

Pengaruh Variasi Bentuk Draft Tube Jenis Elbow Terhadap Nilai Gaya Drag Sudu Runner Turbin Crossflow Berbasis CFD

Sirojuddin dan Fadilah Chaerul Iman

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta

Jl. Rawamangun Muka, Rawamangun, Jakarta 13220

e-mail : sirojuddinabbas@unj.ac.id

e-mail : fadilahchaeruliman040997@gmail.com

Abstrak

Draft tube merupakan suatu pipa atau saluran yang secara bertahap meningkatkan luas yang menghubungkan saluran keluar runner ke aliran sungai, fungsinya sebagai saluran yang dapat mengkonversi energi kinetik menjadi energi tekanan yang akan hilang begitu saja jika tidak digunakannya draft tube. Pada turbin air penggunaan draft tube adalah untuk meningkatkan efisiensi daya. Tujuan riset ini adalah untuk mengetahui pengaruh 5 variasi bentuk draft tube jenis elbow terhadap nilai gaya drag pada sudu runner sehingga diketahui nilai daya turbinnya. Ada 5 varian yang akan diriset, terdiri dari varian DT-1, DT-2, DT-3, DT-4, dan DT-5. Desain mula-mula dibuat dalam bentuk 2D menggunakan AutoCad dan desain yang sudah di matangkan di software 2D di buat dalam bentuk 3D kemudian disimulasikan dalam software CFD. Debit air masuk yang digunakan adalah sebesar $0,0333 \text{ m}^3/\text{s}$, tinggi jatuh 5,5 m. Dari hasil simulasi CFD SolidWork Flow Simulation diperoleh varian DT-1 yang terbaik dimana aliran pada sudu runner tingkat 1 dan tingkat 2 menghasilkan gaya drag dan daya turbin terbesar.

Kata kunci: variasi draft tube, elbow, gaya drag, efisiensi turbin, CFD simulation

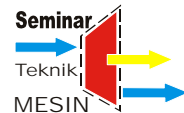
1. Pendahuluan

Turbine air jenis cross-flow merupakan jenis dari turbin impuls, biasa digunakan pada pembangkit listrik skala kecil, untuk daerah terpencil yang belum ada pasokan listriknya. Aliran air yang menggerakkan turbin dapat berupa : saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjunan (head) dan jumlah debit air.

[1] menyatakan bahwa turbin cross-flow merupakan jenis dari pembangkit listrik tenaga mikro hidro atau PLTMH (daya terbangkit < 200 kW) dan menurut [2] pembangkit listrik skala mikro hidro (PLTMH) yakni bila daya yang dibangkitkan dibawah 1 MW.

[3] menerangkan bahwa Draft tube merupakan suatu pipa atau saluran yang secara bertahap meningkatkan area yang menghubungkan saluran keluar runner ke alam. ini digunakan untuk mengeluarkan air dari pintu keluar turbin ke alam. salah satu ujung draft tube terhubung ke bagian luaran aliran akhir turbin. Darft tube itu sendiri memiliki dua fungsi utama yakni; 1. Sebagai saluran yang dapat menkonversi energi kinetik (velocity) menjadi energi tekanan atau potensial yang akan hilang begitu saja jika tidak di gunakannya draft tube. 2. Untuk memasang runner turbin di atas atau di bawah permukaan air untuk menghindari kavitasi, tanpa mempengaruhi head bersih.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan [4] menyimpulkan bahwa nilai drag pada sudu runner turbin cross flow berbanding lurus terhadap perubahan harga outlet angle dan angle of attack. penelitian ini hanya membahas tentang bagaimana pengaruh jenis bentuk sudu secara khusus, dan tidak membahas mengenai hubungannya terhadap draft tube. Sementara [5] Menerangkan drag force pada suatu permukaan plat akan sangat



menguntungkan tetapi dalam beberapa kasus yakni pada bentuk airfoil gaya drag merupakan gaya yang harus lebih kecil dari gaya angkat.

[7] dalam bukunya menerangkan bahwa bentuk elbow pada draft tube merupakan bentuk geometri yang dapat mempengaruhi surging atau karakteristik aliran balik yang terjadi pada aliran. Surging tersebut dapat di minimalisir dengan mengetahui bentuk geometri elbow draft tube yang tepat dan resonansi diketahui dengan frekuensi alamiah fitur pembangkit lainnya dapat di lihat dengan hasil yang telah muncul. Resonansi tersebut dapat di cegah dengan memilih komponen dengan geometri design draft tube yang tepat.

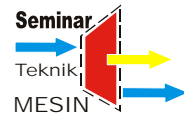
Pada penelitian yang di lakukan oleh [8] melakukan riset untuk mengetahui pengaruh nozzle dan draft tube terhadap efisiensi performa turbin, simulasi dijalankan dengan metode CFD. Dalam peneltian ini sudut diffuse darft tube serta tinggi divariasikan secara terpisah sehingga dari peneltiian ini diketahui bahwa bentuk draft tube mempengaruhi aliran sudu runner pada tingkat 1 dan tingkat 2 runner. Hasil dari simulasi diketahui daraft tube dengan sudut diffuse 5° dengan tinggi yang sama pada variasi lainnya memiliki hasil turbin performa yang paling tinggi begitu juga terhadap varian tinggi pada darft tubenya yang mana draft tube dengan tinggi 135,5 mm memiliki efisiensi perfroma yang lebih tinggi dibanding pada varian dengan ukuran 145,5 mm. Penelitian ini tidak memvariasikan bentuk draft tube jenis elbow, tetapi hanya memvariasikan sudut diffuse draft tube pada ketinggian yang sama serta tinggi draft tube secara terpisah.

Penelitian mengenai investigasi jenis draft tube dengan simulasi aliran menggunakan metode CFD di lakukan oleh [9] mencoba mensimulasikan 2 jenis draft tube berbeda yakni simple elbow draf tube (varian 1) dan mixed elbow draft tube (varian 2). pada varian 1 bentuk profil outlet draft tube berbentuk bulat sedangkan pada varian 2 berbentuk persegi. kedua nya di lakukan uji simulasi berdasarkan efisiensi turbin mengacu pada tekanan dan kecepatan aliran air sehingga di dapatkan hasil bahwa draft tube varian 2 dengan jenis mixed elbow draft tube memiliki efisiensi yang lebih baik jika dibandingkan dengan jenis simple elbow draft tube. Penelitian ini dilakukan dengan jenis bentuk elbow yang memiliki bentuk pada sisi masuk berupa lingkaran dan keluarannya berbentuk persegi. Penelitian ini meneliti simple elbow dengan tidak memvariasikan perubahan tinggi pada jenis simple elbow tersebut.

[10] melakukan penelitian eksperimental mengenai darft tube pada turbin crossflow, di dapat bahwa ukuran dan bentuk draft tube yang tepat dapat memberikan efek yang positif dalam peningkatan turbin performa pada setiap head turbin. pada pengujian saat kecepatan putar mencapai kecepatan tertentu penggunaan darft tube dengan ukuran 300 mm pada head 6 m memiliki keluaran daya output yg tertinggi dibandingkan dengan jenis draft tube lainnya pada head yang sama. Penelitian ini tidak memvariasikan bentuk draft tube jenis elbow tetapi hanya memvariasikan tinggi draft tube.

[11] meneliti tentang optimasi draft tube Menemukan bahwa hasil simulasi aliran secara numerik atau CFD memiliki validitas yang baik hal ini terbukti dengan perbandingan nett mass flow dan mass flow rate pada sisi inlet draft tube yakni $1,091 \times 10^{-6} \%$ hal ini masih sangat baik karena masih di bawah 1 %. Tetapi penelitian ini tidak menunjukan seberapa efisiensi yang bisa di dapatkan dikarenakan penelitian hanya fokus terhadap perbandingan tekanannya saja.

[12] melakukan penelitian mengenai pengaruh bentuk variasi draft tube pada turbin francise, penelitian ini dilakukan dengan metode CFD pada aplikasi ANSYS, variasi memiliki 3 bentuk yang berbeda dengan jenis draft tube berupa draft tube jenis elbow. Dilihat dari ilustrasi yang tertera pada jurnal bentuk variasi yakni saluran tunggal (1), dua percabangan (2) dan 3 percabangan (3) di bagian keluarannya. ketiga variasi tersebut di lihat berdasarkan vortex pada aliran dan di dapat pada draft tube jenis B dapat menghilangkan pengaruh vortex pada dinding draft tube. Penelitian ini meneliti tentang bentuk draft tube



jenis elbow dengan fokus pada penghilangan vortex tetapi tidak membahas mengenai gaya drag akibat bentuk draft tube.

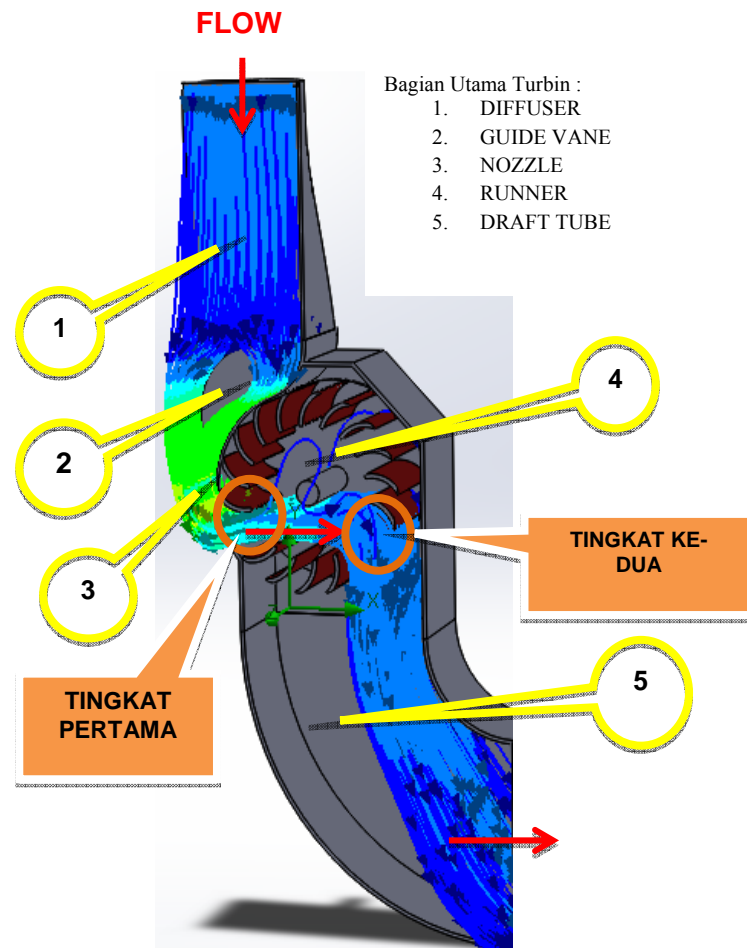
[13] melakukan penelitian mengenai draft tube dengan melihat efisiensi draft tube jenis conical draft tube dengan 3 variasi sudut diffuse yang berbeda dan 4 Ratio L/D yang berbeda. Di dapat dari hasil simulasi menggunakan CFD efisiensi draft tube tipe conical draft tube dengan varian L/D = 13 dan sudut diffuse 6 derajat mencapai efisiensi yang maksimum yakni sebesar 99.8% dan juga ditemukan bahwa varian dengan ratio L/D yang bernilai lebih dari 13 cenderung akan mengalami masalah kavitasi. Penelitian ini tidak membahas tentang bentuk draft tube berjenis elbow, Dalam penelitian ini metode pengambilan nilai efisiensi dilakukan dengan tidak langsung menghitung efisiensi performa turbin secara keseluruhan tetapi hanya menghitung efisiensi draft tube itu sendiri dengan membandingkan nilai kecepatan pada inlet dan outlet draft tube.

[14] melakukan percobaan simulasi draft tube pada aplikasi CFD dengan menambahkan Vortex Generator. Dari hasil penelitian yang dilakukan, mereka menemukan bahwa penambahan Vortex Generator memiliki dampak yang signifikan pada performa turbin. Peningkatan performa mencapai 4,3% dengan head dibawah 5 m sedang pada head yang lebih besar peningkatan efisiensi hanya mencapai 1.5%. Vortex Generator dengan sirip yang relatif kecil dapat mampu memperbaiki sifat aliran sedangkan Vortex Generator yang lebih besar malah justru akan mengakibatkan gangguan akibat vortex yang akan merusak. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan feature Vortex Generator tetapi tidak membahas performa turbin di tinjau dari gaya drag pada sudu ataupun kecepatan pada inlet dan outlet draft tube.

[15] melakukan percobaan bentuk draft tube yang terdiri dari 3 jenis berbeda yakni conical type, curved-elbow type dan Bell Mouth Type. Ketiga jenis tersebut mewakili bentuk yang berbeda-beda. Percobaan dilakukan melakukan pengujian aliran dengan menggunakan CFD. Selain itu dilakukan pengujian eksperimental. Dengan membandingkan hasil kedua metode analisa tersebut hasilnya adalah keduanya memiliki sedikit perbedaan diakibatkan adanya faktor error pada software yang digunakan dan masih dalam batas normal. Di samping itu hasil dari analisa draft tube tersebut menunjukkan hasil efisiensi yang cukup signifikan yakni conical draft tube dengan sudut diffuse 8° memiliki efisiensi sebesar 84,4%, sedang sudut diffuse 3° dengan parameter yang sama memiliki efisiensi lebih rendah, yaitu sebesar 77,4%. Pada penelitian disimpulkan bahwa sebaiknya conical draft tube disarankan pada sudut 7-8° lebih dari itu di khawatirkan akan mengakibatkan terjadinya back flow dan masalah-masalah kavitasi. Penelitian ini tidak berfokus pada bentuk draft tube jenis elbow, tetapi penelitian ini hanya membahas bentuk jenis-jenis draft tube secara umum sesuai dengan teori yang ada.

Berdasarkan hasil penelitian [15] maka akan dicoba diteliti gaya drag sudu runner turbin crossflow pada sudu tingkat 1 dan tingkat 2 akibat bentuk draft tube jenis elbow menggunakan software CFD SolidWorks Flow Simulation kemudian dihitung effisiensinya. Desain dibuat beberapa variasi ukuran dan bentuk draft tube dengan memvariasikan sudut elevasi, luas sisi keluaran dan tinggi draft tube jenis elbow berdasarkan patokan diameter runner. Sementara jarak inlet draft tube terhadap runner dibuat 0,7 D₁ (Diameter Runner).

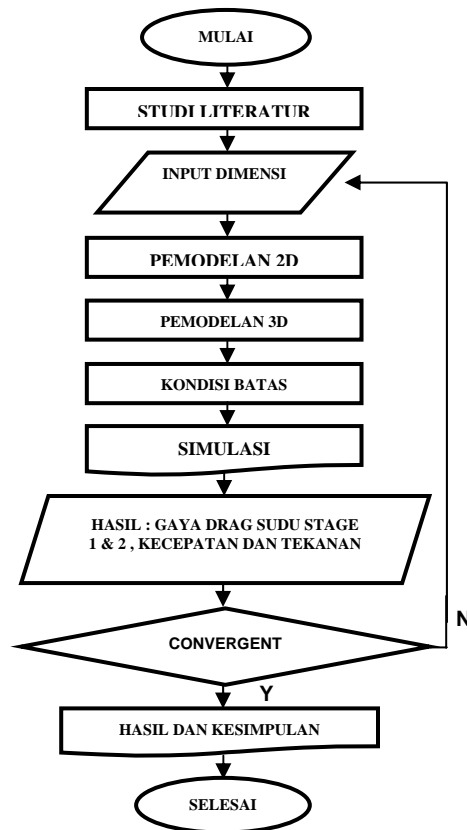
Bagian utama turbin banki dapat dilihat seperti pada Gambar 1 dibawah ini :



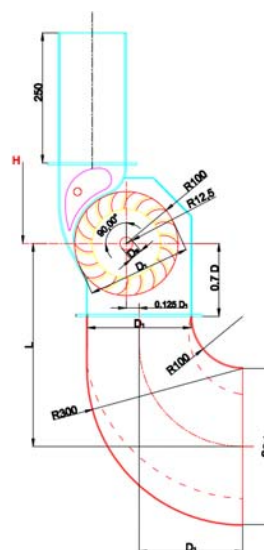
Gambar 1. Bagian Utama Turbin

2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Perancangan, Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta menggunakan software AutoCAD dan SolidWork Flow Simulation. Diagram alir dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

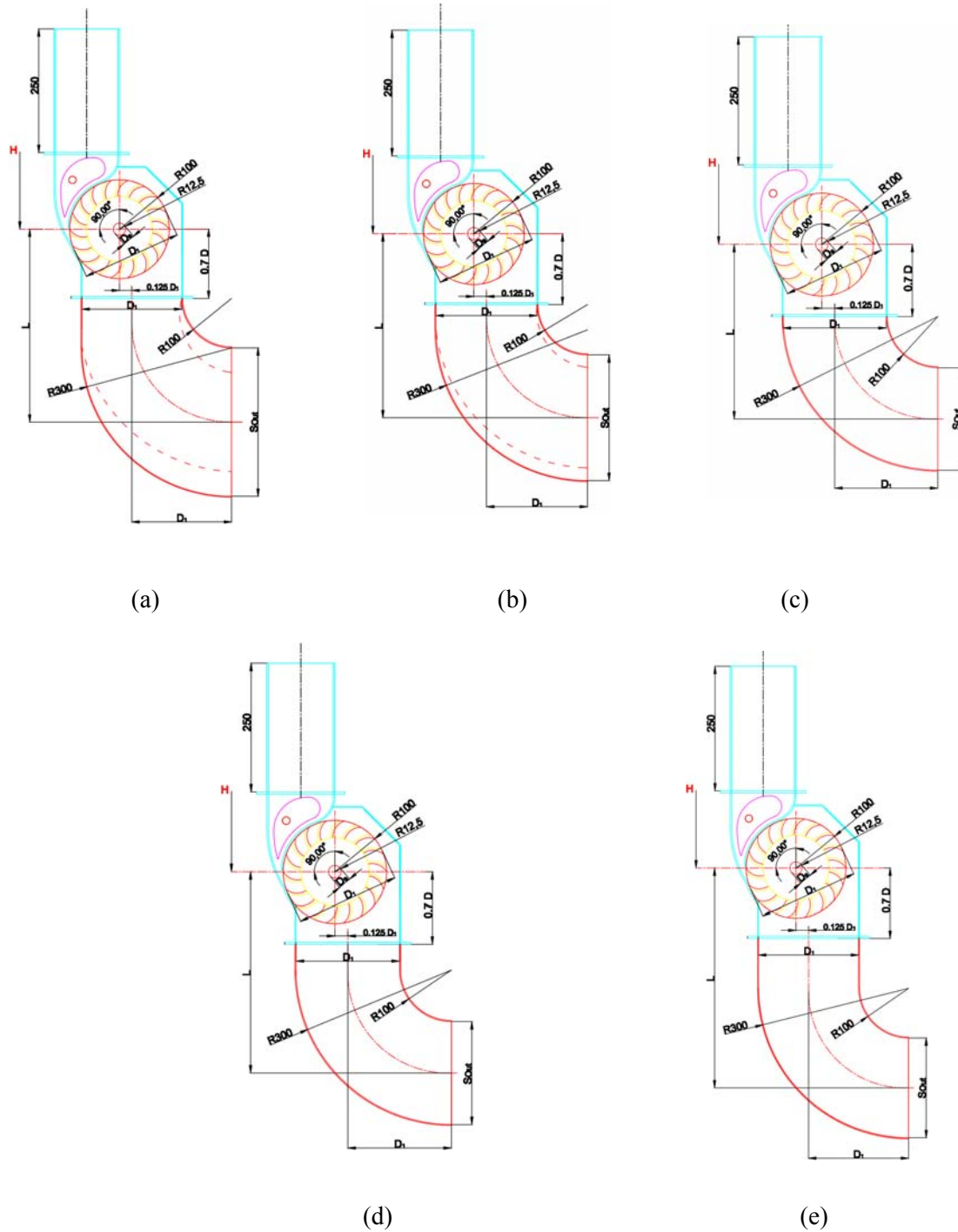


Gambar 2. Diagram Alir



Gambar 3. Dua Dimensi Turbin

Desain geometri 2D dibuat di Autocad, sedangkan 3D di Solidworks. Simulasi aliran dijalankan dalam simulasi aliran CFD Solidworks. Model Draft Tube dibuat dalam 5 varian dengan tinggi dan sudut diffuse yang berbeda seperti pada gambar 3 dan gambar 4. Di bawah ini :



Gambar 4. 2D Varian (a) DT-1, (b) DT-2, (c) DT-3, (d) DT-4, dan (e) DT-5.

Tabel 1. Ukuran Draft Tube

Varian Draft Tube	L/D ₁	L (mm)	Elevasi Outlet	S _{out} /D ₁	S _{out} (mm)
DT 1	1,95	390	Yes	1,5	300
DT 2	1,7	365	Yes	1,25	250
DT 3	1,45	340	No	1	200
DT 4	1,95	390	No	1	200
DT 5	2,2	440	No	1	200

Tabel 2. Parameter Desain dan Data Turbin

Parameter Desain	Data Kalkulasi	Dimensi Desain	Deskripsi
α_1	16°	16°	Sudut Masuk
β_1	30°	30°	Sudut Blade
D ₁	200 mm	200 mm	Diameter Luar Runner
n	18 pieces	18 pieces	Jumlah Sudu Runner
V ₁	10.18 m / s	10.18 m / s	Kecepatan Absolut Air
H	5,5 m	5,5 m	Head
N	468.84 rpm	470 rpm	Putaran Runner
Q	2 m ³ / min	2 m ³ / min	Debit Aliran
Ds	25 mm	25 mm	Diameter poros
S ₁	16 mm	16 mm	Tebal Tembakan Nozzle

Berdasarkan perhitungan kondisi batas pada software terdapat tiga persamaan differensial dasar dari pergerakan fluidanya. Perhitungan dasarnya adalah sebagai berikut :

Persamaan Kontinuitas :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

Persamaan Momentum :

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

Persamaan Energi

$$\frac{d\hat{h}}{dt} = p(\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

Yang mana Φ merupakan fungsi dissipasi kekentalan [6].

Tabel 3. Kondisi Batas Saat Simulasi

Item	Besaran
Tekanan Operasi	101325 Pa
Gravitasi	9,81 m/s ² (Sumbu Y-)
Unit System	SI
Tipe Analisis	Internal
Kavitasi	tidak
Reference Axis	Y
Fluida	Liquid = Water (H ₂ O)
Tipe Aliran	Turbulen dan Laminer
Roughness	0
Wall Thermal Condition	Adiabatic Wall
Temperatur	293,2 K
Turbulence Model	K- ϵ
Turbulence Intensity	2%
Turbulence Length	0.003 m
Turbulence Energy	1 J/Kg
Turbulence Dissipation	1 W/Kg
Rotation	Non Rotation, berhenti sesaat

Daya teotitis dihitung dengan rumus :

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (5)$$

P_{th} adalah daya teoritis (Watt), Q debit (m³/s), ρ massa jenis (kg/m³) dan H tinggi jatuh (m). Untuk memperoleh daya turbin (P_d) dalam riset ini menggunakan pendekatan gaya drag (F_d) yang dikalikan dengan kecepatan turbin (U_1). Nilai gaya drag diperoleh dari analisa CFD pada sudu runner tingkat satu dan tingkat dua. Gaya drag dan dayanya dihitung dengan rumus berikut:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (6)$$

$$P_d = F_d \cos \alpha_1 \cdot U_1 \quad (7)$$

$$U_1 = \frac{V_1 \cos \alpha_1}{2} \quad (8)$$

$$V_1 = C \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (9)$$

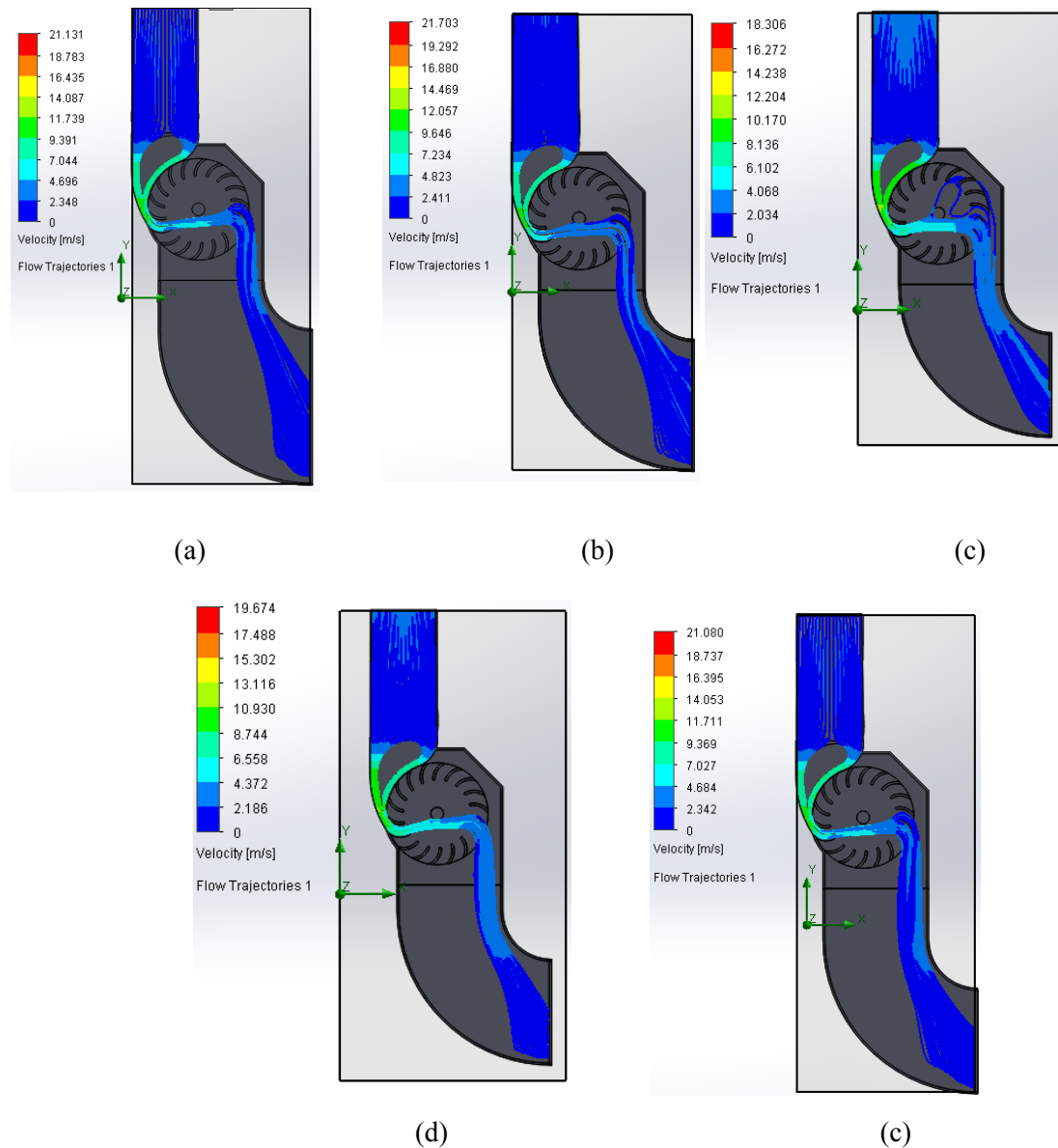
Pendekatan perhitungan dengan gaya drag pada permukaan sudu dilakukan karena perhitungan dengan segitiga kecepatan tidak dapat memprediksi gaya akibat dari bentuk sudu.

Efisiensi Turbin :

$$\eta = \frac{P_d}{P_{th}} \times 100 \% \quad (10)$$

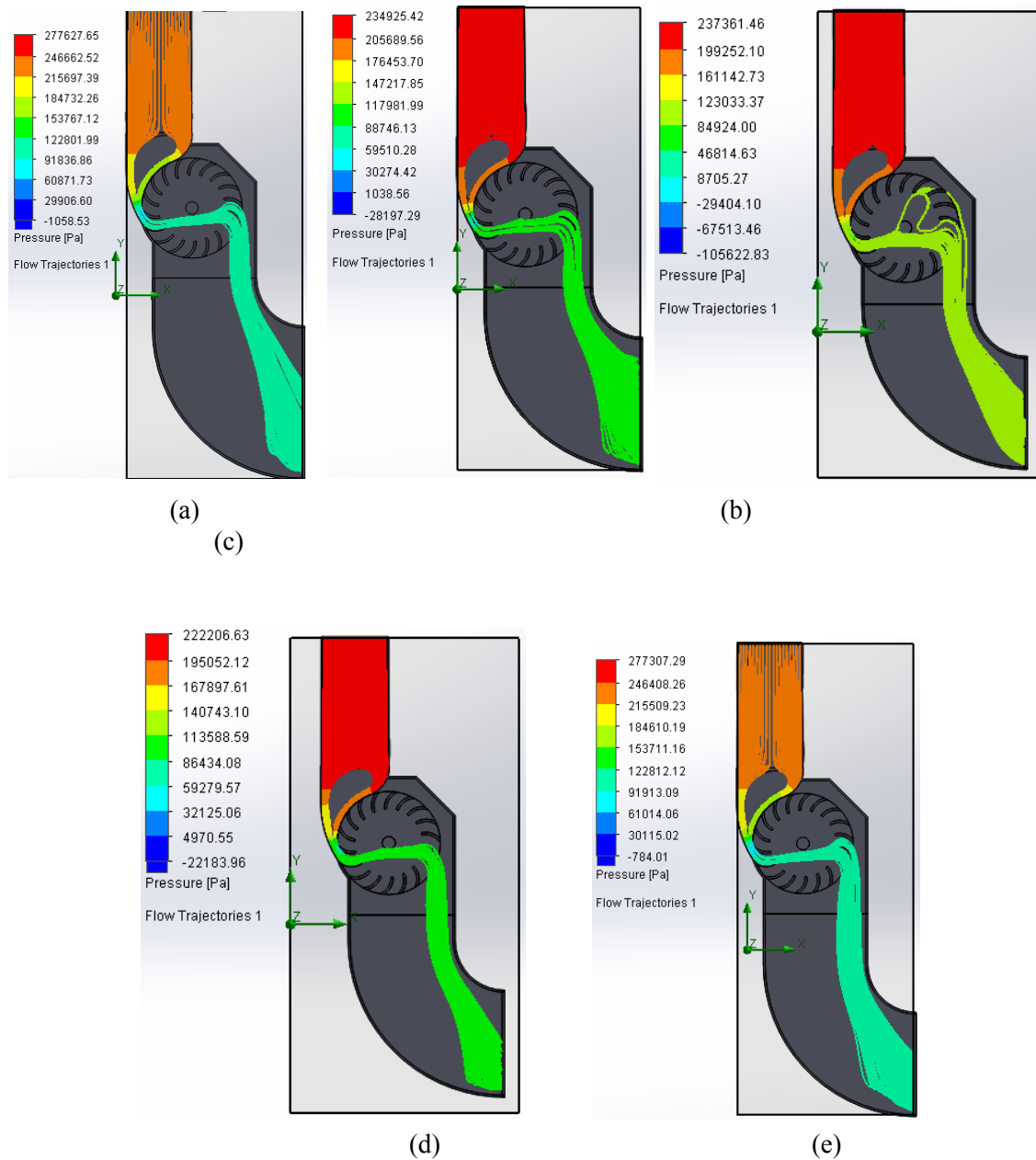
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Simulasi Kecepatan Aliran



Gambar 5. Kontur Kecepatan (a) Varian DT-1, (b) Varian DT-2, (c) Varian DT-3, (d) Varian DT-4, dan (e) Varian DT-5.

Hasil Simulasi Tekanan Aliran



Gambar 6. Kontur Tekanan (a) Varian DT-1, (b) Varian DT-2, (c) Varian DT-3, (d) Varian DT-4, dan (e) Varian DT-5.

Hasil Simulasi Drag Force

Tabel 4. Gaya Drag pada sudu tingkat pertama dan kedua.

Variasi Draft Tube	DT-1	DT-2	DT-3	DT-4	DT-5
Fd Sudu Tk 1 (N)	196,62	170,43	161,04	255,72	193,13
Fd Sudu Tk 2 (N)	73,14	61,95	39,88	43,92	66,56
Gaya Drag Total	269,76	232,39	200,93	299,65	259,69

Berikut merupakan hasil dari perhitungan berdasarkan persamaan (7) terhadap Drag Force menjadi Daya Drag pada sudu tingkat pertama dan kedua :

Tabel 5. Daya Drag pada sudu tingkat pertama dan kedua.

Variasi Bentuk Draft Tube	Pd (Watt)
DT-1	1288,13
DT-2	1109,68
DT-3	959,46
DT-4	1430,86
DT-5	1240,04

Efisiensi

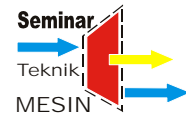
Berikut merupakan hasil dari perhitungan berdasarkan persamaan (10) Terhadap daya yang telah didapatkan dari drag force yang ada dalam tiap varian maka Efisiensi turbin dapat dilihat pada table 3, seperti dibawah ini :

Tabel 6. Efisiensi Turbin.

Variasi Draft Tube	Pth (Watt)	Efisiensi (%)
DT-1		71,6
DT-2		61,7
DT-3	1798,5	53,3
DT-4		79,5
DT-5		68,9

Pembahasan

Dari hasil simulasi pada aliran kecepatan dan tekanan Variasi DT-1 dengan ukuran tinggi $L/D_1 = 1,95$ dan pembesaran area pada outlet sebesar 300 mm didapat bahwa gaya drag dan nilai efisiensi beturut-turut ialah 1288,13 N dan 71,6%. Pada Variasi DT-2 dengan ukuran tinggi $L/D_2 = 1,7$ dan pembesaran area pada outlet sebesar 250 mm mm didapat bahwa gaya drag dan nilai efisiensi beturut-turut ialah 1109,68 N dan 61,7%. Pada Variasi DT-3 dengan ukuran tinggi $L/D_3 = 1,45$ dan tidak memiliki pembesaran pada outlet serta tidak memiliki penambahan panjang di bagian inlet didapat bahwa gaya drag dan nilai efisiensi beturut-turut ialah 959,46 N dan 53,3%. Variasi DT-4 dengan tinggi draft tube



sebesar 1,95 D_4 dari posisi nozzle hingga pusat saluran outlet memiliki pola aliran yang baik karena tidak menabrak poros. Dan tekanan aliran cenderung lebih tinggi dengan kontur dominan berwarna hijau terang pada variasi DT-4 dan DT-2. Hasil daya yang diperoleh berdasarkan gaya drag pada sudu tingkat pertama dan kedua di peroleh daya yang paling tinggi ialah pemasangan draft tube pada variasi DT-4 yakni daya mencapai 1430,86 watt dan memiliki efisiensi sebesar 79,5% dengan aliran seragam dan tidak menabrak poros. Pada Variasi DT-5 dengan ukuran tinggi $L/D_5 = 2,2$ dan tidak memiliki pembesaran pada outlet serta memiliki penambahan panjang di bagian inlet didapat bahwa gaya drag dan nilai efisiensi beturut-turut ialah 1240,04 N dan 68,9%.

4. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari simulasi di atas dapat disimpulkan sebagai berikut:

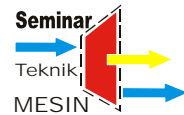
1. Pemasangan bentuk draft tube jenis elbow mempengaruhi lintasan aliran air dari tingkat pertama dan kedua dari sudu runner dan apakah masih menabrak poros atau tidak.
2. Perbedaan bentuk draft tube jenis elbow juga mempengaruhi kondisi tekanan dan kecepatan aliran pada air dari tingkat pertama dan kedua dari sudu runner dan apakah masih menabrak poros atau tidak.
3. Dari segi efisiensi Variasi DT-4 merupakan varian terbaik dengan dengan daya drag pada sudu tingkat 1 dan 2 sebesar dan efisiensi mencapai 79,5%, pada variasi ini aliran tidak menabrak poros dan tekanan aliran menunjukan yang paling tinggi yang dapat dilihat dengan warna hijau terang pada vektor tekanan saat simulasi. Serta kecepatan cenderung mengalami penurunan hal itu dapat dilihat dengan warna biru tua sesuai dengan yang terdapat pada vektor kecepatan saat simulasi.
4. Dilihat dari variasi DT-1, DT-2 dan DT-3. Menunjukan bahwa semakin besar sudut elevasi keluaran draft tube maka akan semakin besar efisiensi.

Saran

Perlu dilakukan penelitian dengan variasi yang lain agar didapat efisiensi yang lebih tinggi.

Daftar Pustaka:

- [1] Suwignyo, I. M. & A. M. (2018). *Desain dan Pembuatan Turbin Gas*. 90–96.
- [2] Menteri Energi Sumber Daya Mineral, Petunjuk Teknis Penggunaan Dana Alokasi Khusus Bidang Listrik Perdesaan Tahun Anggaran 2011. Kementrian ESDM RI. 2011
- [3] Bansal, R.K. (2005): A Text Book of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines : *S.I. Units*, New Delhi : *Laxmi Publication*
- [4] Marsan, K. (2007). Koefisien lift dan drag pada sudu runner turbin aliran silang dengan menggunakan british profil 9c7/32,5 c50. *SMARTek*, 5(3), 181–189.
- [5] White, M. F. (2017). Fluid Mechanics : Seventh Edition, New York : *The McGraw-Hill Companies, Inc.*
- [6] White, M. F. (2017). Fluid Mechanics : Second Edition, New York : *The McGraw-Hill Companies, Inc.*
- [7] Palde, U.J. (1972). Influence of Draft Tube Shape on Surging Characteristic. *ASCE National Engineering Meeting ; Atlanta, Georgia*.
- [8] Choi, Y.-D., & Son, S.-W. (2012). Shape Effect of Inlet Nozzle and Draft Tube on the



- Performance and Internal Flow of Cross-Flow Hydro Turbine. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 36(3), 351–357.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.3.351>
- [9] Chaman Pal, T Gulshan, Shashi, S., Ali Nisbat, & Mundhra Chandan. (2018). Experimental and CFD Analysis of Mixed Elbow Draft Tube and Comparative Analysis with Simple Elbow Draft Tube. *International Journal for Research in Engineering Application and Management*, 04(03), 15–21.
- [10] Reddy, H., Seshadri, V., & Kothari, D. P. (1996). Effect of draft tube size on the performance of a cross-flow turbine. *Energy Sources*, 18(2), 143–149.
<https://doi.org/10.1080/00908319608908755>
- [11] Subekti, R. A. (2012). Analisis Aliran Fluida Dinamik Pada Draft Tube Turbin Air. *Puslit Tenaga Listrik dan Mekatronik – LIPI*.
- [12] Jeon, J. H., Byeon, S. S., & Kim, Y. J. (2013). Effects of draft tube on the hydraulic performance of a Francis turbine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 52(TOPIC 5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/52/5/052034>
- [13] Patil, A., & Raghu, M. S. (2014). Optimum Design of Conical Draft Tube by Analysis of Flow Using CFD Simulation. *Ijltemas*, III(Vii), 99–103.
- [14] Tian, X., Pan, H., Hong, S., & Zheng, Y. (2015). Improvement of hydro-turbine draft tube efficiency using vortex generator. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(7), 1–8.
<https://doi.org/10.1177/1687814015595339>
- [15] Agarwal, T., Chaudhary, S., & Verma, S. (2017): *Numerical and Experimental Analysis of Draft Tubes for Francis Turbine*, Indian Journal of Science and Technology, Vol 10(23), DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i23/115566