

Numerical Study on Undershoot Waterwheel Performance

Budiarso, Sanjaya BS^{1,*}, Nasution², Dendy Adanta³, Warjito, Satrio AA⁴.

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok 16424

*Corresponding author: sanjayabaroarnasution@gmail.com

Abstract. Undershoot waterwheel turbine is recommended to overcome the low electrification ratio in remote areas. This is because it effective for low water sources such as river flow. In addition, undershoot waterwheel turbine is also easy and inexpensive to fabricate because of their simple shape. In this study, analytical and numerical studies were carried out by varying velocity inlet of the water. Variations velocity used are 1, 3 and 5 m/s. Based on analytical calculations, the number of blades used is 8 blades. In the numerical study, the six-degrees of freedom (6-DOF) feature is used to get more accurate results. Based on numerical results show that the efficiency of the turbine at variations in velocity inlet of 1 m/s is 45,6%, 3 m/s is 15,2 %, and 5 m/s is 13,8 %. Based on analytical calculations, the efficiency of the turbines in inlet velocity of 1 m/s is 60,2%, 3 m/s is 20,1 %, and 5 m/s is 12,1 %. Thus, results indicate that increasing velocity of the water does not have a positive impact on the performance of the undershot waterwheel turbine. Moreover, the volume fractions contour also shows the same phenomenon. Therefore, it can be indicated that the undershot waterwheel turbine is a reaction turbine where the blade receives work from difference in static pressure.

Abstrak. Turbin roda air undershot direkomendasikan untuk mengatasi rendahnya rasio elektrifikasi pada daerah terpencil. Turbin *undershot* efektif digunakan untuk sumber air dengan ketinggian rendah seperti pada aliran sungai. Selain itu, turbin *undershot* juga mudah dan murah untuk difabrikasi karena bentuknya yang sederhana. Pada penelitian ini, dilakukan studi analitik dan numeric dengan memvariasikan kecepatan inlet air. Variasi kecepatan yang digunakan ialah 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s. Berdasarkan perhitungan analitik, jumlah sudu yang digunakan ialah 8 sudu. Pada metode numerik, feature enam-derajat kebebasan (*six-degrees of freedom* (6-DOF)) untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Berdasarkan hasil numerik menunjukkan bahwa efisiensi turbin pada variasi kecepatan 1 m/s ialah 45.6 %, 3 m/s adalah 15.2 %, dan 5 m/s adalah 13.8 %. Berdasarkan perhitungan analitik, efisiensi turbin pada variasi kecepatan inlet ialah 1 m/s adalah 60.2 %, 3 m/s adalah 20.1 %, dan 5 m/s adalah 12.1 %. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa meningkatnya kecepatan tidak memberikan dampak positif pada performa turbin roda air *undershot*. Lebih lanjut, kontur fraction volume juga menunjukkan fenomena yang sama. Oleh sebab itu, dapat diindikasikan bahwa turbin roda air undershot merupakan turbin reaksi dimana sudu menerima kerja dari perbedaan tekanan statik.

Keywords: *Undershoot*, roda air, numerik, 6-DOF, daerah terpencil

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Berdasarkan data dari kementerian ESDM pada tahun 2017 rasio elektrifikasi nasional Indonesia ialah 92.80%. Hal ini menunjukkan 7.2% dari total jumlah rumah tangga di Indonesia belum mendapatkan sumber arus listrik. Selain itu, beberapa provinsi terpencil memiliki rasio elektrifikasi yang sangat rendah seperti NTB 79.93%, Sulawesi Utara 76.79%, NTT 59.17% dan Papua 48.74% [1]. Berdasarkan hal tersebut dapat dikatakan bahwa rasio elektrifikasi yang belum merata, khususnya pada daerah terpencil masih menjadi masalah bangsa Indonesia yang harus diselesaikan.

Rendahnya rasio elektrifikasi di daerah terpencil disebabkan bentuk geografis daerah tersebut. Bentuk geografis yang berbukit-bukit serta daerah kepulauan menyebabkan sulitnya distribusi arus listrik. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan

pembangkit daya listrik yang mudah difabrikasi, murah, dan memiliki life time yang panjang. Turbin piko hidro dapat dijadikan salah satu alternatif. Hal ini disebabkan turbin piko hidro memiliki *capital cost* (biaya produksi) dan *generation cost* yang lebih murah dibanding dengan energi angin dan solar PV (energi matahari) [2]. Selain itu turbin piko hidro juga memiliki *life cycle cost* (LCC) lebih tinggi karena memiliki *life time* yang lebih lama [3].

Turbin piko hidro terdiri dari beberapa jenis, yaitu: turbin *propeller*, *undershot*, *overshot*, *breatshot*, *Archimedes*, *pelton*, *turgo* dan *Francis*. Turbin roda air langkah bawah (undershot) merupakan turbin penghasil listrik yang memanfaatkan energi tekan dan dorong dari air untuk memutar sudu roda. [4]. Turbin *undershot* efektif digunakan untuk sumber air dengan ketinggian rendah seperti pada aliran sungai [5]. Selain itu, turbin *undershot* juga mudah dan murah untuk difabrikasi karena bentuknya yang sederhana

[6]. Untuk itu, turbin air *undershot* merupakan salah satu pilihan terbaik untuk diaplikasikan pada daerah terpencil.

Penelitian tentang turbin *undershot* telah banyak dilakukan, diantaranya: Denny [7] melakukan studi analitik tentang turbin *undershot* dengan menggunakan modifikasi *Poncelet* untuk meningkatkan efisiensi turbin. Hasil perhitungan secara analitik menunjukkan adanya peningkatan performa dibandingkan turbin *undershot* konvensional.. Zulfikar dkk. [8] merumuskan spesifikasi teknik untuk roda air dan parameter tertentu untuk desain roda air *undershot*. Sule dkk. [9] melakukan studi eksperimental untuk membandingkan efektifitas jumlah dan bentuk sudu untuk turbin roda air *undershot*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model 6 sudu bentuk *tick* memberikan performa terbaik. Rinaldi dkk. [10] menurunkan sebuah persamaan untuk daya awal menggunakan *head* dan kapasitas aliran air. Jamlay dkk. [11] memaparkan sebuah proses untuk perencanaan, desain, dan instalasi turbin piko hidro pada sebuah desa menggunakan roda air *undershot*. Yah dkk. [12] menganalisi efek kedalaman sudu terhadap performa turbin roda air *undershot* dengan variasi kedalaman sudu ialah 20 mm, 40 mm, 60 mm, dan 80 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman 40 mm merupakan kedalaman paling optimal. Jamlay dkk. [13] menganalisis fenomena aliran dari turbin roda air *undershot*. Hasil analisis menunjukkan kondisi tertentu dari perilaku aliran terhadap performa turbin. Zengin dkk[14] mengembangkan sebuah persamaan untuk mengoptimasi daya *output* dan efisiensi dari sebuah pembangkit daya menggunakan turbi roda air undershot. Dutta dkk. [15] mengungkapkan bahwa material HDPE (*high density polyethylene*) menawarkan resistensi yang lebih terhadap air, materian *non-corrosive*, tidak membusuk, dan tidak mahal sehingga cocok digunakan untuk turbin air.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah memaparkan beberapa metode untuk meningkatkan performansi turbin roda air *undershot* seperti modifikasi bentuk sudu, memvariasikan jumlah sudu, dan kedalaman sudu. Namun, hingga saat ini masih sedikit referensi yang berkaitan dengan pengaruh perubahan kecepatan aliran air terhadap performansi turbin roda air *undershot*. Oleh sebab itu, dilakukan studi analisis menggunakan metode komputasi (CFD) untuk mengetahui pengaruh perubahan kecepatan aliran fluida terhadap performansi turbin roda air *undershot*. Hal ini juga akan menjadi referensi baru untuk membuktikan apakah turbin roda air *undershot* merupakan jenis turbin reaksi atau campuran.

Metode Penelitian

Potensi daya air pada turbin *undershot* dihitung dimana roda air dalam kondisi diam. Pada keadaan tersebut energi air yang dihitung sebagai potensi daya ialah energi kinetik. Besarnya daya air yang berasal dari energi kinetik persatuan waktu diketahui dari persamaan berikut [16].

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho Q v^2 \quad (1)$$

Daya keluar turbin *undershot* secara analitik dihasilkan dari gaya hidrostatik fluida. Hal ini disebabkan fluida yang bekerja bersentuhan dengan bidang datar yaitu suku turbin. gaya hidrostatik tersebut menyebabkan suku bergerak, gerakan suku yang yang terhubung pada poros menyebabkan roda air berotasi. Berputarnya roda air tersebut akan menghasilkan daya keluar. Adapun daya keluar yang dibangkitkan oleh roda air dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [17]

$$P_{out} = F_r u \quad (2)$$

Gaya hidrostatik yang dihasilkan pada kondisi sesaat sebelum roda air berputar ialah [18].

$$F_r = \rho g \left(\frac{d_1^2 - d_2^2}{2} \right) W \quad (3)$$

Untuk menghitung kecepatan keliling suku secara analitik digunakan persamaan berikut [19]:

$$u = \frac{v}{2} \quad (4)$$

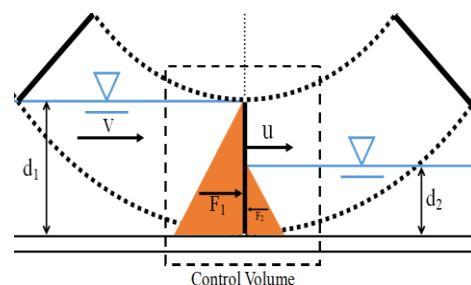
Daya keluar turbin menggunakan metode numerik (CFD) dapat diperoleh dengan menghitung torsi roda air dan kecepatan putar yang dihasilkan. Adapun persamaan yang digunakan ialah:

$$P_{out} = T \cdot \omega \quad (5)$$

Efisiensi turbin diperoleh dengan membagikan daya keluar yang dihasilkan dan potensi daya air yang mengalir. Kondisi ini berlaku baik secara analitik maupun secara numerik.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (6)$$

Penjelasan gaya hidrostatik yang bekerja pada suku roda air dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Gaya hidrostatik pada turbin undershot[20]

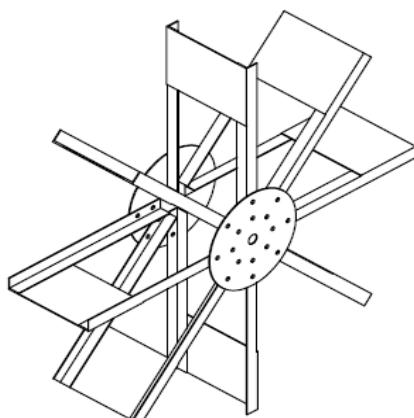
Penelitian ini menggunakan rancangan turbin roda air dengan jumlah sudu 8 buah. Berikut ini

merupakan table 1 spesifikasi rancangan turbin yang digunakan.

Tabel 1. Spesifikasi roda air yang digunakan

No	Parameter	Nilai
1	Diameter luar, Do	0.984 m
2	Diameter dalam, Di	0.656 m
3	Lebar, W	0.25 m
4	Jumlah sudu, Z	8 sudu
5	Tinggi sudu,h/Do	0.167m

Berikut ini merupakan gambar 2 geometri turbin roda air *Undershoot*



Gambar 2. Geometri turbin roda air *Undershoot*

Software yang digunakan pada penelitian ini adalah Fluent ANSYS 18.2. Software ini digunakan untuk menghitung performansi dan pola aliran fluida turbin secara numerik. Pada penelitian ini, tahap pertama yang dilakukan ialah pembentukan model geometri yang sesuai dengan spesifikasi turbin. Model geometri dibangun dalam gambar CAD dua dimensi (2D). Tahapan selanjutnya ialah pembentukan *meshing/grid* geometri. Jika tahapan tersebut telah selesai, dilakukan pengaturan *set up input parameter* dan kondisi batas yang ditentukan. Adapun tahap terakhir ialah perhitungan dan pengambilan data yang dibutuhkan.

Pada penelitian ini digunakan *set-up* dengan kondisi aliran turbulen, *unsteady*, dan menggunakan fluida *multiphase*. Fluida yang digunakan ialah air dan udara dengan *surface tension* antara keduanya ialah 0.0728 N/m. Selain itu, untuk mendapatkan nilai daya yang lebih akurat digunakan metode *dynamic mesh* six-DoF (6 derajat kebebasan) dimana putaran roda air tidak ditentukan tetapi menjadi salah satu parameter yang dicari. Adapun variasi *input set up* yang dilakukan ialah variasi kecepatan pada *boundary condition inlet* dimana *inlet* diatur sebagai *velocity inlet* dengan variasi kecepatan fluida air masuk ialah 1 m/s, 2 m/s, dan 3

m/s. Selain itu, model turbulen yang digunakan ialah *standard k-ε scalable wall*. Hal ini disebabkan karena model turbulen tersebut sesuai pada kasus dimana *grid wall* yang berubah-ubah [rio].

Hasil perhitungan numerik (CFD) sangat bergantung pada jumlah dan kualitas *grid/mesh* yang digunakan. Untuk kasus *unsteady*, *time step size* juga menjadi parameter penting yang harus dipertimbangkan. Oleh sebab itu, dilakukan verifikasi awal untuk mengetahui pengaruh variasi dua parameter tersebut dan mencari nilai terbaik yang digunakan pada proses simulasi. Adapun verifikasi yang dilakukan ialah *mesh* dan *time step independency*. Pada *mesh independency* digunakan variasi jumlah *mesh* 30.000, 50.000, 70.000, dan 90.000. Sedangkan pada *time step independency* variasi yang dilakukan ialah *time step size* 0.1 s, 0.01s, 0.001s, dan 0.0001s.

Hasil dan Pembahasan

Perhitungan analitik dilakukan dengan menggunakan persamaan 1 sampai dengan 6 dimana massa jenis air ialah 1000 kg/m³, gravitasi 9.8 m/s² dan kapasitas aliran 0.041 m³/s. Berikut ini table 2 merupakan hasil perhitungan analitik dimana efisiensi maksimal yang diperoleh ialah 60.26 %.

Table 2. Hasil perhitungan analitik

No	v	u	Fr	Daya Analitis	Potensi Daya
1	1 m/s	0,5 m/s	24,7 N	12,35 W	20,5 W
2	3 m/s	1,5 m/s	24,7 N	37,06 W	184,5 W
3	5 m/s	2,5 m/s	24,7 N	61,77 W	512,5 W

Mesh independency dilakukan dengan mencari nilai *force* (gaya) pada titik (1,0,0) kemudian membandingkan hasilnya pada setiap variasi yang telah ditentukan. Pada penelitian ini jumlah *mesh* yang digunakan ialah 90000. Hal ini disebabkan perbedaan besaran gaya antara 90000 dan 11000 merupakan perbedaan paling kecil, sehingga dapat diindikasikan bahwa penambahan jumlah *mesh* sudah tidak begitu berpengaruh. Berikut ini merupakan Table 3 yang berisi hasil simulasi numerik gaya pada titik yang ditentukan.

Tabel 3. Hasil perhitungan numerik *mesh independency*

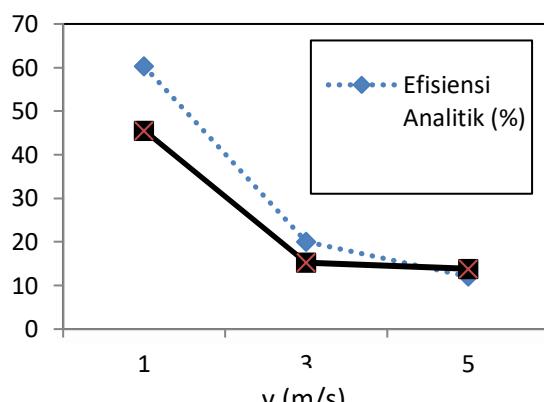
No	Jumlah Mesh	Force
1	30000	5.145 N
2	50000	2.523 N
3	70000	2.187 N
4	90000	2.422 N
5	11000	2.388 N

Pada titik yang sama (1,0,0) diambil data *force* (gaya) dengan memvariasikan *time step size*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan nilai *force* antara 0.001 dan 0.0001 tidak terlalu signifikan. Untuk itu, pada penelitian ini digunakan *time step size* 0.001. berikut ini merupakan table 4. Hasil perhitungan numerik gaya pada variasi *time step size*.

Table 4. Hasil perhitungan numerik *time step independency*

No	Time step size	Force
1	0.1	5.01 N
2	0.01	13.7 N
3	0.001	15.8 N
4	0.0001	19 N

Hasil perhitungan efisiensi turbin *undershot* baik secara analitik maupun numerik menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan. Berikut ini merupakan **Gambar 5**. Tentang efisiensi analitik dan numerik turbin roda air *undershot*.

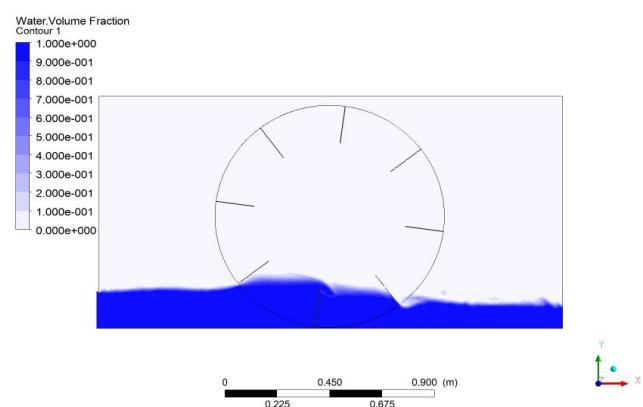


Gambar 3. Efisiensi analitik dan numerik

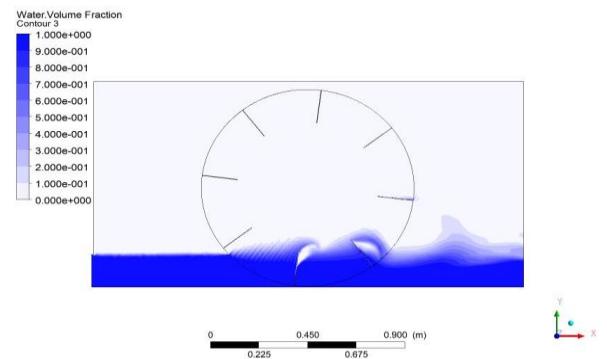
Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran masuk air tidak memberikan dampak positif terhadap efisiensi turbin. Efisiensi tertinggi berada pada kecepatan aliran 1 m/s (60.2 % analitikal dan 45.6 % numerical) dan paling rendah 5 m/s(12.1% analitikal dan 13.8% numerical). Selain itu, perbedaan efisiensi antara kecepatan 3 m/s (20.1 % analitikal dan 15.2 % numerical) dan 5 m/s tidak begitu besar.

Gambar 4, 5, dan 6 berikut ini akan menunjukkan kontur *fraction volume* pada setiap kondisi kecepatan. **Gambar 4** menunjukkan pada kecepatan 1 m/s air mengalir dengan pola teratur baik sebelum mengenai sudu maupun setelah itu. Pada **gambar 5**

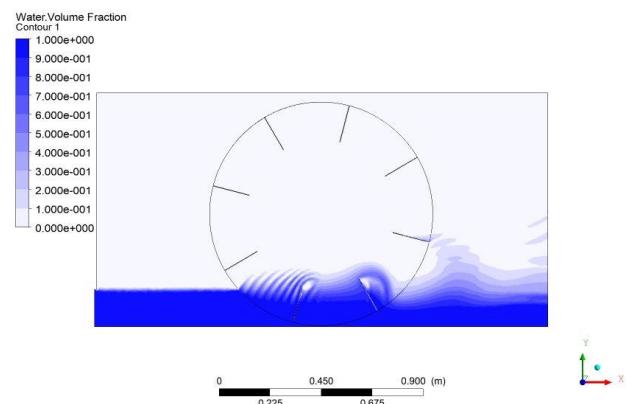
kontur air baik sebelum mengenai sudu maupun setelah melewati sudu berubah menjadi tidak teratur. Olakan air sebelum mengenai sudu disebabkan oleh air yang mengalir terlalu cepat sehingga sudu tidak dapat menangkap keseluruhan energi kinetik dari air tersebut. Hal ini menyebabkan arus balik yang berlawanan dengan arus aliran *inlet*. Selanjutnya, pada **gambar 6** dimana kecepatan air ialah 5 m/s ketidakteraturan semakin besar walaupun tidak terlalu jauh berbeda dari kondisi 3 m/s.



Gambar 4. Kontur fraksi volume kecepatan 1 m/s



Gambar 5. Kontur fraksi volume kecepatan 3 m/s



Gambar 6. Kontur fraksi volume kecepatan 5 m/s

Hasil perhitungan analitik dan numerik menunjukkan bahwa meningkatnya kecepatan tidak memberikan dampak positif pada efisiensi turbin roda air *undershot*. Kontur *fraction volume* dari gambar 4, 5, dan 6 juga menunjukkan fenomena yang sama. Oleh sebab itu, dapat diindikasikan bahwa turbin roda air *undershot* merupakan turbin reaksi dimana sudu menerima kerja dari perbedaan tekanan statik.

Kesimpulan

Dengan demikian, berdasarkan studi analitik dan numerik, turbin roda air *undershot* merupakan turbin reaksi karena tidak ada pengaruh kecepatan inlet terhadap daya yang dihasilkan. Lebih lanjut, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara hasil analitik dan numerik berkaitan dengan efisiensi turbin. Secara analitik efisiensi tertinggi turbin ialah 60.2 % dan secara numerik 45.6 %. Kondisi ini terjadi pada kecepatan inlet 1 m/s. Adapun efisiensi terendah ialah pada kondisi kecepatan inlet 5 m/s dimana secara analitik efisiensi turbin ialah 12.1 % dan secara numerik 13.8 %. Oleh sebab itu, dapat diindikasikan bahwa turbin roda air *undershot* ialah turbin reaksi.

Referensi

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, <http://www.esdm.go.id>(diakses pada 14 Agustus 2018)
- [2] B. Ho-Yan, 2012 , Design of a Low Head Pico Hydro Turbine for Rural Electrification in Cameroon, pp. 1–175.
- [3] Warjito dkk., 2018, The effect of Bucketnumber on Breastshot Waterwheel Performance, IOP conference Series, Earth Environment Science, vol. 105, no 1, p. 12031
- [4] R. Pradito, 2017, “Perancangan Kincir Air Piko Hidro Undershoot dengan Metode Analitik dan Numerik,” Universitas Indonesia.
- [5] S. J. Williamson, B. H. Stark, and J. D. Booker, 2014, “Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis,” Renew. Energy, vol. 61, pp. 43–50.
- [6] E. Quaranta and G. Müller, 2018. “Sagebien and Zuppinger water wheels for very low head hydropower applications,” J. Hydraul. Res., pp. 1–11, Jan.
- [7] M. Denny, 2004, The efficiency of overshot and undershot waterwheels, Eur. J. Phys., vol. 25, no. 2, pp. 193–202.
- [8] D. Zulfikar, H. Siswoyo, and T. Utomo, “Perancangan pltmh tipe kincir air di Kecamatan Pasrujambe Kabupaten Lumajang,” Jurnal Mahasiswa Teknik Pengairan Universitas Brawijaya, 2013. [Online]. Available: <http://pengairan.staff.ub.ac.id/jurnal-mahasiswa/>. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [9] S. W. Luther Sule, I.N.G. Wardana, Rudy Soenoko, 2014, Angled and curved blades of deep-water wheel efficiency, Aust. J. Basic Appl. Sci. April 2014, vol. 8, no. 1, pp. 186–192.
- [10] Rinaldi, A. Hendri, and A. Junaidi, 2015, Model fisik kincir air sebagai pembangkit listrik, J. Online Mhs. Fak. Tek. Univ. Riau, vol. 1, no. 2, pp. 1–9.
- [11] K. Jamlay, L. Sule, and D. Hasan, 2016, Perancangan roda air arus bawah sudu bengkok sebagai pembangkit listrik tenaga picohydro di Desa Tamangil, J. Tek. Mesin Inst. Teknol. Padang, vol. 6, no. 1, pp. 32–37.
- [12] N. F. Yah, I. M. Sahat, and A. N. Oumer, 2016, Numerical investigation on effect of immersed blade depth on the performance of undershot water turbines, in MATEC Web of Conferences, vol. 74, pp. 5–9.
- [13] K. Jamlay, L. Sule, and D. Hasan, 2016, Analisis perilaku aliran terhadap kinerja roda air arus bawah untuk pembangkit listrik skala pikohidro, Din. Tek. Mesin, vol. 6, no. 1, pp. 51–59.
- [14] N. Zengin, F. Aslan, T. C. Artunç, M. E. Aktan, and Ö. F. Güney, 2016, Design of hydrokinetic energy generation system, CBU Int. Conf. Proc. vol. 4, no. September, pp. 857–863.
- [15] A. K. Dutta, B. Shrestha, J. Shahi, and V. K. Chaudhary, 2016 , Re-design and optimization of traditional undershot wheel using high density polyethylene (HDPE) blades, in Proceedings of the International Symposium on Current Research in Hydraulic Turbines.
- [16] Nishi et al., 2015, Study on an undershot Cross Flow Water Turbine with Straight Blades, International Journal of Rotating Machinery, 1-10.
- [17] Senior et al., 2008, The Rotary Hydraulic Pressure Machine for Very Low Head Hydropower Sites, hidroenergia Conference, 1-8.
- [18] Munson et al., 2002, Fundamentals of Fluid Mechanics Fourth Edition, Hoboken, Jhon Wiley and Sons, Inc.

- [19] Yusri, Zamri, A., & Ahmed, 2004, Analisis Daya dan Putaran Kincir Air Tradisional Sebagai Alternatif Sumber Daya Penggerak, Jurnal Teknik Mesin, 1-4.
- [20] Arifianto, Satrio A., 2018, Analisis Jumlah Sudu dan Kecepatan Aliran Masuk Pada Turbin Pihidro Roda Air Langkah Tengah, Universitas Indonesia.