

# Performance of pico-scale turgo turbine bucket using coconut shells spoons with variations inlet angle and nozzle distance to hydraulic efficiency

Muhammad Faridz Athaya, Warjito, Budiarmo, Ridho Irwansyah, Muhamad Agil Fadhel, Muhammad Mizan

Fakultas Teknik Mesin, Universitas Indonesia  
Jl. Margonda Raya, Pondok Cina, Kec. Beji, Kota Depok, Jawa Barat, 16424  
Email korespondensi: muhammad.mizan81@ui.ac.id

## Abstrak

Konferensi Perubahan Iklim (COP26) oleh The United Nations memiliki agenda utama, yakni mengevaluasi COP21, di mana target utama dari COP21 adalah untuk menjaga perubahan suhu global di bawah 2 derajat Celsius (MoEF, 2021). Indonesia telah berkomitmen untuk emisis zero carbon pada 2060, dan target dari energi terbarukan pada 2025 adalah 23%. Potensi energi terbarukan yang dimiliki oleh Indonesia adalah 443 GW [13], tetapi tidak semua energi terbarukan dapat digunakan di beberapa daerah yang memiliki permasalahan pada medan. Turbin picohydro merupakan pilihan yang cocok, karena turbin tersebut memiliki suplai yang konstan, dapat diletakkan di waduk dan sungai, dan juga tidak bergantung pada cuaca. Di antara jenis dari picohydro, Turbin Turgo adalah turbin yang cocok untuk dipilih, karena memiliki konstruksi dan perawatan yang ekonomis, dan dapat didukung oleh aliran yang rendah. Kajian ini bertujuan untuk menentukan dampak dari perubahan pada sudut inlet dan jarak nozzle pada efisiensi hidraulik dari turbin turgo dengan bilah tempurung kelapa. Variasi pada sudut inlet ditentukan pada 10°, 20°, 30° dan variasi jarak yakni 100 mm, 150 mm, 200 mm. Berdasarkan hasil yang didapatkan dari kajian ini, dapat disimpulkan bahwa efisiensi hidraulik terbesar adalah pada variasi sudut inlet di 10° dengan jarak nozzle sebesar 100 mm, secara numerik yakni 49%, dan secara eksperimen adalah 41,8%.

**Kata kunci:** sudut inlet, jarak nozzle, turbin turgo, picohydro.

## Abstract

The United Nations Climate Change Conference of the Parties (COP26) has a main agenda, namely evaluating COP21, where the main target of COP21 is to maintain global temperature changes below 2 degrees Celsius (MoEF, 2021). Indonesia itself is committed to zero carbon emissions by 2060, and the target of a renewable energy mix by 2025 is 23%. Indonesia's own renewable energy potential is 443 GW [13], but not all renewable energy can be used in some areas that have terrain problems. Picohydro turbines are suitable for choice, because these turbines have a relatively constant supply, can be placed in reservoirs and rivers, and are also not dependent on weather. Among several types of picohydro, the Turgo Turbine is a suitable turbine to choose, because it has cheap construction and maintenance costs, and only requires a low head. This study aims to determine the effect of changes in the inlet angle and nozzle distance on the hydraulic efficiency of turgo turbines with coconut shell blades. Variations in the entry angle are carried out, namely 10°, 20°, 30° and distance variations, namely 100 mm, 150 mm, 200 mm. Based on the results of the study, it can be concluded that the greatest hydraulic efficiency is at a variation in the entry angle of 10° with a nozzle distance of 100 mm, that is, numerically by 49%, and experimentally by 41.8%.

**Keywords:** Inlet angle, nozzle distance, turgo turbine, picohydro.

## 1. Pendahuluan

Pertemuan konferensi iklim terbesar di dunia, COP26 atau lebih dikenal sebagai konferensi ke-26 dari partai-partai yang dihadiri oleh 197 negara berhasil diselenggarakan di Glasgow, Skotlandia dari 31 Oktober ke 12 November 2021 dengan perjanjian untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, mendorong peningkatan produksi energi terbarukan, pertahankan perubahan suhu global di bawah 2°C, atau maksimum 1,5°C pada 2030, dan komitmen untuk berkontribusi miliaran dolar untuk dampak perubahan iklim yang dihadapi oleh negara-negara miskin. Sektor daya menyumbang untuk hampir 1/4 (seperempat) emisi global, sehingga dekarbonisasi pembangkit listrik menempati posisi utama dalam upaya untuk berurusan

dengan perubahan iklim global. Indonesia berkomitmen untuk membuat upaya untuk bebas dari emisi karbon pada tahun 2060, yang menargetkan fase dari batu bara diganti oleh NRE pada tahun 2056, di mana pemerintah menargetkan energi terbarukan di 2025 sebesar 23% dan di 2050 sebesar 31% [1].

Potensi energi terbarukan Indonesia untuk listrik mencapai 443 GW, termasuk geotermal, air, dan mikrohidro mini, bioenergi matahari, angin, dan gelombang laut [2]. Berdasarkan Tabel 1, air & mikrohidro adalah jenis sumber daya yang ditargetkan untuk perkembangan terbesar kedua setelah energi matahari, di mana pada tahun 2025 itu akan menjadi 20.960 MW dan 45.379 MW pada tahun 2050 [3].

**Tabel 1.** Target pengembangan NRE [13,14].

Jenis sumber daya	Target 2025 (MW)	Target 2050 (MW)
Panas bumi	7,241	17,546
Air & Mikrohidro	20,960	45,379
Bioenergi	5,532	26,123
Matahari	6,379	45,000
Angin	1,807	28,607
Lainnya	3,128	6,383

Dengan target besar dan potensi, jenis energi air ini dapat membantu mempercepat peningkatan campuran energi nasional. Namun, untuk mencapai daerah terpencil, turbin dengan skala kecil diperlukan untuk dipasang pada sungai-sungai listrik kecil. Turbin *picohydro* adalah turbin dengan daya kurang dari 5 kW, sehingga cocok untuk sungai-sungai berdaya kecil [4].

Jenis turbin *picohydro* dibagi menjadi dua, turbin reaksi dan turbin impuls. *Picohydro* dengan ketinggian air *drop* rendah biasanya menggunakan jenis turbin reaksi seperti turbin *propeller*/turbin *flume* terbuka, turbin *caplan* dan impuls seperti turbin *crossflow* [5]. Turbin berikutnya untuk air menengah-jatuh lebih direkomendasikan untuk turbin impuls seperti turbin *crossflow*, *Pelton Multijet* dan turgo serta turbin reaksi seperti turbin *Francis*. Terakhir untuk turbin untuk ketinggian air *drop* tinggi direkomendasikan untuk turbin impuls seperti turgo dan turbin *Pelton*. Salah satu turbin impuls yang direkomendasikan untuk aplikasi *picohydro* di daerah terpencil adalah turbin turgo [11]. Hal ini disebabkan oleh biaya konstruksi yang rendah, kemudahan pemeliharaan dan turbin turgo dapat bekerja pada variasi kepala besar, yang berkisar dari 15 hingga 500 m [6].

Untuk mengurangi biaya pembangunan turbin turgo, penggunaan bahan-bahan lokal sebagai bahan baku untuk pisau turbin turgo telah dilakukan dalam beberapa studi turbin turgo, yang bertujuan untuk mengurangi biaya pemeliharaan dan bahan lebih mudah ditemukan di daerah terpencil. Telah dijelaskan bahwa hasil dari tes tekanan statis menggunakan metode tes marshall pada dua contoh pisau dengan material tempurung kelapa bahwa rata-rata kekompresan statis bahan tempurung kelapa adalah  $19,023 \pm 3,9$  MPa dan  $19,014 \pm 5,1$  MPa [7]. Oleh karena itu, tempurung kelapa adalah salah satu pilihan yang dapat digunakan karena tempurung kelapa mudah ditemukan, memiliki nilai tes kompresif statis besar dan juga bentuk tempurung

kelapa itu sendiri dapat digunakan sebagai pisau turgo turbin *runner* [8-10].

Selain seleksi material, efisiensi turbin turgo adalah hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Studi untuk meningkatkan efisiensi turbin turgo telah dilakukan secara luas, di mana salah satu pengaruh terbesar dalam meningkatkan efisiensi turbin turgo berasal dari sudut inlet relatif turbin turgo serta kecepatan air dari *nozzle*. Pengaruh kepala dan sudut inlet relatif terhadap efisiensi turbin turgo, di mana sudut inlet relatif paling ideal adalah  $10^\circ$  dengan kepala 3,5 m yang menghasilkan efisiensi 91% [2]. Pengaruh sudut inlet relatif dan rasio kecepatan untuk efisiensi turbin turgo, di mana ditemukan bahwa efisiensi tertinggi diperoleh ketika sudut inlet relatif adalah pada sudut  $20^\circ$  dan dengan rasio kecepatan  $x = 0,53$  [11,12]. Namun, tidak ada yang telah mempelajari lebih dalam pengaruh sudut inlet relatif dan jarak *nozzle* pada efisiensi turbin turgo, sehingga kajian ini bertujuan untuk mengetahui efek dari perubahan sudut inlet dan jarak *nozzle* pada efisiensi hidrolik turbin turgo dengan pisau kulit kelapa.

## 2. Metode

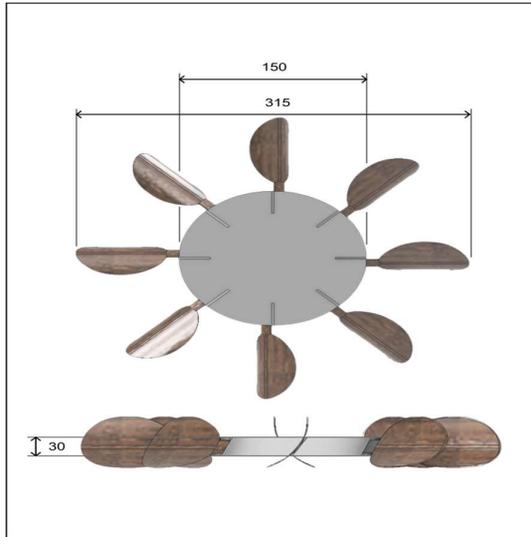
### Spesifikasi & Parameter Model

Kajian ini membahas ke panjang, lebar, dan persyaratan kedalaman yang terdapat dalam standar tempurung kelapa [3]. Karena turbin turgo memiliki dua fase, yaitu udara dan air, keadaan sekitarnya adalah udara, dan apabila *nozzle* menyembrotkan air, dengan menerapkan keadaan transien dan model turbulensi k, CFD berhubungan dengan persamaan volume cairan. Menurut Tabel 1, terdapat sejumlah kondisi yang digunakan dalam simulasi CFD menggunakan software ANSYS Fluent.

**Tabel 2.** Kondisi batas dari simulasi model turbin turgo.

Kondisi batas	Nilai
<i>Inlet Velocity</i>	8,08 m/s
<i>Outlet Pressure</i>	0 Pa
<i>The Density of Fluid</i>	998,2 kg/m <sup>3</sup>
<i>Convergence Absolute</i>	1.00 E-5
<i>Phases</i>	Water and Air

Turgo turbin yang digunakan dalam kajian ini memiliki diameter luar sebesar 315 mm, diameter dalam sebesar 150 mm, dan ketebalan sebesar 30 mm. Gambar 2 menunjukkan dimensi turbin turgo. Tabel 3 di bawah ini menunjukkan variasi dan beberapa parameter tambahan.



Gambar 1. Dimensi bilah dan runner.

Tabel 3. Nilai parameter dari simulasi model turbin turgo.

Parameter	Dimensi
Head, $H$	3.5 m
Distance between Nozzle and Spoon	100, 150, 200 mm
Diameter Nozzle	8, 10, 12 mm
Spoon, $Z$	8
Inlet Angle	10°, 20°, 30°

#### Simulation Set-up

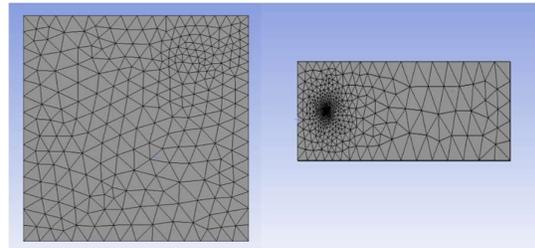
Tabel 4. Pengaturan.

Parameter	Dimension
Solver Type	Pressure-Based
Turbulence Model	$k$ - $\omega$
Solver Time	Transient
Material Fluid	Water Liquid

Dalam kajian ini, cairan adalah air yang dianggap tidak terkompresi, sehingga jenis pelarut yang dipilih adalah berbasis tekanan. Setelah simulasi dilakukan pada kondisi transisi, Dan model *turbulent* yang digunakan adalah  $k$ - $\omega$ . Ini karena  $k$ - $\omega$  adalah model yang secara numerik lebih stabil, terutama dalam angka Reynold yang rendah, sehingga solusi konvergensi lebih cepat dari model  $k$ - $\epsilon$ . Selain itu, model ini cocok untuk digunakan untuk menganalisis aliran dekat dinding/pipa.

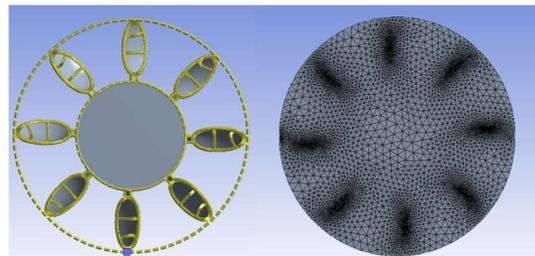
#### Meshing

Dalam kajian ini, menggunakan metode tetrahedron pada semua bagian dengan pertimbangan bahwa metode tetrahedron lebih adaptif untuk menyesuaikan bentuk alat kerja secara ekstrim atau memiliki radius relatif kecil dibandingkan dengan ukuran *mesh*. Meskipun tetrahedron lebih adaptif, *mesh* ini membutuhkan waktu konvergensi lebih lama karena memiliki jumlah *mesh* lebih banyak dari jenis *mesh* lainnya [9].



Gambar 2. Hasil metode meshing tetrahedron.

Berikutnya, metode ukuran tepi digunakan pada bagian pisau dan *runner*. *Edge sizing* adalah salah satu metode ukuran dalam ANSYS yang bertujuan untuk dapat mendistribusikan jumlah *mesh* sepanjang sudut-sudut dari *workpiece*. Penggunaan *edge sizing* dalam *meshing* ini adalah karena setiap keliling pisau dan *runner* memiliki kualitas *mesh* buruk yang dapat mempengaruhi *skewness*. Di daerah yang digunakan oleh ukuran tepi, ukuran *mesh* jauh lebih kecil dibandingkan dengan *mesh* di daerah lain yang bertujuan untuk kualitas *mesh* di tepi untuk tetap baik dan memiliki miring yang baik.



Gambar 3. Hasil metode meshing edge sizing pada bilah dan runner.

Berdasarkan proses *meshing* yang telah dilakukan, kecenderungan rata-rata dari *workpiece* adalah 0,23412 dan kecenderungan maksimal dari *workpiece* adalah 0,9=87888.

#### Grid Convergence Study

Tes independen *grid* harus dilakukan sebelum menetapkan ukuran dan kuantitas *mesh* yang akan digunakan untuk semua kondisi. Dengan sedikitnya jumlah *mesh* diperlukan dan tanpa secara signifikan mengubah hasil numerik, tes ini berusaha untuk mengidentifikasi kondisi *mesh* ideal. Pendekatan ekstrapolasi Richardson, yang saat ini adalah metode yang paling dapat diandalkan, biasanya digunakan dalam tes ini. Untuk menentukan nilai dari sebuah

variabel dalam nilai ukuran *mesh* dengan kisi nol, digunakan pada ekstrapolasi Richardson ini. Dibutuhkan setidaknya dua ukuran *mesh* yang berbeda untuk mendapatkan nilai ini. Langkah waktu menurun kisi disempurnakan dengan memiliki sel *grid* yang lebih kecil, yang meningkatkan jumlah sel di domain aliran. Tidak termasuk kesalahan pembulatan komputer, kesalahan diskretisasi temporal dan spasial harus secara simptomik mendekati nol.

Pertama, sel representatif, *mesh*, atau ukuran *grid* ditentukan dengan menghitung rasio perbaikan *grid* dengan Persamaan 1 berikut.

$$r = \left( \frac{N_{fine}}{N_{coarse}} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (1)$$

Nilai harus lebih besar dari 1,1 untuk menghilangkan eror diskretisasi dan dihilangkan dari sumber eror lainnya. *N* adalah angka *lattice points* yang digunakan untuk kisi, *d* adalah dimensi dari domain aliran. Selanjutnya, tiga *grid* yang berbeda signifikan diatur dan disimulasikan untuk menentukan nilai objektif. Pada kajian ini, nilai torsi dari bilah turbin didapatkan sebagai hasil dari analisis CFD. Aliran dihitung pada tiga *grid* dengan pengaturan *mesh* yang baik.

Setelah didapatkan  $r_{21}$  dan  $r_{32}$ , *p* dihitung dengan metode pada Persamaan 2 berikut.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \ln \left| \frac{\tau_3 - \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \right| \quad (2)$$

*Fine Grid Convergence Index* (GCI) dihitung menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4.

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 |(\tau_1 - \tau_2) / (\tau_1)|}{(r_{21}^p - 1)} \times 100\% \quad (3)$$

$$GCI_{fine}^{32} = \frac{1.25 |(\tau_2 - \tau_3) / (\tau_2)|}{(r_{32}^p - 1)} \times 100\% \quad (4)$$

Pada kajian tes independen *mesh*, variasi *mesh* digunakan adalah elemen 1878499, 2664537, dan 3756998. Hasil dari tes independen *mesh* ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil perhitungan dari *Grid Convergence Independency*, nilai *mesh* yang cocok adalah 3756998, dengan eror sebesar 0,9%. Oleh karena itu, hasil simulasi adalah independen dan nilai *mesh* adalah 3756998 dianggap cocok untuk digunakan pada simulasi.

**Tabel. 5.** Hasil kajian grid convergence.

<i>Mesh</i>	<i>Normalized Grid Spacing</i>	Torsi	GCI (%)
2878499	2,00	0,82567	3,9
3222998	1,41	0,88124	1,2
3756998	1,00	0,90261	0,9

Pada *VoF* (Volume fluida), persamaan momentum tunggal diselesaikan di domain, laju dibagi oleh fase. Berdasarkan fraksi volume dari semua fase yang melalui kepadatan campuran dan viskositas, persamaan momentum ditunjukkan pada Persamaan 5 berikut.

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho \cdot \underline{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \underline{v} \cdot \underline{v}) = -\nabla p + \nabla [\mu(\nabla \underline{v} + \nabla \underline{v}^T)] + \rho \cdot \underline{g} + \underline{F} \quad (5)$$

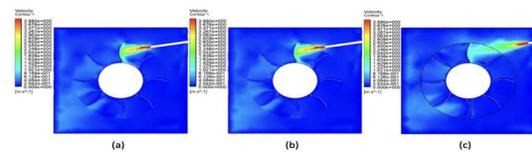
Untuk menggabungkan ketegangan permukaan ke dalam perhitungan model *VoF*, istilah sumber ditambahkan ke persamaan momentum. Jika hanya ada dua fase dalam sel, istilah sumber dapat dinyatakan sebagai persamaan kekuatan volume dan dapat ditulis sebagai Persamaan 6 berikut.

$$F_{voj} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \cdot \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (6)$$

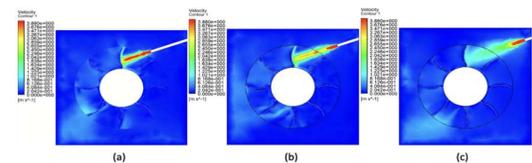
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### *Visualisasi Aliran pada Turbin Turgo*

Pada studi numerikal, simulasi dilakukan sebanyak 9 kali dengan memvariasikan sudut inlet *nozzle*, yakni 10°, 20°, dan 30° juga memvariasikan jarak *nozzle*, yakni 100 mm, 150 mm, dan 200 mm. Pada visualisasi aliran, kontur kecepatan diatur pada 0-4 m/s. di mana warna merah menunjukkan kecepatan aliran sebesar 4 m/s dan warna biru menunjukkan kecepatan aliran sebesar 0 m/s pada Gambar 4 berikut.



**Gambar 4.** Kontur kecepatan aliran variasi nozzle 10°.



**Gambar 5.** Kontur kecepatan aliran variasi nozzle 20°.

Gambar 4 menunjukkan sudut inlet pada 10° dengan variasi jarak *nozzle* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm, dapat dilihat bahwa jarak *nozzle* sebesar 100 mm, percikan cairan pada kecepatan tinggi hingga menyentuh bilah, di mana dapat dilihat pada kontur warna merah dari ujung akhir *nozzle* hingga menyentuh bilah. Perbedaan jarak *nozzle* 150 mm dan 200 mm, di mana kecepatan dari fluida berkurang dan sinar melebar, di mana membuat fluida menyentuh bilah secara tidak optimal. Dapat dilihat dari warna kontur yang berubah dari merah ketika keluar dari

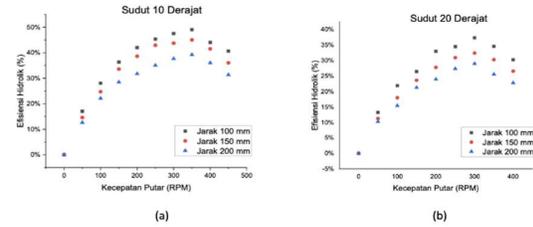
*nozzle* menjadi hijau ke biru cerah ketika menyentuh bilah dan aliran melebar. Dapat dilihat juga dampak dari sudut inlet, di mana pada sudut inlet sebesar  $10^\circ$ , percikan fluida menyebar ke semua bagian dari bilah, sehingga impuls diterima oleh bilah menjadi maksimal.

Gambar 5 menunjukkan sudut inlet sebesar  $20^\circ$  dengan variasi jarak *nozzle* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm, pada jarak *nozzle* sebesar 100 mm, percikan fluida pada kecepatan tinggi dari *nozzle* hingga menyentuh bilah. Namun, distribusi fluida pada bilah lebih buruk jika dibandingkan dengan sudut  $10^\circ$ . Dapat dilihat bahwa dampak dari sudut inlet, di mana pada sudut  $20^\circ$ , percikan fluida tidak terdistribusi secara merata pada bilah, di mana percikan fluida tertuju pada dasar bilah. Hal tersebut menyebabkan bilah tidak terdorong dengan baik. Kemudian dampak dari jarak *nozzle*, sama seperti sudut  $10^\circ$ , di mana semakin besar jarak, maka semakin rendah kecepatan aliran fluida yang akan menyentuh bilah.

Sudut inlet sebesar  $30^\circ$  dengan variasi jarak *nozzle* sebesar 100 mm, 150 mm, dan 200 mm, dapat dilihat bahwa jarak *nozzle* sebesar 100 mm, percikan fluida pada kecepatan tinggi dari *nozzle* menyentuh bilah, tetapi distribusi fluida pada bilah dinilai lebih buruk dibandingkan dua lainnya. Dapat dilihat dampak dari sudut inlet, di mana pada sudut inlet  $30^\circ$ , percikan fluida sangat kecil yang diterima oleh bilah, di mana percikan fluida tertuju pada bagian dasar bilah. Hal tersebut menyebabkan bilah tidak terdorong dengan baik. Selanjutnya pada perubahan jarak, seperti sudut  $10^\circ$  dan  $20^\circ$ , di mana semakin jauh jarak, maka semakin rendah aliran fluida yang akan menyentuh bilah.

#### **Dampak Sudut Inlet dan Jarak Nozzle pada Efisiensi Hidraulik**

Gambar 6 menunjukkan hasil dari simulasi untuk variasi sudut inlet  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  sesuai dengan jarak *nozzle* 100, 150, dan 200 mm, di mana Gambar 7 menunjukkan rasio di antara kecepatan putar (RPM) dan efisiensi hidraulik dari turbin turgo. Dari ketiga gambar, dapat dilihat bahwa efisiensi hidraulik terbesar didapatkan dari variasi sudut inlet  $10^\circ$  dengan jarak *nozzle* 100 mm, di mana terdapat perbedaan 49% dengan 12,9% dari hasil metode analisis yang dilakukan, yakni 61,9%. Efisiensi hidraulik paling rendah didapatkan oleh sudut inlet  $30^\circ$  dan jarak *nozzle* 200 mm yakni sebesar 14,2%. Dapat dilihat dampak dari variasi sudut inlet dan jarak *nozzle*, di mana semakin tinggi sudut inlet *nozzle*, maka semakin rendah efisiensi hidraulik, sama halnya bahwa semakin jauh jarak *nozzle*, maka hidraulik efisiensi juga akan semakin rendah.



**Gambar 6.** Hasil simulasi variasi sudut inlet dengan jarak *nozzle* pada efisiensi hidraulik.

#### **4. Kesimpulan**

Berdasarkan semua hasil dari kajian turbin turgo yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi efisiensi hidraulik dari turbin turgo yang didapatkan dengan variasi sudut  $10^\circ$  dan jarak *nozzle* 100 mm sebesar 49,0%. Perbedaan sudut dan jarak memiliki dampak pada efisiensi turbin turgo, di mana semakin tinggi sudut inlet, maka semakin rendah efisiensi hidraulik. Serupa dengan jarak, di mana jika jarak *nozzle* semakin tinggi, maka efisiensi hidraulik akan semakin rendah.

#### **Ucapan Terima Kasih**

Kajian ini telah didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dengan pendanaan No: NKB-215/UN2.RST/HKP.05.00/2021.

#### **Daftar Pustaka**

- [1]. Pribadi, A. (2021). Capaian Kinerja Ketenagalistrikan 2020, Rasio Elektrifikasi Capai 99,20%. Ministry of Energy and Mineral Resources. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/capaian-kinerja-ketenagalistrikan-2020-rasio-elektrifikasi-capai-9920>
- [2]. Williamson, S. J., Stark, B. H., Booker, J. D. (2012). Experimental Optimisation of a Low-Head Pico Hydro Turgo Turbine. IEEE ICSET.
- [3]. Adanta, D., Warjito, Febriansyah, D., & Budiarmo. (2020). Feasibility analysis of a pico-scale turgo turbine bucket using coconut shell spoons for electricity generation in remote areas in Indonesia. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 69(1), 85–97. <https://doi.org/10.37934/ARFMTS.69.1.8597>
- [4]. Benzon, D. S., Aggidis, G. A., & Anagnostopoulos, J. S. (2016). Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present. Applied Energy, 166, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.091>
- [5]. Warjito, Budiarmo, Siswanto, A. I., Adanta, D., Kamal, M., & Dianofitra, R. (2017). Simple bucket curvature for designing a low-head Turgo turbine for pico hydro application. International Journal of Technology, 8(7),

- 1239–1247.  
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.767>
- [6]. Budiarmo, Warjito, Naufal Lubis, M., & Adanta, D. (2019). Performance of a low cost spoon-based turgo turbine for pico hydro installation. *Energy Procedia*, 156(September 2018), 447–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.087>
- [7]. Ei, H. H., & Soe, M. M. (2018). Flow Analysis of Turgo Impulse Turbine for Low Head Power Plant. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 8(8), 314–323.  
<https://doi.org/10.29322/ijsrp.8.8.2018.p8037>
- [8]. Soe, M. M., War, W. A. R., Swe, M. I. N., Thu, A. M., & Latt, A. K. O. (2019). Effect of Jet Angle on the Performance of a Turgo Turbine. *2(12)*, 203–207.
- [9]. Wiratama, C. (2021). *Teori dan Best Practices Computational Fluid Dynamics*. AE Publisher.
- [10]. Gallego, E., Rubio-Clemente, A., Pineda, J., Velásquez, L., & Chica, E. (2021). Experimental analysis on the performance of a pico-hydro Turgo turbine. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(4), 266–275.  
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.011>
- [11]. Cobb, B. R., Sharp, K. V. (2013). Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable Energy*, 50, 959–964.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.049>
- [12]. Phillips, Tyrone S., C. J. R. (2014). Richardson Extrapolation-based Discretization Uncertainty Estimation for Computational Fluid Dynamics. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 136.
- [13]. DEN. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019*.
- [14]. IESR. (2019). *Indonesia Clean Energy Outlook*.