

Uprating Francis Turbine by Redesigning and Remodeling the Existing Runner Through Computational Fluid Dynamics Simulation

I Nengah Diasta¹, Isnain 'Aliman^{1*}, Suharto², Yohanes H. S.¹, D. Widodo¹, S. A. Fatimah¹

¹

¹Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung, Indonesia

²PT PLN (Persero), Jl. Raya Dayeuhkolot KM 09, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: Isnain.aliman@itb.ac.id

Abstract. This study was conducted to improve the performance of Francis turbines of the Mini Hydro Power Plant (PLTM) built in the 1920s with a power and efficiency about 160 kW and 66.4%. The turbines respectively have 42 m and 0.585 m³/s operating heads and discharge rate. A redesign, remodelling, and numerical simulation process for Francis turbine runners has been carried out to increase turbine power under the same head and discharge operating conditions. The redesigned parameters are: blade angle, blade cross-profile profile, blade thickness, number of blades, and guide vane opening angle. Based on the redesign results, new runners were obtained with 16 blades, NACA-0006 blade cross-profile profile, and a maximum blade thickness of 9 mm. Based on the simulation results, the maximum turbine power that can be generated is 203.75 kW with 88% efficiency. The power generated is 27.3% greater than the existing turbine power. Turbine efficiency at maximum power also increased by 32.5% compared to the efficiency of existing turbines. The highest efficiency of the turbine with a new runner reaches 89.82%, which is when the turbine operates at a discharge of 0.473 m³ / s and produces a power of 166.7 kW.

Abstrak. Studi ini dilakukan untuk meningkatkan performa turbin Francis dengan daya sebesar 160 kW dengan efisiensi sekitar 66,4% dari Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTM) yang dibangun pada tahun 1920-an. Turbin tersebut memiliki head dan debit operasi masing-masing adalah 42 m dan 0,585 m³/s. Pada penelitian ini dilakukan perancangan ulang, pemodelan, dan simulasi numerik dari runner turbin Francis yang telah tersedia untuk meningkatkan daya (uprating) turbin pada kondisi operasi head dan debit yang sama. Parameter yang dirancang ulang untuk peningkatan daya turbin ini antara lain: sudut sudu, profil penampang sudu, ketebalan sudu, jumlah sudu, dan sudut bukaan guide vane. Berdasarkan hasil perancangan ulang, diperoleh sebuah runner-baru dengan jumlah sudu sebanyak 16 buah, profil penampang sudu NACA-0006, dan ketebalan maksimal sudu sebesar 9 mm. Berdasarkan hasil simulasi, daya turbin maksimum yang dapat dihasilkan adalah sebesar 203,75 kW dengan efisiensi 88%. Daya yang dihasilkan tersebut 27,3% lebih besar dibandingkan dengan daya turbin existing. Efisiensi turbin pada saat daya maksimum juga mengalami kenaikan sebesar 32,5% dibandingkan dengan efisiensi turbin existing. Efisiensi tertinggi turbin dengan runner-baru mencapai 89,82% yaitu pada saat turbin beroperasi pada debit 0,473 m³/s dan menghasilkan daya sebesar 166,7 kW.

Kata kunci: turbin-existing, uprating, runner-baru, daya, efisiensi.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik di Indonesia dari tahun ketahun semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan oleh kebutuhan listrik pada tahun 2013 sebesar 190 TWh dan terus meningkat hingga sebesar 232 TWh pada tahun 2016 bahkan diperkirakan mencapai 2008 TWh pada tahun 2050[1].

Hal tersebut tidak diimbangi dengan laju pertumbuhan pembangunan pembangkit listrik yang hanya 6,5% per-tahun dibandingkan dengan laju pertumbuhan permintaan listrik sebesar 8,5% per-tahun[1]. Tidak sebandingnya pertumbuhan dan permintaan listrik ini terjadi karena beberapa hal, salah satunya masalah pembebasan dan penyediaan lahan untuk pembangkit baru. Ini akan menjadi

masalah yang serius jika melihat bahwa PLTU batubara diperkirakan masih akan mendominasi penambahan kapasitas pembangkit dari kurun waktu 2015-2050 sebesar 253 GW[1].

Solusi lain untuk meningkatkan kapasitas pembangkit, yaitu dengan melakukan peningkatan daya yang dihasilkan oleh pembangkit yang sudah dibangun (uprating). Upaya peningkatan daya ini, khususnya PLTA, dilakukan dengan merancang ulang komponen utama dari sebuah turbin air yaitu roda jalan (runner) turbin.

Studi ini diambil dari sebuah PLTMH yang menggunakan jenis turbin Francis dengan kapasitas 160 kW yang telah dibangun pada tahun 1920-an. Pada tahun-tahun tersebut teknologi perancangan dan pembuatan turbin air belum semaju saat ini. Dengan bantuan perangkat lunak (software) yang tersedia saat ini diharapkan dapat menghasilkan desain yang dapat meningkatkan kinerja turbin. Peningkatan daya (uprating) pada PLTM tersebut akan dilakukan dengan merancang ulang bagian runner turbin tanpa mengubah dimensi utama dari runner tersebut. Hal ini dilakukan agar komponen-komponen lain dari turbin existing masih dapat digunakan kembali.

Ruang Linkup & Batasan Masalah

Pada penelitian ini, perancangan ulang hanya dilakukan pada sudu-sudu runner turbin saja. Pada proses simulasi aliran dianggap dalam kondisi tunak, hanya digunakan 1 (satu) jenis profil airfoil yaitu NACA-0006, dan simulasi numerik hanya berupa simulasi aliran untuk mendapatkan daya dan efisiensi dari turbin. Perancangan tidak meninjau kekuatan material dari runner.

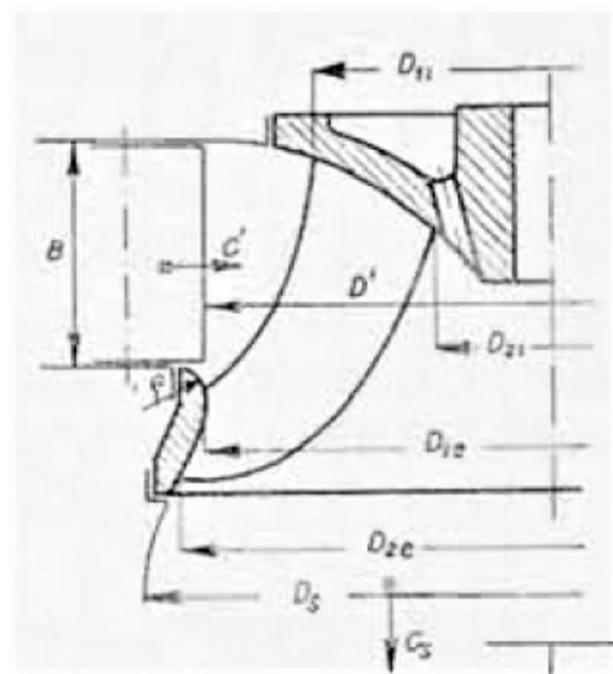
Proses Perancangan

Data-data yang digunakan dalam perancangan *runner* turbin Francis adalah:

- Head Netto (H) : 42 m
- Debit (Q) : 0,585 m³/s
- Putaran (n) : 1000 rpm

Proses perancangan dimulai dengan menentukan ukuran/dimensi utama dari *runner* turbin. Proses *uprating* dilakukan dengan merancang ulang sudu-sudu dari *runner* turbin saja dengan tujuan agar komponen lain dari turbin seperti: *spiral case*, *guide vane*, dan *draf tube* masih dapat dipergunakan kembali. Oleh sebab itu dalam perancangan ulang ini dimensi utama dari *runner* turbin akan tetap menggunakan dimensi utama dari *runner* turbin

existing. Dimensi utama *runner* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi utama *runner* turbin[3]

Dimensi utama *runner* turbin Francis *existing* diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi utama *runner*

Dimensi utama	Turbin <i>existing</i> (mm)
D _{1e}	387
D _{1i}	387
D _{2e}	325
D _{2i}	191,8
B	78

Dimensi utama dari *runner* turbin tersebut kemudian akan menjadi parameter *input* pada perangkat lunak perancangan sudu-sudu turbin. Pada perangkat lunak ini, selain dimensi *runner* parameter lain yang diperlukan untuk menjadi *input* adalah sudut sudu pada sisi masuk (β_1) dan keluar *runner* (β_2). Sudut sudu dapat diperoleh dari metode tabung alir dan perhitungan segi-tiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar *runner*. Tabung alir merupakan sebuah metode perancangan penampang meridian turbin Francis dengan menerapkan prinsip kontinuitas mengikuti persamaan berikut:

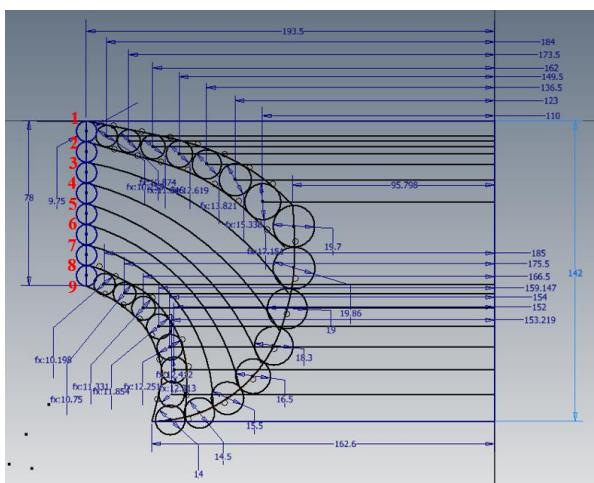
$$\frac{Q}{x} = \pi D \Delta C_m = \pi D' \Delta' C'_m = \text{konstan} \quad (1)$$

$$U = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{60} \quad (2)$$

Dimana:

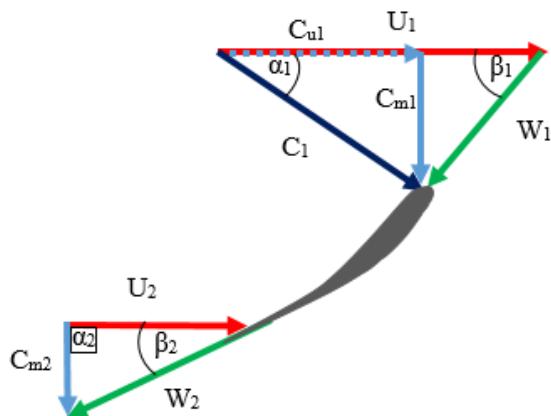
- Q = Debit (m^3/s)
- x = Jumlah tabung alir
- Δ = Diameter lingkaran pada tabung alir (m)
- D = Jarak lingkaran pada tabung alir dengan sumbu poros (m)
- C_m = Kecepatan meridiana (m/s)

Dari metode tabung alir diperoleh skema penampang meridiana *runner* turbin Francis seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema penampang tabung alir meridiana *runner*.

Dari skema tabung alir kemudian dapat diperoleh sudut sudu pada sisi masuk dan sisi keluar *runner* dengan bantuan segitiga kecepatan seperti ditunjukkan pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Segitiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar sudu *runner*

Persamaan untuk menghitung sudut sudu pada sisi masuk :

$$C_{u1} = \frac{N}{\rho \cdot Q \cdot U_1} \quad (3)$$

$$C_{m1} = \frac{Q}{\pi \cdot D_{inlet} \cdot B_{inlet}} \quad (4)$$

$$\beta_1 = \text{arc tan} \frac{C_{m1}}{U_1 - C_{u1}} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \text{arc tan} \frac{C_{m1}}{C_{u1}} \quad (6)$$

Hasil perhitungan sudut sudu pada sisi masuk *runner* ditunjukkan Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan sudut β_1 dan α_1

	D_{inlet} (m)	B_{inlet} (m)	U_1 (m/s)	C_{u1} (m/s)	C_{ml} (m/s)	β_1 (°)	α_1 (°)
1	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
2	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
3	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
4	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
5	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
6	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
7	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
8	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63
9	0,387	0,078	20,27	18,29	6,16	72,21	18,63

Persamaan untuk menghitung sudut sudu pada sisi keluar *runner*:

$$C_{m2} = \frac{Q}{\pi D_{outlet} B_{outlet}} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \text{arc tan} \frac{C_{m2}}{U_2} \quad (8)$$

Hasil perhitungan sudut sudu pada sisi keluar *runner* ditunjukkan Tabel 3.

Setelah mengetahui sudut sudu pada sisi masuk dan keluar *runner*, langkah berikutnya yaitu menghitung jumlah sudu-sudu *runner* dengan persamaan berikut :

$$Z = \frac{10 \text{ to } 12}{u_1} \quad (9)$$

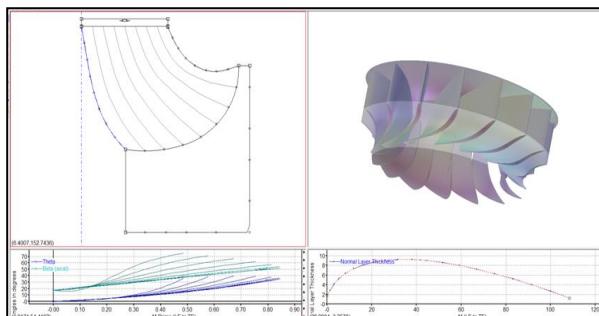
Dengan nilai $u_{1e}=0.69$, maka diperoleh jumlah sudu sebanyak 15 - 16 buah.

Tabel 3. Hasil perhitungan sudut β_2

D_{outlet} (m)	Q (m^3/s)	B_{outlet} (m)	U_2 (m/s)	C_{m2} (m/s)	β_2 ($^\circ$)	α_2 ($^\circ$)
1	95,9	0,585	0,122	10	7,95	38,37
2	94,78	0,585	0,122	9,93	8,04	39,03
3	96,02	0,585	0,122	10,1	7,94	38,30
4	99,46	0,585	0,122	10,4	7,66	36,36
5	105,9	0,585	0,122	11,1	7,2	33,01
6	116	0,585	0,122	12,2	6,57	28,41
7	129,4	0,585	0,122	13,6	5,89	23,49
8	145,4	0,585	0,122	15,2	5,24	19,01
9	162,6	0,585	0,122	17	4,69	15,40

Ketebalan maksimum sudu yang akan digunakan pada proses perancangan ini adalah 9 mm dan ketebalan penampang sudu mengikuti profil *airfoil* NACA-0006.

Setelah semua parameter perancangan didapatkan, proses selanjutnya membuat model *runner* turbin Francis dengan bantuan perangkat lunak. Dengan menggunakan parameter-parameter yang telah dihitung sebelumnya dan mengikuti skema penampang meridian sudu dari metode tabung alir maka diperoleh model *runner* turbin Francis seperti pada Gambar 4.

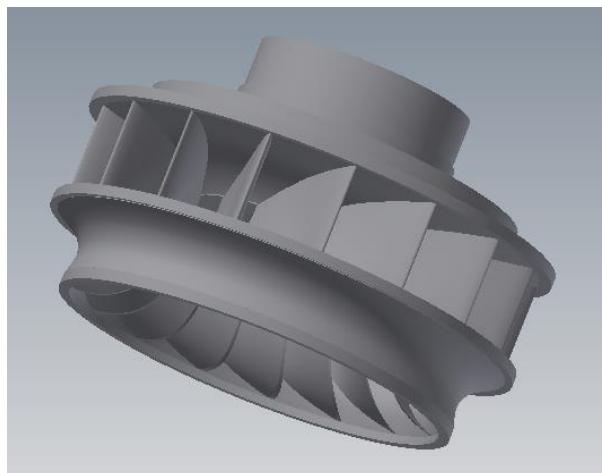


Gambar 4. Hasil perancangan runner dengan bantuan perangkat lunak.

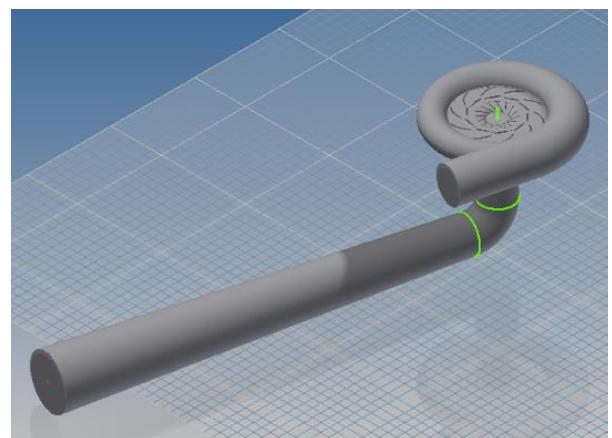
Untuk memperoleh model 3-dimensi dari *runner*, hasil dari proses ini akan diekspor ke perangkat lunak CAD untuk menambahkan komponen lain dari *runner* seperti *shroud*, *hub*, dan lubang poros. Hasil model 3-dimensi *runner* dari proses ini ditunjukkan Gambar 5.

Proses simulasi menggunakan perangkat lunak CFD. Model yang digunakan pada proses simulasi ini berupa model volume fluida kerja dari turbin Francis yang terdiri dari volume fluida kerja dari *runner*, *casing*, *guide vane*, dan *draft tube*. Sudut bukaan *guide vane* juga akan diatur pada model fluida kerja dari *guide vane*. Model volume fluida

kerja turbin Francis ditunjukkan pada Gambar 6 berikut ini:



Gambar 5. Model *runner* turbin Francis



Gambar 6. Volume fluida kerja turbin Francis
Hasil dan Analisis

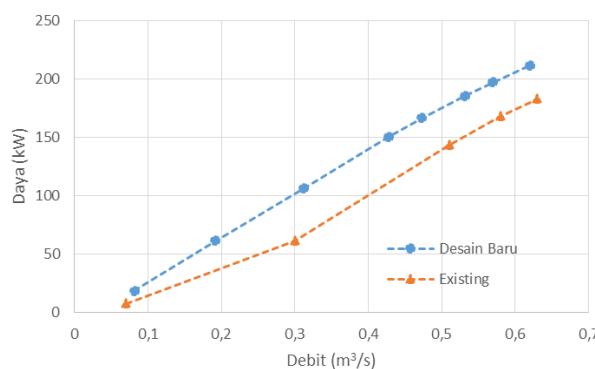
Proses simulasi yang dilakukan pada 8 (delapan) variasi sudut bukaan *guide vane*. Dari keseluruhan simulasi diperoleh desain *runner* dengan jumlah sudu 16 (enam belas) buah dengan profil penampang sudu berbentuk *airfoil* NACA-0006 menghasilkan prestasi turbin paling baik dan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Prestasi turbin desain baru pada berbagai sudut bukaan *guide vane*.

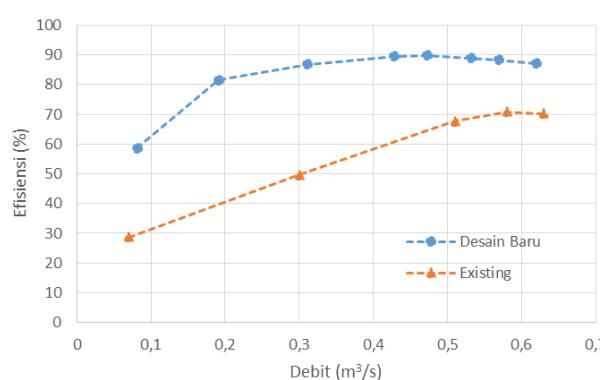
Guide vane (derajat)	Ef. Hidrolik (%)	Q (m^3/s)	Torsi (Nm)	Daya (kW)
5	58,6	0,08	179,7	18,82
10	81,48	0,19	587,1	61,48
15	86,77	0,31	1014,82	106,27
20	89,58	0,43	1437,11	150,49
22	89,82	0,47	1591,87	166,7
25	88,93	0,53	1771,68	185,53
27	88,3	0,57	1883,2	197,21

30	87,08	0,62	2019,82	211,52
----	-------	------	---------	--------

Prestasi dari turbin desain baru ini kemudian akan dibandingkan dengan prestasi turbin *existing* untuk melihat ada atau tidaknya peningkatan prestasi dari turbin setelah proses desain ulang. Hasil perbandingan prestasi ini disajikan dalam bentuk grafik daya terhadap debit dan efisiensi terhadap debit dari turbin desain baru dengan turbin *existing* sebagai berikut:

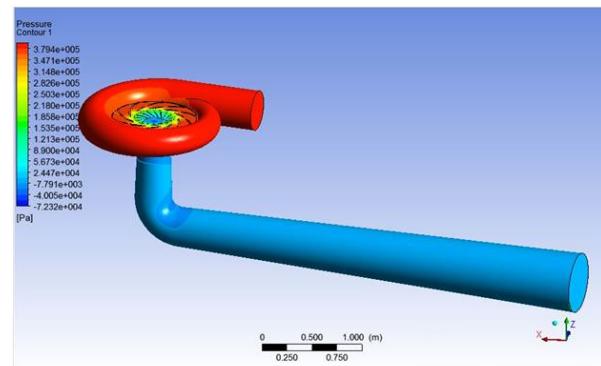


Gambar 7. Grafik daya terhadap debit.

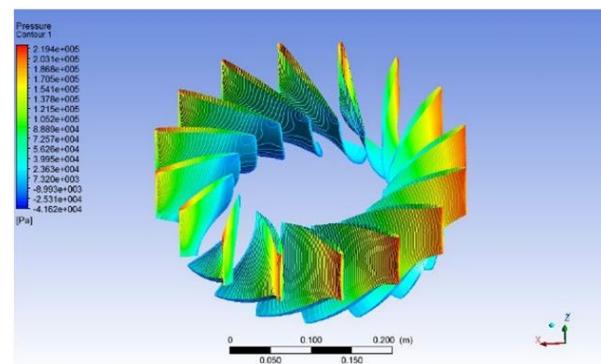


Gambar 8. Grafik efisiensi terhadap debit.

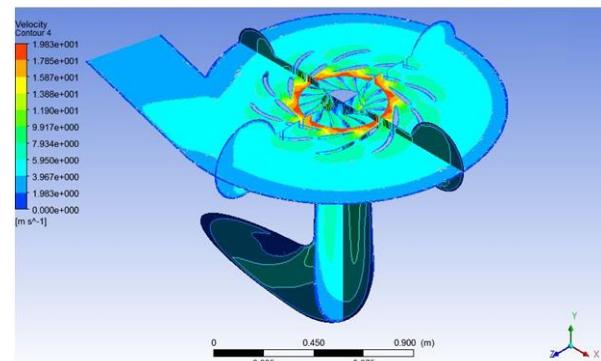
Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan turbin dengan desain *runner* baru memiliki prestasi yang lebih baik dibandingkan turbin *existing*. Kontur tekanan dan kontur kecepatan pada turbin Francis desain baru ditunjukkan pada Gambar 9, 10, dan 11.



Gambar 9. Kontur tekanan di seluruh komponen turbin Francis



Gambar 10. Kontur tekanan di bagian sudu runner



Gambar 11. Kontur kecepatan air yang melewati turbin Francis

Kesimpulan

Data-data *runner* turbin Francis hasil perancangan ulang untuk head 42 m dan debit 0,585 m³/s adalah sebagai berikut:

- Dimensi utama *runner* yaitu: $D_{1e} = 387 \text{ mm}$, $D_{1i} = 387 \text{ mm}$, $D_{2e} = 325 \text{ mm}$, $D_{2i} = 191,8 \text{ mm}$.
- Jumlah sudu-sudu optimal *runner* sebanyak 16 buah.
- Profil penampang sudu-sudu berbentuk airfoil NACA-0006 dengan ketebalan maksimal 9 mm.

Daya maksimum yang dapat dihasilkan turbin adalah sebesar 203,75 kW dengan efisiensi 88%.

Daya yang dihasilkan tersebut 27,3% lebih besar dibandingkan dengan daya turbin *existing*.

Efisiensi turbin pada saat daya maksimum juga mengalami kenaikan sebesar 32,5% dibandingkan dengan efisiensi turbin *existing*. Efisiensi tertinggi turbin dengan *runner*-baru mencapai 89,82% yaitu pada saat turbin beroperasi pada debit 0,473 m³/s dan menghasilkan daya sebesar 166,7 kW.

Penghargaan

Penelitian ini bekerjasama dengan PT. PLN Persero, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara (Teknik Mesin), dan Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan LPPM ITB, Pusat Rekayasa Industri ITB.

- [10] S. A. Fatimah, Perancangan, Pemodelan dan Simulasi Turbin Air Jenis Francis Untuk Head 42 m dan Debit 0,585 m³/s, Tugas Sarjana, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Bandung, 2015.
- [11] Vapour pressure of water, Wikipedia, 1 Mei 2016. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water. [Diakses 19 Mei 2016].

Referensi

- [1] BPPT, Outlook Energi Indonesia 2015, Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi (PTPSE), Jakarta, 2015.
- [2] B. R. Munson, Fundamentals of Fluid Mechanics 7th Edition, Jefferson: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [3] M. Nechleba, Hydraulic Turbine Their Design and Equipment, Czechoslovakia: ARTIA Prague, 1957.
- [4] E. F. Kreith, Mechanical Engineering Handbook, Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [5] M. Manno, Hydraulic Turbines and Hydroelectric Power Plants, Rome: Department of Industrial Engineering University of Rome, 2013.
- [6] D. Widodo, Simulasi Numerik Performansi Turbin Francis PLTMH Cijedil Terhadap Perubahan Parameter Sudu pada Runner, Tugas Sarjana, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Bandung, 2015.
- [7] Airfoil, Wikipedia, 16 Mei 2016. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>. [Diakses 18 Mei 2016].
- [8] ANSYS Inc., "Meshing Help," November 2009. [Online]. Available: orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/wb_msh.pdf. [Diakses 19 Mei 2016].
- [9] G. Okyay, "Utilization of CFD Tools In the Design Process of a Francis Turbine," School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, 2010.