

# INVESTIGASI EFEK SOLIDITAS *RUNNER* TERHADAP PERFORMA TURBIN *CROSSFLOW*

Abdul Muis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas Tadulako

[amuis19@gmail.com](mailto:amuis19@gmail.com)

[abdul.muis@untad.ac.id](mailto:abdul.muis@untad.ac.id)

**Abstrak**— Turbin *Crossflow* adalah salah satu pembangkit tenaga air yang sangat populer digunakan untuk mengubah potensi tenaga air menjadi energi listrik. Turbin ini menawarkan banyak keunggulan terutama kesederhanaan desain, andal dalam performa serta dapat diaplikasikan untuk aliran air head rendah. Penelitian ini menginvestigasi efek soliditas *runner* turbin *crossflow* terhadap performa yang dihasilkan. Turbin *crossflow* yang direncanakan akan beroperasi pada head tiga meter dengan laju aliran volume 41,55-liter dan putaran *runner* 300 rpm. Desain *runner* turbin dibuat sederhana dari sudu yang difabrikasi dengan memanfaatkan pipa berukuran empat inch sehingga mudah diperoleh dan terutama sederhana dalam proses manufaktur dan perbaikan. Variasi soliditas *runner* diperoleh dari variasi jumlah sudu yang digunakan oleh *runner*. Investigasi ini menggunakan *runner* dengan jumlah sudu 15, 20, 25, 30 dan 33 buah yang merepresentasikan soliditas 11,7%, 14,6%, 17,5% dan 19,2%. Hasil investigasi memperlihatkan bahwasanya dengan *runner* yang dibentuk dari kumpulan sudu yang dihasilkan dari pipa empat inch yang beroperasi pada kondisi yang direncanakan, memberikan performa maksimum dengan efisiensi 81,42% pada soliditas 17,5% atau 30 buah jumlah sudu.

**Kata Kunci**— *Crossflow*; *low head*; soliditas *runner*, turbin air.

**Abstract**— The *crossflow* turbine is a popular type of hydropower generator used to convert water energy into electricity. It offers several advantages, including a simple design, reliable performance, and suitability for low-head water flows. This study investigates the effect of runner solidity on the performance of a *crossflow* turbine. The designed turbine will operate at a three-meter head with a flow rate of 41.55 liters and a runner speed of 300 rpm. The runner design is straightforward, using blades made from four-inch pipes for easy availability and simple manufacturing and repair processes. Variations in runner solidity are achieved by adjusting the number of blades. The investigation uses runners with 15, 20, 25, 30, and 33 blades, representing solidities of 11.7%, 14.6%, 17.5%, and 19.2%, respectively. The results show that the runner developed from a set of blades produced by four-inch pipes, operating under the designed conditions, achieves maximum performance with an efficiency of 81.42% at a solidity of 17.5%, or 30 blades.

**Keywords**— *Crossflow*; *low-head*; *runner* solidity; hydraulic turbine.

## PENDAHULUAN

Pengembangan dan penggunaan potensi energi yang dimiliki oleh air telah berlangsung sangat lama yang dimulai dari pemanfaatan pompa ulir Archimedes (287 – 212 S.M.) yang merupakan awal dari pemanfaatan mesin fluida sederhana, yang kemudian meningkat dengan diperkenalkannya turbin air modern oleh Benoit Fourneyron (1802-1867) yang berhasil mengembangkan turbin air tipe free-efflux [1]. Pengembangan ini membuat pemanfaatan potensi tenaga air menjadi vital sebagai pembangkit tenaga listrik hingga dewasa ini. Jika dikelompokkan berdasarkan head operasi dari turbin air umumnya dibagi dalam empat kategori yakni turbin head tinggi; lebih dari 100 meter, menengah; 30 hingga 100 meter dan rendah; 2,5 hingga 30 meter serta sangat rendah; kurang dari 2,5 meter [2], [3].

Turbin air *crossflow* umumnya dapat dioperasikan pada head sangat rendah hingga menengah, sehingga memiliki fleksibilitas tinggi dalam pemanfaatannya. Keandalan dan kesederhanaan dalam desain juga menjadi nilai lebih yang membuat jenis turbin ini sangat populer di masyarakat. Hal ini

pula yang mendorong banyak peneliti untuk terus berusaha melakukan inovasi dan penyempurnaan untuk mencapai performa yang diharapkan.

Oleh beberapa peneliti, pengaruh jumlah sudu *runner* pada turbin diketahui dapat sangat mempengaruhi performa, yang berimbang pada daya yang dihasilkan. Beberapa penelitian telah memberikan kesimpulan diantaranya akan disebutkan berikut.

Penelitian eksperimental [4] mengungkapkan bahwasanya peningkatan jumlah sudu dari 15 hingga 30 buah akan memberikan efek yang semakin baik pada performa turbin. Sudu turbin terbuat dari pipa akrilik dengan ketebalan 3,2 mm. Studi [5] membandingkan jumlah sudu 16, 20 dan 24 buah pada turbin *Crossflow*. Hasil eksperimental merekomendasikan turbin dengan 20 buah sudu memiliki performa yang lebih baik dari yang lainnya. Oleh [6] melakukan eksperimen pada turbin *Crossflow* dengan jumlah sudu 24, 26 dan 28 buah. Hasil investigasi yang diperoleh memperlihatkan bahwasanya ketiga turbin masing-masing unggul dalam performa pada pembebanan yang berbeda, sehingga tidak diperoleh jumlah sudu yang dominan diantara ketiganya. Studi dengan simulasi CFD [7] untuk menginvestigasi pengaruh variasi jumlah sudu 32, 36, 40, 44 dan 48 buah terhadap kinerja turbin *Crossflow*.

Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa *runner* dengan jumlah sudu 40 buah unggul dibandingkan yang lainnya. Hasil yang sama yang diperoleh [8] yang menginvestigasi variasi jumlah sudu 8, 12, 16, 20, 24, 32, 36, 40, 48 dan 52 pada turbin *Crossflow*. Beberapa hasil investigasi dirangkum [9] merekomendasikan jumlah sudu optimal yang berbeda, yakni jumlah sudu 15, 20, 22, 24, 25, 28, 30 dan 35.

Pengaruh jumlah sudu pada penelitian yang telah disebutkan, berkaitan erat dengan soliditas *runner* turbin, Soliditas *runner* ini dipengaruhi oleh diameter dan jumlah sudu serta ketebalan material sudu *runner*. Karenanya, meskipun jumlah sudu sama, namun dengan ketebalan material sudu dan atau diameter yang berbeda, akan menghasilkan soliditas *runner* turbin yang juga berbeda. Untuk itu, penelitian ini akan menggunakan soliditas *runner* selain jumlah sudu sebagai parameter pembeda dari desain turbin yang ingin diketahui performanya.

## METODE

Pada penelitian ini, investigasi dilakukan terhadap turbin dengan menggunakan studi numerik. Perangkat lunak CFD (Computational Fluid Dynamics) yang menggunakan solusi persamaan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Perangkat lunak ini telah menjadi pilihan yang menarik karena kemampuannya dalam memberikan hasil analisis dengan tingkat akurasi yang baik, sehingga mampu melengkapi penyelesaian matematika analitik serta eksperimen pada laboratorium dan di lapangan.

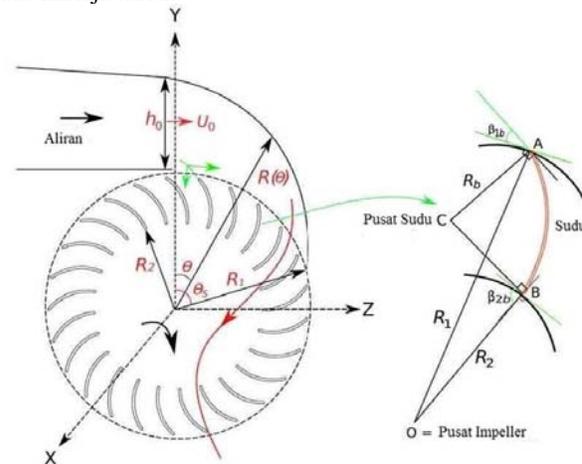
Ansys merupakan salah satu cara penyelesaian volume hingga (*finite volume solver*). Secara umum penyelesaian volume hingga menggunakan beberapa langkah berikut; pembentukan kisi, diskritisasi dan penyelesaian persamaan [10]. Untuk memperoleh hasil penyelesaian, domain volume hingga kemudian dibagi dalam volume kecil yang dikenal sebagai elemen. Ansys menggunakan kondisi batas dan kondisi awal yang telah ditetapkan oleh pengguna pada daerah volume hingga untuk menyelesaikan persamaan pengatur pada variabel aliran di dalam setiap elemen fluida. Persamaan pengatur tersebut adalah persamaan RANS.

Persamaan RANS merupakan transformasi dari persamaan Navier-Stokes, dengan asumsi solusi komponen fluktuasi dapat dipisahkan dari komponen rata-rata. Pemisahan variabel komponen rata-rata dan komponen fluktuasi dikenal sebagai penguraian Reynolds (Reynolds decomposition). Penggunaan persamaan RANS dan model turbulen mempermudah untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara numerik dengan menggunakan sistem komputasi yang ada. Penelitian ini akan menggunakan model turbulen  $k\omega$ -SST (*shear stress transport*) yang merupakan pengembangan dari model  $k\omega$  yang diusulkan oleh Wilcox [11]. Model  $k\omega$ -SST dikembangkan oleh Menter [12], yang menggabungkan formulasi model  $k\omega$  untuk daerah dekat dinding dan formulasi model  $k\epsilon$  untuk daerah yang jauh dari permukaan. Menurut Menter, model ini telah banyak digunakan, dan telah menjadi pilihan untuk studi numerik dan oleh Ansys Fluent [13] juga menyebutkan bahwasanya fitur model  $k\omega$ -SST lebih akurat dan terpercaya untuk berbagai kasus aliran dibandingkan dengan  $k\omega$  standar.

Turbin *Crossflow* terdiri dari dua bagian utama yaitu nosel dan sudu gerak. Nosel berfungsi untuk mengarahkan aliran

memasuki sudu gerak yang berfungsi untuk mengubah aliran air yang masuk menjadi daya. Sudu gerak memperoleh daya dari aliran dengan mengubah momentum sudut aliran yang bergerak melewati sudu. Perubahan energi berasal dari energi kinetik air yang masuk dan melewati sudu gerak atau *impeller* pada tekanan atmosfer. Pada tahap awal, aliran air akan melewati bagian pertama baris sudu *impeller* dan kemudian melewati daerah tengah, yang diakhiri dengan melewati bagian kedua *impeller* sebelum aliran air meninggalkan turbin.

Kedua bagian utama turbin *cross-flow* memiliki kontribusi besar terhadap kinerja yang dihasilkan, karenanya pengembangan desain akan fokus pada kedua bagian tersebut. Parameter desain yang menjadi pertimbangan dalam pengembangan desain turbin diperlihatkan dalam Gbr. 1. Parameter tersebut adalah leher nosel  $h_0$ , lebar nosel  $W$ , bentuk dinding belakang nosel  $R(\theta)$ , lengkungan sudu masuk nosel  $\theta_s$ , sudut aliran masuk *impeller*  $\alpha$ , sudut sudu luar  $\beta_{1b}$ , sudut sudu dalam  $\beta_{2b}$ , diameter luar  $D_1$ , diameter dalam  $D_2$ , radius sudu  $R_b$  dan jumlah sudu  $N_b$ . Parameter-parameter ini mengatur kondisi aliran sebelum dan sesudah *impeller* yang bermuara pada kinerja turbin.



Gbr. 1 Parameter desain turbin *Crossflow* [14]

Selain bagian utama (nosel dan *impeller*), turbin dilengkapi dengan komponen lain seperti penstock yang berfungsi meneruskan aliran air ke nosel, sudu pengarah untuk menyesuaikan kondisi aliran ke *impeller*, rumah turbin dan rangka dasar yang berfungsi sebagai penopang turbin *cross-flow*. Untuk menggerakkan generator, poros turbin biasanya dilengkapi dengan roda gila yang tersambung dengan puli generator melalui sabuk.

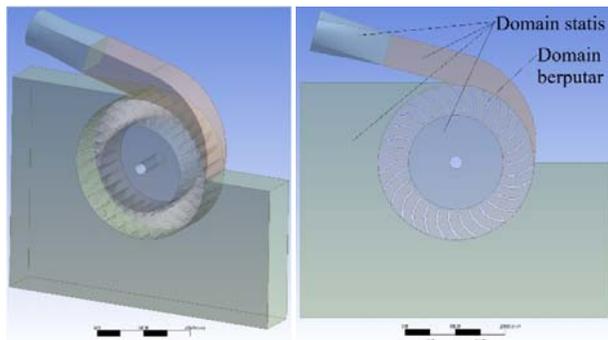
Pengembangan turbin *Crossflow* dilakukan dengan merujuk pada model analitik yang ditawarkan oleh Adhikari [14]. Analisis dua-dimensi tanpa memperhitungkan efek viskositas digunakan untuk mendesain nosel turbin, dimana aliran dibatasi dalam arah tangensial dan radial. Desain nosel turbin dioptimalkan untuk menkonversi keseluruhan head aliran menjadi energi kinetik tanpa menimbulkan separasi aliran pada sudu. Desain sudu *runner* dikembangkan agar aliran dari nosel bersesuaian dengan aliran masuk dari nosel menuju barisan sudu *runner* tahap pertama, untuk menghindari timbulnya separasi aliran dan kerugian kinerja turbin. Sudu *runner* juga

harus dapat mereduksi torsi balik saat aliran memasuki *runner* pada tahap kedua sebelum meninggalkan turbin.

Pengembangan model turbin menggunakan data head 3 meter dengan debit aliran 41.55 liter per detik dengan rencana putaran 300 rpm. Data ini disesuaikan dengan kondisi dimana turbin akan terpasang saat studi eksperimental dilakukan. Model ini menggunakan *impeller* dengan sudu yang terbuat dari pipa komersial 4 inch, sehingga akan memudahkan dalam mencari raw material serta fabrikasinya. Dengan pertimbangan beban karena head dan laju aliran serta efek korosi pada sudu, maka dipilih pipa PVC dengan ketebalan 4,1 mm sebagai bahan sudu. Parameter desain turbin diperlihatkan dalam Tabel I. Pengembangan model tiga-dimensi turbin berdasarkan pada parameter desain dan diperlihatkan pada Gbr. 2. Model turbin yang telah dibangun, kemudian akan diekspor dalam perangkat lunak CFD untuk keperluan studi numerik.

TABEL I  
PARAMETER DESAIN TURBIN

Parameter	Nilai
Leher nosel $h_0$	64 mm
Lebar nosel $W$	89 mm
Bentuk dinding belakang nosel $R(\theta)$	$151,72^\circ - 212,03^\circ$
Lengkungan sudut masuk nosel $\theta_s$	$90^\circ$
Sudut aliran masuk <i>impeller</i> $\alpha$	$15^\circ$
Sudut sudu luar $\beta_{1b}$	$39^\circ$
Sudut sudu dalam $\beta_{2b}$	$90^\circ$
Diameter luar $D_1$	304 mm
Diameter dalam $D_2$	198 mm
Radius sudu $R_b$	51 mm
Soliditas dan Jumlah sudu $N_b$	11,7% (20), 14,6% (25), 17,5% (30), 19,2% (33)



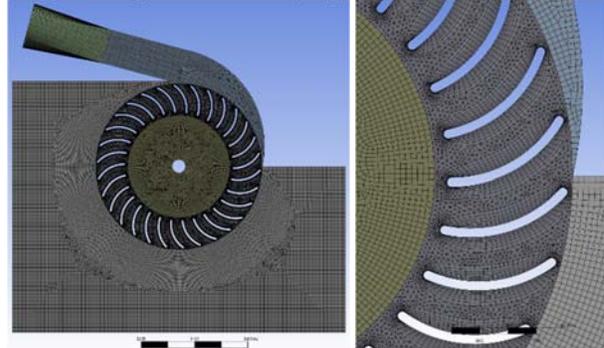
Gbr. 2 Model turbin *Crossflow*

## HASIL DAN DISKUSI

### Studi Numerik

Studi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD, Ansys CFX. Simulasi yang dilakukan menggunakan model 3D, dengan model viskos  $k\omega - SST$ , aliran dua-fasa free surface dengan steady RANS. Ada dua domain utama turbin, domain diam (statis) dan berputar dan memanfaatkan kombinasi bentuk mesh *hexahedral* dan *wedges* untuk pembentukan kisi, diperlihatkan dalam Gbr. 3.

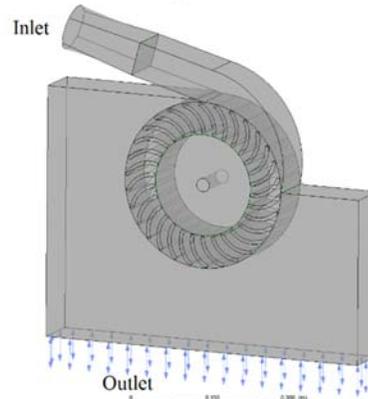
Total elemen mesh yang dikembangkan pada model adalah 6.871.936, dimana 5.495.872 pada domain yang berputar dan sisanya 1.376.064 elemen pada domain yang statis. Jumlah elemen mesh ini dipilih setelah test independensi pada berbagai ukuran mesh yang berhubungan erat dengan total elemen pada model. Dari beberapa pengetesan, pada jumlah elemen yang dipilih memberikan hasil yang identik dengan model yang menggunakan jumlah elemen yang lebih banyak.



Gbr. 3 Pengembangan mesh pada model turbin

Kondisi batas yang digunakan dalam pemodelan numerik ini adalah sebagai berikut:

- Pada sisi inlet, kecepatan air adalah 7.327 meter per detik sesuai dengan potensi aliran yang telah dipilih, fraksi volume dari udara dan air adalah 0 dan 1, serta intensitas turbulensi 5%.
- Pada sisi outlet, digunakan tipe terbuka (*opening*) dengan tekanan 1 atm dan fraksi volume dari udara dan air adalah 1 dan 0.
- Antarmuka antara bagian yang diam dan *runner* yang bergerak (*interface*) dipilih *frozen rotor*.
- Definisi *wall* diperuntukkan untuk sudu *runner* (*impeller*), rumah turbin dan dinding nosel.



Gbr. 4 Domain komputasi turbin *Crossflow*

### Hasil Analisis

Performa turbin *Crossflow* dapat diperoleh dari simulasi numerik, dimana perhitungan performa turbin merupakan perbandingan antara daya yang dibangkitkan oleh turbin dengan potensi daya yang diberikan oleh aliran fluida. Potensi daya aliran fluida  $P_W$  akan dihitung berdasarkan dengan persamaan berikut, [15].

$$P_w = Q \frac{(Pr_{in}-Pr_{out})}{\rho} \quad (1)$$

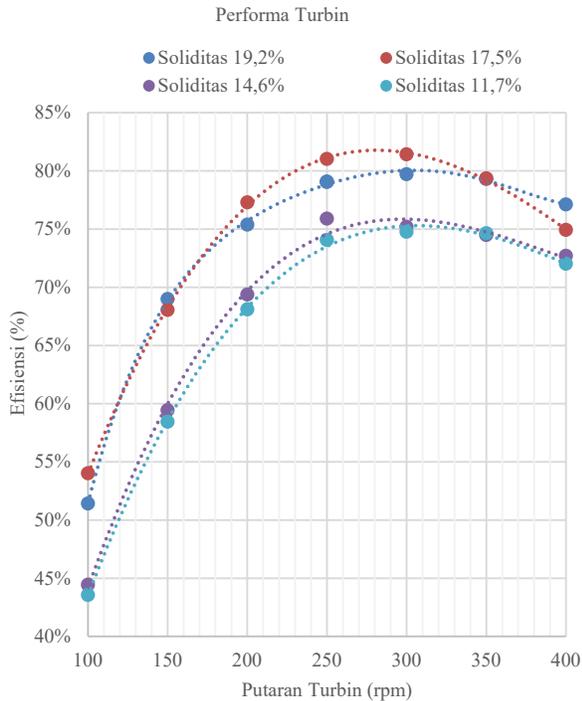
dimana  $Q$  adalah laju aliran massa,  $\rho$  adalah massa jenis air dan  $Pr_{in}$ ,  $Pr_{out}$  adalah tekanan pada sisi masuk dan sisi keluar turbin. Sedangkan daya yang dibangkitkan oleh turbin  $P_t$  dapat diperoleh berdasarkan dengan persamaan berikut:

$$P_t = T_{tot} \cdot \omega \quad (2)$$

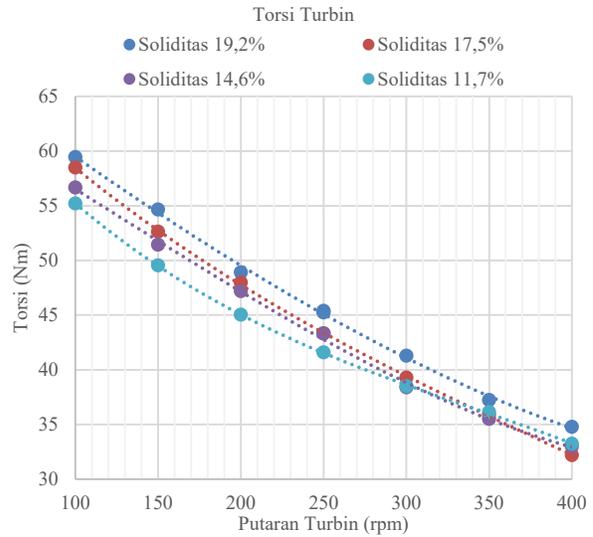
dimana  $T_{tot}$  adalah torsi yang dihasilkan oleh turbin dan  $\omega$  adalah putaran turbin. Efisiensi turbin  $\eta_T$  akan diperoleh dari:

$$\eta_T = \frac{P_w}{P_t} \quad (3)$$

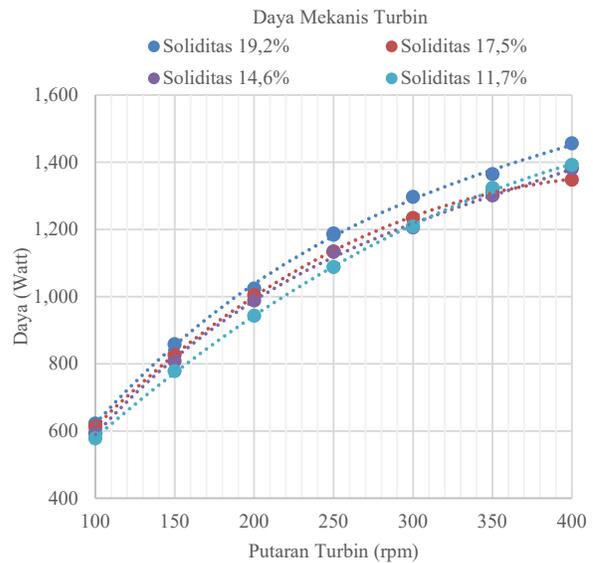
Hasil simulasi berbagai soliditas runner diperlihatkan dalam grafik pada Gbr. 5 untuk performa turbin dan Gbr. 6 untuk torsi runner serta Gbr. 7 untuk daya mekanis yang dihasilkan. Performa turbin dengan soliditas 17,5% atau jumlah sudu 30 buah terlihat dominan pada putaran desain 300 rpm dan pada berbagai skenario putaran lain di sekitar putaran tersebut. Selanjutnya, tingkatan performa tersebut secara berurut diikuti oleh turbin dengan soliditas 19,2%, 14,6% dan 11,7%. Torsi dan daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin memiliki kecenderungan berbanding lurus dengan soliditas turbin. Tabel II, memperlihatkan performa dan daya yang dibangkitkan turbin pada putaran desain 300 rpm.



Gbr. 5 Performa turbin Crossflow



Gbr.6 Torsi yang dihasilkan oleh runner turbin Crossflow



Gbr. 7 Daya mekanis yang dibangkitkan turbin Crossflow

TABEL II  
PERFORMA DAN DAYA TURBIN PADA ROTASI 300 RPM

Soliditas	Jumlah Sudu	Efisiensi	Daya
11,7%	20	74,76%	1208,61 W
14,6%	25	75,19%	1205,77 W
17,5%	30	81,42%	1233,85 W
19,2%	33	79,70%	1296,46 W

Perhitungan daya dan efisiensi turbin dengan menggunakan persamaan 1 hingga 3. Sebagai contoh untuk turbin dengan soliditas 17,5%, pada putaran 300 rpm dengan kecepatan aliran air 7,327 m/s dimana massa jenis air 997 kg/m<sup>3</sup>, hasil simulasi yang diperoleh sebagai berikut:

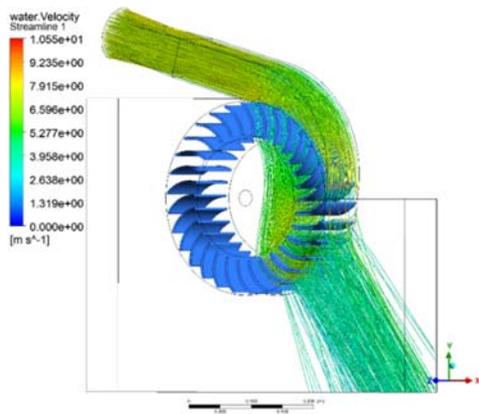
- Laju aliran massa air = 41,4291 kg/s
- Torsi runner = 39,2822 Nm
- Tekanan inlet = 43904,1 Pa

- Tekanan outlet = 7434,46 Pa.

Dari hasil tersebut akan diperoleh:

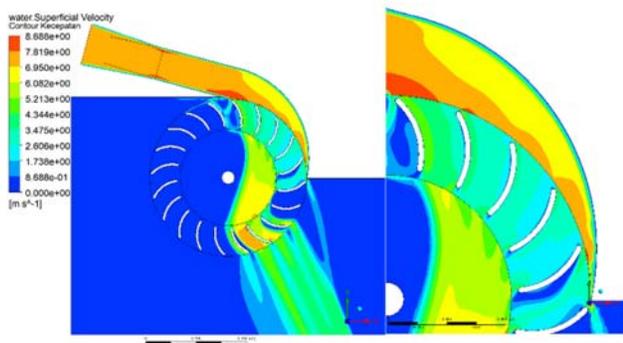
- $P_t = T_{tot} \cdot \omega = T_{tot} \cdot 2\pi n$   
 $= 39,2822 * 2 * 3,141 \left(\frac{300}{60}\right) = 1233,85 W$
- $P_w = Q \frac{(P_{rin} - P_{rou})}{\rho}$   
 $= 41,4291 * \left(\frac{43904,1 - 7434,46}{997}\right) = 1515,45 W$
- $\eta_T = \frac{P_w}{P_t} = \frac{1233,85}{1515,45} = 81,42\%$

Kondisi aliran fluida di dalam turbin diperlihatkan pada Gbr. 8 hingga 16. Pada Gbr. 8, memperlihatkan bagaimana fluida air mengalir melalui nosel dan memasuki *runner* dan mulai berinteraksi dengan barisan sudu tahap pertama dan selanjutnya berinteraksi dengan sudu pada tahap kedua sebelum meninggalkan turbin. Proses ini menghasilkan perubahan momentum yang memungkinkan bagi sudu untuk mengubah energi kinetis fluida menjadi energi mekanis berupa putaran poros turbin. Kondisi ini berlaku identik terhadap semua turbin meskipun memiliki soliditas berbeda.

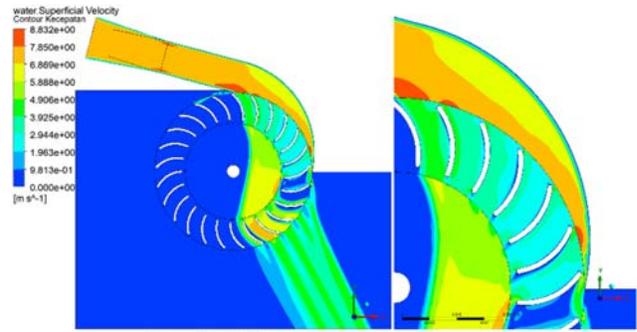


Gbr. 8 Arah dan interaksi aliran fluida dengan *runner* turbin dengan soliditas 17,5% dan putaran 300 rpm

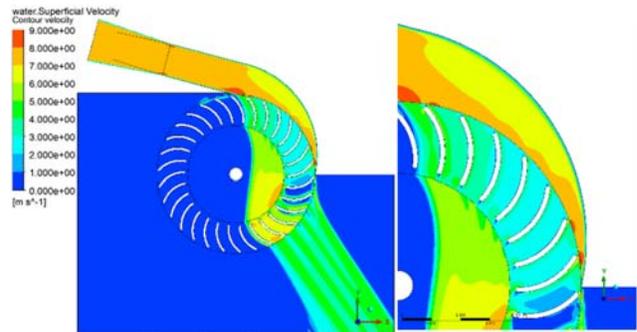
Dari keempat turbin pada kondisi operasi desain 300 rpm, terlihat bahwasanya desain nosel dapat memenuhi kriteria yang diinginkan sejak awal yaitu dapat mengubah keseluruhan energi potensial fluida menjadi energi kinetis. Hal ini diperlihatkan pada Gbr. 9 hingga 12, dimana kecepatan aliran fluida dapat dipertahankan ketika memasuki barisan sudu *runner*.



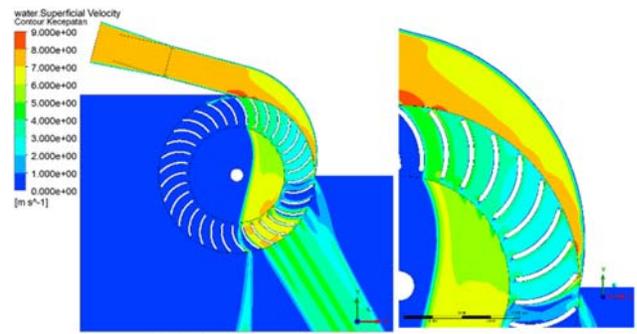
Gbr. 9 Distribusi kecepatan air pada turbin dengan soliditas 11,7% dan putaran 300 rpm



Gbr. 10 Distribusi kecepatan air pada turbin dengan soliditas 14,6% dan putaran 300 rpm



Gbr. 11 Distribusi kecepatan air pada turbin dengan soliditas 17,5% dan putaran 300 rpm

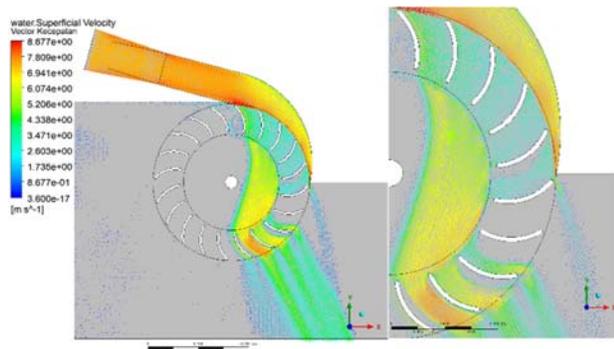


Gbr. 12 Distribusi kecepatan air pada turbin dengan soliditas 19,2% dan putaran 300 rpm

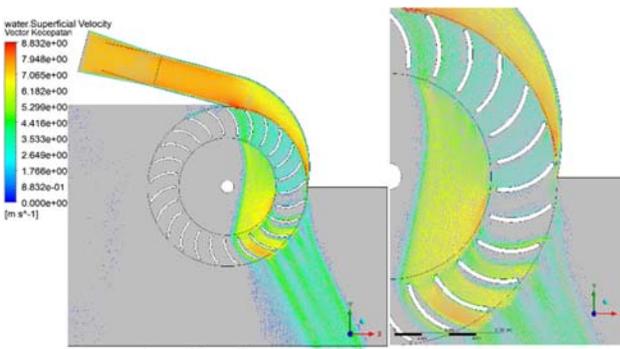
Interaksi fluida dengan sudu *runner* diperlihatkan dengan lebih detail pada Gbr. 13 hingga 16. Terkhusus pada Gbr. 13 dan 14, pada turbin dengan soliditas *runner* rendah 11,7% dan 14,6%, separasi aliran terlihat muncul di punggung sudu baik pada sudu saat fluida berinteraksi dengan barisan sudu tahap pertama maupun pada barisan sudu tahap kedua. Kondisi ini berakibat pada menurunnya performa turbin. Separasi aliran terlihat lebih besar porsinya pada turbin dengan soliditas yang lebih rendah dimana jarak antar sudu lebih lebar.

Pada turbin dengan soliditas *runner* yang lebih tinggi, 17,5% dan 19,2% interaksi fluida dengan sudu *runner* diperlihatkan pada Gbr. 15 dan 16. Turbin dengan soliditas *runner* 17,5% memperlihatkan bahwasanya aliran fluida dapat

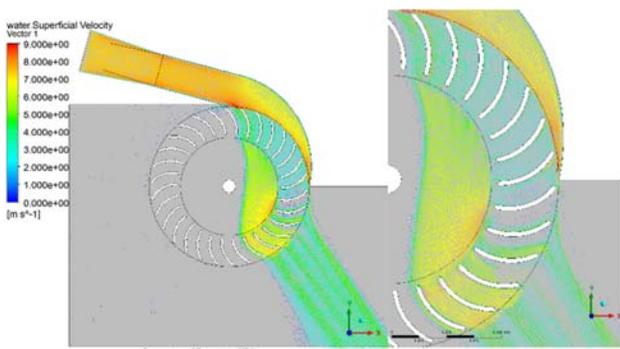
memenuhi keseluruhan ruang yang tersedia diantara sudu terutama pada barisan sudu tahap pertama. Dengan demikian, separasi aliran terlihat lebih minim dan hanya timbul pada barisan sudu tahap kedua. Untuk turbin dengan soliditas 19,2%, interaksi aliran fluida dengan sudu identik dengan turbin yang memiliki soliditas 17,5%. Namun, terlihat bahwasanya pada barisan sudu tahap kedua, separasi yang timbul lebih luas. Separasi ini dipicu oleh ruang antar sudu yang lebih rapat karena soliditas yang tinggi. Efek separasi aliran pada keempat turbin menyebabkan perbedaan performa seperti yang telah diperlihatkan pada Gbr. 5.



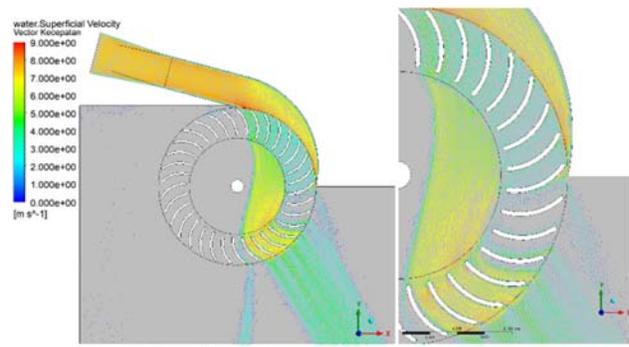
Gbr. 13 Vektor kecepatan air pada turbin dengan soliditas 11,7% dan putaran 300 rpm



Gbr. 14 Vektor kecepatan air pada turbin dengan soliditas 14,6% dan putaran 300 rpm



Gbr. 15 Vektor kecepatan air pada turbin dengan soliditas 17,5% dan putaran 300 rpm



Gbr. 16 Vektor kecepatan air pada turbin dengan soliditas 19,2% dan putaran 300 rpm

### KESIMPULAN

Hasil studi numerik yang telah dilakukan memperlihatkan bahwasanya soliditas pada *runner* turbin *Crossflow* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa turbin. Studi ini membandingkan empat turbin dengan soliditas *runner* yang berbeda, 11,7%, 14,6%, 17,5% dan 19,2%. Perbedaan soliditas ini diperoleh dari penggunaan jumlah sudu yang berbeda, 20, 25, 30 dan 33. Keseluruhan sudu dikembangkan dari pipa komersial empat inch untuk memberikan kemudahan dalam memperoleh materialnya dengan tetap mempertimbangkan faktor penting dalam desain sudu seperti bentuk geometri dan kekuatan material. Dari empat model turbin yang digunakan dalam studi ini, turbin dengan soliditas *runner* 17,5% atau 30 buah sudu, memberikan performa yang terbaik dengan efisiensi 81,42%. Hasil investigasi ini juga memperlihatkan pengaruh soliditas terhadap timbulnya separasi aliran pada sudu *runner*. Soliditas yang rendah akan memudahkan timbulnya separasi, akan tetapi jika soliditas tinggi, juga dapat memperluas daerah separasi aliran ketika fluida memasuki barisan sudu tahap kedua.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Mesin Universitas Tadulako atas dukungan yang diberikan.

### REFERENSI

- [1] G. F. Round, *Incompressible Flow Turbomachines*, vol. 21, no. 1. 2004.
- [2] "Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant ESHA 2004".
- [3] S. Bozhinova, V. Hecht, D. Kisiakov, G. Muller, and S. Schneider, "Hydropower converters with head differences below 2.5m," *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy*, vol. 166, no. 3, pp. 107–119, 2013, doi: 10.1680/ener.11.00037.
- [4] V. R. Desai and N. M. Aziz, "Parametric Evaluation of Cross-Flow Turbine Performance," *J. Energy Eng.*, vol. 120, no. 1, pp. 17–34, 1994, doi: 10.1061/(asce)0733-9402(1994)120:1(17).
- [5] R. S. Rahmany and A. Djafar, "Experimental Study on Effect of Blade Number and Attack Angle on Power and Rotation of *Crossflow* Water Turbine," *Pros. SNTTM XVI*, pp. 130–134, 2017.
- [6] S. Sujita, "The Effect of Variation Number of Blades on the Performance of Water Turbine Cross-Flow Type with Horizontal Flow," ... *Res. J. Adv. Eng. ...*, vol. 5, no. 4, pp. 301–

- 304, 2020, [Online]. Available: <http://eprints.unram.ac.id/eprint/24236>
- [7] Purwanto, Budiono, Hermawan, and D. M. Prabowoputra, "Simulation Study on Cross Flow Turbine Performance with an Angle of 20 °to the Variation of the Number of Blades," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–36, 2022, doi: 10.18178/ijmerr.11.1.31-36.
- [8] D. M. Prabowoputra *et al.*, "Effect of Blade Angle and Number on the Performance of Bánki Hydro-Turbines: Assessment using CFD and FDA Approaches," *Evergreen*, vol. 10, no. 1, pp. 519–530, 2023, doi: 10.5109/6782156.
- [9] E. Quaranta, J. P. Perrier, and R. Revelli, "Optimal design process of *crossflow* Banki turbines: Literature review and novel expeditious equations," *Ocean Eng.*, vol. 257, no. January, p. 111582, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111582.
- [10] Versteeg and Malalasekera, "an-Introduction-To-Computational-Fluid-Dynamics-Versteeg.Pdf," *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. p. 507, 2007.
- [11] C. W. David, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries. 1994.
- [12] F. R. Menter, "AIAA 93 · 2906 Zonal Two Equation  $k \cdot \omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows . Mailing Address : 24th Fluid Dynamics Conference FOR AERODYNAMIC FLOWS," *Fluid Dyn.*, 1993.
- [13] Fluent Thoery Guide, "Ansys Fluent Theory Guide," *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, no. November, pp. 724–746, 2013, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ANSYS+FLUENT+Theory+Guide#0>
- [14] R. Chandra Adhikari, "Design improvement of *crossflow* hydro turbine," University of Calgary, 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11023/3335>
- [15] E. T. Woldemariam and H. G. Lemu, "Numerical simulation-based effect characterization and design optimization of a micro cross-flow turbine," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 65, no. 6, pp. 386–397, 2019, doi: 10.5545/sv-jme.2018.5901.