoritma ini dilakukan secara iterasi hingga didapatkan nilai konvergensi. Pemberlakuan *running* algoritma pada simulasi yang telah dilakukan *setting* sebelumnya yang dilakukan secara iterasi.

2.3 Tahap *Post-Processing*

Tahap terakhir pada kegiatan simulasi terhadap PLTMH ini adalah tahap *post-processing*, pada tahap ini dilaksanakan validasi serta analisis terhadap hasil simulasi yang telah dilaksanakan.

a. Validasi

Validasi dilaksanakan untuk mencari pendekatan kebenaran hasil simulasi dengan cara melakukan perbandingan efisiensi hasil simulasi dengan pengujian nyata. Adapun formula efisiensi yang digunakan, yaitu sebagai berikut:

$$\eta_t = \frac{P_m}{P_h} \times 100\%$$

Dimana:

η_t : Efisiensi

P_m : Daya Mekanis (watt)

P_h : Daya Hidrostatik (watt)

b. Analisis hasil simulasi

Analisis hasil simulasi yang dilakukan yaitu terhadap aliran fluida yang terjadi serta *cut plot* pada distribusi kecepatan dan tekanannya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Eksperimen / Pengujian Prottipe Turbin *Crossflow* portabel dan Validasi Model

Dari tahapan eksperimen / pengujian yang telah dilaksanakan tersebut, diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2 Data hasil pengujian/eksperimen prototipe PLTPH

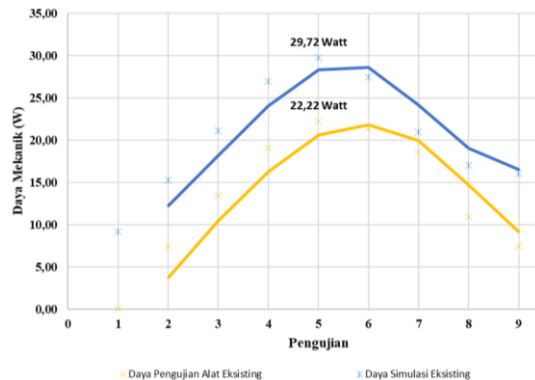
Head (m)	Kecepatan (rpm)	Kecepatan Sudut (rad/s)	Torsi (Nm)	Flow (l/s)	Daya Mekanis (W)	Daya Hidrolis (W)	Efisiensi Turbin (%)
3	1093	114.401	0.00	3.388	0.00	106.047	0.00
	800	83.733	0.09	3.338	7.47	104.483	7.20
	735	76.93	0.18	3.295	13.49	103.126	13.10
	626	65.521	0.29	3.217	19.01	100.675	18.90
	579	60.602	0.37	3.078	22.22	96.345	23.10
	526	55.055	0.39	2.965	21.41	92.798	23.10
	385	40.297	0.46	2.903	18.5	90.868	20.40
	201	21.038	0.52	2.835	10.88	88.729	12.30
	136	14.235	0.53	2.768	7.49	86.643	8.60

Didapatkan juga data hasil simulasi aliran menggunakan software yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3 Data hasil simulasi prototipe PLTPH

Head (m)	Tekanan (Pa)	Kecepatan Sudut (rad/s)	Torsi (Nm)	Daya Mekanis (W)	Daya Hidrolis (W)	Efisiensi Turbin (%)
3	29413.035	114.40	0.08	9.15	106.05	8.63
		83.73	0.18	15.07	104.48	14.43
		76.93	0.27	20.77	103.13	20.14
		65.52	0.41	26.86	100.67	26.68
		60.60	0.48	29.09	96.35	30.19
		55.05	0.5	27.53	92.8	29.66
		40.30	0.52	20.95	90.87	23.06
		21.04	0.81	17.04	88.73	19.21
		14.23	1.13	16.09	86.64	18.56

Dengan data yang diperoleh berdasarkan pengujian dan simulasi tersebut, selanjutnya dapat disusun grafik sebagai berikut:



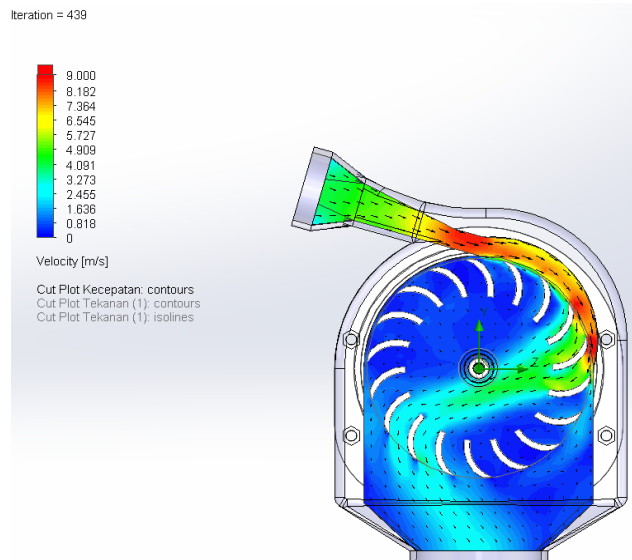
Gambar 9 Grafik daya mekanis hasil eksperimen dan simulasi pada head 3 meter

Dari grafik hubungan daya mekanis pada tinggi jatuh air 3 meter, dimana tinggi tersebut termasuk kategori tinggi jatuh air rendah [17]. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa daya mekanis dengan putaran turbin sebesar 579 rpm, debit 3,078 liter/detik menghasilkan daya sebesar 22,2 watt.

Hasil simulasi memiliki nilai yang mendekati hasil dari pengujian secara langsung. Hasil simulasi aliran menggunakan *software* didapatkan daya luaran yang lebih besar dibandingkan dengan pengujian secara langsung di lapangan terhadap alat, hal ini terjadi karena faktor rugi-rugi pada pengujian yang diabaikan seperti rugi volumetris, rugi gesekan aliran dengan dinding, dan lain sebagainya. Daya mekanis maksimal pada head 3 meter dari simulasi adalah 29,72 watt sedangkan dari pengujian ulang adalah 22,2 watt. Dari kalkulasi yang telah dilakukan, didapatkan efisiensi pengujian yang telah dilakukan yaitu sebesar 23,1 % serta efisiensi simulasi yaitu 29,6 %. Hal ini menunjukkan bahwa rugi-rugi riil pada saat pengujian adalah sekitar 25% dan cukup logis. Dengan hasil validasi tersebut maka simulasi telah mendekati hasil pengujian sesungguhnya di lapangan serta dapat dilakukan tahap analisis.

3.1 Analisis Pola Aliran Fluida

Pada analisis aliran fluida ini dapat dilihat gerak aliran air yang masuk ke dalam alat dimulai dari *inlet* sampai keluar lagi melalui *outlet*-nya. Gerak aliran kecepatan pada saluran masuk (*inlet*), runner, dan saluran keluaran (*outlet*) dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 Aliran Fluida pada PLTMH

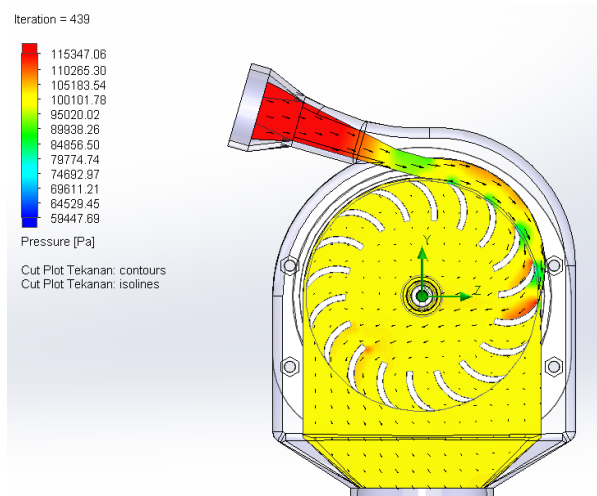
Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa aliran air awalnya memiliki kecepatan yang merata di setiap penampangnya dengan kecepatan sekitar 2,455 m/detik. Air yang masuk ke dalam mengalami kenaikan kecepatan pada daerah *inlet* atau *nozzel* karena pengecilan luas penampang masukkan air, hal ini diindikasikan dengan warna aliran yang menjadi berwarna merah dengan kecepatan maksimum mencapai 9 m/detik. Pola aliran menunjukkan aliran dari *nozzel* berbelok melalui *runner* masuk ke arah dalam dan selanjutnya berbelok kembali setelah melalui *runner* di bagian sebaliknya dan setelah itu akhirnya keluar melalui saluran *outlet*. Kecepatan aliran menurun secara *gradual* saat melewati *runner*, hal ini menunjukkan proses konversi dari energi kinetik menjadi energi mekanik dalam bentuk torsi dan putaran.

Pola aliran sudah sesuai dengan karakteristik dari turbin *crossflow*, namun jet air dari *nozzle* tidak mengarah secara tepat pada profil dari *runner* turbin *crossflow*. Jet air berkecepatan tinggi tidak langsung mengarah pada sudu tetapi berbelok terlebih dahulu ke ruang penyalur. Pada bagian ujung *nozzel* sebelum masuk ke *runner* terdapat ruang penyalur yang akan mengarahkan aliran dari *nozzel* menuju *runner*; namun pada daerah tersebut menunjukkan pola kecepatan yang tidak konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk geometri ruang penyalur tersebut tidak optimal dan berpotensi mengurangi efisiensi konversi energi dari energi tekanan (*head*) menjadi energi kecepatan atau kinetik dan selanjutnya akan diubah oleh *runner* menjadi torsi dan putaran atau daya mekanik. Bagian ujung saluran atau ruang penyalur masih terdapat sebagian aliran yang langsung turun dan menuju saluran *outlet* tanpa mengenai turbin terlebih dahulu sehingga sebagian potensi energi kinetik tersebut tidak terkonversi menjadi energi mekanik, hal ini juga menjadi salah satu kerugian yang mengurangi efisiensi.

Saat memasuki *runner*, kecepatan air sekitar 7-9 m/detik dan didalam *runner* menurun secara drastis hingga keluar dari *runner* pada kecepatan sekitar 2,455 m/detik. Pola aliran dan perubahan distribusi kecepatan menunjukkan bahwa proses konversi energi pada *runner*, yaitu dari energi kecepatan atau energi kinetik menjadi torsi atau energi mekanik sudah berlangsung dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa profil dari sudu turbin *crossflow* sudah sesuai dengan pola aliran yang terjadi.

3.2 Analisis Distribusi Tekanan

Gambar 11 memperlihatkan distribusi tekanan yang terjadi pada turbin. Air memasuki saluran masuk atau inlet pada tekanan absolut sekitar 130.000 Pa dan selanjutnya oleh *nozzle* dikonversi menjadi kecepatan sehingga tekanannya turun hingga nilai terendah mencapai sekitar 85.000 Pa. Hal ini menunjukkan fungsi *nozzle* untuk mengonversi energi tekanan menjadi energi kinetik sudah cukup baik.



Gambar 11 Distribusi Tekanan

Pada posisi jet air mengenai runner tampak bahwa di sekitar runner terjadi kenaikan tekanan sekitar 110.000 Pa, hal ini dikarenakan di bagian tersebut terjadi penyerapan energi kinetik menjadi torsi oleh runner. Demikian pula pada bagian runner pada bagian sebaliknya yaitu pada posisi jet air meninggalkan runner juga terjadi sedikit kenaikan tekanan karena terjadi belokan arah aliran yang juga menghasilkan torsi sesuai dengan karakteristik turbin crossflow.

Berdasarkan data distribusi tekanan tersebut tampak bahwa tekanan terendah yang terjadi di dalam turbin adalah sekitar 80.000 Pa, maka jika turbin dioperasikan pada temperatur lingkungan yaitu pada temperature 25-30 celcius maka turbin aman dari kemungkinan terjadinya kavitasi.

4. KESIMPULAN

Hasil studi melalui kaji simulasi yang telah dilakukan menunjukkan proses konversi energi pada turbin crossflow portabel, yaitu merubah dari daya hidrolis berupa head 3 meter dan debit sebesar 3,078 liter/detik menjadi torsi sebesar 0,46 Nm pada putaran 576 rpm atau berupa daya mekanik sebesar 29,09 watt. Hal ini menunjukkan turbin beroperasi dengan efisiensi sekitar 30,19%. Nilai efisiensi tersebut masih cukup rendah dan masih berpotensi untuk ditingkatkan. Kecepatan paling tinggi berada pada ujung saluran *inlet* dengan bentuk yang menyempit berbentuk nozzle, namun kecepatan aliran kembali menurun di ruang penyalur dan berbelok sehingga jet air masuk ke runner pada sudut tembak yang tidak sesuai profil sudu turbin crossflow. Hal ini menjadi faktor utama yang mengurangi efisiensi.

Untuk meningkatkan kinerja turbin, direkomendasikan untuk dilakukan modifikasi pada bentuk *inlet* atau *nozle* dan ruang penyalur agar perubahan energi tekanan menjadi energi kinetik dapat terjadi secara *gradual* dan meminimalkan kehilangan energi akibat pola aliran yang tidak sesuai dengan profil sudu turbin. Distribusi tekanan menunjukkan tekanan terendah di dalam turbin adalah 80.000 Pa sehingga turbin aman dari kemungkinan terjadinya kavitasi. Turbin dapat digunakan pada aplikasi dengan *head* yang lebih tinggi namun harus dikaji kembali dari aspek kekuatan runner karena runner akan menyalurkan daya yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Nugroho, A. Suprajitno, and G. Gunawan, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Air Terjun Kedung Kayang," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 13, no. 3, p. 161, 2017, doi: 10.17529/jre.v13i3.8554.
- [2] B. P. J. Barat, "Provinsi Jawa Barat Dalam Angka 2023," Bandung, 2023. [Online]. Available: <https://jabar.bps.go.id/publication/2023/02/28/57231a828abbfdd50a21fe31/provinsi-jawa-barat-dalam-angka-2023.html>
- [3] IESR, "Indonesia Energy Transition Outlook 2023: Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia: Pursuing Energy Security in the Time of Transition," 2023, p. Please cite this report as: IESR (2022). Indonesia. [Online]. Available: www.irena.org
- [4] Univeritas Katolik Parahyangan, "Menuju Transisi Energi Bersih," Suara Parahyangan. Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://unpar.ac.id/menuju-transisi-energi->

- bersih/#:~:text=Transisi energi adalah proses merubah,%2C panas bumi%2C dan angin.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, *Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air*. Indonesia, 2019, p. 11. [Online]. Available: <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/12551>
 - [6] B. S. N. Indonesia, *Spesifikasi turbin cross-flow PLTMH kelas A*. Indonesia: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/12/28/2750/standar.nasional.indonesia.sni.pembangkit.ebt?lang=en>, 2019, p. 26. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/12/28/2750/standar.nasional.indonesia.sni.pembangkit.ebt?lang=en>
 - [7] Politeknik Negeri Bandung, *Rencana Induk Penelitian Politeknik Negeri Bandung 2021-2025*. Indonesia, 2021, p. 63. [Online]. Available: [https://sippm.polban.ac.id/file_downloads/Rencana_Induk_Penelitian_\(RIP\)_Polban_Tahun_2021_-_2025_29c33305-5944-4829-b5a8-20b7ccd3520c.pdf](https://sippm.polban.ac.id/file_downloads/Rencana_Induk_Penelitian_(RIP)_Polban_Tahun_2021_-_2025_29c33305-5944-4829-b5a8-20b7ccd3520c.pdf)
 - [8] Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, “Salinan Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi,” vol. 1, no. 3, pp. 1–76, 2020, [Online]. Available: <https://usd.ac.id/lembaga/lpmai/wp-content/uploads/2021/04/Permendikbud-Nomor-3-Tahun-2020.pdf>
 - [9] B. Triyono, Haryadi, and P. Nurega, “Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Head Rendah dan Portable,” *Jur. Tek. Mesin*, no. 2008, pp. 172–177, 2014, [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/425>
 - [10] D. Setiawan, L. Ode, and M. F. Sorimuda, “Perancangan dan Optimasi Desain Turbin Francis Pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro di Bendungan Jatibarang Kota Semarang .,” *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 9, no. 3, pp. 20–28, 2019, doi: <https://doi.org/10.35814/teknobiz.v9i3.1152>.
 - [11] H. Suropto *et al.*, “Analisis Kecepatan Masuk Sudut Runner Turbin Cross flow dengan Simulasi CFD,” *J. Aptek*, no. 1, pp. 39–44, 2020, [Online]. Available: <https://journal.upp.ac.id/index.php/aptek/article/view/131>
 - [12] Haryadi, Sugianto, Prasetyo, and D. Setiawan, “Experimental and Numerical Study on Conical Gravitational Water Vortex Turbine with 3D Runner,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–14, 2024, doi: <https://doi.org/10.37934/arfm.114.2.114>.
 - [13] D. S. Haryadi, Ali Mahmudi, Sugianto, “Studi Pengaruh Debit dan Jenis Runner Terhadap Efisiensi Turbin Vorteks PLTPH,” *J. Permadi Perancangan, Manufaktur, Mater. Dan Energi*, vol. 5, no. 2, pp. 66–77, 2023, doi: doi.org/10.52005/permadi.v5i2.121.
 - [14] D. S. Haryadi, Ali Mahmudi, Sugianto, “Studi pengaruh debit dan jumlah tingkat runner terhadap efisiensi turbin vorteks PLTPH,” *J. Crankshaft*, vol. 6, no. 2, pp. 9–20, 2023, doi: doi.org/10.24176/crankshaft.v6i2.10876.
 - [15] H. M. Ardi, M. M. Fahmi, D. Setiawan, and M. Y. Efendi, “Perencanaan Transmisi Mekanik Roda Gigi dan Generator Turbin Vorteks PLTMH,” *J. Tek. Mesin*, vol. 20, no. 2, pp. 55–63, 2023, doi: [10.9744/jtm.20.2.55-63](https://doi.org/10.9744/jtm.20.2.55-63).
 - [16] D. Setiawan, Y. A. Rahman, F. Vauzia, and D. Kurnia, “Pelatihan Perencanaan dan Pengujian Performa Turbin Crossflow Offgrid pada Pelatihan Perencanaan PLTMH Program ISED di Laboratorium Hidro Hycom Pemerintah Republik Indonesia dan,” vol. 8, no. November, pp. 61–74, 2023.
 - [17] B. Triyono, Sugianto, and Haryadi, “Studi Komparasi Jumlah Sudu Turbin Pada Rancangan PLTMH Head Rendah Dengan Daya 2kW,” no. August 2022, pp. 93–97, 2014.