

Verifikasi *Deep-V Planing Hull* Menggunakan *Finite Volume Method* Pada Kondisi Air Tenang

Samuel^{*}, Sarjito Jokosisworo, Muhammad Iqbal, Parlindungan Manik, Good Rindo

Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Pengujian eksperimen menggunakan towing tank adalah salah satu cara yang digunakan untuk memprediksi hambatan kapal. Metode alternatif lain yang dapat digunakan adalah metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Metode ini menjadi trend di industri maritime karena biaya pengujian eksperimen pada towing tank semakin mahal dan diikuti dengan perkembangan ilmu dan teknologi tentang mekanika fluida menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) yang sangat pesat. Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi performa kapal cepat menggunakan metode komputasi. Metode CFD yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan mekanika fluida ini adalah dengan menggunakan persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes untuk menggambarkan model turbulensi dengan $k-\epsilon$, dengan menggunakan aliran multiphase Euler yang diasumsikan air dan udara. Dynamic Fluid Body Interaction (DBFI) adalah modul yang mensimulasikan gerakan benda sebagai respon terhadap gaya yang diterapkan oleh kontinum fisika. DBFI heave dan pitch pada penelitian ini diasumsikan bergerak bebas untuk dapat menghitung gerakan kapal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa CFD dapat membantu dalam memprediksi hambatan, trim dan kenaikan titik gravitasi.

Kata kunci: computational fluid dynamic; dynamic fluid body interaction; kapal cepat

Abstract

[Title: Verification of Deep-V Planing Hull Using Finite Volume Method for Calm Water Condition]
The most important The experimental towing tanks test is one of the methods used to predict ship resistance. Another alternative method that can be used is the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. This method has become a trend in the maritime industry because the cost of experimental testing in towing tanks is increasingly expensive and is followed by the development of science and technology about fluid mechanics using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method which is very rapid. This study aims to verify the performance of fast vessels using computational methods. The CFD method used to solve this fluid mechanics problem is to use the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation to describe the turbulence model with $k-\epsilon$, using the Euler multiphase flow assumed by water and air. Dynamic Fluid Body Interaction (DBFI) is a module that simulates the motion of objects in response to forces applied by the physics continuum. DBFI heave and pitch in this study are assumed to move freely to be able to calculate the movement of the ship. The results of this study indicate that CFD can help in predicting resistance, trim, and the rise of the center of gravity.

Keywords: computational fluid dynamic; dynamic fluid body interaction; high-speed craft

1. Pendahuluan

Secara umum, kapal diklasifikasikan berdasarkan distribusi tekanan di bagian bawah badan kapal, yaitu *displacement*, *semi-planing*, dan *planing* (Marshall,

2002). Kapal *planing* memiliki karakteristik unik, seperti tekanan dinamis di dasar badan kapal; *slamming*, *porpoising*, *trim*, dan *heave*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

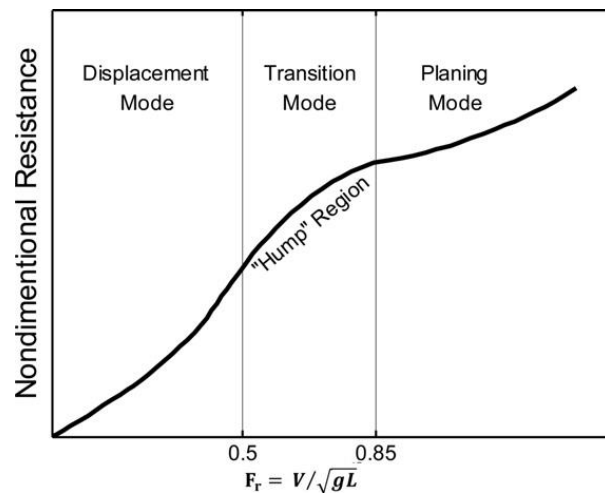
Penelitian yang berkontribusi untuk studi eksperimen pertama kali dilakukan oleh (Savitsky, 1964) untuk memprediksi hambatan kapal cepat

^{*}) Penulis Korespondensi.

E-mail: samuelaritonang@lecturer.undip.ac.id

dengan menghasilkan persamaan empiris (Savitsky & Brown, 1976). Kemudian pada tahun yang sama studi eksperimen berhasil dilakukan oleh Fridsma untuk memprediksi hambatan tambahan, *heave*, dan *pitch* pada gelombang reguler (Fridsma, 1969) dan gelombang irreguler (Fridsma, 1971).

Pada dekade 2000-an perkembangan komputasi sangat pesat ditunjukkan dengan berkembangnya persamaan Navier-Stokes 3-dimensi. Perkembangan pesat ini menjadi kunci dalam bidang maritim, khususnya dalam bidang teknik perkapalan. Penelitian ini diawali dengan menghitung *drag* dan *lift* pada pesawat boeing untuk menghemat biaya produksi sebuah pesawat (Hirsch, 2007).



Gambar 1. Klasifikasi kapal berdasarkan *Froude Number* (Marshall, 2002)

Penelitian yang dilakukan oleh Yousefi pada tahun 2013 menyimpulkan perkembangan penelitian tentang kapal cepat menggunakan komputasi. Berdasarkan penelitian tersebut, *Finite Volume Method* (FVM) menunjukkan bahwa akurasi yang baik untuk memprediksi aliran turbulensi (Yousefi, Shafaghat, & Shakeri, 2013). FVM adalah penyempurnaan *Finite Element Method* (FEM) (Versteeg & Malalasekera, 2007). Verifikasi menggunakan FVM pada penelitian kapal cepat dilakukan untuk memprediksi hambatan juga dilakukan oleh (Samuel, Trimulyono, & Santosa, 2019) untuk melihat aliran fluida pada kondisi gelombang reguler menggunakan kapal dengan geometri sederhana. Pada penelitian tersebut model Fridsma hull digunakan sebagai objek untuk memprediksi hambatan, gerakan *heave* dan *pitch*.

Tabel 1. Metode numerik yang digunakan untuk memprediksi hambatan pada kapal cepat.

Penulis	Metode analisis
<i>Finite volume method</i>	
(Caponnetto, 2001)	COMET: HIRIC
(Caponnetto, Söding, & Azcueta, 2003)	COMET: dynamic mesh, RANS, k- ε
(Senocak & Iaccarino, 2005)	FLUENT: FVM, RANS, k- ε
(Yousefi, Shafaghat, & Shakeri, 2014)	FLUENT: FVM RANS, single-phase, k- ε
(Brizzolara & Serra, 2007)	Star-CCM+: RANS, FVM
(Yousefi dkk., 2014)	FLUENT: VOF, RANS, k- ε
(Lotfi, Ashrafizaadeh, & Esfahan, 2015)	ANSYS: VOF, mesh density, k- ε
(Mousaviraad, Wang, & Stern, 2015)	CFD ship-Iowa: unsteady RANS, single-phase, two-phase
(Sukas, Kinaci, Cakici, & Gokce, 2017)	Star-CCM+: two-phase, overset mesh, rigid body motion
(De Marco, Mancini, Miranda, Scognamiglio, & Vitiello, 2017)	Star-CCM+: two-phase, morphing mesh, overset mesh,
(Avci & Barlas, 2018)	Star-CCM+: VOF phase replacement model
<i>Boundary element method</i>	
(Savander, Scorpio, & Taylor, 2002)	Potential perturbation, vortex distribution
(Kihara, 2006)	2D+T, domain decomposition in spray region
(Ghassemi & Yu-min, 2008)	Pressure drag, Frictional drag and empirical method for spray drag
(Sun & Faltinsen, 2010)	2D+T theory
<i>Finite element method</i>	
(Yang, Löhner, Noblesse, & Huang, 2000)	Dynamic mesh
(Xie, Vassalos, & Jasionowski, 2005)	FEM and potential method
(Akkerman, Dunaway, Kvandal, Spinks, & Bazilevs, 2012)	ALE-VMS: Mixed interface-tracking, FEM

Saat ini *Finite Different Method* (FDM) dan *Finite Element Method* (FEM) juga dikembangkan untuk memprediksi hambatan pada kapal cepat. Pada tahun 2015, penelitian menggunakan FEM untuk memprediksi hambatan pada kapal katamaran dilakukan untuk melihat pola aliran dengan mengabaikan gerakan dinamis kapal (Samuel, Iqbal, & Utama, 2015). FEM secara umum digunakan untuk menganalisis struktur pada kapal, tetapi banyak digunakan juga untuk memprediksi pola aliran.

Secara umum, CFD menggunakan persamaan Navier-Stokes yang sangat rumit untuk menyelesaikan pola aliran kapal dan memerlukan banyak waktu untuk menyelesaikan satu kasus. BEM (*Boundary Element Method*) menyederhanakan persamaan Navier-Stokes untuk mempersingkat waktu dengan membuat beberapa asumsi. Pada praktiknya, teori potensial digunakan dengan mengabaikan properti dalam komputasi. Pada tabel 1 menunjukkan beberapa penelitian berkaitan dengan metode yang digunakan untuk memprediksi hambatan pada kapal cepat.

Penelitian ini akan menganalisis secara numerik tentang hambatan kapal cepat menggunakan lambung kapal yang kompleks. Percobaan model dengan eksperimen akan dibandingkan dengan FVM dan akan membahas masalah *Numerical Ventilation Problem* (NVP).

2. Bahan dan Metode

2.1 Objek Penelitian

Kapal kecepatan tinggi sebagian besar didukung oleh gaya apung ketika pada kecepatan rendah, tetapi pada kecepatan tinggi, badan kapal terangkat oleh gaya *lift* hidrodinamik atau gaya aerodinamik untuk mengurangi luasan permukaan basah. *Deep-V Planing hull* adalah salah satu jenis kapal berkecepatan tinggi.

Pada penelitian ini akan menggunakan bentuk lambung *Deep-V* yang telah diuji secara eksperimen dalam kondisi air tenang yang sudah berstandar ITTC.

Tabel 2. Dimensi ukuran utama VPS (Kim dkk., 2013)

Dimensi	VPS	Unit
L	0.927	Meter
LWL	0.796	Meter
B	0.308	Meter
T	0.080	Meter
Δ	89.26	Kg
β at A.P	20	Derajat
β at midship	23	Derajat
β at F.P	32	Derajat
LCG	0.286	Meter
C.G from baseline	0.137	Meter
k (%L)	21.8	%

Penelitian yang dilakukan oleh Kim pada tahun 2013 menghasilkan lambung VPS. Lambung kapal VPS memiliki tiga pasang *strake* atau *stripe* yang terpasang di lambung bawah kapal. Desain ini memiliki variasi sudut *deadrise* yang berbeda pada tiap *station*. Bentuk lambung VPS perlahan-lahan meningkat pada bagian depan sebesar 32 derajat pada *Fore Peak*. Bentuk pada garis lunas melengkung ke atas pada 55% ke atas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Kim dkk., 2013). Penelitian selanjutnya, kapal yang didesain tanpa menggunakan penumpang ini dibangun dengan skala penuh (Kim & Kim, 2017). Penelitian tersebut dilakukan oleh *Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering* (KRISO) untuk keperluan militer. Dimensi ukuran utama VPS atau *planing deep-V straight* ditampilkan pada tabel 2.

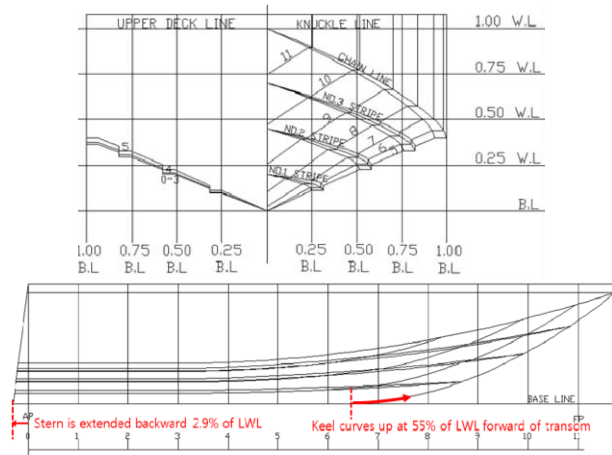
Tahap pertama dalam pengujian numerik adalah pembuatan model kapal dibantu dengan CAD (*computer-aided design*) sehingga memiliki kesamaan yang akurat dengan karakteristik kapal sesungguhnya. Definisi garis dan volume kapal dipresentasikan dengan menggunakan NURBS yang ditunjukkan pada gambar 3. NURBS (*Non-Uniform, Rational B-spline Surface*) adalah pemodelan secara matematika yang secara umum digunakan untuk membuat geometri.

2.2. Metode Penelitian

FVM adalah metode numerik yang menggunakan diskritisasi persamaan diferensial parsial (PDE) ke dalam persamaan aljabar. Langkah pertama dari diskritisasi adalah membagi domain komputasi menjadi jumlah volume yang terbatas lalu membentuk apa yang disebut mesh atau grid. Selanjutnya, PDE terintegrasi dalam setiap volume untuk menghasilkan persamaan aljabar pada setiap mesh. Nilai dari setiap mesh dari variabel aliran disimpan yang disebut node. Pendekatan komputasi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan Navier-stokes yang mempresentasikan hukum konservasi massa dan momentum.

Berdasarkan pembahasan penelitian diatas bahwa metode FVM paling akurat untuk memprediksi aliran turbulen dengan menggunakan k- ϵ (Launder & Spalding, 1974). Setiap node diasumsikan sebagai volum fraksi yang memiliki nilai 1 dan 0, sedangkan permukaan air didefinisikan dengan nilai 0.5. Nilai fraksi fluida air atau udara tergantung dari properti volum fraksi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.

Untuk memastikan akurasi perhitungan numerik, penelitian ini merujuk pada ITTC. International Towing Tank Conference (ITTC) adalah organisasi internasional yang memiliki tanggung jawab untuk prediksi hidrodinamik kapal dan maritim berdasarkan hasil percobaan fisik dan numerik. Beberapa rekomendasi yang digunakan untuk memprediksi hambatan kapal cepat sebagai berikut (ITTC, 2014): (1) grid pada dinding kapal (y+); (2) time-step; (3) jenis mesh; (4) ukuran kolam uji; dan (5) kerapatan grid.

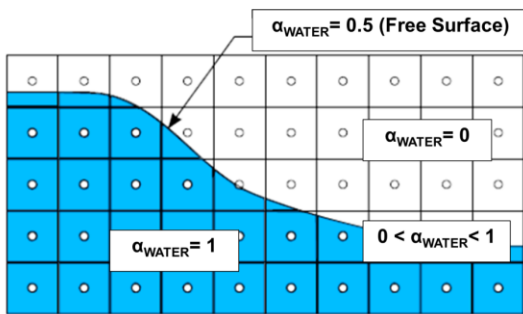


Gambar 2. Body plan dan Sheer plan lambung VPS (Kim dkk., 2013)

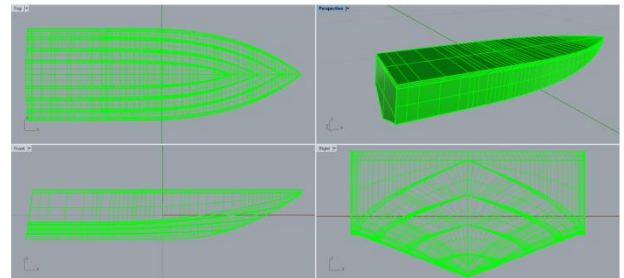
Jumlah grid dalam lapisan batas ditentukan untuk memperoleh tingkat akurasi, ini bergantung pada model turbulensi yang dipilih. ITTC merekomendasikan nilai y^+ adalah $30 < y^+ < 100$. Pada penelitian (Lotfi dkk., 2015) menggunakan nilai y^+ sebesar $50 < y^+ < 150$. Pada penelitian ini nilai y^+ dapat dilihat langsung pada bagian bawah kapal yang ditunjukkan pada gambar 5 yaitu nilai y^+ berada pada nilai $30 < y^+ < 85$. Pedoman persamaan yang digunakan dalam bentuk non-dimensional ukuran grid dari titik pertama dinding dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$\frac{y}{L} = \frac{y^+}{Re \sqrt{\frac{C_f}{2}}} \quad (1)$$

Untuk menentukan *time-step* pada penelitian ini tergantung angka Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Angka CFL menunjukkan jumlah titik yang ditempuh oleh partikel fluida dalam interval waktu. Semakin cepat kapal maka semakin kecil *time-step* yang akan



Gambar 4. Volum fraksi pada setiap node



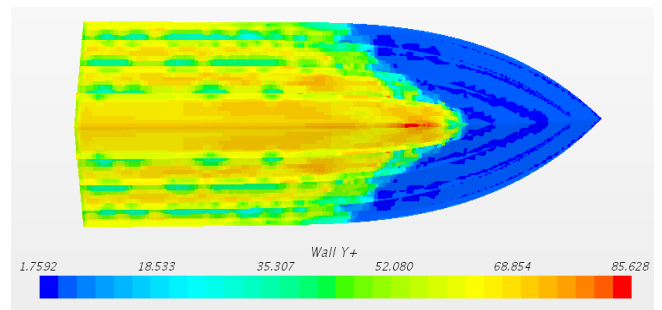
Gambar 3. Model lambung VPS dengan menggunakan NURBS

digunakan. Berdasarkan perhitungan yang direkomendasikan oleh ITTC (Persamaan 2).

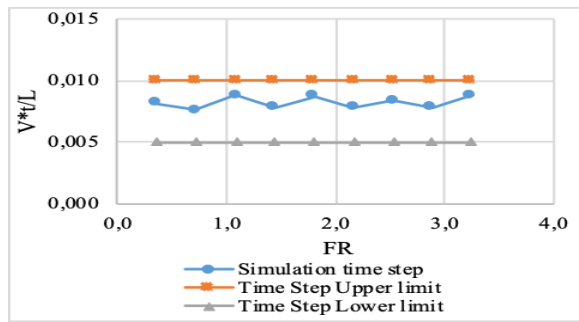
$$\Delta t_{ITTC} = 0.005 \sim 0.01 L/U \quad (2)$$

Angka CFL juga direkomendasikan oleh manual prosedur pada software yang akan digunakan (Star-CCM+, 2018). Nilai *time-step* ditunjukkan pada gambar 6 berkisar antara 0,008.

Pada penelitian ini menggunakan mesh yang tidak terstruktur agar mempermudah bentuk geometri yang kompleks untuk mendapatkan hasil akurasi geometri yang lebih baik. Selain itu kerapatan mesh pada setiap layer dapat diatur untuk mendapatkan akurasi yang baik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 7. Kelemahan menggunakan mesh yang tidak terstruktur adalah membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan mesh yang terstruktur, sehingga membutuhkan memori dan tenaga yang lebih besar untuk membentuk bentuk geometri yang diinginkan.



Gambar 5. Nilai y^+ pada lambung VPS pada angka Froude 2.16

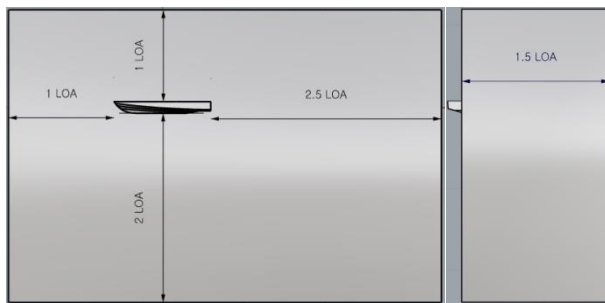


Gambar 6. Angka Courant-Friedrichs-Lewy

Untuk menghemat waktu maka komputasi numerik dilakukan hanya menggunakan setengah badan kapal. Domain yang dilakukan menggunakan rekomendasi yang dikeluarkan oleh ITTC, hal ini berkaitan dengan refleksi gelombang yang dihasilkan oleh badan kapal ketika beroperasi. Ilustasi jarak dinding terhadap kapal dapat dilihat pada gambar 8.

Konsentrasi mesh dilakukan berdasarkan koordinat x, y, z menggunakan metode isotropic atau anisotropic. Konsentrasi mesh dibagi menjadi beberapa bagian, seperti yang ditunjukkan pada tabel 3. Semakin rapat konsentrasi mesh maka akan menambah waktu komputasi, sehingga kerapatan mesh hanya dilakukan pada bagian tertentu saja. Pada gambar 9 menunjukkan konsentrasi mesh pada bagian tertentu saja, kerapatan mesh sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi.

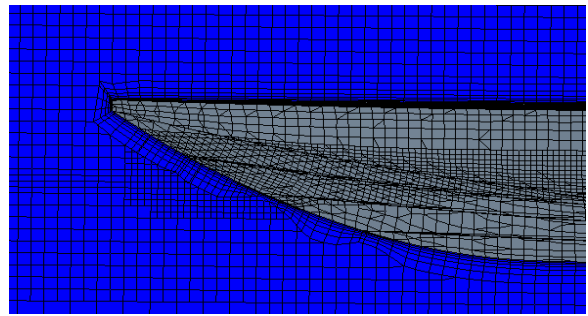
Pada simulasi CFD gerak kapal pada DBFI dibatasi hanya pada 2-Dof (*degree of freedom*) yaitu gerakan *heave* dan *pitch*, sementara gerakan kapal yang lain diabaikan. Asumsi ini digunakan untuk memprediksi trim dan gerakan naik turun kapal.



Gambar 8. Ilustrasi kolam uji pada simulasi numerik

Tabel 3. Konsentrasi Mesh

No	Bagian	Dimensi
1	Umum	0.060L
2	Blok 1	0.007L
3	Blok 2	0.030L
4	Permukaan air	0.002L
5	Badan kapal	0.006L

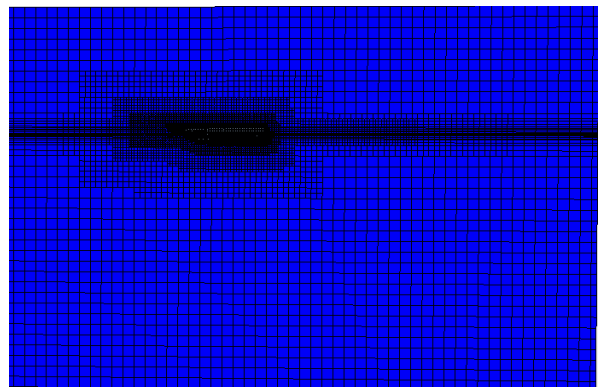


Gambar 7. Mesh tidak terstruktur

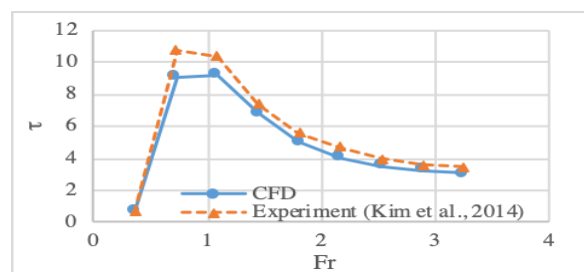
3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan dengan kondisi air tenang. Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, bahwa kapal cepat memiliki karakteristik pada hambatan, *trim* dan *heave*. Bentuk kapal yang cenderung kecil akan memberikan gaya angkat yang besar, sehingga hambatan, *trim* dan *heave* sangat berpengaruh terhadap simulasi CFD.

Simulasi dilakukan pada kondisi air tenang. Pada kondisi air tenang unit yang digunakan adalah non-dimensional. Gambar 10 menunjukkan perbandingan *trim* berdasarkan kecepatan kapal atau angka Froude. Perbandingan *trim* (τ) pada simulasi CFD dan eksperimen menunjukkan kesesuaian yang cukup baik.



Gambar 9. Ilustrasi konsentrasi mesh pada kolam uji CFD



Gambar 10. Perbandingan *trim* pada simulasi CFD dan eksperimen pada kondisi air tenang

Gambar 13 menunjukkan perbandingan hambatan antara metode numerik dan metode eksperimen. Pada gambar tersebut nilai unit yang digunakan adalah hambatan/displacement (R/Δ) per satuan angka Froude yang mempresentasikan kecepatan kapal. Hambatan total pada $0 > Fr > 2.16$ cenderung mirip, tetapi pada kecepatan di angka Froude 2.16 s/d 3.25 ada perbedaan yang signifikan dikarenakan ketidakmampuan simulasi CFD untuk menyelesaikan permasalahan Numerical Ventilation Problem (NPV).

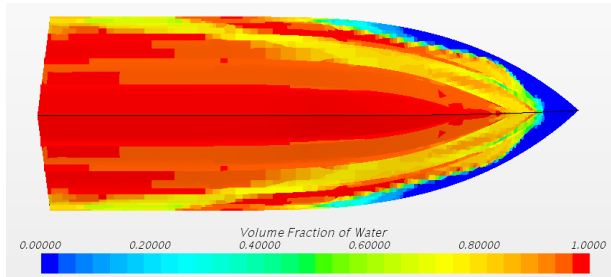
Pada saat kecepatan meningkat jumlah udara yang menyebar di bawah lambung ikut meningkat, karena efek nilai *trim* yang tinggi. Secara praktis, permasalahan ini menyebabkan hambatan yang tidak diinginkan sebesar 30% bergantung pada kecepatan kapal (Federici, 2014). Pendekatan untuk menyelesaikan masalah ini adalah mengalikan total hambatan yang ditampilkan dari fraksi volume air (Avci & Barlas, 2018). Misalnya, jika udara difusi yang divisualisasikan adalah 25%, maka hambatan dikalikan sebesar 1.25. Sementara permasalahan ini tidak terjadi pada kondisi *displacement mode* yang ditunjukkan pada gambar 1. Pada kapal *displacement mode* tidak memiliki nilai *trim* yang besar, sehingga udara yang terperangkap pada bagian bawah kapal

tidak terjadi. Penelitian yang dilakukan oleh Gray-Stephens memodifikasi HRIC (High-Resolution Interface-Capturing) untuk mendapatkan akurasi yang lebih baik pada hambatan (Gray-Stephens, Tezdogan, & Day, 2019).

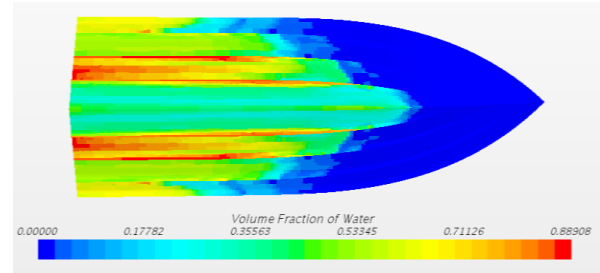
Gambar 11 menunjukkan kecepatan kapal pada angka Froude 0.36, dimana pada kecepatan ini CFD masih bisa memprediksi dengan baik. Gambar 11 menunjukkan fraksi volum air masih mendominasi pada bagian bawah kapal.

Gambar 12 menunjukkan volum fraksi air cenderung tidak ada. Pada kecepatan angka Froude 2.16, volum fraksi udara lebih banyak didominasi dibandingkan dengan fraksi air. Kondisi ini, menyebabkan ketidakakuratan pada hambatan yang dianalisis. Hal ini membuktikan bahwa adanya ketidakmampuan CFD dalam memprediksi kapal cepat.

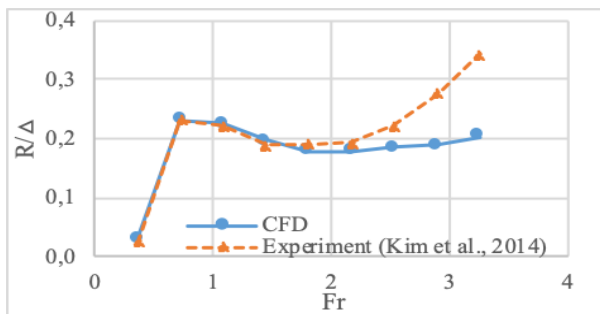
Perbandingan kenaikan titik gravitasi pada simulasi CFD dan eksperimen ditunjukkan pada gambar 14. Pada gambar tersebut diilustrasikan dengan non-dimensional unit, perubahan kenaikan gravitasi/sarat kapal berdasarkan angka Froude. Dari hasil tersebut kenaikan titik gravitasi cenderung memiliki nilai yang sama dengan eksperimen.



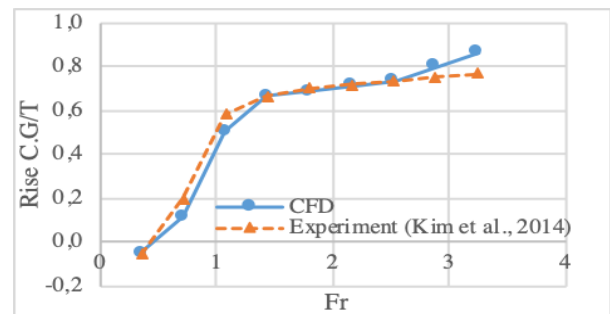
Gambar 11. Volum fraksi air pada simulasi CFD dengan angka Froude 0.36



Gambar 12. Volum fraksi air pada simulasi CFD dengan angka Froude 2.16



Gambar 13. Perbandingan hambatan pada simulasi CFD dan eksperimen pada kondisi air tenang



Gambar 14. Perbandingan kenaikan titik gravitasi pada simulasi CFD dan eksperimen pada kondisi air tenang

4. Kesimpulan

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan bagian penting dalam merencanakan/mendesain sebuah produk *engineering* dengan menggunakan solusi matematika. Simulasi numerik pada kapal cepat dapat dilakukan dengan menggunakan CFD, tetapi perlu verifikasi yang cukup akurat. Prediksi hambatan pada angka Froude lebih dari 2 perlu ditinjau ulang karena *Numerical Ventilation Problem* (NPV). Solusi yang ditawarkan adalah dengan mengalikan besar total hambatan terhadap visualisasi pada bagian bawah kapal. Pada simulasi *trim* dan perubahan titik gravitasi pada simulasi CFD sudah bisa di prediksi dengan baik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *Laboraturium Ship Design, Department Naval Architecture and System Engineering di Pukyong National University, South Korea* dan Universitas Diponegoro atas bantuan dan dukungan dalam menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Akkerman, I., Dunaway, J., Kvandal, J., Spinks, J., & Bazilevs, Y. (2012). Toward free-surface modeling of planing vessels: Simulation of the Fridsma hull using ALE-VMS. *Computational Mechanics*, 50(6), 719–727. <https://doi.org/10.1007/s00466-012-0770-2>
- Avci, A. G., & Barlas, B. (2018). An experimental and numerical study of a high-speed planing craft with full-scale validation. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(5), 617–628. <https://doi.org/10.6119/JMST.201810>
- Brizzolara, S., & Serra, F. (2007). Accuracy of CFD codes in the prediction of planing surfaces hydrodynamic characteristics. The 2nd International Conference on Marine Research and Transportation, (June 2007), 147–158. Retrieved from <http://www.icmrt07.unina.it/Proceedings/Papers/B/14.pdf>
- Caponnetto, M. (2001). Practical CFD simulations for planing hulls. International Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER' 01).
- Caponnetto, M., Söding, H., & Azcueta, R. (2003). Motion simulations for planing boats in waves. *Ship Technology Research*, 50(4), 182–198. <https://doi.org/10.1179/str.2003.50.4.006>
- De Marco, A., Mancini, S., Miranda, S., Scognamiglio, R., & Vitiello, L. (2017). Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull. *Applied Ocean Research*, 64, 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.02.004>
- Federici, A. (2014). Design and analysis of non-conventional hybrid high-speed hulls with hydrofoils by CFD methods. University of Genoa.
- Fridsma, G. (1969). A Systematic study of the rough-water performance of planing boats. Hoboken, New Jersey.
- Fridsma, G. (1971). A Systematic study of the rough-water performance of planing boats. Irregular waves. Hoboken, New Jersey.
- Ghassemi, H., & Yu-min, S. (2008). Determining the hydrodynamic forces on a planing hull in steady motion. *Journal of Marine Science and Application*, 7(3), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11804-008-7057-1>
- Gray-Stephens, A., Tezdogan, T., & Day, S. (2019). Strategies to minimise numerical ventilation in CFD simulations of high-speed planing hulls. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95784>
- Hirsch, C. (2007). Numerical Computation of Internal and External Flows. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6594-0.X5037-1>
- ITTC. (2014). Practical guidelines for ship CFD applications. Specialist Committee on CFD in Marine Hydrodynamics of the 27th ITTC.
- Kihara, H. (2006). A computing method for the flow analysis around a prismatic planing-hull. *High Performance Marine Vehicles*, 262–270. Australia: Australian Maritime College.
- Kim, D. J., & Kim, S. Y. (2017). Comparative study on manoeuvring performance of model and full-scale Waterjet propelled planing boats. *International Conference on Fast Sea Transportation*, 126–135. Nates-France. 27 - 29 September.
- Kim, D. J., Kim, S. Y., You, Y. J., Rhee, K. P., Kim, S. H., & Kim, Y. G. (2013). Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(1), 161–177. <https://doi.org/10.3744/JNAOE.2013.5.1.161>
- Launder, B., & Spalding, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269–289.
- Lotfi, P., Ashrafizaadeh, M., & Esfahan, R. K. (2015). Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water. *Ocean Engineering*, 94, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.022>

- Marshall, R. (2002). All about powerboats: understanding design and performance. McGraw Hill Professional.
- Mousaviraad, S. M., Wang, Z., & Stern, F. (2015). URANS studies of hydrodynamic performance and slamming loads on high-speed planing hulls in calm water and waves for deep and shallow conditions. *Applied Ocean Research*, 51, 222–240. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.04.007>
- Samuel, Iqbal, M., & Utama, I. K. A. P. (2015). An investigation into the resistance components of converting a traditional monohull fishing vessel into catamaran form. *International Journal of Technology*, 6(3). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i3.940>
- Samuel, Trimulyono, A., & Santosa, A. W. B. (2019). Simulasi CFD pada Kapal Planing Hull. *Jurnal Ilmu Pengetahuan & Teknologi Kelautan*, 16(3), 123–128. <https://doi.org/10.14710/kapal.v16i3.26397>
- Savander, Scorpio, S. M., & Taylor, R. (2002). Steady hydrodynamic analysis of planing surfaces. *Journal of Ship Research*, 46, 248–279.
- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME*, 1(1), 71–95.
- Savitsky, D., & Brown, P. W. (1976). Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water. *Marine Technology*, 13(4), 381–400.
- Senocak, I., & Iaccarino, G. (2005). Progress towards RANS simulation of free-surface flow around modern ships. *Annual Research Brifes, Center for Turbulence Research*, 151–156.
- Star-CCM+. (2018). User guide star-CCM+. Version 13.02.
- Sukas, O. F., Kinaci, O. K., Cakici, F., & Gokce, M. K. (2017). Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. *Applied Ocean Research*, 65, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.015>
- Sun, H., & Faltinsen, O. M. (2010). Numerical study of planing vessels in waves. *9th International Conference on Hydrodynamics*, 22, 451–458. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60238-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60238-9)
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=RvBZ-UMpGzIC>
- Xie, N., Vassalos, D., & Jasionowski, A. (2005). A study of hydrodynamics of three-dimensional planing surface. *Ocean Engineering*, 32(13), 1539–1555.
- Yang, C., Löhner, R., Noblesse, F., & Huang, T. T. (2000). Calculation of ship sinkage and trim using unstructured grids. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, (September). ECCOMAS.
- Yousefi, R., Shafaghat, R., & Shakeri, M. (2013). Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls. *Applied Ocean Research*, 42, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.05.004>
- Yousefi, R., Shafaghat, R., & Shakeri, M. (2014). High-speed planing hull drag reduction using tunnels. *Ocean Engineering*, 84, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.033>