

PENENTUAN JENIS *DRAFT TUBE* BERDASARKAN NILAI *HEAD RECOVERY* DAN KINERJA TURBIN *HYDROCOIL* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Fahmi Hidayat¹, Alief Avicenna Luthfie^{1*}, Agung Wahyudi Biantoro¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta
Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia

*corresponding author

E-mail*: alief.avicenna@mercubuana.ac.id

Abstrak—Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menggunakan turbin *hydrocoil* di Desa Sukajaya Lembang, Bandung, Jawa Barat, telah berhasil dirancang. Namun, kecepatan aliran air setelah keluar dari turbin *hydrocoil* masih relatif tinggi, sehingga masih banyak energi aliran yang terbuang sebelum dapat dikonversi. Sebagaimana turbin reaksi lainnya, turbin *hydrocoil* memerlukan *draft tube* agar dapat memaksimalkan proses konversi energinya. Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah menentukan jenis *draft tube* berdasarkan nilai *head recovery* dan kinerja turbin *hydrocoil* untuk sistem PLTMH yang telah dirancang. Proses penentuan ini melibatkan 3 tahap, yaitu: 1) evaluasi kinerja turbin *hydrocoil* yang telah dipasang 3 jenis *draft tube*, yaitu *conical straight*, *curved elbow*, dan *simple elbow*, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), 2) perhitungan *head recovery* ketiga jenis *draft tube*, dan 3) penentuan jenis *draft tube* terbaik berdasarkan nilai *head recovery* dan kinerja turbin *hydrocoil*. Pada tahap satu, tipe analisis yang digunakan adalah *steady state* dengan model turbulensi SST $k-\omega$, untuk menangkap turbulensi di pipa *penstock* dan di dekat *blade* turbin. Hasil yang didapatkan adalah efisiensi turbin *hydrocoil* tertinggi dengan ketiga jenis *draft tube* terpasang, berada di kecepatan putar $N = 1100$ rpm. Efisiensi tertinggi untuk turbin *hydrocoil* dengan *draft tube conical straight*, *curved elbow*, dan *simple elbow* masing-masing adalah 90,48%, 90,18%, dan 91,26%. Sementara itu, *head recovery* pada kecepatan putar $N = 1100$ rpm untuk *draft tube conical straight*, *curved elbow*, dan *simple elbow* masing-masing adalah 1,627 m; 1,866 m; dan 4,097 m. Dengan demikian, *draft tube simple elbow* adalah yang terbaik untuk sistem PLTMH ini karena memiliki nilai *head recovery* dan efisiensi tertinggi.

Kata kunci: Turbin Hydrocoil, Draft tube, Head recovery, Efisiensi, Computational Fluid Dynamics (CFD)

Abstract— A Microhydro Power Plant (MHP) with hydrocoil turbine in Sukajaya Lembang Village, Bandung, West Java, has been successfully designed. However, the velocity of the water flow after exiting the hydrocoil turbine is still relatively high, so there is still a lot of wasted flow energy before it can be converted. Like other reaction turbines, the hydrocoil turbine requires a draft tube in order to maximize its energy conversion process. Thus, the purpose of this research is to determine the type of draft tube based on the head recovery value and performance of the hydrocoil turbine for the MHP system. This determination process involves 3 stages: 1) evaluation of the performance of the hydrocoil turbine that has been installed with three types of draft tubes, namely conical straight, curved elbow, and simple elbow, by Computational Fluid Dynamics (CFD), 2) calculation of the head recovery of the three types of draft tubes, and 3) determination of the best draft tube based on the head recovery value and performance of the hydrocoil turbine. In stage one, the type of analysis used is steady state with the SST $k-\omega$ turbulence model, to capture turbulence in the penstock pipe and near the turbine blades. As the results, the highest hydrocoil turbine efficiency with all three types of draft tubes installed, is at a rotational speed of $N=1100$ rpm. The highest efficiency for the hydrocoil turbine with conical straight, curved elbow, and simple elbow draft tubes are 90.48%, 90.18%, and 91.26%, respectively. Meanwhile, the head recovery at rotational speed $N=1100$ rpm for conical straight, curved elbow, and simple elbow draft tubes are 1.627 m, 1.866 m, and 4.097 m, respectively. Thus, the simple elbow draft tube is the best to use in this MHP system because it has the highest head recovery and efficiency values.

Keywords: Hydrocoil Turbine, Draft Tube, Head recovery, Efficiency, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang tinggi. Berdasarkan data dari Kementerian

Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), Dengan melihat potensi energi terbarukan yang tersebar, penyediaan energi dalam negeri

terutama di daerah-daerah yang belum memiliki akses terhadap energi bisa dipenuhi dengan potensi-potensi lokal [1]. Potensi energi air di Indonesia diperkirakan mencapai 94.449 MW. Potensi yang dapat dimanfaatkan sebagai PLTA 75.091 MW sementara yang dapat dimanfaatkan sebagai PLTM dan PLTMH mencapai 19.358 MW [2]. Salah satu pemanfaatan energi terbarukan di pedesaan adalah dengan menggunakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Sistem PLTMH akan memanfaatkan energi aliran air yang berasal dari energi potensial air dari hulu atau penampungan berupa danau atau bendungan. Namun, beberapa sistem PLTMH tidak dapat bertahan lama karena ketersediaan *head* air yang rendah [3].

Program Studi Teknik Mesin Universitas Mercu Buana telah berhasil merancang sistem PLTMH di Desa Sukajaya Lembang, Bandung, Jawa Barat. Turbin yang digunakan dalam sistem PLTMH tersebut adalah turbin *hydrocoil*, Turbin *hydrocoil* memiliki kumparan berputar tunggal yang unik dengan desain bentuk pita melengkung yang mengubah energi aliran air yang mengalir menjadi energi mekanik rotasi [4]. Namun, kecepatan aliran air setelah keluar dari turbin *hydrocoil* masih relatif tinggi, sehingga masih banyak energi aliran yang terbuang sebelum dapat dikonversi.

Sebagaimana turbin reaksi lainnya, turbin *hydrocoil* memerlukan *draft tube* agar dapat memaksimalkan proses konversi energinya. *Draft tube* adalah komponen tambahan yang dipasang di sisi keluaran turbin yang akan memperlambat aliran air setelah keluar dari turbin, sehingga akan mengubah kelebihan energi aliran air menjadi tekanan statis untuk meningkatkan kinerja turbin [5], [6]. Analisis kinerja turbin yang dipasang *draft tube* telah banyak dilakukan, misalnya saja oleh Shojaeefard, *et al.* [7]. Dalam penelitian ini telah dibahas optimasi bentuk *draft tube* yang digunakan pada turbin mikrohidro tipe Agnew. Hasilnya memprediksi bahwa pusaran tinggi aliran masuk secara drastis mengurangi kinerja *draft tube*. Selain itu, Baya, *et al.* [8] juga melakukan analisis terhadap kinerja turbin air yang telah dipasang *draft tube*. Hasilnya menunjukkan pemecahan masalah yang dihasilkan oleh tali pusaran di bagian turbin Francis dengan kecepatan spesifik sedang. Namun, analisis secara eksperimental ini akan menghabiskan banyak biaya, karena membutuhkan proses manufaktur *draft tube* yang belum tentu dapat menghasilkan kinerja turbin terbaik.

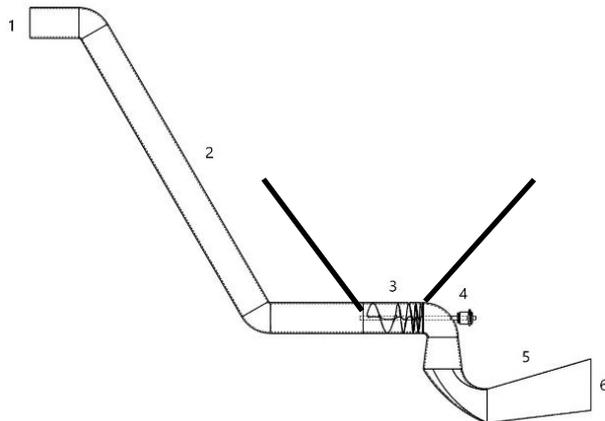
Dalam rangka penghematan biaya ketika menganalisis kinerja turbin air yang telah dipasang *draft tube*, maka banyak peneliti yang menggunakan metode simulasi numeris, misalnya saja analisis yang telah dilakukan oleh Agarwal [9] menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Zona tekanan tinggi diidentifikasi dalam *draft tube* kerucut dan siku, meskipun, tekanan keseluruhan kurang dari tekanan atmosfer. Selain itu, Luthfie [10] juga melakukan analisis terhadap kinerja turbin air yang telah dipasang *draft tube* pada sebuah pipa siphon. Hasilnya menunjukkan bahwa sudut kemiringan pipa siphon 45° memberikan kinerja turbin *hydrocoil* yang lebih baik dibandingkan sudut kemiringan pipa siphon 90°. Hal ini berkaitan dengan mengecilnya perbedaan kecepatan tangensial antara sisi *inlet* dan sisi *outlet* turbin. Namun, analisis-analisis tersebut hanya berpusat pada kinerja turbin yang digunakan dan belum menyertakan perhitungan *head recovery* dari *draft tube* yang dipasang.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menentukan jenis *draft tube* berdasarkan nilai *head recovery* dan kinerja turbin *hydrocoil* guna memaksimalkan proses konversi energi pada turbin *hydrocoil* di sistem PLTMH yang telah dirancang. Proses penentuan ini melibatkan 3 tahap, yaitu: 1) evaluasi kinerja turbin *hydrocoil* yang telah dipasang 3 jenis *draft tube*, yaitu *conical straight*, *curved elbow*, dan *simple elbow*, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), 2) perhitungan *head recovery* ketiga jenis *draft tube*, dan 3) penentuan jenis *draft tube terbaik* berdasarkan nilai *head recovery* dan kinerja turbin *hydrocoil*.

2. METODOLOGI

2.1. Gambaran Umum

Prinsip kerja PLTMH adalah memanfaatkan beda tinggi dan jumlah air per detik yang ada pada aliran sungai. Air yang mengalir melalui *inlet* akan diteruskan oleh *penstock* menuju turbin dan akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. [11]. Secara garis besar, sistem PLTMH yang telah dirancang oleh Program Studi Teknik Mesin Universitas Mercu Buana untuk Desa Sukajaya Lembang, Bandung, Jawa Barat, ditunjukkan oleh Gambar 1. Pada penelitian ini, generator listrik diabaikan, sehingga perhitungan kinerja hanya difokuskan pada kinerja turbin *hydrocoil*.



Gambar 1. Desain turbin hydrocoil dengan tambahan draft tube

Keterangan Gambar 1:

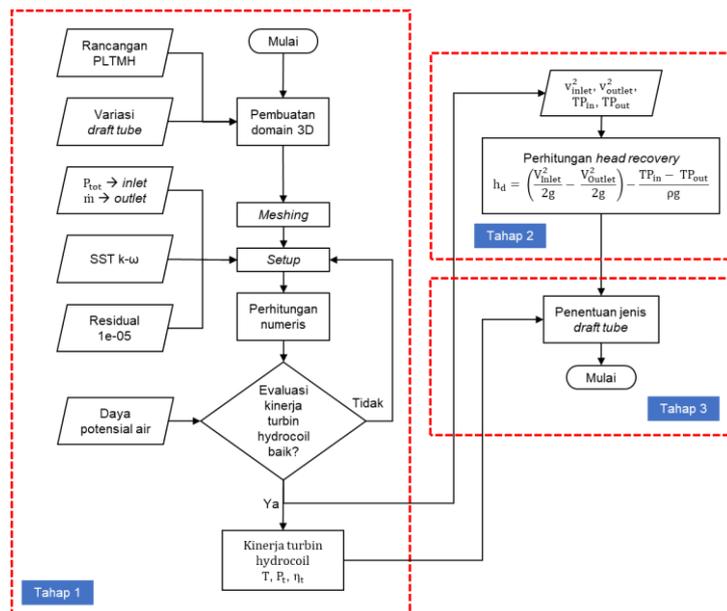
- 1. Inlet
- 2. Penstock
- 3. Turbin Hydrocoil
- 4. Generator
- 5. Draft Tube
- 6. Outlet

Gambar 2 menunjukkan detail langkah-langkah pada penelitian ini. Pada tahap satu, evaluasi kinerja turbin hydrocoil dilakukan dengan menerapkan metode CFD, yang diawali dari pembuatan domain komputasi 3D rancangan

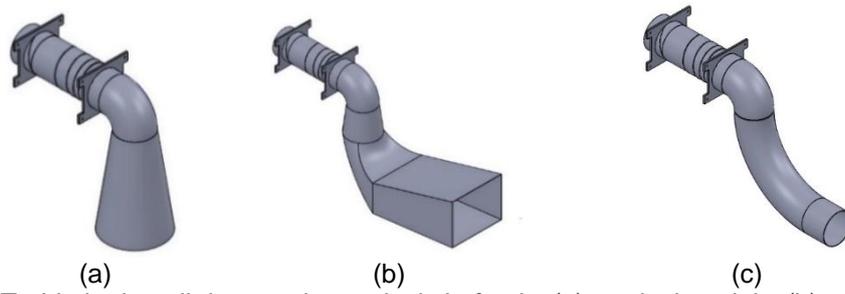
PLTMH dan tiga jenis variasi draft tube. Kemudian, proses perhitungan numeris dilakukan dengan menerapkan governing equations berupa persamaan kontinuitas dan momentum (Navier-Stokes). Setelah itu, dilanjutkan dengan proses evaluasi kinerja turbin hydrocoil dan didapatkan nilai torsi (T), daya turbin (P_t), dan nilai efisiensi (η_t). Proses evaluasi dikatakan baik jika tren grafik kinerja telah sesuai dengan tren kinerja turbin air pada umumnya. Lebih jauh lagi, data hasil perhitungan numeris digunakan untuk perhitungan head recovery (h_d) pada tahap dua. Kemudian, baik data kinerja turbin hydrocoil maupun head recovery dari tiga variasi draft tube, digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan jenis draft tube terbaik untuk sistem PLTMH ini.

2.2. Pemodelan Fisik

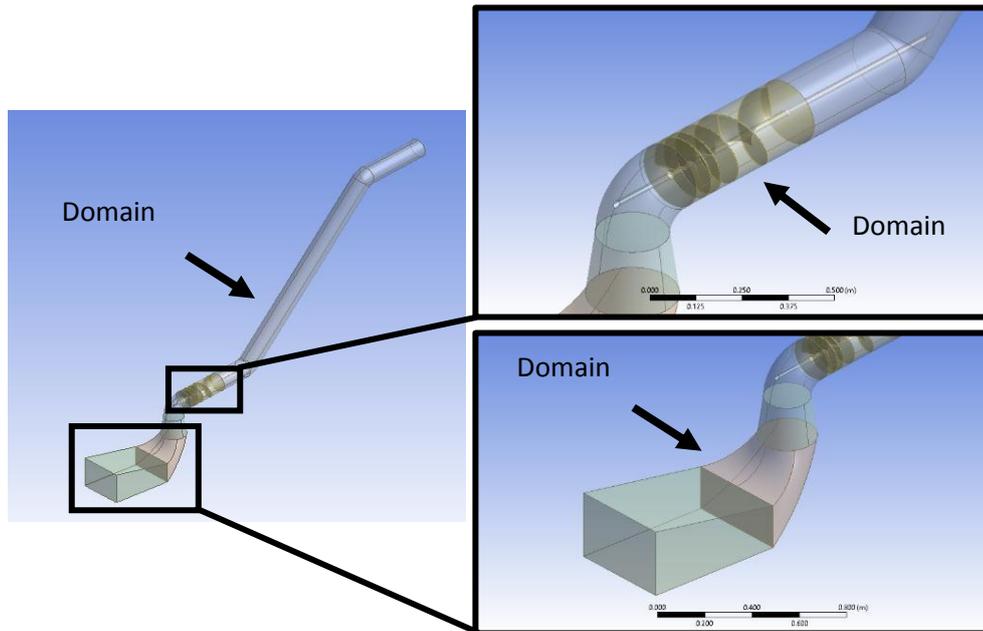
Pemodelan fisik pada penelitian ini adalah pembuatan domain komputasi 3D berdasarkan rancangan PLTMH dan tiga jenis variasi draft tube, yaitu conical straight, curved elbow, dan simple elbow [12]. Adapun ketiga jenis variasi draft tube setelah dipasang kepada turbin hydrocoil akan tampak seperti Gambar 3. Gambar 4 menunjukkan contoh domain komputasi 3D dari sistem PLTMH yang telah dipasang draft tube jenis curved elbow. Tampak pada gambar tersebut bahwa ada dua domain yang didefinisikan sebagai domain stationary dan domain rotating [13]. Kemudian, Gambar 5 menunjukkan hasil mesh yang terbentuk. Sementara itu, Tabel 1 dan 2 menunjukkan data statistik dan kualitas dari mesh tersebut.



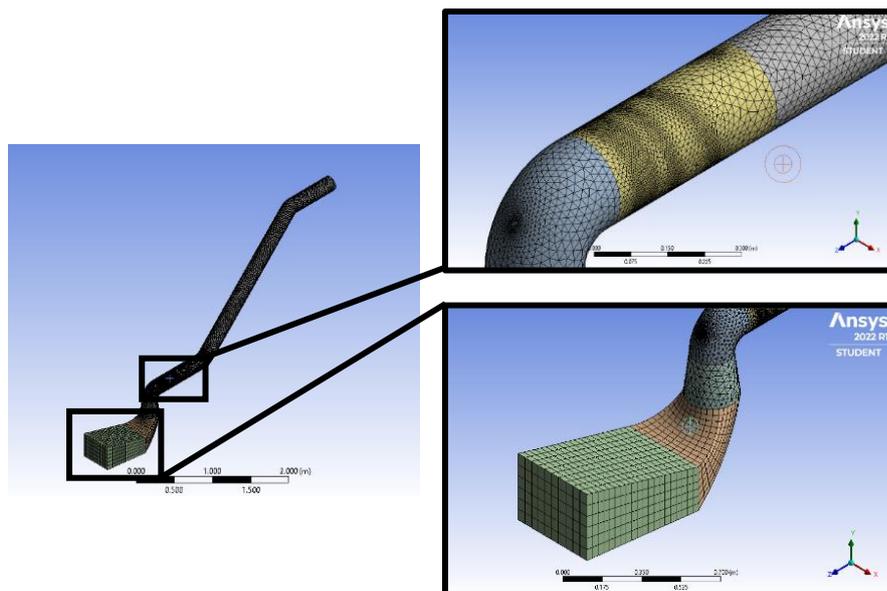
Gambar 2. Langkah kerja penelitian



Gambar 3. Turbin hydrocoil dengan tiga variasi *draft tube* (a) *conical straight*, (b) *curved elbow*, dan (c) *simple elbow*



Gambar 4. Domain komputasi 3D dari turbin hydrocoil yang telah dipasang *draft tube*



Gambar 5. Hasil *mesh* pada domain komputasi 3D

Tabel 1. Data Statistik Mesh

Statistic	Draft Tube Conical Straight	Draft Tube Curved Elbow	Draft Tube Simple Elbow
	Element	476.414	490.948
Nodes	125.347	131.683	138.005

Tabel 2. Data Kualitas Mesh

Quality	Draft Tube Conical Straight	Draft Tube Curved Elbow	Draft Tube Simple Elbow
	Minimum	1,6342e-004	6,1543e-005
Maximum	0,99549	0,91684	0,95202
Average	0,25173	0,25014	0,25388

2.3. Pemodelan Matematik

Setelah pemodelan fisik selesai, selanjutnya adalah pemodelan matematik. Pemodelan matematik ini merupakan bagian dari *setup* pada Gambar 2. Pada pemodelan matematik ini, diawali dengan penentuan *governing equations* berupa persamaan kontinuitas dan momentum (Navier-Stokes) [14]. Adapun persamaan-persamaan tersebut adalah:

$$\rho \nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

$$\rho \nabla \cdot (vv) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \cdot v + \rho g + (-\rho \nabla \cdot (\overline{v'v'})) \tag{2a}$$

$$\rho \nabla \cdot (v_r v_r) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \cdot v_r + \rho g + (-\rho \nabla \cdot (\overline{v_r'v_r'})) - \rho [(2\omega v_r) + (\rho \omega \omega r)] \tag{2b}$$

di mana ρ adalah densitas air, v adalah kecepatan absolut aliran air, p adalah tekanan statis air, μ adalah viskositas dinamik air di temperatur 20°C, g adalah percepatan gravitasi, v_r adalah kecepatan relatif yang muncul akibat putaran domain, v' adalah fluktuasi kecepatan absolut air akibat turbulensi, v_r' adalah fluktuasi kecepatan relatif akibat turbulensi, dan ω adalah kecepatan putar dari domain. Pada penelitian ini, nilai kecepatan putar ω divariasikan mulai dari 350 rpm hingga 1250 rpm.

Suku terakhir di ruas kanan pada Persamaan 2a, yaitu $(-\rho \nabla \cdot (\overline{v'v'}))$, menunjukkan tegangan Reynolds yang muncul akibat aliran turbulensi di dalam domain komputasi. Penyelesaian tegangan Reynolds ini membutuhkan sebuah model turbulensi. Pada penelitian ini, model turbulensi yang dipilih adalah *shear stress transport* k-omega (SST k- ω). Selain itu, suku terakhir pada Persamaan 2b, $(-\rho [2\omega v_r + \rho \omega \omega r])$,

menunjukkan gaya-gaya per satuan volume terjadi akibat putaran domain.

Ketiga persamaan tersebut, Persamaan 1 – 2b, diselesaikan dengan memasukkan nilai kondisi batas. Sebagaimana tampak pada Gambar 1 dan 2, kondisi batas yang dimaksud adalah *inlet* dan *outlet* [10]. Tekanan total di sisi *inlet* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{tot} = \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho v_{inlet}^2 \tag{3}$$

di mana h adalah beda ketinggian antara *inlet* dan sumbu putar turbin dan v_{inlet} adalah kecepatan rata-rata aliran air ketika memasuki *inlet*. Pada penelitian ini, nilai h ditentukan sebesar 0,4 m sesuai dengan kondisi terjunan sungai. Lalu, nilai v_{inlet} dapat dihitung menggunakan persamaan Manning [15], sebagai berikut:

$$v_{inlet} = \frac{K}{n} R_h^{2/3} S_o^{1/2} \tag{4}$$

di mana R_h adalah jari-jari hidrolis aliran sungai, S_o adalah kemiringan aliran sungai, K adalah konstanta tak berdimensi yang bernilai 1 jika persamaan tersebut dihitung dalam satuan SI, dan n adalah koefisien Manning [15]. Berdasarkan pengamatan, kemiringan sungai S_o adalah 0,05 m dan koefisien Manningnya bernilai 0,035.

Adapun laju alir massa di sisi *outlet* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\dot{m} = \rho \cdot v_{inlet} \cdot A \tag{5}$$

di mana A adalah luas penampang. Meskipun laju alir massa ini digunakan sebagai kondisi batas *outlet*, tetapi luas penampang yang dimaksud adalah luas penampang sisi *inlet*, karena laju alir massa diasumsikan konstan dari *inlet* sampai *outlet* [15]. Tabel 3 menunjukkan rangkuman hal-hal yang diatur pada tahap *setup* berdasarkan pemodelan matematik dan pengaturan lain yang terkait.

Tabel 3. Rangkuman *setup* pemodelan matematik

Option	Setup
Tipe analisis	Steady State
Tekanan referensi	1 atm
Model turbulensi	SST k- ω
Tekanan total <i>inlet</i>	6.954,54 Pa
Laju alir massa <i>outlet</i>	78.801 kg/s
Machine Type	Axial Turbine
Sumbu rotasi	Sumbu z
Interface model	Frozen Rotor

Option	Setup
Target residual	1e-05
Iterasi	10.000

2.4. Perhitungan kinerja dan head recovery

Pengambilan data hasil perhitungan numeris berupa nilai kecepatan, tekanan, dan torsi untuk setiap jenis *draft tube* dan variasi kecepatan putar. Data torsi akan digunakan untuk menghitung daya turbin yang dihasilkan, sementara data kecepatan dan tekanan akan digunakan untuk menghitung *head recovery*. Selanjutnya, nilai daya turbin ini akan digunakan untuk menghitung efisiensi turbin. Nilai-nilai torsi, daya turbin, dan efisiensi turbin menunjukkan kinerja turbin yang akan dianalisis pada penelitian ini. Kemudian, nilai-nilai *head recovery*, torsi, daya turbin, dan efisiensi turbin untuk setiap jenis *draft tube* diplot ke dalam grafik untuk dibandingkan. Perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Daya Potensial Air

Daya potensial air adalah daya yang dihasilkan oleh air yang jatuh pada *head* tertentu dengan debit dan dapat dihitung sebagai,

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \tag{6}$$

dimana Q adalah debit air di sisi *inlet* yang dapat dihitung sebagai kecepatan air *inlet*, v_{inlet} , dikali dengan luas penampang sisi *inlet* A [16].

b. Daya Turbin

Besar daya turbin yang dihasilkan akibat adanya konversi energi di dalam turbin, dapat dihitung sebagai,

$$P_t = T \cdot \omega \tag{7}$$

di mana T adalah torsi turbin hydrocoil yang didapatkan dari hasil perhitungan numeris. Nilai torsi ini akan bersesuaian dengan nilai kecepatan putar ω yang divariasikan [17].

c. Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin adalah daya guna turbin dilihat dari perbandingan daya turbin dengan daya potensial air [18]. Dapat dihitung sebagai,

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100 \% \tag{8}$$

d. Head Recovery

Draft Tube berfungsi sebagai alat untuk memulihkan tekanan atau memulihkan *head* (*pressure recovery/head recovery*) [19]. Per-samaan yang dapat digunakan untuk menghitung *head recovery* adalah,

$$h_d = \left(\frac{V_{inlet}^2}{2g} - \frac{V_{outlet}^2}{2g} \right) - H_{LD} \tag{9}$$

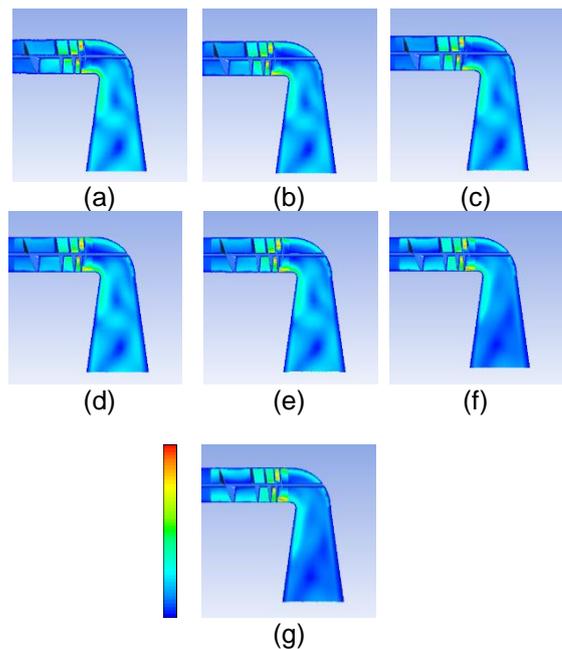
$$H_{LD} = \frac{TP_{in} - TP_{out}}{\rho g} \tag{10}$$

di mana v_{inlet} adalah kecepatan air di sisi *outlet* dari *draft tube*, TP_{in} adalah tekanan total di sisi *inlet* dari *draft tube* terpasang, dan TP_{out} adalah tekanan total di sisi *outlet*-nya.

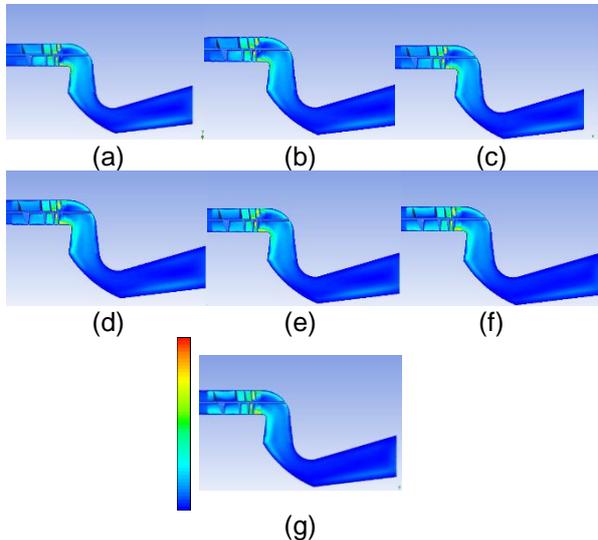
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Contour Kecepatan dan Tekanan

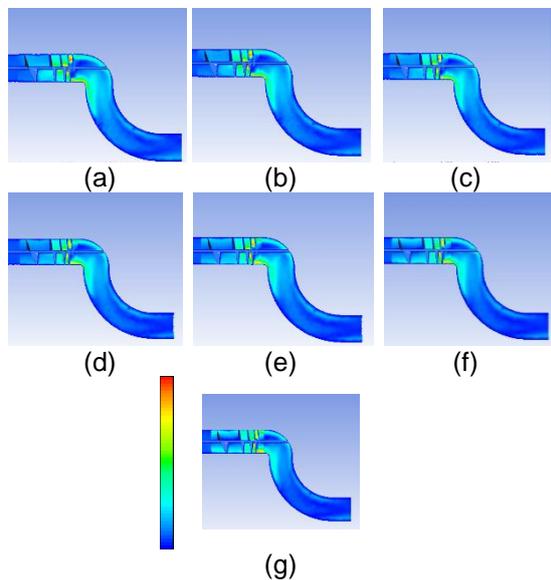
Gambar 6 sampai 8 menunjukkan *contour* kecepatan aliran air di turbin hydrocoil dengan *draft tube conical straight, curved elbow, dan simple elbow*. Tampak bahwa kecepatan fluida mengalami peningkatan selama melewati bilah turbin dan mengalami penurunan kembali di dalam *draft tube*. Peningkatan kecepatan selama melewati bilah turbin menunjukkan adanya peningkatan kecepatan tangensial aliran akibat putaran bilah turbin, sebagaimana diungkapkan oleh Luthfie [10]. Kecepatan tangensial ini akan menambah kecepatan total aliran air ketika melewati turbin hydrocoil.



Gambar 6. *Contour* kecepatan aliran air di turbin hydrocoil dengan *draft tube conical straight* (a) 350 rpm (b) 500 rpm (c) 650 rpm (d) 800 rpm (e) 950 rpm (f) 1.100 rpm (g) 1.250 rpm



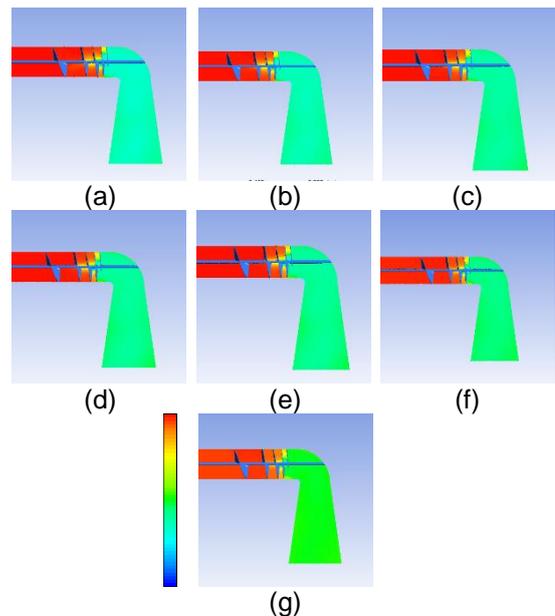
Gambar 7. *Contour* kecepatan aliran air di turbin hydrocoil dengan *draft tube curved elbow* (a) 350 rpm (b) 500 rpm (c) 650 rpm (d) 800 rpm (e) 950 rpm (f) 1,100 rpm (g) 1.250 rpm



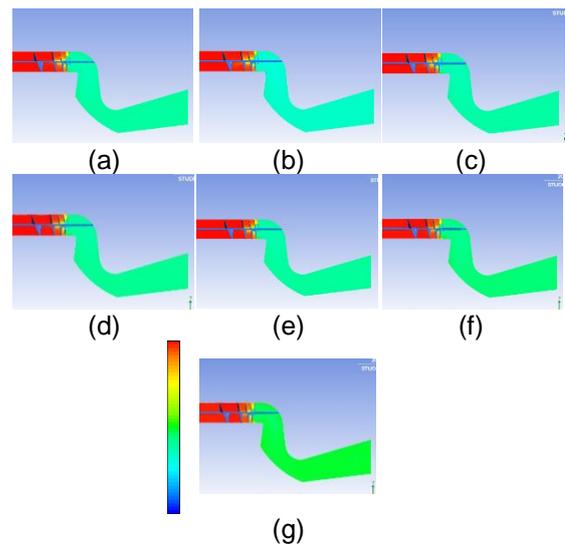
Gambar 8. *Contour* kecepatan aliran air di turbin hydrocoil dengan *draft tube simple elbow* (a) 350 rpm (b) 500 rpm (c) 650 rpm (d) 800 rpm (e) 950 rpm (f) 1,100 rpm (g) 1.250 rpm

Sementara itu, Gambar 9 sampai 11 menunjukkan *contour* tekanan aliran air di

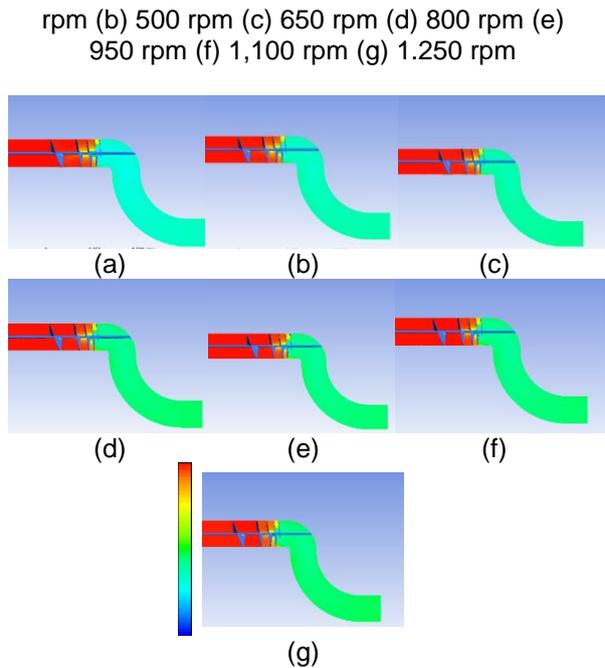
turbin hydrocoil pada *draft tube jenis conical straight, curved elbow, dan simple elbow*. Dari gambar-gambar tersebut, tampak bahwa terjadi penurunan tekanan statis air selama melewati bilah turbin dan penurunan tekanan lebih besar lagi di dalam *draft tube*. Penurunan tekanan ini menunjukkan adanya penyerapan energi aliran air oleh turbin hydrocoil. Semakin besar penurunan tekanannya, maka semakin besar pula penyerapan energi aliran air oleh turbin hydrocoil.



Gambar 9. *Contour* tekanan aliran air di turbin hydrocoil *draft tube conical straight* (a) 350 rpm (b) 500 rpm (c) 650 rpm (d) 800 rpm (e) 950 rpm (f) 1,100 rpm (g) 1.250 rpm



Gambar 10. *Contour* tekanan aliran air di turbin hydrocoil *draft tube curved elbow* (a) 350



Gambar 11. Contour tekanan aliran air di turbin hydrocoil *draft tube simple elbow* (a) 350 rpm (b) 500 rpm (c) 650 rpm (d) 800 rpm (e) 950 rpm (f) 1,100 rpm (g) 1.250 rpm

3.2. Kinerja Turbin Hydrocoil

Pada penelitian ini, kinerja turbin yang akan diamati adalah torsi, daya turbin, dan efisiensi turbin. Adapun pembahasannya adalah sebagai berikut:

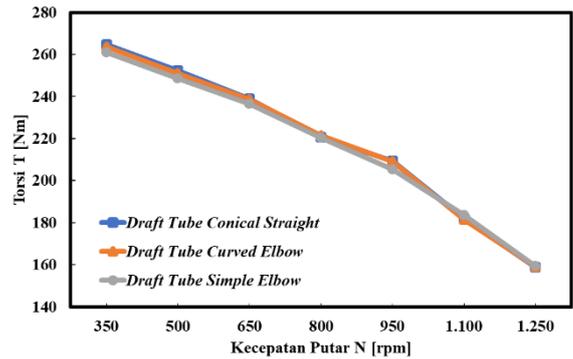
a. Torsi

Tabel 4 menunjukkan nilai-nilai torsi turbin *hydrocoil* untuk setiap jenis *draft tube* pada setiap variasi kecepatan putar. Gambar 12 menunjukkan plot nilai-nilai torsi tersebut. Tampak pada gambar tersebut bahwa sema-kin besar kecepatan putar, torsi semakin kecil dan tidak ada perbedaan yang signifikan di antara ketiga jenis *draft tube*. Hal ini menunjukkan bahwa torsi turbin tidak dipengaruhi oleh jenis *draft tube*, tetapi hanya dipengaruhi oleh bentuk bilah turbin dan kecepatan putar turbin. Tren torsi ini telah sesuai seperti yang ditunjukkan oleh [4].

Tabel 4. Nilai torsi turbin *hydrocoil* untuk setiap jenis *draft tube*

Kecepatan Putar [rpm]	Torsi [Nm]		
	<i>Draft Tube Conical Straight</i>	<i>Draft Tube Curved Elbow</i>	<i>Draft Tube Simple Elbow</i>

Kecepatan Putar [rpm]	Torsi [Nm]		
	<i>Draft Tube Conical Straight</i>	<i>Draft Tube Curved Elbow</i>	<i>Draft Tube Simple Elbow</i>
	350	264,56	263,55
500	252,46	251,01	248,66
650	239	238,59	236,51
800	220,62	221,58	220,41
950	209,24	209,09	205,27
1.100	182,06	181,45	183,62
1.250	158,95	159,22	159,39



Gambar 12. Grafik hubungan kecepatan putar terhadap torsi turbin *hydrocoil* untuk setiap jenis *draft tube*

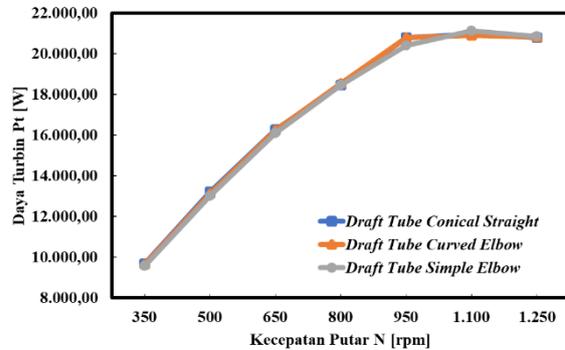
b. Daya Turbin

Tabel 5 menunjukkan nilai-nilai daya turbin *hydrocoil* untuk setiap jenis *draft tube* pada setiap variasi kecepatan putar. Gambar 13 menunjukkan plot nilai-nilai daya tersebut. Pada Gambar 13, menunjukkan semakin besar kecepatan putar maka akan semakin besar daya yang dihasilkan. Namun, daya akan mengalami penurunan kembali ketika kecepatan putar di atas 1.100 rpm yang artinya pada kecepatan putar 1.100 rpm, daya turbin mencapai nilai maksimum. Hal ini telah sejalan dengan tren daya turbin *hydrocoil* pada penelitian [20].

Tabel 5. Nilai Daya Turbin *Hydrocoil* untuk Setiap Jenis *Draft Tube*

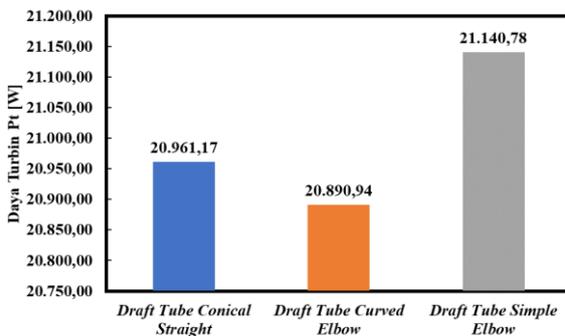
Kecepatan Putar [rpm]	Daya Turbin [W]		
	<i>Draft Tube Conical Straight</i>	<i>Draft Tube Curved Elbow</i>	<i>Draft Tube Simple Elbow</i>
	350	9.691,71	9.654,71
500	13.212,07	13.136,19	13.013,2
650	16.259,96	16.232,07	16.090,56
800	18.473,24	18.553,63	18.455,66
950	20.805,43	20.790,51	20.410,68
1.100	20.961,17	20.890,94	21.140,78

Kecepatan Putar [rpm]	Daya Turbin [W]		
	Draft Tube Conical Straight	Draft Tube Curved Elbow	Draft Tube Simple Elbow
	1.250	20.795,95	20.831,28



Gambar 13. Grafik hubungan kecepatan putar terhadap daya turbin hydrocoil untuk setiap jenis draft tube

Sementara itu, Gambar 14 menunjukkan perbandingan nilai daya pada kecepatan putar 1.100 rpm untuk setiap jenis draft tube. Tampak pada Gambar 14, bahwa draft tube jenis simple elbow menghasilkan daya turbin tertinggi di antara ketiganya.



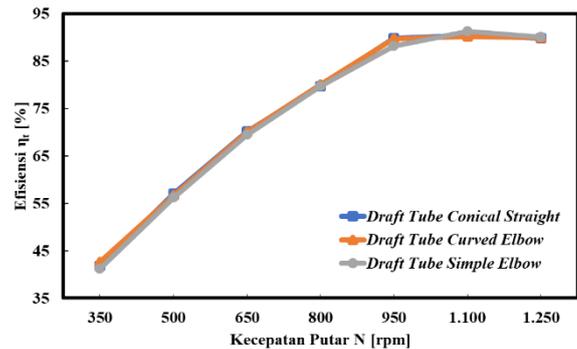
Gambar 14. Grafik hubungan kecepatan putar terhadap daya maksimal turbin hydrocoil untuk setiap jenis draft tube

- c. Efisiensi
Tabel 6 menunjukkan nilai-nilai efisiensi turbin hydrocoil untuk setiap jenis draft tube pada setiap variasi kecepatan putar. Gambar 15 menunjukkan plot nilai-nilai daya tersebut.

Tabel 6. Nilai Efisiensi Turbin Hydrocoil Untuk Setiap Jenis Draft Tube

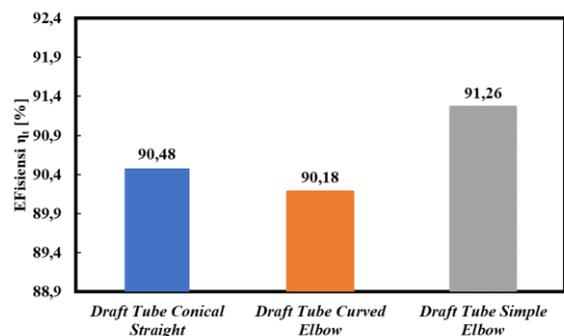
Kecepatan	Efisiensi [%]
-----------	---------------

Putar [rpm]	Draft Tube Conical Straight	Draft Tube Curved Elbow	Draft Tube Simple Elbow
350	41,83	42,67	41,24
500	57,03	56,7	56,17
650	70,18	70,07	69,46
800	79,74	80	79,67
950	89,81	89,75	88,11
1.100	90,48	90,18	91,26
1.250	89,77	89,92	90,02



Gambar 15. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putar Terhadap Efisiensi Turbin Hydrocoil Untuk Setiap Jenis Draft Tube

Gambar 15 menunjukkan semakin besar kecepatan putar maka akan semakin besar efisiensi yang dihasilkan. Namun, efisiensi akan mengalami penurunan kembali pada kecepatan putar 1.100 rpm yang artinya pada kecepatan putar 1.100 rpm adalah puncak efisiensi dari turbin hydrocoil. Hal ini sejalan dengan tren daya turbin yang dihasilkan. Adapun nilai efisiensi di kecepatan putar 1.100 rpm ditunjukkan oleh Gambar 16. Pada Gambar 16, efisiensi tertinggi dicapai ketika turbin hydrocoil dipasangkan dengan draft tube jenis simple elbow.



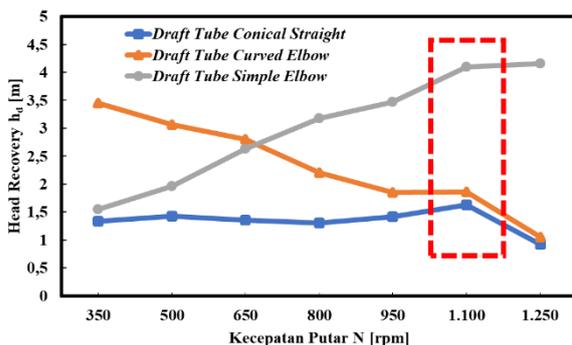
Gambar 16. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putar Terhadap Efisiensi Maksimal Turbin Hydrocoil Untuk Setiap Jenis Draft Tube

3.3. Analisis Head Recovery

Hasil perhitungan *head recovery* ditunjukkan oleh Tabel 7. Gambar 17 menunjukkan plot nilai-nilai *head recovery* tersebut. Pada gambar tersebut, perbedaan bentuk desain *draft tube* mempunyai nilai *head recovery* yang bervariasi dari variasi kecepatan putar. Pada *draft tube* jenis *conical straight* menunjukkan bahwa setiap perbedaan kecepatan putar memiliki nilai *head recovery* yang cenderung konstan dan memiliki *head recovery* tertinggi pada kecepatan putar 1.100 rpm dengan nilai 1,627 m. Pada *draft tube* jenis *curved elbow* menunjukkan semakin besar kecepatan putar maka akan semakin kecil nilai *head recovery* dan memiliki *head recovery* tertinggi pada rata-rata putaran 350 rpm dengan nilai 3,447 m. Sementara pada *draft tube* jenis *simple elbow* menunjukkan semakin besar kecepatan putar maka akan semakin besar nilai *head recovery* dan memiliki *head recovery* tertinggi pada kecepatan putar 1.250 rpm dengan nilai 4,155 m.

Tabel 7. Head Recovery untuk Setiap Jenis Draft Tube

Kecepatan Putar [rpm]	Head Recovery [m]		
	Draft Tube Conical Straight	Draft Tube Curved Elbow	Draft Tube Simple Elbow
350	1,334	3,447	1,544
500	1,4308	3,061	1,963
650	1,361	2,807	2,63
800	1,3017	2,206	3,175
950	1,4203	1,853	3,474
1.100	1,627	1,866	4,097
1.250	0,923	1,055	4,155



Gambar 17. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putar Terhadap Head Recovery Turbin Hydrocoil untuk Setiap Jenis Draft Tube

Terjadinya perbedaan *head recovery* pada setiap jenis *draft tube* disebabkan karena ada perbedaan kecepatan pada sisi *inlet draft tube*

dan kecepatan pada sisi *outlet draft tube*. Perbedaan ini terjadi karena setiap *draft tube* memiliki perubahan luas penampang yang berbeda-beda mulai dari sisi *inlet* hingga sisi *outlet*. Selain itu, panjang dari setiap jenis *draft tube* juga berbeda, sehingga mempengaruhi besarnya perubahan kecepatan dan perubahan tekanan aliran air selama melewati *draft tube*.

Kotak merah di Gambar 17 menunjukkan nilai *head recovery* setiap jenis *draft tube* pada kecepatan putar terbaik, yaitu kecepatan putar yang menghasilkan daya dan efisiensi turbin terbaik. Penentuan jenis *draft tube* terbaik untuk sism PLTMH ini didasarkan pada perbandingan nilai *head recovery* yang ada di dalam kotak merah. Dari hasil perbandingan, tampak bahwa jenis *draft tube* terbaik untuk sistem PLTMH ini adalah jenis *simple elbow*, karena jenis tersebut memiliki nilai *head recovery* tertinggi di antara jenis-jenis lainnya.

4. KESIMPULAN

Parameter penentuan jenis *draft tube* adalah hubungan *head recovery* tertinggi dengan efisiensi tertinggi pada setiap jenis *draft tube*. Pada kecepatan putar terbaiknya, *draft tube* jenis *conical straight* memiliki nilai *head recovery* 1,627 m dengan efisiensi 90,48%. Sementara pada *draft tube* jenis *curved elbow*, nilai *head recovery*-nya adalah 1,866 m dan efisiensinya adalah 90,18%. Pada *draft tube* jenis *simple elbow*, nilai *head recovery*-nya adalah 4,097 m dengan efisiensi mencapai 91,26%. Dengan ini menunjukkan bahwa *draft tube* jenis *simple elbow* adalah yang paling baik untuk turbin *hydrocoil* di sistem PLTMH ini dengan nilai efisiensi dan *head recovery* tertinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IESR, "Energi Terbarukan," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [2] A. Taufiqurrahman and J. Windarta, "Overview Potensi Dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air Di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 70–78, 2021, doi: 10.14710/jebt.2020.10036.
- [3] S. Nisworo and E. Setyowati, "Menggali Potensi Aliran Air Sungai Sebagai Sumber Tenaga Pembangkit Listrik Mikrohidro; Studi Kasus: Sungai Kali Manggis Di Wilayah Magelang," *J.*

- Teknol. Acad. Ista*, vol. 12, no. 2, pp. 260–265, 2008.
- [4] A. Aprillianto, Indarto, and Prajitno, "Design of A Prototype Hydrocoil Turbine Applied As Micro Hydro Solution," *ASEAN J. Syst. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 72–76, 2013.
- [5] S. Tridon, S. Barre, G. Dan, and L. Tomas, "Fluids Experimental analysis of the swirling flow in a Francis turbine draft tube : Focus on radial velocity component determination," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 29, no. 4, pp. 321–335, 2010, doi: 10.1016/j.euromechflu.2010.02.004.
- [6] R. A. Subekti, "Analisis Aliran Fluida Dinamik Pada Draft Tube Turbin Air," *Puslit Tenaga List. dan Mekatronik - LIPI*, no. 21, 2012.
- [7] M. H. Shojaeefard, A. Mirzaei, and A. Babaei, "Shape optimization of draft tubes for Agnew microhydro turbines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 681–689, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.025.
- [8] A. Baya, S. Muntean, V. C. Câmpian, A. Cuzmoş, M. Diaconescu, and G. Bălan, "Experimental investigations of the unsteady flow in a Francis turbine draft tube cone," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 12, p. 012007, 2010, doi: 10.1088/1755-1315/12/1/012007.
- [9] C. D. Widiawaty, A. I. Siswantara, and G. G. R. Gunadi, "Kajian Analisis Engineering Dengan Metode Computational Fluid Dynamics," *J. PoliTeknologi*, vol. 14, no. 3, 2016, doi: 10.32722/pt.vol14.no.3.2015.pp.
- [10] A. A. Luthfie, "Analisis Pengaruh Perubahan Sudut Pipa Siphon Terhadap Performasi Turbin Hydrocoil Dengan Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)," *J. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, p. 41, 2017, doi: 10.22441/jtm.v6i1.1336.
- [11] S. Sukamta and A. Kusmantor, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Jantur Tabalas Kalimantan Timur," *J. Tek. Elektro Unnes*, vol. 5, no. 2, pp. 58–63, 2013.
- [12] Max, "Draft Tube: A Basic Guide to The Types, Function And Efficiency," *Linqip Technews*, 2020. https://www.linqip.com/blog/draft-tube/#draft_tube_function.
- [13] R. M. Irawan, "Simulasi CFD Aliran Stratified Air-Udara pada Pipa Horisontal," *Semesta Tek.*, vol. 21, no. 2, 2016, doi: 10.18196/st.212227.
- [14] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. New York: Pearson Education Limited, 1995.
- [15] Y. A. Cengel and J. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamental And Application*, vol. 1999, no. December. 2006.
- [16] R. M. A. A. Aritonang, "Rancangan Pengujian Serta Pembuatan Turbin Air Kinetik Tipe Savonius Poros Vertikal Menggunakan Pemandu Arah Aliran Dengan Pemanfaatan Aliran Sungai," *J. Pembang. Wil. Kota*, vol. 1, no. 3, pp. 82–91, 2018.
- [17] A. Muliawan and A. Yani, "Analisis Daya Dan Efisiensi Turbin Air Kinetis Akibat Perubahan Putaran Runner," *Sainstek J. Sains dan Teknol.*, vol. 8, no. 1, p. 1, 2017, doi: 10.31958/js.v8i1.434.
- [18] I. Hanggara and H. Irvani, "Potensi PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) Di Kecamatan Ngantang Kabupaten Malang Jawa Timur," *J. Reka Buana*, vol. 2, no. 2, pp. 149–155, 2017.
- [19] R. Khare, V. Prasad, and M. Verma, "Design Optimisation of conical draft tube of hydraulic turbine," *IJAEST Int. J. Adv. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, 2012.
- [20] A. A. Luthfie, S. E. Pratiwi, and P. Hidayatulloh, "Hydrocoil Turbine Performance at 3 m, 4 m, and 5 m Head Analysis Using Computational Fluid Dynamics Method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 343, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/343/1/012024.