

OPTIMALISASI KAPASITAS DAYA MELALUI UPRATING RUNNER TURBIN PADA PLTA PLENGAN

Fadli Kurnia¹, Dhany Harmeidy Barus²

^{1,2}Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia

¹fadli2310580@itpln.ac.id

²dhany@itpln.ac.id

Abstract— The Plengan Hydroelectric Power Plant is located in Pulosari Village, Pangalengan District, Bandung Regency, West Java. There are 5 hydro power plants still operating under the Plengan Hydroelectric Power Plant. The current problem lies in unit 5, which is a relocation unit from the Susukan Hydroelectric Power Plant with an installed capacity of 1600 kW. The performance of this unit has decreased so that it is only able to produce 1000 kW of power. This is suspected to be due to the specifications of the installed turbine not being in accordance with the actual conditions in the new location, especially in the head and water discharge parameters. This study aims to improve the efficiency of the power plant through the reverse engineering process and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation to uprate the turbine runner. The results of the design and simulation show that the efficiency has increased from 62% to 90% so that the output power can be increased to 1600 kW with an operating discharge parameter of 2.07 m³/s. From a financial perspective, it increases annual revenue from 3.15 billion to 4.7 billion with cheaper production costs than third parties. This study shows that optimizing turbine design based on actual data can significantly improve the efficiency and performance of the power plant unit.

Keywords— Plengan Hydroelectric Power Plant, Reverse Engineering, Turbine Runner Uprating, CFD Simulation, Efficiency

Intisari—PLTA Plengan terletak didesa Pulosari, Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Terdapat 5 unit pembangkit hidro yang masih beroperasi dibawah PLTA Plengan. Masalah yang terjadi saat ini terletak pada unit 5 yang merupakan unit relokasi dari PLTA Susukan dengan daya terpasang 1600 kW. Kinerja dari unit ini mengalami penurunan sehingga hanya mampu menghasilkan daya sebesar 1000 kW. Hal ini disinyalir akibat dari spesifikasi dari turbin yang terpasang tidak sesuai dengan kondisi aktual ditempat yang baru khususnya pada parameter head dan debit air. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit melalui proses *reverse engineering* dan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk melakukan *uprating runner* turbin. Hasil dari desain dan simulasi menunjukkan efisiensi meningkat dari 62% menjadi 90% sehingga daya *output* dapat ditingkatkan menjadi 1600 kW dengan parameter debit operasi 2,07 m³/s. Dari sisi finansial menaikkan *revenue* tahunan dari 3,15 miliar menjadi 4,7 miliar dengan ongkos produksi lebih murah dibanding pihak ketiga. Penelitian ini menunjukkan bahwa optimalisasi desain turbin berbasis data aktual dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja unit pembangkit secara signifikan

Kata Kunci— PLTA Plengan, Reverse Engineering, Uprating Runner Turbin, Simulasi CFD, Efisiensi

I. PENDAHULUAN

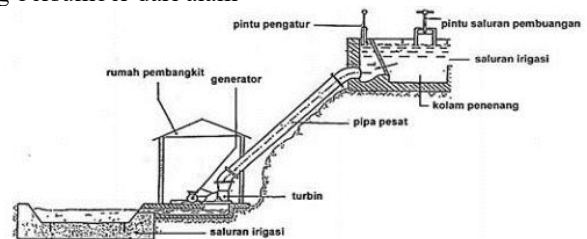
Pembangkit energi baru terbarukan (EBT) merupakan pembangkit dengan biaya pokok produksi yang relatif rendah karena pembangkit ini memanfaatkan energi secara cuma – cuma menjadi energi listrik, Salah satu energi terbarukan yang tersedia sangat melimpah terutama di Indonesia adalah energi potensial air yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik atau yang biasa dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). PLTA adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial dan *kinetic* air sebagai penggerak turbin, yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Salah satu PLTA yang ada di Indonesia yang nantinya akan menjadi objek dari penelitian ini yaitu PLTA Plengan.

PLTA Plengan merupakan Pusat Listrik Tenaga Air yang terletak di Jl. Raya Pangalengan, Pulosari, Kec. Pangalengan, Kabupaten Bandung Jawa Barat. Jenis turbin yang digunakan adalah *francis turbin* dengan daya terpasang 1600 Kw. Unit ini merupakan unit relokasi dari PLTA Susukan. Terdapat 5 unit pembangkit yang masih beroperasi dibawah PLTA Plengan UP Saguling, PT Indonesia Power, dengan total daya output ± 6,7 MW.

II. LANDASAN TEORI

Air dapat dimanfaatkan dalam berbagai hal, salah satunya untuk pembangkit tenaga. Contohnya kincir air. Teknologi kincir air ini telah dikenal di Inggris sekitar 900 tahun yang lalu. Perkembangannya semakin pesat memasuki abad XIX, dimana pada waktu itu jumlah kincir air yang beroperasi di Inggris mencapai 20.000 unit. Di kawasan Eropa, Asia dan sebagian Afrika, kincir air digunakan untuk menggerakkan mesin.

Selanjutnya, teknologi kincir air berkembang menjadi turbin air. Turbin bertenaga air ini telah memiliki kemampuan untuk berputar dalam kecepatan yang sangat tinggi. Dari sini munculah tenaga air (*hydro power*), yang memiliki kelebihan ramah lingkungan dan terbarukan yang bersumber dari alam



Gambar 1. Siklus PLTA

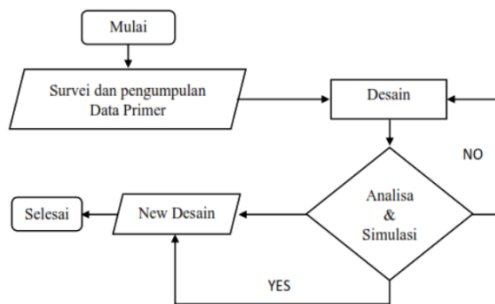
Turbin air bekerja berdasarkan prinsip konversi energi potensial menjadi energi *kinetic* yang akhirnya akan menjadi energi mekanik putar pada poros. Proses ini terjadi karena interaksi air yang mengalir terhadap komponen turbin khususnya *runner*. Efisiensi dari proses ini sangat bergantung pada bentuk orientasi sudu, serta kesesuaian desain terhadap ketersediaan sumber energi setempat seperti *head* dan debit. [3]

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan *applied research* (terapan), karena berfokus pada penerapan teori dan teknologi untuk penyelesaian masalah nyata dilapangan, yaitu penurunan efisiensi turbin air pada PLTA Plengan unit 5 yang menyebabkan kinerja dari pembangkit tidak optimal. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif, karena seluruh proses analisa dan evaluasi dilakukan berdasarkan pada data numerik, baik dari pengukuran lapangan (*head*, debit), hasil simulasi (tekanan, kecepatan, efisiensi), maupun perhitungan teknis lainnya. Kemudian data-data tersebut diolah dan dibandingkan secara objektif untuk mengambil kesimpulan ilmiah. [17]

Metode yang digunakan dalam penelitian ini berbasis *reverse engineering* untuk mendapatkan geometri awal *runner* turbin. Tahapan *reverse engineering* yang dilakukan yaitu :

1. Pengumpulan data primer (pengukuran *head* dan debit)
2. *Reverse engineering* desain lama menggunakan *3D scanner*
3. Simulasi CFD pada *runner* eksisting dan *runner* hasil redesain
4. Analisis yang meliputi distribusi tekanan, kecepatan fluida, dan efisiensi
5. Interpretasi dari hasil analisa dan simulasi serta rekomendasi desain *final*



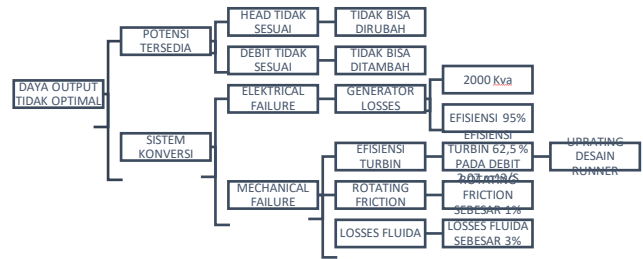
Gambar 2. Diagram Alur Proses Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Penyebab Masalah

Output daya dari *generator* dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain efisiensi turbin, efisiensi *generator*, gaya gesek komponen *rotating*, dan *losses* yang terjadi pada fluida. Dari beberapa potensi penyebab diatas, diketahui *point* terbesar dari permasalahannya terletak pada efisiensi dari kinerja turbin. Hal ini disebabkan karena unit 5 ini adalah sebuah unit PLTA relokasi dari PLTA Susukan yang mana desain debit dari *runner* turbin eksisting unit ini tidak sesuai dengan debit yang tersedia di PLTA Plengan.

maka dari itu dilakukanlah perhitungan ulang potensi yang tersedia di PLTA Plengan untuk menjadi acuan utama saat redesain *runner* turbin.



Gambar 3. Analisa Penyebab Masalah

1. Data Runner Eksisting



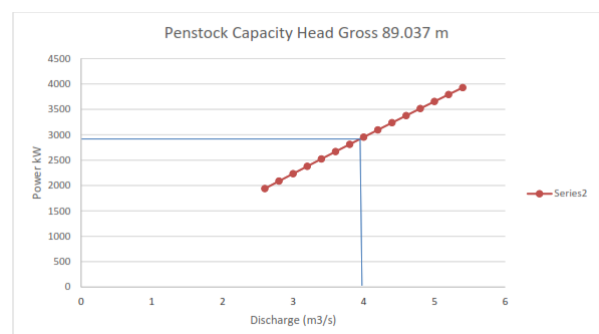
Gambar 4. Turbin PLTA Plengan Unit 5

Tabel I
Data Turbin PLTA Plengan Unit 5

Uraian	Spesifikasi
Jenis Turbin	Francis
<i>Head</i>	90 m
Posisi Poros	Horizontal
RPM Operasi	600 rpm
Kapasitas Penstock	2 ; 3,9 m ³
Daya <i>Output</i>	1610 kW
Debit	± 2 m ³ /s

2. Kapasitas Penstock

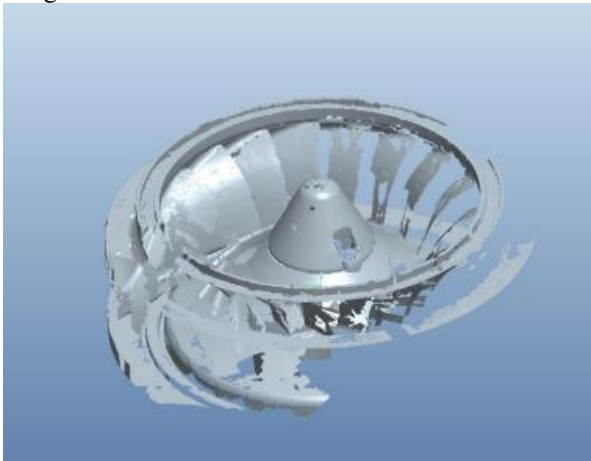
Penstock PLTA Plengan unit 4 & 5 mempunyai diameter 1300 mm, dengan panjang *penstock* 195 m. Pada grafik dibawah menunjukkan kapasitas daya yang bisa dibangkitkan oleh turbin PLTA Plengan pada berbagai rentang debit yang melewati *penstock*..



Gambar 5. Simulasi Kapasitas *Penstock*

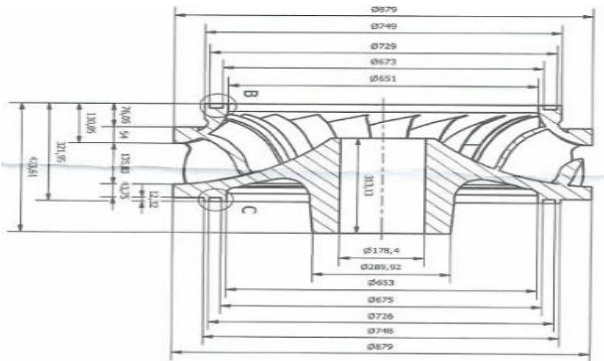
B. Permodelan Runner Eksisting

Untuk mendapatkan data geometri *runner* eksisting dilakukan pengukuran menggunakan *3D Scanner*. Hasil pengukuran *3D scanner* berupa *point cloud*, seperti terlihat pada gambar berikut :



Gambar 6. Hasil Pemindaian *3D Runner* Eksisting

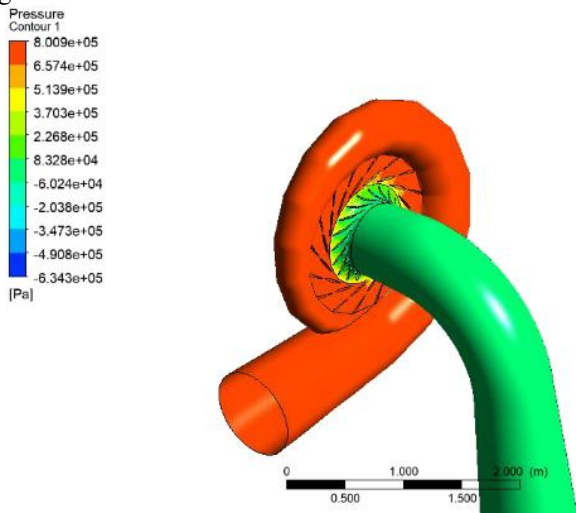
Berdasarkan hasil pemindaian *3D scanner*, dilakukan rekonstruksi model 3D dari *runner* eksisting. Proses rekonstruksi dilakukan dengan metode gabungan antara *solid modelling* dan *surface modelling*, hingga diperoleh model *3D runner* PLTA Plengan unit 5.



Gambar 7. Drawing *Runner* Eksisting

C. Simulasi CFD *Runner* Eksisting

Hasil simulasi pada *runner* eksisting dapat dilihat pada gambar berikut :



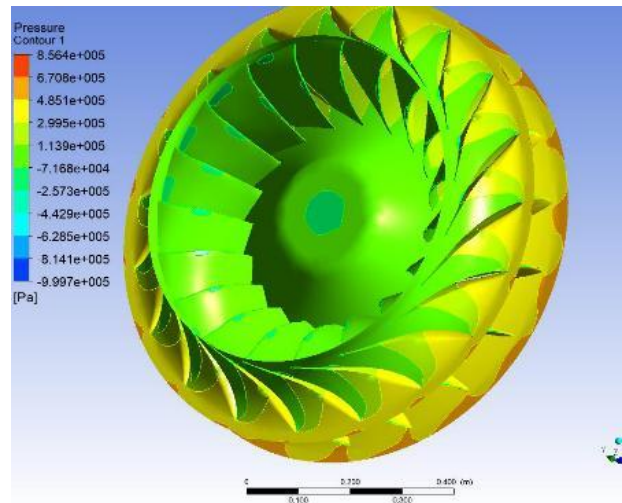
Gambar 8. *Pressure Contour* Turbin Eksisting

Simulasi dilakukan dengan kondisi batas *inlet* spiral casing 8,5 Bar dan tekanan outlet 2.943 Pa dengan asumsi *draft tube* terendam 30 cm, diperoleh pada bukaan 20° turbin mampu mengalirkan debit air sebesar 2,887 m³/s dan mampu menghasilkan daya poros 2.142 kW dengan efisiensi turbin sebesar 89,0794%. Rincian parameter turbin dapat dilihat pada table berikut :

Tabel II
Parameter Turbin Eksisting

<i>Discharge</i>	2,88719	m ³ /s		
<i>Inlet</i>	850.014	Pa	86,64771	m
<i>In Runner</i>	816.728	Pa	83,25464	m
<i>Out Runner</i>	21.693,7	Pa	2,211386	m
<i>Out Draft Tube</i>	16.868,4	Pa	1,719511	m
H Sistem	833.145,6	Pa	84,9282	m
<i>H Runner</i>	795.034,3	Pa	81,04325	m
<i>t Runner</i>	34.103,1	Nm		
<i>Rotational Speed</i>	63	Rad/s	600	rpm
<i>Power</i>	2.142,761	kW		
<i>Eff Runner</i>	93,3496	%		
<i>Eff System</i>	89,0794	%		

Hasil simulasi *runner* eksisting menunjukkan terindikasi akan mengalami kavitasi ketika beroperasi pada bukaan penuh. Hal ini terlihat pada nilai kevakuman pada *suction side trailing edge blade runner*, seperti terlihat pada gambar :



Gambar 9. Area Yang Berpotensi Kavitasi

Simulasi *runner* eksisting menunjukkan bahwa *runner* PLTA Plengan yang saat ini terpasang adalah *runner* yang mempunyai kapasitas yang besar, terbatasnya debit air pada hulu sungai menyebabkan *runner* selalu bekerja dibawah debit desain optimalnya.[26] Sehingga perlu didesain *runner* baru dengan kapasitas yang sesuai dengan debit yang tersedia sehingga mampu beroperasi secara optimal.

D. Desain *Runner* Baru

Selanjutnya, *runner* pengganti PLTA Plengan didesain dengan parameter sebagai berikut :

- H_{nett} = 85 m
- Debit desain = 2,15 m³/s
- Rpm turbin = 600 rpm
- Gravitasi = 9,81 m/s²

$$U_1 = \frac{0,4 \times 62.832}{40,85} = 0,615 \tag{4}$$

Selanjutnya :

$$z = \frac{10 \text{ to } 12}{U_i} \tag{5}$$

$$U_1 = \frac{R_1 \times \omega}{\sqrt{2 \times g \times H}} \tag{1}$$

Dimana :

- U_1 = Kecepatan keliling sudu pada radius R_1 (m/s)
- R_1 = Radius sudu pada sisi masuk (m)
- ω = Kecepatan sudut (rad/s)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- H = Head

Dimana :

z = Jumlah sudu
 10 – 12 adalah konstanta empiris (tergantung desain turbin)

Maka :

a. $z = \frac{10}{0,615} = 16,26$ (6)

b. $z = \frac{12}{0,615} = 19,51$ (7)

- Maka :
- a. R_1 = Berkisar antara 0,3 – 0,5 meter untuk aplikasi turbin skala sedang.
 - b. $\omega = \frac{n \times 2\pi}{60} = \frac{600 \times 2\pi}{60} = 62.832 \text{ rad/s}$ (2)
 - c. $\sqrt{2 \times g \times H} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 85} = 40,85$ (3)

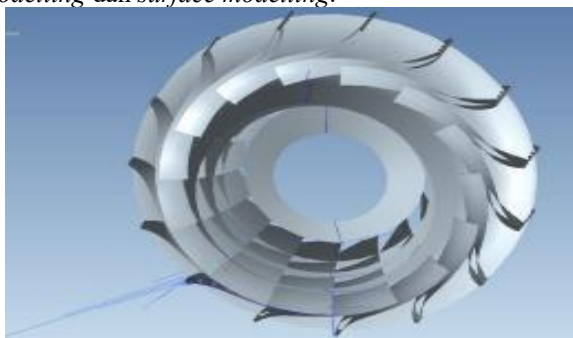
Berdasarkan perhitungan diatas, maka didapatkan estimasi jumlah sudu ideal untuk *runner* adalah antara 16 – 19 sudu.

Selanjutnya, dengan mempertahankan dimensi utama *runner* eksisting, didapatkan parameter desain *blade runner* baru, seperti terlihat pada table :

Tabel III
Parameter *Blade*

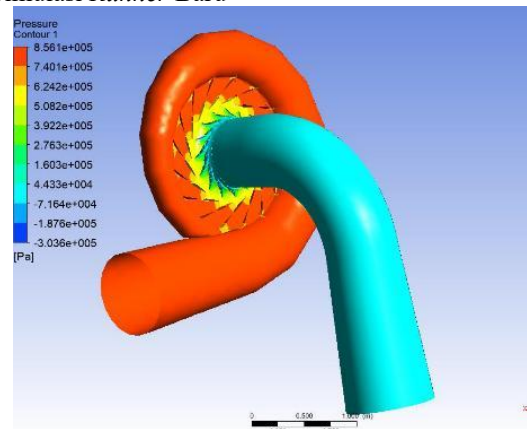
Parameter	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5
Cm1	5,69143 m/s	5,70745 m/s	5,74609 m/s	5,77907 m/s	5,96704 m/s
Cm2	5,34671 m/s	6,46509 m/s	6,96122 m/s	7,17581 m/s	7,18774 m/s
R1	0,4275 m/s	0,4275 m/s	0,4275 m/s	0,4275 m/s	0,4275 m/s
R2	0.19499 m/s	0,22511 m/s	0,25648 m/s	0,29011 m/s	0,32769 m/s
U1	26,85052 m/s	26,86062 m/s	26,86062 m/s	26,86062 m/s	26,86062 m/s
U2	12,25138 m/s	14,14408 m/s	16,11511 m/s	18,22815 m/s	20,58937 m/s
Sudut Serang $\alpha 1$	11,95332 deg	11,99602 deg	12,07486 deg	12,14211 deg	12,52477 deg
C1u=U1	25,12705 m/s	25,12705 m/s	25,12705 m/s	25,12705 m/s	25,12705 m/s
C1	25,68491 m/s	2568802 m/s	25,69556 m/s	25,70203 m/s	25,73959 m/s
W1	5,599231 m/s	5,613483 m/s	5,647873 m/s	5,677244 m/s	5,84493 m/s
Cos $\beta 1$	0,309609	0,308822	0,306942	0,305354	0,296594
$\beta 1$	71,95436 deg	72,01172 deg	72,12496 deg	72,22053 deg	72,74587 deg
Out let C2=Cm2	5,34671 m/s	6,46509 m/s	6,96122 m/s	7,17581 m/s	7,18774 m/s
$\beta 2$	23,57692 deg	24,56458 deg	23,36282 deg	21,48789 deg	19,24407 deg
Cos $\beta 2$	0,916524 m/s	0,909493	0,918012	0,930495	0,944123
W2	13,36745 m/s	15,5516 m/s	17,55436 m/s	19,58973 m/s	21,80793 m/s
C2	5,34671 m/s	6,46509 m/s	6,96122 m/s	7,17581 m/s	7,18774 m/s

Proses *modelling blade runner* baru berpatokan pada parameter desain *blade* pada table diatas. Proses *modelling* dilakukan dengan metode kombinasi antara *solid modelling* dan *surface modelling*.



Gambar 10. 3D Modelling Runner Baru

E. Simulasi Runner Baru



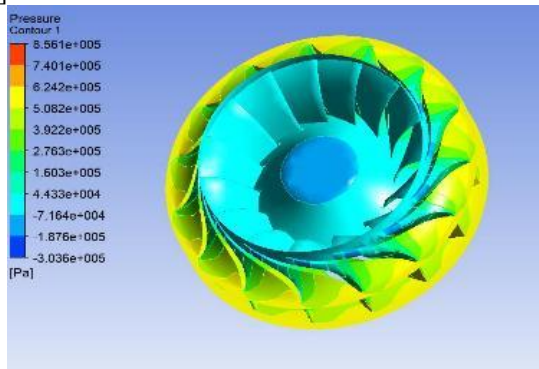
Gambar 11. Pressure Contour Turbin dengan Runner Baru

Proses simulasi dilakukan dengan parameter yang sama dengan *runner* eksisting. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada bukaan *guide vane* maksimal, turbin mampu mengalirkan debit sebesar 2,59 m³/s dengan *output* daya poros 1900 kW dan efisiensi turbin 87,89%.

Tabel IV
Parameter *Blade*

Discharge	2,58945	m ³ /s		
Inlet	850.012	Pa	86,6475	m
In Runner	822.506	Pa	83,84363	m
Out Runner	39.402,7	Pa	4,016585	m
Out Draft Tube	14.913,3	Pa	1,520214	m
H Sistem	835.098,7	Pa	85,12729	m
H Runner	783.103,3	Pa	79,82704	m
t Runner	30.239,9	Nm		
Rotational Speed	63	Rad/s	600	rpm
Power	1900,029	kW		
Eff Runner	93,6987	%		
Eff Sistem	87,8648	%		

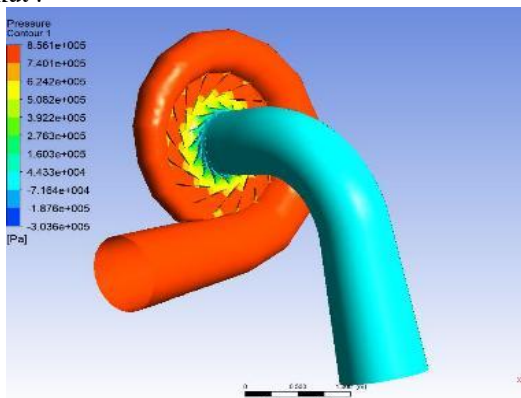
Hasil simulasi menunjukkan bahwa *runner* tidak terindikasi akan mengalami kavitasi, terlihat tingkat kevakuman pada *runner* yang masih dalam rentang aman. [29]



Gambar 12. *Pressure Contour* Runner Baru

F. Simulasi Pada Debit Operasi 2,07 m³/s

Keterbatasan debit pada PLTA Plengan akan menyebabkan *runner* hanya dapat bekerja pada debit 2,07 m³/s. Untuk mengetahui performa dari *runner* baru pada debit ini, dilakukan simulasi CFD dengan parameter operasi tersebut. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 13. *Pressure Contour* Turbin Pada Debit 2,07 m³/s

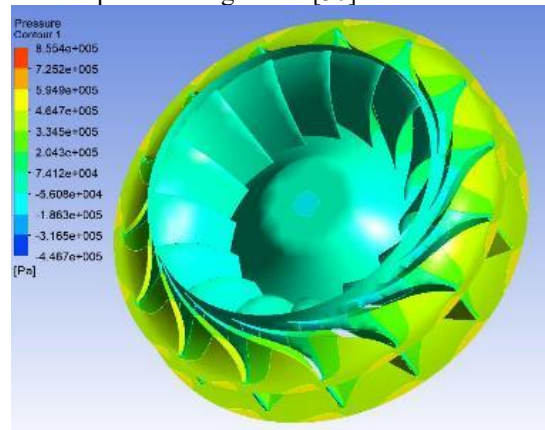
Hasil simulasi menunjukkan pada debit operasi turbin sebesar 2,07 m³/s, turbin mampu menghasilkan daya poros sebesar 1578 kW dengan efisiensi turbin sebesar 90,27%.

Parameter turbin dapat dilihat pada table berikut :

Tabel V
Parameter Turbin pada Debit 2,07 m³/s

<i>Discharge</i>	2,07	m ³ /s		
<i>Inlet</i>	849.954	Pa	86,64159	m
<i>In Runner</i>	810.256	Pa	82,5949	m
<i>Out Runner</i>	15.997,2	Pa	1,630703	m
<i>Out Draft Tube</i>	7.191,04	Pa	0,733032	m
<i>H System</i>	842.763	Pa	85,90856	m
<i>H Runner</i>	794.258,8	Pa	80,9642	m
<i>t Runner</i>	25.123,3	Nm		
<i>Rotational Speed</i>	63	Rad/s	600	rpm
<i>Power</i>	1.578,543	kW		
<i>Eff Runner</i>	95,7896	%		
<i>Eff System</i>	90,2765	%		

Ketika turbin beroperasi pada debit 2,07 m³/s, *runner* tidak terindikasi mengalami kavitasi, hal ini terlihat pada kontur tekanan pada *runner* mempunyai tingkat kevakuman pada rentang aman. [30]



Gambar 14. *Pressure Contour* Runner Pada Debit 2,07 m³/s

G. Perbandingan Desain Baru dan Eksisting

Desain *runner* eksisting mempunyai bentuk sudu yang sederhana dengan *trailing edge* yang tajam, serta sudut keluar fluida yang tidak sejajar dengan arah aliran. Hal ini menyebabkan terjadinya aliran turbulen dan potensi kavitasi yang cukup signifikan terutama pada bagian *trailing edge* sudu. Permukaan sudu hasil pengecoran yang cenderung kasar, yang juga mempengaruhi performa aliran.

Sebaliknya, desain *runner* baru menggunakan pendekatan perhitungan berdasarkan data *actual head* dan debit eksisting. Pada redesain awal, jumlah sudu dikurangi

menjadi 15 buah dengan tetap mempertahankan dimensi utama dari *runner* eksisting, namun hasil simulasi menunjukkan *output* daya yang dihasilkan belum tercapat. Selanjutnya, dilakukan redesign dengan jumlah sudu dioptimalkan yang awalnya berjumlah 17 buah menjadi 19 buah dengan bentuk sudu yang lebih ramping dan *trailing edge* yang lebih membulat. Sudut keluar fluida disesuaikan agar *parallel* dengan arah aliran sehingga mampu mengurangi kerugian energi potensial yang ada serta dapat meningkatkan efisiensi dari kinerja turbin dan mengoptimalkan kapasitas daya output yang dihasilkan PLTA Plengan unit 5. [31]

Berdasarkan hasil pengukuran juga didapat kan besaran berat untuk *runner* eksisting adalah 517 kg, sementara berat runner hasil redesign adalah 525 kg dengan material SS 304.

Perbandingan hasil *redesign runner* baru dengan *runner* eksisting dapat dilihat pada table berikut :

Tabel V
Perbandingan Desain

Parameter	Runner Eksisting	Runner Baru
Jumlah sudu	17 sudu	19 sudu
Berat <i>Runner</i>	517 kg	525 kg
Bentuk sudu	Sudu lurus, <i>trailing edge</i> tajam (sudut belakang)	Sudu melengkung, <i>trailing edge</i> membulat
Sudut keluar fluida	Tidak paralel dengan arah aliran	Disesuaikan dengan sudut tangensial
Geometri <i>trailing edge</i>	Siku dan tajam	Ramping & membulat
Permukaan sudu	Hasil cor lama, kasar	Halus, hasil CAD & simulasi

Runner eksisting menghasilkan daya sebesar 1000 kW pada debit *actual* 2,07 m³/s, dengan efisiensi 62,5%. Pada simulasi CFD, *runner* eksisting disimulasikan dengan debit maksimal sebesar 2,887 m³/s. Didapatkan efisiensi dari turbin sebesar 89,08%. Namun, hasil simulasi menunjukkan potensi terjadinya kavitasi pada *trailing edge* akibat kevakuman yang berlebih pada *runner*.

Sementara pada *runner* baru, ketika diuji pada debit *actual* sebesar 2,07 m³/s, mampu menghasilkan daya sebesar 1578 kW dengan efisiensi turbin sebesar 90,27 %. Tidak ditemukan adanya potensi kavitasi pada kontur tekanan *runner* baru. Hal ini menunjukkan perbaikan yang signifikan dalam aspek desain. Perbaikan ini tidak hanya berdampak terhadap peningkatan efisiensi dari kinerja turbin dan optimalisasi kapasitas daya, namun juga menurunkan potensi terjadinya kerusakan akibat kavitasi dan memperpanjang umur operasional turbin. [32]

H. Kesesuaian Desain Dan Dampak Teknis

Runner eksisting didesain untuk debit yang lebih besar (± 3 m³/s), sementara debit *actual* hanya sebesar $\pm 2,07$ m³/s. Hal ini menyebabkan *runner* selalu bekerja diluar

titik operasi optimal. Hal ini juga dapat menyebabkan terjadinya kavitasi pada aliran fluida yang masuk ke area turbin yang akan menyebabkan kerusakan akibat erosi dan getaran pada runner.

Desain *runner* baru dirancang sesuai dengan parameter *actual* yang tersedia di PLTA Plengan, sehingga menghasilkan desain yang lebih efisien, adaptif, dan lebih meminimalisir loss karena terjadinya kavitasi. Hal ini akan berdampak pada peningkatan performa dari turbin sehingga kapasitas daya output PLTA Plengan unit 5 akan lebih optimal sesuai dengan potensi yang tersedia.

I. Nilai *Capacity Factor*

Nilai dari *Capacity Factor* didapatkan dengan menganalisa data operasi pada PLTA Plengan unit 5. Berdasarkan hasil perhitungan terhadap *sample* data operasi unit 5, didapatkan lah rata-rata nilai dari *Capacity Factor* adalah sebesar 60%.

BULAN : DESEMBER			
TGL	UNIT		
	5		
	STAND AKHIR	HASIL kWh	BEBAN (kW)
STAND AWAL	60059,27		
1	60069,37	24644	1100
2	60078,97	23424	1000
3	60089,77	26352	1100
4	60100,57	26352	1100
5	60111,37	26352	1100
6	60122,36	26816	1200
7	60122,36	0	0
8	60122,36	0	0
9	60122,36	0	0
10	60122,36	0	0
11	60122,36	0	0
12	60122,36	0	0
13	60122,36	0	0
14	60125,30	7174	1200
15	60137,06	28694	1200
16	60148,82	28694	1200
17	60160,58	28694	1200
18	60172,34	28694	1200
19	60184,10	28694	1200
20	60195,86	28694	1200
21	60207,62	28694	1200
22	60218,42	26352	1100
23	60229,22	26352	1100
24	60240,02	26352	1100
25	60250,82	26352	1100
26	60257,05	15201	1100
27	60257,05	0	0
28	60257,05	0	0
29	60257,05	0	0
30	60257,05	0	0
31	60257,05	0	0
JML		482583,20	21700,00

Gambar 15. Data Operasi Desember

BULAN : JANUARI			
TGL	HAL : 11		
	UNIT		
	5		
STAND AWAL	STAND AKHIR	HASIL kWh	BEBAN (kW)
	60257,05	0	0
1	60257,05	0	0
2	60257,05	0	0
3	60257,05	0	0
4	60257,05	0	0
5	60257,05	0	0
6	60257,05	0	0
7	60257,05	0	0
8	60257,05	0	0
9	60257,05	0	0
10	60257,05	0	0
11	60257,05	0	0
12	60257,05	0	0
13	60261,81	11614	1100
14	60272,61	26352	1100
15	60283,41	26352	1100
16	60294,21	26352	1100
17	60305,01	26352	1100
18	60315,81	26352	1100
19	60327,57	28694	1200
20	60339,33	28694	1200
21	60351,09	28694	1200
22	60362,85	28694	1200
23	60374,61	28694	1200
24	60386,37	28694	1200
25	60398,13	28694	1200
26	60409,89	28694	1200
27	60421,65	28694	1200
28	60433,41	28694	1200
29	60445,89	30451	1300
30	60458,61	31037	1300
31	60471,33	31037	1300
JML		522843,20	22500,00

Gambar 16. Data Operasi Januari

V. KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian data analisis, simulasi numerik, dan evaluasi teknis terhadap system turbin PLTA Plengan unit 5, maka didapatkan beberapa kesimpulan :

1. *Up-rating* desain runner turbin dengan metode *Reverse Engineering* dan simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)*, berdasarkan hasil analisa dan simulasi berhasil meningkatkan efisiensi turbin yang awalnya hanya sebesar 62,5% menjadi 90,27% pada parameter *head* dan debit *actual* yang tersedia di PLTA Plengan.
2. Penerapan metode *Reverse Engineering* dan simulasi CFD dalam penelitian ini juga berhasil meningkatkan kapasitas daya output dari PLTA Plengan unit 5 menjadi lebih optimal dengan kapasitas daya yang dihasilkan yang awalnya hanya 1000 kW, menjadi 1578 kW.

3. Implementasi metode *Reverse Engineering* berbasis simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)* terbukti menjadi strategi efektif dan ekonomis dalam melakukan *up-rating system* PLTA tanpa perlu melakukan penggantian besar-besaran terhadap komponen utama lainnya. Optimasi ini berpotensi memberikan dampak langsung yang cukup besar terhadap peningkatan kinerja PLTA Plengan unit 5, penghematan biaya pemeliharaan jangka panjang secara signifikan.

REFERENSI

- [1] K. Celebioglu, S. Aradag, E. Ayli, and B. Altintas, "Rehabilitation of Francis Turbines of Power Plants with Computational Methods," *Hittite Journal of Science & Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 37–48, 2018, doi: 10.17350/HJSE19030000076.
- [2] S. Leguizamón and F. Avellan, "Open-source implementation and validation of a 3D inverse design method for Francis turbine runners," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082020.
- [3] M. Nechleba, C. Mayer, and A. G. Evans, "CI z HYDRAULIC TURBINES Their Design and Equipment State Prize Laureate, Professor of Hydraulic Machines N?. Translated from the Czech edition by INTRODUCTION TO THEORY OF HYDRAULIC TURBINES," 1957.
- [4] T. Azad, S. Ahmed, B. Saha, T. Bintay Azad, and K. Afzalur Rahman, "Design & CFD Analysis of Blade Geometry of Kaplan Turbine," 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/348163370>
- [5] C. Liu *et al.*, "Study on Pressure Pulsation and Force Characteristics of Kaplan Turbine," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/w15132421.
- [6] C. Abeykoon, "Modelling and optimisation of a Kaplan turbine — A comprehensive theoretical and CFD study," *Cleaner Energy Systems*, vol. 3, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cles.2022.100017.
- [7] M. Mahmood *et al.*, "DESIGN OPTIMIZATION OF KAPLAN TURBINE," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/355107120>
- [8] "UNIT II Reaction Water Turbines Turbo Machines DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING."
- [9] A. Bernad and E. Putra, "ANALISIS PERHITUNGAN EFISIENSI DAYA DENGAN MENGUKUR BESARNYA DEBIT ALIRAN AIR DAN KETINGGIAN (HEAD) AIR YANG JATUH DI PLTA SAGULING BANDUNG."
- [10] K. Celebioglu, S. Aradag, E. Ayli, and B. Altintas, "Rehabilitation of Francis Turbines of Power Plants with Computational Methods," *Hittite Journal of Science & Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 37–48, 2018, doi: 10.17350/HJSE19030000076.
- [11] S. Leguizamón and F. Avellan, "Open-source implementation and validation of a 3D inverse design method for Francis turbine runners," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082020.
- [12] M. Nechleba, C. Mayer, and A. G. Evans, "CI z HYDRAULIC TURBINES Their Design and Equipment State Prize Laureate, Professor of Hydraulic Machines N?. Translated from the Czech edition by INTRODUCTION TO THEORY OF HYDRAULIC TURBINES," 1957.
- [13] T. Azad, S. Ahmed, B. Saha, T. Bintay Azad, and K. Afzalur Rahman, "Design & CFD Analysis of Blade Geometry of Kaplan Turbine," 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/348163370>
- [14] C. Liu *et al.*, "Study on Pressure Pulsation and Force Characteristics of Kaplan Turbine," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/w15132421.

- [15] C. Abeykoon, "Modelling and optimisation of a Kaplan turbine — A comprehensive theoretical and CFD study," *Cleaner Energy Systems*, vol. 3, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cles.2022.100017.
- [16] M. Mahmood *et al.*, "DESIGN OPTIMIZATION OF KAPLAN TURBINE," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/355107120>
- [17] "UNIT II Reaction Water Turbines Turbo Machines DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING."
- [18] A. Bernad and E. Putra, "ANALISIS PERHITUNGAN EFISIENSI DAYA DENGAN MENGUKUR BESARNYA DEBIT ALIRAN AIR DAN KETINGGIAN (HEAD) AIR YANG JATUH DI PLTA SAGULING BANDUNG."
- [19] O. J. Mdee, C. Z. Kimambo, T. K. Nielsen, and J. Kihedu, "Measurement methods for hydropower resources: a review," 2018.
- [20] Purece C, Corlan L, and Pleşca V, "DETERMINATION OF TURBINE EFFICIENCY FOR SMALL HYDRO POWER PLANTS," *JOURNAL OF SUSTAINABLE ENERGY*, vol. 11, no. 2, 2020.
- [21] S. Kale and S. Kolase, "Design and CFD Analysis of Francis Turbine," *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, vol. 4, pp. 2395–5252, 2022, doi: 10.35629/5252-0408839846.
- [22] J. Xu and F. Lou, "A rapid method for turbomachinery aerodynamic design and optimization using active subspace," *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, vol. 8, pp. 24–38, 2024, doi: 10.33737/jgpps/184214.
- [23] F. Ayancik, U. Aradag, E. Ozkaya, K. Celebioglu, O. Unver, and S. Aradag, "Hydroturbine Runner Design and Manufacturing," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, pp. 162–165, 2013, doi: 10.7763/ijmmm.2013.v1.35.
- [24] K. Çelebioğlu and A. Kaplan, "Development and Implementation of a Methodology for Reverse Engineering Design of Francis Turbine Runners," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 430–439, 2019, doi: 10.5505/pajes.2018.43959.
- [25] M. J. García R Pierre Boulanger Jaime Barbosa P John Betancur M and B. A. Quintero Leonel F Castañeda Germán R Betancur G, "APPLICATION OF THE REVERSE ENGINEER IN THE MODELING OF A FRANCIS TURBINE IN A HYDROELECTRIC MINIPOWER STATION."
- [26] S. I. . Ao, Len. Gelman, D. W. L. . Hukins, Andrew. Hunter, and Alexander. Korsunsky, *World Congress on Engineering : WCE 2015 : 1-3 July, 2015, Imperial College London, London, U.K.* Newswood Limited : International Association of Engineers, 2015.
- [27] S. L. Bogdan, D. Nedelcu, and I. Pădurean, "The Reverse Engineering technique performed on a Francis Runner Geometry through Photogrammetry," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/477/1/012021.
- [28] J. Souček, P. Nowak, M. Kantor, and R. Veselý, "CFD as a Decision Tool for Pumped Storage Hydropower Plant Flow Measurement Method," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/w15040779.
- [29] A. Khakurel, S. Bhattarai, B. Nath Sharma Ghimire, and R. Krishna Regmi, "Numerical Modelling of Flow towards Headwork using CFD Approach," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net
- [30] R. Khare, "CFD APPROACH FOR FLOW CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC FRANCIS TURBINE," 2010.
- [31] S. Kale, S. Kolase, and S. Kaledepartment, "Design and CFD Analysis of Francis Turbine KusumAhire Department of Mechanical Engineering," 2022. [Online]. Available: www.ijres.org
- [32] C. Purece, "Determining the turbine discharge and efficiency at low-head hydropower plants," 2023. [Online]. Available: www.researchinventy.com
- [33] A. Mundet, X. Escaler, and V. H. Hidalgo, "Numerical simulation of cavitation in a Francis runner under different operating conditions."
- [34] X. Escaler, "CAVITATION MONITORING OF HYDROTURBINES: TESTS IN A FRANCIS TURBINE MODEL," 2006.
- [35] P. Nikhar, J. Abbas, E. Quon, C. Iavornic, and H. Obermeyer, "Computational Fluid Dynamics Modeling and Verification of a Submersible Pump-Turbine Runner: Preprint." [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74121.pdf>.
- [36] P. P. Gohil and P. Saini, "Cavitating turbulent flow study for low head francis turbine by transient analysis," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 22–30, 2019, doi: 10.5293/IJFMS.2019.12.1.022.
- [37] P. P. Gohil and R. P. Saini, "Numerical study of cavitation in francis turbine of a small hydro power plant," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9, no. 1, pp. 357–365, 2016, doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.24080.
- [38] W. Safi and V. Prasad, "DESIGN AND PERMANENCE ANALYSIS OF FRANCIS TURBINE FOR HYDRO POWER STATION ON KUNAR RIVER USING CFD.," *Int J Adv Res (Indore)*, vol. 5, no. 5, pp. 1004–1012, May 2017, doi: 10.21474/IJAR01/4209.
- [39] A. Winkler and L. Neururer, "CFD study of a Francis turbine using an industrial approach including a validation with model test results," 2022.
- [40] M. Louyot, B. Nennemann, C. Monette, and F. P. Gosselin, "Modal analysis of a spinning disk in a dense fluid as a model for high head hydraulic turbines," 2020.
- [41] M. Kamal, G. Saini, A. Abbas, and V. Prasad, "Prediction and analysis of the cavitating performance of a Francis turbine under different loads," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2021, doi: 10.1080/15567036.2021.2009941.
- [42] "MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA KEPUTUSAN MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA."
- [43] "BERITA NEGARA REPUBLIK INDONESIA." [Online]. Available: www.peraturan.go.id