



STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK HIDROFOIL NACA 63(4)021 SEBAGAI PENGEMBANGAN BILAH TURBIN ARUS LAUT KECEPATAN RENDAH

Numerical Study of NACA 63(4)021 Hydrofoil Characteristics as Development of Turbine Blade on Low-Speed Ocean Current

Ahmad Yasim^{1,a}, Nandiko Rizal² dan Widodo²

¹Teknik Konstruksi Perkapalan, Universitas Jember, Jl. Kalimantan No. 37, Jember, Indonesia

²Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Hidrodinamika BPPT, Surabaya, Indonesia

e-mail: ^aahmadyasim@unej.ac.id

Diterima : 01 September 2022; Direvisi: 10 November 2022, Disetujui: 21 November 2022

Abstrak

Perkembangan energi terbarukan mengalami peningkatan pesat seiring menipisnya cadangan bahan bakar fosil. Arus laut adalah sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia namun didominasi oleh kecepatan arus rendah. *Vertical Axial Tidal Current Turbine (VATCT)* adalah teknologi yang cukup efektif mengonversi energi arus laut rendah menjadi energi listrik. NACA 63(4)021 adalah jenis hidrofoil yang sedang tren digunakan karena dapat menghasilkan efisiensi yang lebih baik. Oleh karena itu, dilakukan studi numerik hidrofoil NACA 63(4)021 berdasarkan kondisi kecepatan arus rendah. Studi numerik menggunakan model 2D dengan variasi sudut serang atau *Angle of Attack (AoA)* dan *initial condition* Re 200.000. Dari hasil studi, diketahui nilai C_l maksimal 1,16 pada AoA 15° , sedangkan nilai C_d cukup rendah pada AoA antara 0° hingga 10° . Nilai C_l/C_d maksimal adalah 25,5 pada AoA 8° . Dengan demikian, direkomendasikan sudut ideal hidrofoil NACA 63(4)02 pada VATCT adalah 8° (untuk turbin *fixed pitch*) atau pada rentang sudut 5° hingga 10° (untuk jenis turbin *active pitch control* dan *passive pitch control*).

Kata kunci: hidrofoil; NACA 63(4)021; VATCT; AoA; *lift coefficient*; *drag coefficient*

Abstract

The development of renewable energy has increased rapidly in line with the depletion of fossil fuel reserves. Ocean currents are a renewable energy source that has great potential in Indonesia but is dominated by the low current speed. *Vertical Axial Tidal Current Turbine (VATCT)* is a technology that is quite effective in converting low-energy ocean currents into electrical energy. NACA 63(4)021 is a type of hydrofoil that is currently in use because it can produce better efficiency. Therefore, a numerical study of the NACA 63(4)021 hydrofoil was carried out based on the low current velocity conditions. The numerical study uses a 2D model with a variation of the angle of attack (AoA) and the initial condition Re 200.000. From the study results, it is known that the maximum C_l value is 1,16 at AoA 15° , while the C_d value is quite low at AoA between 0° to 10° . The maximum C_l/C_d value is 25,5 at AoA 8° . Therefore, it is recommended that the ideal NACA 63(4)02 hydrofoil angle for VATCT is 8° (for fixed pitch turbine) or in the range of 5° to 10° (for turbine with type active and passive pitch control).

Keywords: hydrofoil; NACA 63(4)021; VATCT; AoA; *lift coefficient*; *drag coefficient*

PENDAHULUAN

Perkembangan energi terbarukan saat ini telah mengalami peningkatan pesat. Para peneliti berlomba-lomba dalam meneliti dan mengembangkan sumber energi terbarukan. Hal ini dikarenakan menipisnya cadangan bahan bakar fosil, sehingga keadaan tersebut memaksa untuk mengeksplorasi energi terbarukan sebagai sumber energi alternatif dan tentunya ramah lingkungan. Beberapa contoh energi terbarukan seperti pemanfaatan energi surya, energi angin, panas bumi dan energi laut. Dari sekian bentuk energi terbarukan tersebut, energi laut merupakan salah satu energi potensial, bersih, dan melimpah. Menurut Ferial (2011), energi laut dapat dibagi menjadi empat jenis potensi energi yaitu energi arus laut (*ocean current*), energi pasang surut (*tidal power*), energi gelombang laut (*wave energy*), dan energi panas laut (*ocean thermal energy*).

Energi arus laut adalah salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia (Mukhtasor, 2015). Menurut Daruwedho, et al. (2016), arus laut merupakan pergerakan suatu massa air yang disebabkan oleh angin, perbedaan massa jenis, aktivitas pasang surut atau pergerakan gelombang panjang. Potensi energi arus laut Indonesia telah dipetakan oleh Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI) yang bekerja sama dengan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL) di bawah Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (Mukhtasor dkk., 2014) menyebutkan bahwa potensi energi arus laut Indonesia secara teoritis adalah 287,82 GW, secara teknis sebesar 72 GW dan secara praktis sebesar 18 GW. Besarnya potensi energi arus laut diharapkan dapat menjadi salah satu sumber energi listrik yang andal, berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Menurut Yasim, et al. (2021), potensi energi arus laut di perairan Indonesia didominasi oleh arus laut kecepatan rendah sehingga dibutuhkan teknologi konversi energi yang efektif bekerja pada kecepatan arus rendah. *Vertical Axial Tidal Current Turbine* (VATCT) adalah teknologi populer dalam bidang energi laut yang cukup efektif mengonversi energi

arus laut rendah menjadi energi listrik. Menurut Hantoro et al. (2018), komponen paling vital pada VATCT adalah *blade*. *Blade* inilah yang akan menangkap aliran kemudian mengubahnya dalam bentuk putaran. Efisiensi sebuah VATCT sangat bergantung pada jenis bilah yang digunakan sehingga pengembangan bilah yang efektif mengonversi arus kecepatan rendah adalah sangat penting untuk dilakukan.

NACA 63(4)021 adalah jenis hidrofoil yang sedang tren digunakan dalam pengembangan turbin VATCT. Menurut Marsh, et al., (2015), Rawlings (2008) dan Satrio, et al. (2018), penggunaan hidrofoil jenis NACA 63(4)021 pada turbin VATCT tipe Darrieus dapat menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan penggunaan bentuk hidrofoil simetris seperti NACA 0018 atau NACA 0021. Hanya saja, penelitian tentang turbin VATCT yang menggunakan bilah NACA 63(4)021 lebih banyak dilakukan pada kecepatan arus yang cukup tinggi, sehingga masih diperlukan penelitian lanjutan untuk bisa diterapkan di Indonesia, mengingat potensi arus laut di Indonesia didominasi oleh kecepatan rendah. Oleh karena itu, dilakukan riset pemodelan numerik turbin VATCT bilah NACA 63(4)021 berdasarkan kondisi kecepatan arus rendah.

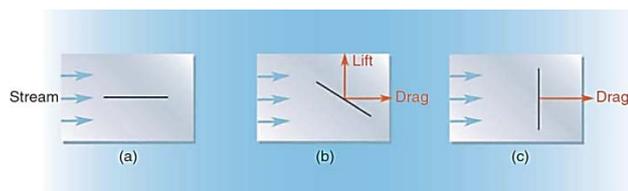
Riset pemodelan numerik turbin VATCT bilah NACA 63(4)021 ini dimulai dengan melakukan studi numerik khusus pada bilah hidrofoil NACA 63(4)021 untuk dapat mengetahui karakteristik hidrofoil NACA 63(4)021 yang meliputi nilai koefisien *lift*, koefisien *drag*, dan kontur kecepatan arus yang melewati bilah hidrofoil. Selain itu, studi awal ini juga digunakan untuk memvalidasi model numerik dengan penelitian terdahulu. Model numerik yang sudah tervalidasi ini selanjutnya akan diterapkan untuk menganalisis turbin VATCT bilah NACA 63(4)021 berdasarkan kondisi kecepatan arus rendah.

Artikel ini secara khusus hanya membahas pemodelan numerik karakteristik hidrofoil NACA 63(4)021 menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis 2D. Model 2D dipilih karena bilah hidrofoil memiliki penampang atas dan

bawah yang sama sehingga dapat ditinjau secara 2D. Selain itu, proses analisis model 2D jauh lebih ringan meskipun menggunakan *meshing grid* presisi tinggi. Untuk lebih detail, teknis pelaksanaan penelitian akan dijelaskan pada bagian metode penelitian.

METODE

Pada prinsipnya, saat terjadi interaksi antara aliran arus dan bilah tubin maka timbul dua gaya dasar yaitu *lift* dan *drag*. *Lift* merupakan jenis gaya menguntungkan untuk membangkitkan putaran pada turbin, sedangkan *drag* merupakan jenis gaya hambat yang merugikan. Oleh karena itu, gaya *drag* ini harus dibuat seminimal mungkin. Pada Gambar 1 dapat diperhatikan arah gaya *lift* dan *drag* pada sebuah pelat tipis yang dilewati oleh arus laut.

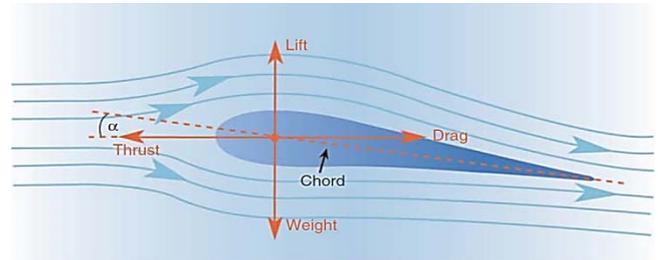


Gambar 1. Arah gaya yang terjadi pada pelat tipis saat dilewati aliran fluida (Lynn, 2014)

Gambar 1(a) menunjukkan sebuah pelat yang diasumsikan sangat tipis dan memiliki permukaan halus, kemudian diposisikan sejajar dengan arah arus sehingga tidak menimbulkan gaya *lift* maupun gaya *drag*. Ketika pelat tersebut dicondongkan pada sudut tertentu seperti pada Gambar 1(b) maka arus yang melewati pelat tersebut akan mengalami gaya yang mencoba mendorong pelat ke belakang yang kemudian disebut *drag*, namun pada saat yang bersamaan juga mengalami gaya dorong ke atas yang disebut gaya *lift*. Selanjutnya Gambar 1(c) menunjukkan sebuah pelat yang diletakan tegak lurus dengan arah datangnya arus sehingga menimbulkan gaya *drag* yang sangat besar namun tidak menimbulkan gaya *lift*.

Berdasarkan uraian Gambar 1 diketahui bahwa penentuan sudut pelat terhadap arah datangnya arus atau dikenal sebagai sudut serang (*angle of attack*) memiliki pengaruh penting terhadap perbandingan nilai koefisien *lift* dan koefisien *drag* (C_l/C_d) yang

dihasilkan suatu hidrofoil. Berikut adalah Gambar 2 yang mengilustrasikan vector gaya-gaya yang bekerja pada sebuah hidrofoil saat dilewati arus laut.



Gambar 2. Vektor gaya yang terjadi pada hidrofoil saat dilewati aliran fluida (Lynn, 2014)

Studi karakteristik hidrofoil bertujuan untuk mendapatkan efisiensi turbin yang optimal dengan mengetahui jenis *foil* yang memiliki nilai C_l/C_d yang tinggi pada kondisi kecepatan arus laut yang relatif rendah. Menurut Sudargana dan Yuniarso (2012), untuk menghitung nilai C_l dan C_d dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^2} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^2} \quad (2)$$

Sedangkan untuk mengetahui gaya *lift* dan *drag* dapat menggunakan persamaan (3) dan (4).

$$L = \int dF_x = \int P \cos \alpha \, dA + \int \tau_{\omega} \sin \alpha \, dA \quad (3)$$

$$D = \int dF_y = -\int P \sin \alpha \, dA + \int \tau_{\omega} \cos \alpha \, dA \quad (4)$$

C_l adalah koefisien *lift*; C_d adalah koefisien *drag*; L adalah gaya *lift* (N); D adalah gaya *drag* (N); v_{∞} adalah kecepatan arus relatif terhadap obyek (m/s); A adalah luasan *foil heading* (m²); ρ adalah densitas fluida (kg/m³); P adalah daya hidrolis (Watt); τ_{ω} adalah torsi pada putaran definitif (N.m); dan α adalah *angle of attack* (°).

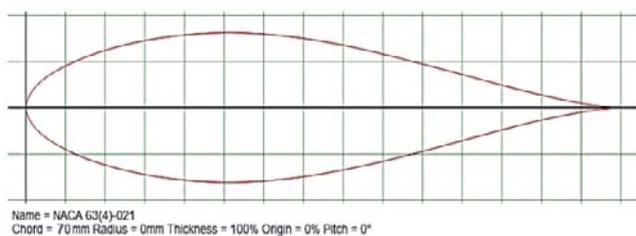
Pemodelan numerik hidrofoil NACA 63(4)021 dimulai dari penentuan koordinat hidrofoil yang bisa didapatkan melalui (Airfoil Tools, 2020). Setelah mendapatkan koordinat, maka selanjutnya dilakukan pembuatan model 3D hidrofoil NACA 63(4)021 kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *boundary condition*, penentuan *region*, pengaturan *meshing grid*, proses *meshing*, penentuan jenis *solver*,

pemilihan *output* yang ingin dihasilkan yaitu koefisien *lift* (Cl) dan koefisien *drag* (Cd), serta yang terakhir adalah koreksi hasil menggunakan hasil penelitian terdahulu.

Untuk mengetahui nilai Cl dan Cd suatu hidrofoil dalam pemodelan numerik, maka analisis harus dilakukan pada beberapa variasi *angle of attack* (AoA). Variasi AoA yang digunakan dalam studi ini antara lain 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, dan 25°. Analisis AoA pada sudut di atas 25° tidak lagi dilakukan karena nilai Cl yang didapatkan semakin menurun dan di sisi lain nilai Cd semakin meningkat.

Untuk melakukan pemodelan numerik, juga diperlukan *initial condition* sebagai input awal simulasi. *Initial condition* yang digunakan dalam studi ini adalah *Reynold Number* (Re) dengan nilai yang diinput sebesar 200.000. Nilai Re tersebut dipilih karena hasil analisa numerik dalam penelitian ini akan divalidasi dengan hasil numerik (Rawlings, 2008) yang mana juga menggunakan hidrofoil NACA 63(4)021 dengan Re 200.000 dan *chord* 0,07 m. Tujuan dilakukan validasi hasil adalah untuk memastikan bahwa prosedur pemodelan numerik yang dilakukan sudah benar.

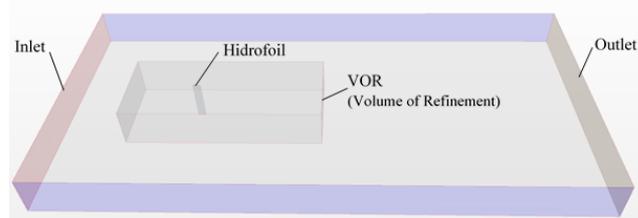
Bentuk hidrofoil NACA 63(4)021 dapat dilihat pada Gambar 3. Koordinat penggambaran *foil* pada gambar tersebut didapatkan dari (Airfoil Tools, 2020), koordinat *foil*-nya telah disesuaikan dengan panjang *chord* yang digunakan yaitu 0,07 m.



Gambar 3. Bentuk hidrofoil NACA 63(4)021 (Airfoil Tools, 2020)

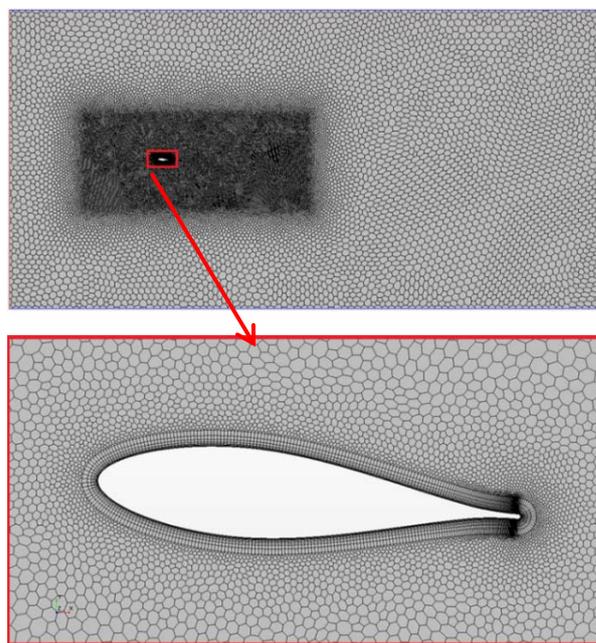
Setelah mendapatkan koordinat hidrofoil, maka langkah selanjutnya adalah persiapan pemodelan numerik yaitu membuat model solid 3D hidrofoil NACA 63(4)021 beserta *boundary condition*-nya kemudian mendefinisikan *region* dan pengaturan *grid* khususnya di sekitar hidrofoil untuk membuat *mesh*

yang lebih rapat agar hasil pemodelan numerik yang diperoleh lebih akurat. Pendefinisian *region* model numerik dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. *Boundary condition* dan *region* pemodelan numerik hidrofoil NACA 63(4)021

Boundary condition yang ditampilkan pada Gambar 4 memiliki ukuran panjang 4 meter, lebar 2 meter, dan tinggi 0,3 meter. Bentuk 3D pada model numerik ini selanjutnya dikonversi menjadi model 2D sebelum proses *meshing*. Hal ini dapat dilakukan karena foil memiliki penampang bagian atas dan bawah yang sama sehingga dapat dianalisis secara 2D. Model 2D dapat melakukan simulasi yang lebih presisi dengan jumlah *grid* yang jauh lebih sedikit dibandingkan jika menggunakan model 3D.



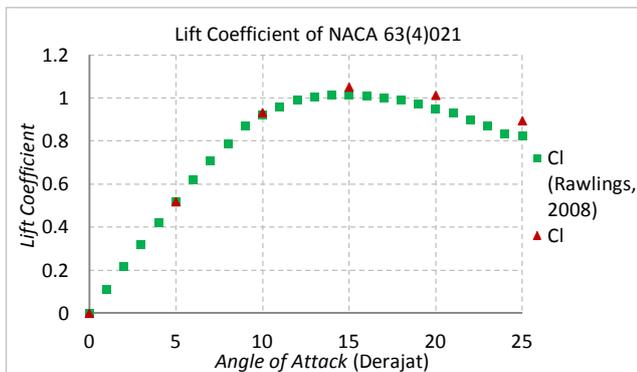
Gambar 5. *Meshing* pemodelan numerik hidrofoil NACA 63(4)021

Hasil proses *meshing* dapat dilihat pada Gambar 5. Jenis *polygonal mesh* dipilih karena memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan *quadrilateral mesh* dan *triangular mesh*. Jumlah *grid* yang digunakan dalam simulasi numerik ini adalah

sebanyak 43.326 dan setiap perubahan sudut serang atau *Angle of Attack* (AoA) juga harus disertai dengan perbaikan *meshing* sebelum menjalankan simulasi numerik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik hidrofoil NACA 63(4)021 yang didapatkan dari studi numerik CFD ini adalah berupa nilai C_l , C_d , C_l/C_d , serta pola aliran yang melewati hidrofoil. Hasil numerik kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik C_l , C_d dan C_l/C_d yang disertai dengan hasil numerik penelitian terdahulu sebagai validasi untuk memastikan bahwa analisis metode CFD yang dilakukan dalam penelitian ini sudah tepat.

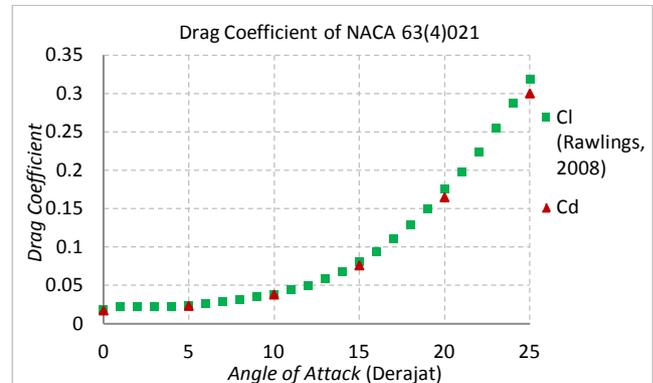


Gambar 6. *Lift Coefficient* (C_l) hidrofoil NACA 63(4)021

Hasil numerik pertama yang dihasilkan dalam studi ini adalah *lift coefficient* (C_l). *Lift coefficient* adalah parameter *non-dimensional* yang menunjukkan perbandingan gaya *lift* dengan gaya dinamis yang dihasilkan hidrofoil. Dalam perancangan turbin, C_l sangat penting karena mengindikasikan kemampuan torsi suatu turbin. Pada Gambar 6 terlihat bahwa C_l mengalami peningkatan ketika hidrofoil NACA 63(4)021 bekerja pada rentang AoA dari 0° hingga 15° . Sedangkan AoA di atas 15° , C_l telah mengalami penurunan nilai sehingga dinilai tidak lagi efektif dalam menghasilkan torsi.

Untuk lebih detail, diuraikan nilai C_l hasil numerik CFD penelitian ini mulai dari AoA 5° hingga 25° yaitu pada AoA 5° sebesar 0,518, pada AoA 10° sebesar 0,933, pada AoA 15° sebesar 1,051, pada AoA 20° sebesar 1,013, dan pada AoA 25° sebesar 0,895. Nilai C_l tersebut kemudian divalidasi dengan hasil numerik yang ada pada Rawlings (2008) dengan

nilai C_l yang diperoleh dari studi ini memiliki nilai yang sangat mendekati hasil numerik (Rawlings, 2008). Oleh karena itu, model numerik penelitian ini dapat dianggap tervalidasi.

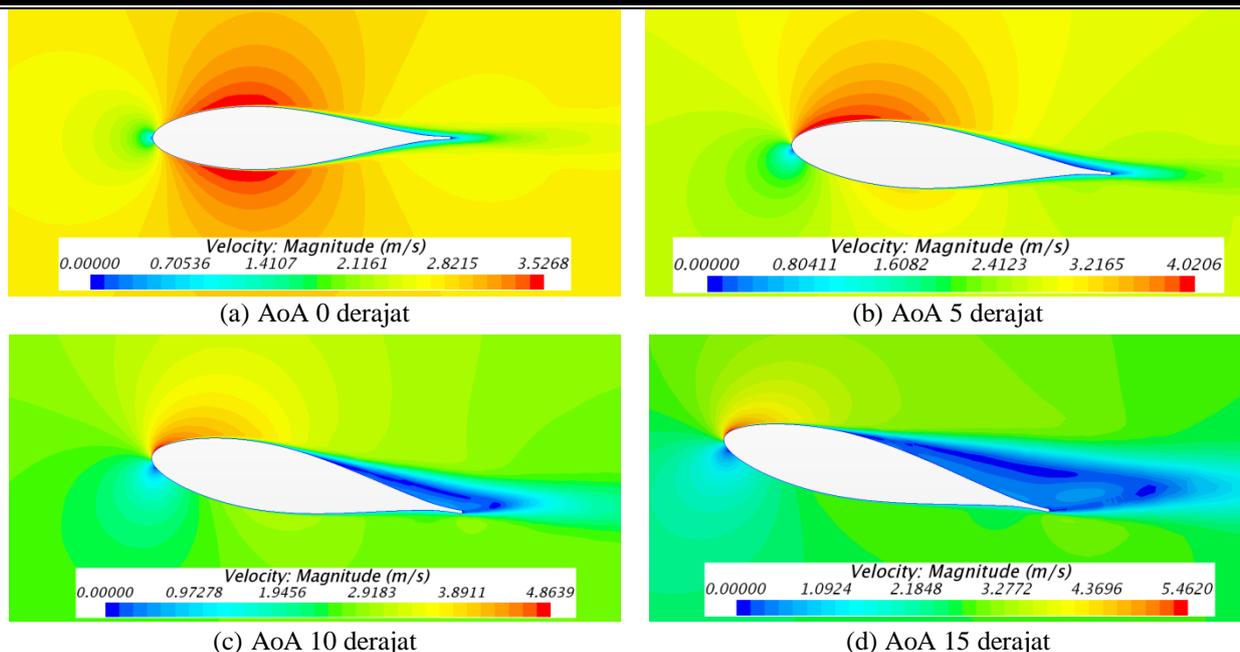


Gambar 7. *Drag Coefficient* (C_d) hidrofoil NACA 63(4)021

Hasil numerik kedua yang dihasilkan dalam studi ini adalah *drag coefficient* (C_d). C_d merupakan parameter yang menghambat bilah hidrofoil untuk menghasilkan torsi. Pada Gambar 7 terlihat bahwa nilai C_d terus mengalami peningkatan ketika AoA diperbesar. Yang menarik adalah peningkatan nilai C_d pada rentang AoA 0° hingga 10° masih tergolong landai, namun setelah itu pada AoA di atas 15° grafik C_d terlihat menanjak lebih tinggi.

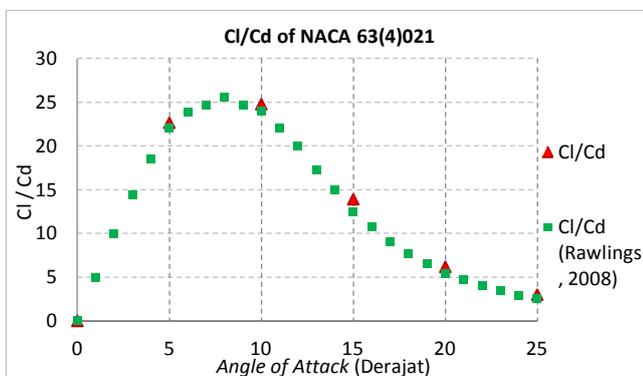
Seperti halnya nilai C_l pada Gambar 6, nilai C_d juga divalidasi dengan hasil numerik yang telah dilakukan Rawlings (2008). Pada Gambar 7 terlihat bahwa nilai C_d dalam penelitian ini dan penelitian yang dilakukan Rawlings (2008) telah memiliki hasil yang sangat mendekati sehingga dapat dianggap bahwa model numerik dalam penelitian ini telah tervalidasi. Berdasarkan Gambar 7 diketahui bahwa nilai C_d akan meningkat seiring dengan peningkatan AoA. Adapun nilai C_d hasil numerik penelitian ini adalah pada AoA 5° sebesar 0,023, pada AoA 10° sebesar 0,038, pada AoA 15° sebesar 0,076, pada AoA 20° sebesar 0,164, dan pada AoA 25° sebesar 0,30.

Nilai C_d memiliki peningkatan tinggi pada variasi AoA rentang 15° hingga 25° atau di atasnya. Sedangkan pada variasi AoA 0° hingga 10° terdapat perubahan nilai C_d yang rendah. Rentang sudut AoA yang menghasilkan nilai C_d rendah inilah yang perlu



Gambar 9. Pola aliran yang melalui hidrofoil NACA 63(4)021 pada berbagai sudut serang

diperhatikan dalam merencanakan suatu bilah turbin VATCT kecepatan arus rendah karena turbin VATCT arus rendah harus didesain lebih sensitif terhadap kecepatan arus untuk mendapatkan kemampuan *start* yang baik.



Gambar 8. Perbandingan Cl/Cd hidrofoil NACA 63(4)021

Nilai *Lift Coefficient / Drag Coefficient* (Cl/Cd) merupakan perbandingan dari nilai Cl dan Cd yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Pada Gambar 8 ditampilkan grafik Cl/Cd yang menjelaskan bahwa Cl/Cd memiliki nilai tinggi pada rentang AoA antara 5° hingga 10°.

Nilai maksimal Cl/Cd hidrofoil NACA 63(4)021 didapatkan pada posisi AoA 8°. Dengan demikian, dapat direkomendasikan bahwa posisi ideal bilah hidrofoil NACA 63(4)021 pada turbin VATCT adalah

pada sudut 8° jika turbin dirancang menggunakan bilah tetap (*fixed pitch*) atau pada rentang sudut 5° hingga 10° jika turbin VATCT dirancang menggunakan sudut bilah bebas. Pengaturan sudut bilah bebas dapat dilakukan dengan cara *active pitch control* dan *passive pitch control*.

Pola aliran hasil simulasi numerik dapat dilihat pada Gambar 9. Pola aliran merupakan bentuk aliran fluida yang melewati hidrofoil NACA 63(4)021 sehingga menimbulkan resultan gaya pada dua arah yang kemudian disebut gaya *lift* dan gaya *drag*. Pola aliran dapat divisualisasikan dalam bentuk kontur kecepatan aliran. Pada Gambar 9 ditampilkan pola aliran yang melalui bilah hidrofoil NACA 63(4)021 berdasarkan variasi *angle of attack* (AoA).

Pola aliran yang ditampilkan pada Gambar 9 merupakan hasil simulasi menggunakan Re 200.000. Pada posisi AoA 0° terlihat bahwa kontur kecepatan aliran adalah sama antara sisi atas dan sisi bawah *foil*. Pada posisi ini belum terjadi gaya *lift* dan *drag*, sehingga Cl/Cd adalah 0. Gaya *lift* dan *drag* terjadi ketika mengubah AoA > 0°. Semakin besar AoA maka gaya *drag* yang terjadi akan semakin besar. Fenomena ini dapat diamati pada Gambar 9 yaitu pada kecepatan rendah (kontur biru) terdapat di bagian sisi atas dan belakang hidrofoil akan semakin

besar seiring dengan bertambahnya AoA dari 0° hingga 90° . Sedangkan gaya *lift* meningkat hanya pada batas AoA tertentu. Pada Gambar 9 dapat diamati kecepatan tinggi (kontur orange-merah) hanya efektif terjadi pada sudut serang $>0^\circ$ hingga 15° . Setelah itu, gaya *lift* akan mengalami penurunan ketika menambah AoA di atas 15° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Namun di sisi lain gaya *drag* terus meningkat seiring dengan peningkatan AoA, bahkan cenderung lebih menanjak pada AoA di atas 15° seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

KESIMPULAN

Dari hasil studi numerik hidrofoil NACA 63(4)02 berdasarkan variasi AoA diperoleh nilai C_l maksimal sebesar 1,16 pada sudut 15° , sedangkan nilai C_d semakin tinggi sering dengan peningkatan sudut AoA. Tren grafik C_d terlihat landai pada rentang AoA antara 0° hingga 10° , kemudian menanjak tinggi pada AoA di atas 15° . Nilai C_l/C_d maksimal diperoleh sebesar 25,5 pada AoA 8° . Dengan demikian, dapat direkomendasikan bahwa posisi ideal sudut bilah hidrofoil NACA 63(4)021 pada VATCT adalah 8° (untuk turbin *fixed pitch*) atau pada rentang sudut 5° hingga 10° (untuk jenis turbin *active pitch control* dan *passive pitch control*). Hasil studi numerik juga dapat dilihat dalam bentuk kontur aliran dengan AoA 0° terlihat kecepatan aliran yang sama pada sisi atas dan bawah hidrofoil, kemudian jika AoA dibuat pada sudut kecil maka aliran fluida di sekitar foil akan meninggi pada sisi atas dibanding sisi yang lain yang menandakan peningkatan gaya *lift* dan seiring dengan peningkatan sudut AoA yang semakin besar maka kecepatan aliran di belakang hidrofoil akan semakin rendah yang menandakan bahwa gaya *drag* semakin tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan peneliti di Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika, Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah membantu penelitian serta penyediaan fasilitas laboratorium sehingga penelitian ini dapat

terlaksana dengan baik. Semoga publikasi ini dapat memberikan sumbangsih terhadap pengembangan bilah turbin arus laut kecepatan rendah di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Airfoil Tools. (2020). *NACA 63(4)021 Airfoil*. Diakses pada 9 Juni 2020. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca634421-il>.
- Daruwedho, H., Sasmito, B., and Janu A., F. (2016). Analisis Pola Arus Laut Permukaan Perairan Indonesia dengan Menggunakan Satelit Altimetri Jason-2 Tahun 2010-2014. *Jurnal Geodesi Undip*, Vol. 5(2): 147-158.
- Ferial. (2011). *Pengembangan Energi Arus Laut*. Diakses pada 12 Desember 2020. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2011/04/25/138/pengembangan.energi.arus.laut?lang=en>.
- Hantoro, R., Utama, I. K. A. P., Arief, I. S., Ismail, A., and Manggala, S. W. (2018). Innovation in Vertical Axis Hydrokinetic Turbine - Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC) Design and Testing for Low Current Speed Power Generation. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1022: 1-8.
- Lynn, P. A. (2014). *Electricity from Wave and Tide: An Introduction to Marine Energy*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., and Thomas, G. (2015). Three-Dimensional Numerical Simulations of Straight-Bladed Vertical Axis Tidal Turbines Investigating Power Output, Torque Ripple and Mounting Forces. *Renewable Energy*, Vol. 83: 67-77.
- Mukhtasor, Susilohadi, Erwandi, Pandoe, W., Iswadi, A., Firdaus, A. M., Prabowo, H., Sudjono, E., Prasetyo, E. dan Iluhade, D. (2014). *Potensi Energi Laut Indonesia*. Badan Litbang Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) dan Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI).
- Mukhtasor. (2015). *Mengenal Energi Laut*. Surabaya: ICEES.
- Rawlings, G. W. (2008). *Parametric*

- Characterization of An Experimental Vertical Axis Hydro Turbine*. Thesis. University of British Columbia, Faculty of Graduate Studies, Mechanical Engineering, Vancouver.
- Satrio, D., Utama, I. K. A. P., and Mukhtasor. (2018). Performance Enhancement Effort for Vertical-Axis Tidal-Current Turbine in Low Water Velocity. *The 4th Asian Wave Tidal Energy Conference (AWTEC 2018)*, pp. 1-5.
- Sudargana, S. dan Yuniarso, R. G. K. (2012). Analisa Perancangan Turbin Darrieus pada Hidrofoil NACA 0015 Dari Karakteristik C_l dan C_d pada Variasi Sudut Serang Menggunakan Regresi Linier pada Matlab. *Rotasi*, Vol. 14 (1): 21-28.
- Yasim, A., Mukhtasor, Rahmawati, S., Widodo, and Madi. (2021). Numerical Modeling of Vertical Axis Hydro Turbine with Experimental Validation. *Proceeding of The 7th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2019)*, pp. 22-29.