

Studi Numerik Peningkatan Kinerja pada Turbin Arus Laut Ganda Berputar Searah

Sony Junianto^{a,*}, Mukhtasor^b, Rudi Walujo Prastianto^b

^aProgram Studi Sistem Pembangkit Energi, Departemen Teknik Mekanik dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Kampus PENS, Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

^bDepartemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Kampus ITS, Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

*E-mail: sony@pens.ac.id

Abstract

Indonesia is currently continuing to make efforts to realize the clean energy transition program. One of the programs is increasing the capacity of new and renewable energy. According to Indonesia's geographical conditions, the relatively large available source of renewable energy is ocean energy, especially tidal current energy, which has relatively rapid technological developments. This technology uses tidal current turbine to convert the velocity of tidal currents into electricity. Until now, single tidal current turbine research continues to be developed. On the other hand, increased capacity is also being developed using multi-turbines. The first step in researching multi-turbines is to analyze the performance of twin turbines. Therefore, this paper describes the performance of twin turbines which were carried out numerically. The analysis was carried out based on the theory of Computational Fluid Dynamics (CFD). The research object is twin turbines that rotate in co-rotation, which means that the two turbines rotate in the same direction. The turbines were arranged using NACA 63(4)-021. The results of this study are that the performance of the second turbine increases by around 42.86-71.43% from the first turbine where the performance of the two together is 1.21 times that of the single turbine.

Kata kunci: cfd analysis; energy of tidal currents; twin turbines; unidirectional rotation

Abstrak

Indonesia saat ini terus berupaya mewujudkan program transisi energi bersih. Salah satu programnya adalah peningkatan kapasitas energi baru dan terbarukan. Berdasarkan kondisi geografis Indonesia, sumber energi terbarukan yang tersedia relatif besar adalah energi laut, terutama energi arus laut yang perkembangan teknologinya relatif pesat. Teknologi ini menggunakan turbin arus laut untuk mengubah kecepatan arus laut menjadi listrik. Hingga saat ini, penelitian turbin arus laut tunggal terus dikembangkan. Di lain sisi, peningkatan kapasitasnya juga terus dikembangkan dengan menggunakan turbin jamak. Langkah awal dalam meneliti turbin arus laut jamak adalah dengan menganalisis kinerja dari turbin ganda. Oleh karenanya, laporan ilmiah ini menjelaskan kinerja turbin ganda yang dilakukan secara metode numerik. Analisis yang dilakukan berdasarkan teori pada Computational Fluid Dynamics (CFD). Obyek penelitiannya adalah turbin ganda yang berputar searah yang artinya putaran kedua turbin pada arah yang sama. Turbin-turbin tersebut disusun dengan menggunakan NACA 63(4)-021. Hasil penelitian ini adalah kinerja turbin kedua meningkat sekitar 42,86-71,43% dari turbin pertama dimana kinerja keduanya secara bersama-sama menjadi 1,21 kali dari kinerja turbin tunggal.

Kata kunci: analisis cfd; energi arus laut; putaran searah; turbin ganda

1. Pendahuluan

Amanah Undang-undang No.30 Tahun 2007 tentang Energi bahwasanya implikasi Kebijakan Energi Nasional (KEN) adalah mendiversifikasi energi untuk kebutuhan energi dalam negeri, salah satunya dengan mengembangkan energi baru dan terbarukan (EBT). Bagi Indonesia, energi laut merupakan EBT potensial yang sesuai dengan kondisi geografis dengan mayoritas terdiri dari lautan. Melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) Indonesia berkomitmen untuk menggunakan EBT hingga 23% pada Tahun 2025 dan 31 % di Tahun 2050 dengan upaya meningkatkan serta menguatkan industri EBT dalam negeri.

Perusahaan Listrik Negara (PLN) mendukung program penggunaan EBT dalam rangka untuk mengurangi peran Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Sebagai negara kepulauan, EBT yang bersumber dari laut dapat dimanfaatkan untuk mendukung program PLN. EBT laut dapat berupa gerak kinetik arus laut, perbedaan pasang surut, gerak gelombang laut, dan energi panas laut. Dari keempatnya, energi kinetik kecepatan arus laut cukup potensial, karena banyaknya selat-selat sempit di antara pulau-pulau di Indonesia.

Indonesia telah memiliki peta potensi arus laut. Peta ini digunakan sebagai dasar menghitung berapa banyak energi yang bisa diambil dari sumber tenaga ini. Selain itu, peta ini juga digunakan sebagai acuan dalam melaksanakan teknis survei kecepatan arus laut. Selanjutnya dapat digunakan dalam proses desain teknologi konversi yang digunakan. Selain itu peta ini juga sebagai dasar pertimbangan tempat peletakan teknologi pembangkit listrik arus laut [1].

Peta potensi energi arus laut Indonesia tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar letak potensi arus laut terletak pada selat. Selat adalah wilayah laut sempit yang berada di antara dua buah pulau. Wilayah perairan yaitu terutama selat merupakan tempat melintasnya dan berkumpulnya massa air laut. Pada lokasi selat ini memungkinkan massa air laut mengumpul dan bergerak lebih cepat karena semakin menyempitnya ruang gerak sejumlah massa air laut dari laut lepas menuju selat. Pada tempat inilah yang terdapat potensi energi terbesar dari perairan sekitarnya [1].

Pembangkit listrik tenaga arus laut (PLTAL) merupakan teknologi yang relatif pesat juga perkembangannya di dunia [2]. Pengembangan teknologi PLTAL ini telah banyak dilakukan, salah satunya oleh European Marine Energy Centre (EMEC). Teknologi pembangkit listrik arus laut yang dikembangkan di Eropa sudah dilakukan uji coba di laut, bahkan beberapa sudah ada yang dikomersialkan.

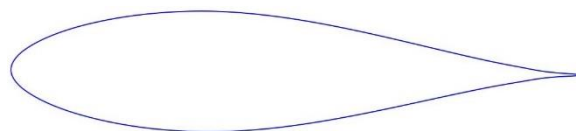
Peningkatan kapasitas dari PLTAL dapat dilakukan dengan memperbanyak turbin pada sebuah sistem PLTAL terapung yang disebut dengan sistem farming [3,4,5,6,7]. Selain itu, Referensi [8] juga mengutarakan bahwa peningkatan kapasitas PLTAL dapat dilakukan dengan memperbesar ukuran turbin tersebut. Menurut Referensi [4], pilihan untuk memperbanyak turbin dalam sebuah struktur lebih dipilih dibandingkan memperbesar ukuran sebuah turbin dalam peningkatan kapasitas daya turbin yang sama. Hal ini karena lebih ekonomis dan efisien.

Selain jumlah turbin yang diperhatikan dalam meneliti kinerja turbin jamak, yang perlu diperhatikan juga adalah penentuan posisi turbin. Sampai saat ini, publikasi penelitian yang menunjukkan peningkatan atau penurunan dari pengaruh posisi peletakan turbin selain dengan cara lateral dilakukan oleh Referensi [3] dan [9] berupa canard layout, tandem layout dan diagonal layout. Beberapa penelitian turbin jamak tersebut belum dikaitkan penerapannya pada struktur apung, sehingga penting untuk diteliti lebih lanjut untuk mengetahui perubahan kinerjanya akibat respon gerak struktur penopangnya.

Pemanfaatan turbin jamak pada struktur apung harus memperhatikan daerah instalasi PLTAL dimana dominan perairan sempit seperti selat. Oleh karenanya, beberapa peneliti di dunia menyarankan untuk menggunakan turbin ganda dalam menerapkan format PLTAL terapung pada kondisi tersebut [10,11]. Selain itu, penelitian turbin ganda tergolong jarang dilakukan terutama dalam menganalisis interaksi hidrodinamika antar turbin tersebut [11]. Dengan alasan tersebut, penelitian kinerja turbin jamak dapat diawali dengan turbin berjumlah dua untuk menuntaskan analisis interaksi hidrodinamika antar turbin yang mempengaruhi sistem mekanik tersebut.

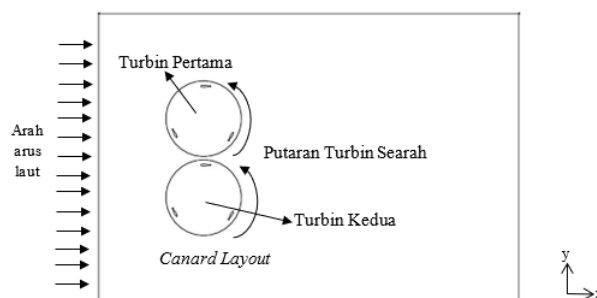
2. Metode Penelitian

Analisis kinerja turbin ini dilakukan secara numerik menggunakan metode CFD. Jenis bilah turbin yang digunakan pada analisis ini adalah jenis bilah turbin NACA 63(4)-021 (Gambar 1). Penyusunan turbin dilakukan dengan sistem turbin ganda.



Gambar 1. Jenis Bilah Turbin NACA 63₍₄₎-021

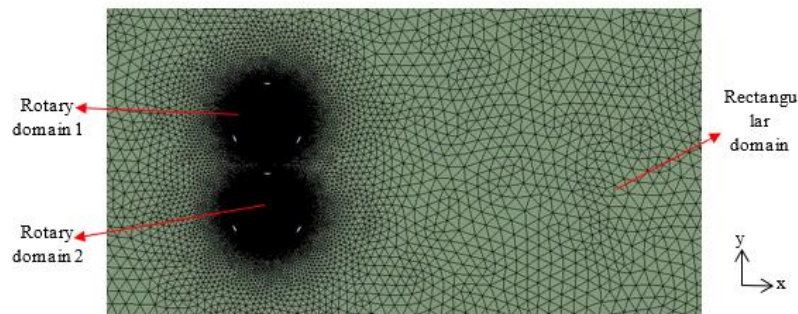
Turbin ganda disusun secara berdampingan kanan-kiri yang disebut dengan *Canard Layout*, seperti pada Gambar 2. Selain itu, turbin disusun dengan kondisi berputar searah. Turbin diatur dengan jarak sebesar $2,25R$, dimana R adalah jari-jari dari turbin tunggal, yaitu 1,5 m. Jarak ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Referensi [9] dimana jarak sebesar $2,25R$ merupakan jarak terdekat untuk turbin ganda berputar searah.



Gambar 2. Domain Komputasi Turbin Ganda Berputar Searah (Tidak Berskala)

Pengaturan *mesh* diberikan dalam penelitian ini untuk digunakan dalam analisis kinerja turbin ganda berputar searah. Kondisi *mesh* saat tahap tersebut telah memenuhi *grid connection* dimana mencapai nilai CP stabil pada ukuran elemen maksimum sebesar 0,79. Gambar 3 merupakan hasil *meshing* dengan tipe segitiga. Dalam gambar tersebut, *rotary domain* terlihat memiliki *mesh* lebih rapat dibandingkan *rectangular domain*. Jumlah elemen dalam *mesh* tersebut adalah 520.962 dengan jumlah *nodes* sebanyak 262.573.

Analisis kinerja turbin ganda berputar searah didapat dengan tanpa memperhatikan pengaruh respon gerak struktur penopang sebagai kontrol dalam penelitian ini. Hasil-hasil tersebut disajikan dalam grafik koefisien torsi, koefisien daya dan fenomena aliran di sekitar turbin. Grafik koefisien torsi (CT) dan fenomena aliran di sekitar turbin disajikan dengan satu buah sampel dari TSR yang tersedia dikarenakan memiliki pola yang serupa. Analisis tersebut diperoleh dengan pengaturan *solver* untuk simulasi numerik.



Gambar 3. Hasil *Meshing* untuk Turbin Ganda Berputar Searah (Tidak Berskala)

3. Verifikasi Pemodelan Numerik Turbin

Tahapan verifikasi ini dilakukan untuk memastikan proses *setting* yang dilakukan dalam penelitian ini memiliki perbedaan hasil yang dapat diterima. Model turbin yang digunakan merupakan turbin tunggal. Terdapat perbedaan model yang digunakan dalam tahap ini. Metode numerik yang dilakukan menggunakan model 2D sedangkan metode eksperimen yang digunakan sebagai verifikator adalah model 3D yang dilakukan di kolam tarik. Hasil eksperimen yang digunakan dalam tahap ini merupakan pekerjaan yang dilakukan oleh Referensi [12].

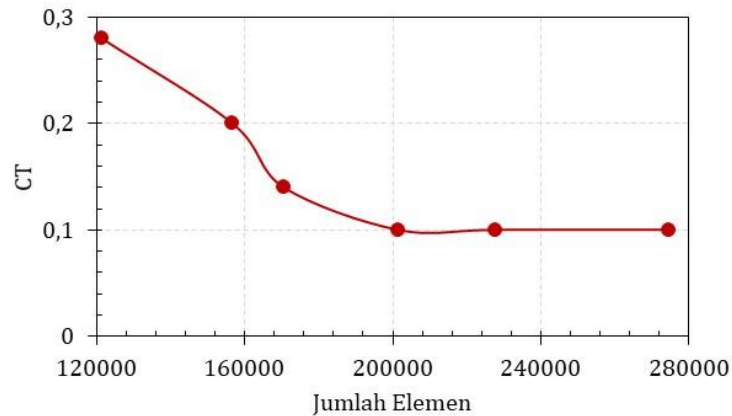
Referensi [12] melakukan eksperimen dengan menggunakan jenis bilah turbin yaitu NACA 63₍₄₎-021. Model 3D dari turbin tersebut diuji dengan kereta tarik pada kolam uji dengan lima kecepatan tarik. Tujuan dilakukannya eksperimen ini adalah untuk memproduksi hasil yang lebih akurasi dari kinerja turbin yang telah mereka desain. Sebelumnya, mereka telah melakukan simulasi numerik terhadap jenis tersebut namun menggunakan model 2D. Oleh karenanya, hasil eksperimen dan numerik yang dilakukan oleh mereka dijadikan sebagai verifikator pada studi ini, terutama hasil eksperimennya. Spesifikasi lainnya dalam eksperimen mereka diberikan di dalam Tabel 1.

Eksperimen tersebut dilakukan dengan menenggelamkan turbin pada kolam uji dan ditarik dengan tanpa adanya gangguan beban gelombang pada permukaan air. Sehingga, koefisien daya yang dihasilkan dalam eksperimen tersebut merupakan hasil murni dari kinerja turbin yang ditarik di kolam uji. Model 3D yang digunakan dalam eksperimen merupakan jenis turbin dengan sistem *fixed arm*, sehingga tidak ada pergerakan antara bilah turbin dengan lengan yang perlu dipertimbangkan.

Tabel 1. Spesifikasi Turbin Tunggal dalam Tahap Verifikasi [12]

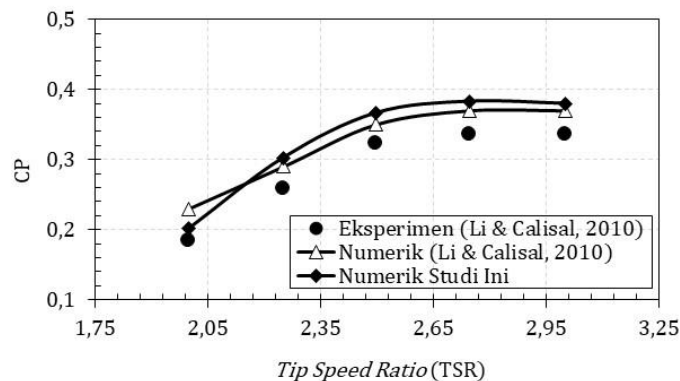
Parameter	Nilai
Jumlah bilah turbin	3
Soliditas	0,435
Reynolds number	160.000

Gambar 4 merupakan grafik koefisien torsi (CT) pada kondisi TSR sama dengan 2 yang menggunakan *mesh* dengan berbagai macam jumlah elemen. Hal ini dilakukan untuk menentukan *grid independence* yaitu ketika jumlah elemen *mesh* mulai *output* yang stabil. Pengujian *grid independence* dimulai dengan elemen berjumlah 121.489. Pengaturan *mesh* mencapai titik stabil pada elemen berjumlah 227.581. Jumlah elemen ini didapat dengan mengatur ukuran maksimum sebesar 0,79 sehingga menghasilkan jumlah *nodes* sebesar 119.102. Menurut Referensi [13,14,15], jumlah *mesh* di atas 100.000 elemen merupakan jumlah yang memadai untuk simulasi numerik 2D. Oleh karenanya, pengaturan *mesh* tersebut menjadi referensi dalam studi numerik ini.



Gambar 4 Grid Independence pada TSR Sama Dengan 2

Hasil simulasi numerik berupa nilai koefisien daya (CP) untuk TSR yang didapat dari hasil eksperimen Referensi [12]. Nilai CP untuk masing-masing TSR dapat dilihat pada Gambar 5. Pada gambar tersebut, koefisien daya dari simulasi numerik ini dibandingkan dengan koefisien daya dari eksperimen 3D dan numerik 2D yang dilakukan oleh Referensi [12]. Hasil yang diperoleh dari simulasi saat ini menunjukkan pola yang sama dengan koefisien daya dari hasil eksperimen dan numerik mereka. Namun, hasil CP saat ini memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding hasil keduanya. Perbedaan yang terjadi disebut dengan nilai deviasi relatif atau tingkat error dalam melakukan pengaturan simulasi numerik.



Gambar 5. Verifikasi Kinerja Turbin Tunggal

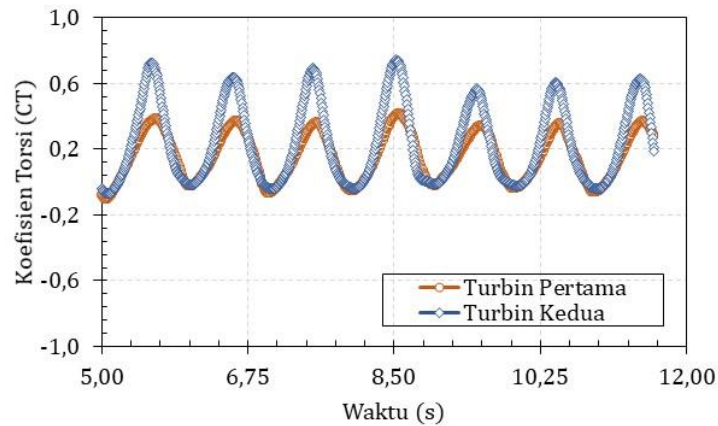
Verifikasi simulasi numerik memiliki presentase perbedaan yang beragam. Saat turbin tunggal dioperasikan pada TSR sama dengan 2, CP yang dihasilkan pada simulasi studi ini adalah 0,2 sedangkan CP yang dihasilkan oleh Referensi [12] pada eksperimen dan numerik secara berturut-turut adalah 0,18 dan 0,23. Pada TSR sama dengan 2,25; 2,5; 2,75; dan 3 untuk studi ini, secara berurutan, CP yang dihasilkan adalah 0,3; 0,37; 0,38 dan 0,38. Secara umum, CP dalam simulasi numerik saat ini lebih tinggi dibanding dengan CP hasil simulasi Referensi [12]. Perbedaan ini dapat disebabkan karena kurangnya data berupa diameter turbin dan domain komputasi pada penelitian tersebut, sehingga memungkinkan terdapat perbedaan dalam kondisi tersebut yang membuat hasil simulasi berbeda.

Presentase terendah adalah saat TSR sama dengan 2 yaitu -12,46%. Presentase negatif tersebut diperoleh karena hasil simulasi saat ini lebih rendah dibanding hasil simulasi milik Li dan Calisal (2010). Presentase perbedaan yang didapat tersebut berkisar -12,46% sampai 4,75%. Sedangkan presentase perbedaan terendah terhadap eksperimen Referensi [12] adalah 8,98% pada TSR sama dengan 2. Presentase tersebut berkisar 8,98% sampai 17,23%. Presentase tersebut bernilai positif karena CP dari numerik saat ini lebih besar dibanding CP dari eksperimen untuk semua TSR.

Beberapa pengaturan 3D diasumsikan ke dalam proses numerik saat ini. Contohnya, panjang span turbin diasumsikan sebagai *depth* di dalam simulasi. Oleh karenanya, hasil numerik yang didapat saat ini memiliki presentase perbedaan yang dapat dijadikan referensi atau kasus dasar dalam mengembangkan analisis kinerja turbin lainnya.

4. Hasil dan Pembahasan

Turbin ganda berputar searah diuji selama empat putaran di dalam perangkat lunak CFD. Namun, nilai CT mulai stabil setelah putaran ketiga. Oleh karenanya, analisis torsi pada sampel TSR sama dengan 2,5 disajikan dalam satu putaran terakhir. Grafik CT disajikan di dalam Gambar 6 dimana terdapat dua buah grafik yang berfluktuasi. Kedua grafik tersebut merupakan perhitungan koefisien torsi dari hasil simulasi numerik pada turbin pertama dan turbin kedua.



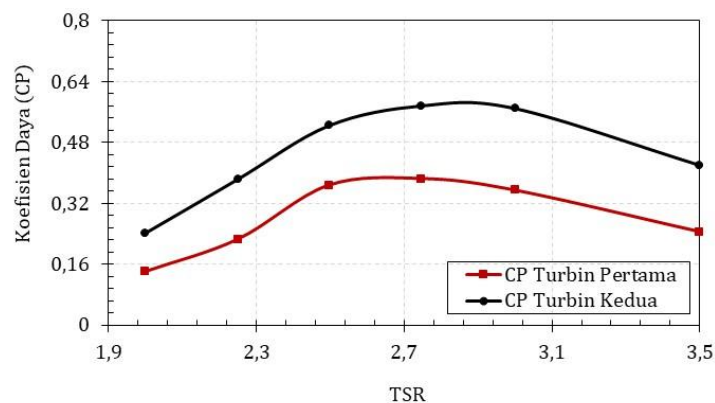
Gambar 6. Koefisien Torsi pada Turbin Ganda Berputar Searah saat TSR 2,5

Koefisien torsi turbin pertama dan turbin kedua memiliki nilai yang berbeda. Di sisi lain, kedua turbin memiliki pola grafik yang sama. Kondisi ini menandakan bahwa kedua turbin berputar dengan arah yang sama yaitu melawan arah jarum jam. Turbin pertama memiliki koefisien torsi yang lebih rendah dibanding turbin kedua.

Putaran turbin pertama memberikan efek peningkatan aliran pada turbin kedua disamping turbin tersebut mendapatkan aliran seragam dari daerah *inlet*. kondisi ini meningkatkan gaya lateral pada turbin kedua sehingga koefisien torsi yang dihasilkan lebih besar dibanding turbin pertama. Dengan kata lain, Turbin kedua mendapatkan interaksi hidrodinamika yang konstruktif dari turbin pertama.

Referensi [8] mempelajari kinerja turbin ganda dengan NACA 0015. Hasil penelitiannya menunjukkan adanya interaksi hidrodinamika konstruktif terhadap turbin yang dianalisis tersebut. Hal ini memungkinkan turbin kedua memiliki nilai koefisien daya lebih tinggi dibanding turbin pertama. Rata-rata koefisien torsi turbin kedua meningkat 42,86% dari turbin pertama. Hasil serupa telah didapat oleh Referensi [11] yang meneliti kinerja turbin ganda yang berputar searah.

Salah satu hasil simulasi numerik CFD untuk kinerja turbin ganda berputar searah ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar tersebut merupakan koefisien daya (CP) dari kecepatan arus laut yang dibuat konstan dan kecepatan putar yang bervariasi. Kedua parameter kecepatan tersebut diwujudkan dengan enam *tip speed ratio* (TSR) yaitu 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3; dan 3,5. Masing-masing TSR memiliki nilai CP yang berbeda. Sebagai contoh pada TSR 2,5, turbin pertama menghasilkan CP sebesar 0,37, sedangkan turbin kedua menghasilkan CP sebesar 0,52.



Gambar 7. Koefisien Daya pada Turbin Ganda Berputar Searah

Turbin ganda memiliki kinerja rata-rata yang didefinisikan sebagai CP rata-rata (CP_{avr}). CP rata-rata merupakan rasio dari penjumlahan daya turbin aktual dengan penjumlahan daya tersedia. Rasio ini diformulasikan di dalam Persamaan (1) yang merupakan adaptasi persamaan dari Referensi [4]. Nilai masing-masing CP dibahas untuk menunjukkan adanya perbedaan kinerja antar turbin pertama dengan turbin kedua. Perubahan gaya lateral pada turbin kedua menyebabkan peningkatan gaya lift yang mengenai turbin kedua tersebut. Oleh karena itu, CP yang dimiliki turbin kedua lebih besar dibandingkan turbin pertama. Perhitungan keseluruhan nilai CP rata-rata dari turbin ganda tersebut disajikan pada Tabel 1.

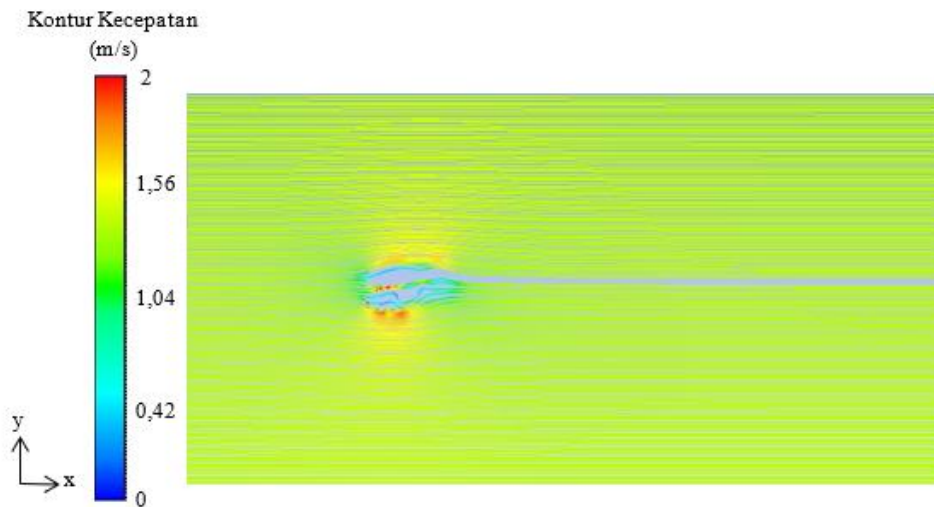
$$CP_{avr} = \frac{P_{t1} + P_{t2}}{P_1 + P_2} \dots \dots \dots (1)$$

Perbedaan nilai CP turbin pertama dan kedua dimulai dari presentase sebesar 42,86% hingga mencapai 71,43%. Tabel 1 menjelaskan CP rata-rata untuk masing-masing TSR, dimana nilai CP rata-rata tersebut tidak melebihi nilai maksimum berdasarkan *Betz Limit* yaitu 0,593. Pada *Betz Limit*, ekstraksi energi pada fluida adalah dengan menggunakan turbin tunggal, namun, CP rata-rata pada turbin ganda juga tidak melebihi batas tersebut. Pada tabel tersebut, nilai CP rata-rata terbesar dihasilkan oleh turbin ganda pada TSR sama dengan 2,75 sebesar 0,48. Turbin ganda berputar searah ini menghasilkan *thrust* yang searah dengan datangnya arus laut. Nilai maksimum *thrust* pada turbin ganda ini ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien Daya Rata-Rata dan *Thrust* Turbin Ganda Berputar Searah

TSR	CP Turbin 1	CP Turbin 2	Presentase Perbedaan CP (%)	CP _{avr}	<i>Thrust</i> Maksimum (kN)
2	0,14	0,24	71,43	0,18	44,33
2,25	0,23	0,38	70	0,30	74,73
2,5	0,37	0,52	42,86	0,45	117,68
2,75	0,38	0,58	62,79	0,48	82,57
3	0,35	0,57	61,02	0,46	80,41
3,5	0,24	0,42	55,04	0,33	76,49

Karakteristik aliran fluida di sekitar turbin ganda berputar searah diberikan pada Gambar 8. Fenomena aliran ini terjadi pada saat turbin ganda bekerja di TSR sama dengan 2,5. Aliran fluida yang mengenai turbin merupakan murni kecepatan arus laut yang seragam tanpa pengaruh dari gesekan fluida dan kondisi lainnya. Gambar tersebut merupakan rekaman rotasi turbin pada *time step* terakhir, sehingga aliran di belakang turbin merupakan aliran yang telah mencapai *full wake development*. Berbagai macam warna pada gambar tersebut menandakan perbedaan kecepatan aliran fluida di beberapa daerah di dalam domain komputasi.



Gambar 8. *Streamline* Kecepatan Turbin Ganda Berputar Searah pada TSR 2,5

Aliran fluida datang dari arah inlet dengan kecepatan yang sama, sehingga warna yang diberikan sebelum memasuki posisi turbin adalah hijau muda. Namun, warna tersebut perlahan berubah ketika aliran berada di dalam turbin yang menandakan adanya penurunan kecepatan fluida di dalam turbin. Hal ini menunjukkan bahwa ada peristiwa perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik pada turbin tersebut. Perubahan tersebut diperkuat dengan kecepatan aliran fluida yang telah melewati turbin mengalami penurunan drastis. Oleh karenanya, peletakan turbin di belakang turbin utama dengan tidak melihat kondisi ini, akan menjadi tidak efisien.

5. Kesimpulan

Koefisien daya turbin tunggal telah banyak dibahas dalam publikasi ilmiah baik nasional maupun internasional. Dalam rangka meningkatkan kinerja turbin arus laut, maka turbin tersebut disusun secara ganda pada sebuah struktur penopangnya. Peletakan dua turbin pada sebuah struktur penopang merupakan pilihan yang relatif ekonomis. Oleh karenanya, strategi ini lebih dipilih dibanding memperbesar ukuran turbin pada sistem PLTAL di area potensial.

Kinerja turbin yang disusun lebih dari satu dapat meningkatkan kinerja turbin pasangannya. Dalam analisis turbin ganda ini, kinerja turbin kedua sebagai pasangannya mengalami peningkatan. Hal ini dikarenakan interaksi hidrodinamika konstruktif yang terbentuk sehingga meningkatkan gaya lift pada turbin tersebut. Pada saat turbin berputar searah, kinerja turbin kedua meningkat sekitar 42,86-71,43% dari turbin pertama. Kinerja kedua turbin secara bersama-sama menjadi 1,21 kali dari kinerja turbin tunggal.

Ucapan Terima Kasih

Penghargaan yang setinggi-tingginya penulis sampaikan kepada Direktorat Jenderal Sumber Daya Iptek dan Pendidikan Tinggi; Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas pemberian beasiswa dan dana riset dengan skema Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU).

Daftar Pustaka

- [1] Mukhtasor, Mengenal energi laut. 2014. Surabaya: ICEES
- [2] Melo, Ana B.e., Jeffrey, H., Ocean energy systems annual report: an overview of ocean energy activities in 2018, 2018. The Executive committee of Ocean Energy Systems, Portugal.
- [3] Li, Y., Barbara, J. Lence, Sander, M.C., Modeling tidal turbine farm with vertical axis tidal current turbines. 2007. Proceeding of IEEE.
- [4] Antheaume, S., Maitre, T., Achard, Jean-Luc, Hydraulic darrieus efficiency for free flow fluid condition versus power farms conditions. 2008. Renewable Energy, 33, 2186-2198.
- [5] Junianto, S., Mukhtasor, Prastianto, R.W., Wardhana, W., Motion response analysis for tidal current energy platform: quad-spar and catamaran type. 2020. China Ocean Engineering, 5, 1-11
- [6] Rho, Yu-ho., Jo, Chul-hee., Kim, Do-youb., Optimization of mooring system for multi-arrayed tidal turbines in a strong current area. Proceedings of the ASME 2014. 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: California, USA
- [7] Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T. dan Quaiocoe, J. E., Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. 2009. Applied Energy 86, 1823–1835.
- [8] Zanforlin, S., Burchi, F., Bitossi, N., Hydrodynamics interactions between three closely-spaced vertical axis tidal turbines. 2016. Energy Procedia, 101, 520-527.
- [9] Li, Y., Development of a procedure for predicting power generated from a tidal current turbine farm. 2008. Dissertation.
- [10] Wang, S., Study on hydrodynamic performance of a tidal current energy conversion device with flexible blade turbine. 2009. Ph.D Thesis, Ocean University of China, Qingdao, China.
- [11] Ma, Y., Hu, C., Li, Y., Li, L., Deng, R., Jiang, D., Hydrodynamic performance analysis of the vertical axis twin-rotor tidal current turbine. 2018. Water, 10, 1-21.
- [12] Li, Y., Calisal, S.M., A discrete vortex method for simulating a stand-alone tidal-current turbine: modeling and validation. 2010. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 132, 031102-1.
- [13] Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., Thomas, G., The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines. 2017. Renewable Energy, 105, 106-116.
- [14] Kai, W., Ke, S., Qi-Hu, S., Liang, Z., Shu-qi, W., The effects of yawing motion with different frequencies on the hydrodynamic performance of floating vertical-axis tidal current turbines. 2016. Applied Ocean Research 59, 224-235.
- [15] Morris, C. E., Doherty, D. M. O., Doherty, T. O., & Mason-jones, A., Kinetic energy extraction of a tidal stream turbine and its sensitivity to structural stiffness attenuation. 2016. Renewable Energy, 88, 30–39.