

STUDI HAMBATAN KAPAL SELAM MODEL DENGAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Agung Purwana¹

¹Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jalan Teknik Kimia Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111

E-mail: agung_purwana@ppns.ac.id

ABSTRAK

Dalam makalah ini teknik komputasi fluid dynamic (CFD) diterapkan untuk memprediksi karakteristik hambatan total (R_t) kapal selam model Darpa Suboff dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk berbagai kondisi kecepatan. Pertama, CFD analisis Benchmark DARPA Suboff Submarine dilakukan untuk kondisi kecepatan yang berbeda. Dalam analisis komputasi, aliran turbulen di sekitar kapal selam dimodelkan dengan Reynolds Averaged Model Navier-Stokes (RANS) dengan model turbulensi $k-\omega$ SST untuk menyelesaikan persamaan-persamaan yang mengatur. Komparasi dari pendekatan CFD yang diterapkan dengan membandingkan hasil numerik dengan eksperimen hasil yang diperoleh dari literatur, dan berdasarkan grid kepadatan dalam domain komputasi. Pendekatan CFD Kapal Selam dan hasilnya dibandingkan dengan hasil Kapal Selam DARPA untuk kondisi hidrodinamika yang sama. Selanjutnya kajian ini diharapkan menjadi contoh untuk studi kapal selam baru yang akan dikembangkan dengan memperhitungkan hambatan kapal.

Kata Kunci: CFD, RANS, Shear Stress Transport, DARPA Suboff Submarine, Hambatan total.

ABSTRACT

In this paper a computational fluid dynamic (CFD) technique is applied to predict the total resistance (R_t) characteristics of the Darpa Suboff model submarine with a Computational Fluid Dynamics (CFD) approach for various speed conditions. First, a CFD DARPA Suboff Submarine Benchmark analysis was performed for different speed conditions. In computational analysis, the turbulent flow around the submarine is modeled by the Reynolds Averaged Model Navier-Stokes (RANS) with the $k-\omega$ SST turbulence model to solve the governing equations. Comparison of the applied CFD approach by comparing the numerical results with experimental results obtained from the literature, and based on density grids in the computational domain. The Submarine CFD approach and results were compared with DARPA Submarine results for the same hydrodynamic conditions. Furthermore, this study is expected to be an example for the study of new submarines that will be developed taking into account the ship's resistance.

Keyword : CFD, RANS, Shear Stress Transport, DARPA Suboff Submarine, Total Resistance.

1. PENDAHULUAN

Para peneliti telah mempelajari hidrodinamika kapal selam dalam beberapa tahun terakhir. Beberapa dari studi ini didasarkan pada prediksi hambatan total, sementara yang lain menyelidiki karakteristik *self-propulsion*. Dalam studi ini, karakteristik hambatan kapal selam Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) SUBOFF (AFF-1) yang terkenal diselidiki. Groves dkk. (1989) menggambarkan formulasi matematis untuk bentuk kapal selam. Huang dan Liu (1994)

dan Liu dan Huang (1998) telah melakukan pekerjaan eksperimental untuk model Kapal Selam DARPA di Pusat Penelitian David Taylor. Toxopeus (2008) melakukan perhitungan viscous-flow untuk lambung kapal selam dan Gross dkk. (2011) memprediksi ketahanan model kapal selam DARPA dengan nilai sudut serang yang berbeda menggunakan CFD dan membandingkan hasil tersebut dengan hasil pengujian *towing tank*.

Moonesun dkk. (2013) menggunakan metode numerik untuk menghitung berbagai karakteristik model kapal selam Darpa yang tersedia dan

kemudian membandingkan temuan mereka dengan pengukuran eksperimental yang relevan. Budak dan Beji (2016) menghasilkan tiga bentuk haluan dan buritan yang sedikit berbeda dengan menggunakan bare hull DARPA generik sebagai dasar dan melakukan analisis ketahanan bentuk-bentuk ini dengan CFD. Doğrul (2019) menyelidiki efek permukaan bebas untuk kapal selam DARPA dalam kecepatan yang berbeda. Dalam studi lainnya pada kapal selam dengan baling baling pada Chase (2012) melakukan simulasi self-propulsion di lambung kapal selam dengan baling-baling INSEAN. Aliran di sekitar DARPA Suboff sebelumnya telah dihitung tanpa baling-baling oleh Bull (1996) dan Alin dkk. (2010).

Dalam studi ini, analisis numerik kapal selam benchmark DARPA dilakukan untuk kondisi kecepatan yang berbeda dan divalidasi dengan data eksperimen yang tersedia dalam nilai hambatan total.

2. DASAR TEORI

Hambatan yang bekerja pada kapal selam yang bergerak melalui fluida satu fasa (densitas konstan) biasanya dibagi menjadi dua komponen, tahanan tekanan (atau tahanan bentuk), R_p , dan hambatan gesek, R_f . Hambatan tekanan: Karena semua cairan kental sampai tingkat tertentu, ada lapisan batas pada semua permukaan body yang bersentuhan dengan cairan. Ini mengganggu simetri depan-belakang dari tekanan yang bekerja pada body, menghasilkan gaya hambat bersih yang dikenal sebagai hambatan tekanan. Hambatan gesek: Kondisi tidak licin di permukaan kapal selam berarti bahwa cairan melawan gerakan body dengan mengerahkan gayageser tangensial pada permukaan saat bergerak maju yang dihasilkan gaya hambat yang berasal dari gaya geser ini disebut sebagai hambatan gesek. Hambatan viskos: Komponen hambatan total yang di sini disebut hambatan viskos adalah jumlah dari hambatan gesek, R_f , dan hambatan tekanan R_p . Alasan pengelompokan ini adalah bahwa hambatan tekanan dapat dikatakan sebagai hasil dari efek viskos, seperti halnya hambatan gesek. Hambatan tekanan kadang-kadang juga disebut sebagai hambatan tekanan viskos.

Persamaan yang digunakan dalam penyelesaian simulasi numerik adalah persamaan NavierStokes. Persamaan tersebut berdasarkan hukum kekekalan. Pokok hukum kekekalan adalah perubahan properti seperti massa, energi dan momentum pada sebuah objek yang ditentukan oleh input dan output. Dengan menerapkan kekekalan massa, kekekalan momentum dan kekekalan energi dapat diperoleh persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi diberikan dalam persamaan dibawah ini. Persamaan kontinuitas diberikan dalam persamaan

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Apabila fluida yang ditinjau adalah taktermampatkan maka persamaan kontinuitas dan persamaan momentum dapat disederhanakan menjadi persamaan RANS untuk fluida tak mampat dan aliran kental dirumuskan :

$$\nabla \cdot U = 0$$

$$F = \frac{\partial v}{\partial t} + V \cdot \nabla V + \nabla P - \frac{1}{Re} \nabla^2 V - \nabla \cdot \tau$$

$$\rho \dot{U} = -\nabla P + \mu \cdot \Delta U + \nabla \cdot T_{Re} + S_M$$

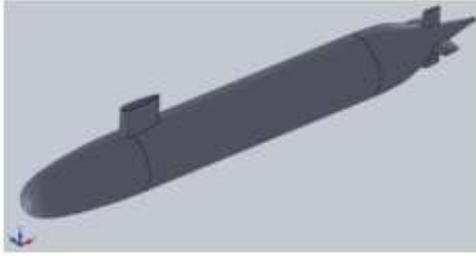
U adalah average velocity vector field, P adalah average pressure field, μ adalah viskositas dinamik, T_{Re} adalah tensor of Reynolds stresses dan S_M adalah vector of momentum sources. Model transport tegangan geser (shear stress transport -SST) k-w dikembangkan oleh Menter (1994) untuk secara efektif memadukan formulasi model k - ω yang kuat dan akurat di wilayah dinding dekat dengan independensi aliran bebas model ke medanjauh. Rumusan ini dapat dianggap sebagai penggabungan antara model k- ϵ dan model k- ω . Model memanfaatkan fungsi pencampuran yang memungkinkannya menggunakan formulasi k- ω di sekitar dinding dan kemudian secara bertahap berubah menjadi formulasi k-e sebagai jarak ke dinding tumbuh lebih besar. Model SST transport tegangan geser dengan opsi aliran transisi digunakan karena kinerjanya yang baik untuk aliran lapisan batas yang dibatasi dinding, Li (2006). Model ini menggabungkan model turbulensi k- ϵ standar yang memiliki kelebihan untuk aliran free stream dan k- ω yang memiliki kelebihan untuk aliran di sekitar dinding lapisan batas.

3. PEMBAHASAN DAN HASIL SIMULASI

Pada tahap awal data geometri model lambung kapal selam DARPA Suboff oleh Groves dkk (1998) digunakan dalam penelitian ini. Ukuran utama dalam tabel. 1.

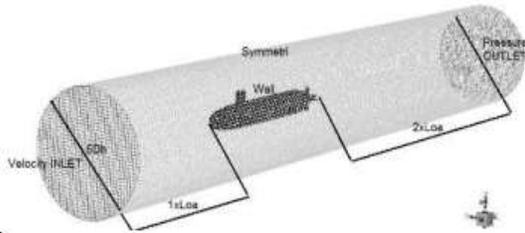
Tabel.1. Ukuran Utama Kapal Selam DARPA Suboff oleh Groves dkk (1998)

Principal Dimension	Model Scale
LOA	14.2917 ft (4.356 m)
Length BPerpendicular (LBP)	4.261
L fore body	3.3333 ft (1.016 m)
L pararel mid body	7.3125 ft (2.229 m)
L aft body	3.6458 ft (1.111 m)
L end cap	0.3125 ft (0.095 m)
Max Body Diameter (Dh)	1.66667 ft (0.508 m)
Fineness ratio (L/D)	8.575
Full/Model Scale ratio (λ)	24
Luas permukaan lambung (S)-m ²	6.386



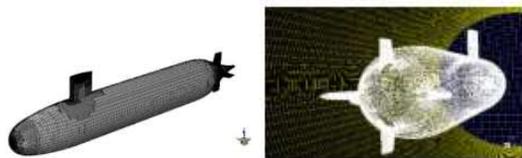
Gambar 1. 3D model DARPA Suboff

Dalam simulasi numerik hambatan kapal selam proses pemodelan 3D terlihat pada gambar.1 dengan domain komputasi, kondisi batas, domain komputasi yang diatur besar ukurannya seperti pada gambar. 2. Dan kondisi batas sebagai berikut: inlet dengan kecepatan aliran dari 5.93-17.79 knots (3.050629-9.151888 m/s), dengan $Re = 2.23420E+06 - 3.57472E+07$. Domain komputasi dan simulasi numerik digunakan model turbulen $k-\omega$ SST. Domain komputasi panjang hulu model kapal selam dan dua panjang hull hilir model, sehingga menjadi 4 L panjang keseluruhan. Diameter luar silinder 5D. Kecepatan inflow adalah $V_s = 1-18$ knot pada model.



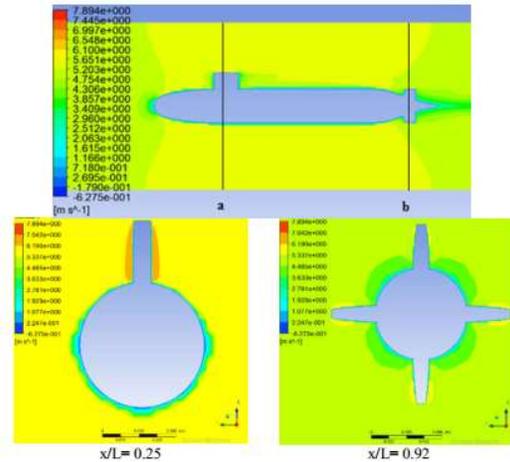
Gambar 2. Domain Komputasi dan Kondisi Batas

Sistem meshing dalam simulasi numerik digunakan grid terstruktur dengan metode Cutcell sesuai literatur Fidkowski (2007).



Gambar 3. Meshing pada simulasi numerik kapal selam skala model

Dalam simulasi numerik ini model turbulen SST $k-\omega$ dengan RMS $\epsilon-04$. Material yang dipilih adalah air tawar pada temperatur 27°C dengan densitas (ρ)= 998.2 kg/m³. Sesuai dengan kondisi model kapal selam Darpa Suboff saat diuji di kolam tarik oleh Groves dkk (1998). Dalam perhitungan hambatan, diketahui luas basah kapal untuk skala model 6.386 m².



Gambar.4. Kontur aliran disekitar model lambung kapal selam $V= 5.144$ m/s (10 knot)

Untuk menghitung dengan proses iterasi digunakan metode solusi skema SIMPLE menggabungkan kecepatan dan tekanan. Proses dikritisasi dipakai gradient Least Squares Cell, PressureOrder kedua, Momentum-order kedua, Turbulent Kinetic Energy (TKE) order satu upwind.

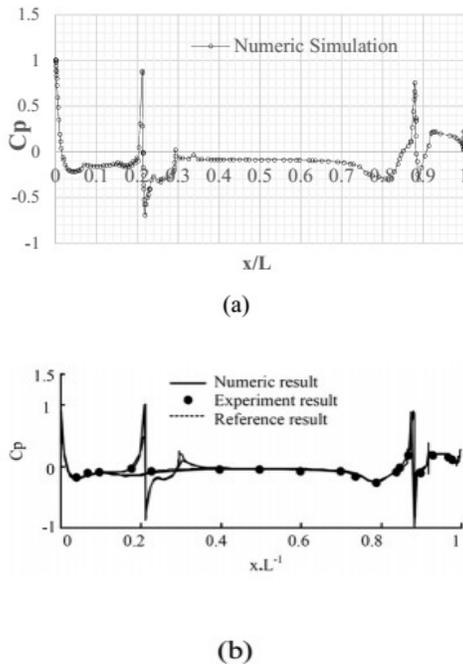
Dalam simulasi numerik juga didapatkan hasil bentuk kontur kecepatan aliran fluida disekitar lambung model kapal selam, seperti terlihat pada gambar.3 menyajikan distribusi kecepatan yang pada penampang sail pada $x/L = 0,25$ dari model SUBOFF $V= 10$ knot.

Dengan menambahkan sail ke lambung mempengaruhi hambatan dan medan aliran dari kapal selam. Penebalan lapisan batas lambung disebabkan oleh gradien tekanan yang merugikan pada sail, yang pada akhirnya menyebabkan pemisahan aliran dan pembentukan wake. Wake buritan yang dihasilkan oleh sail rudder mempengaruhi wake secara keseluruhan. Selain distribusi kecepatan di medan aliran, distribusi tekanan pada kapal selam merupakan faktor penting dalam proses desain.

Sesuai dengan prinsip Bernoulli pada daerah bertekanan rendah dengan aliran dipercepat, seperti haluan, sail, dan buritan, sedangkan tidak ada perubahan tekanan penting yang di tengah kapal selam. Dari hasil simulasi numerik dapat memprediksi koefisien tekanan disekitar lambung kapal selam. Pada gambar.4.5.(a) menunjukkan perbandingan koefisien tekanan hasil simulasi numerik dan (b) menunjukkan CP hasil eksperimen dan numerik dari Wei.dkk (2013), di sepanjang garis badan kapal selam model SUBOFF pada kecepatan 10 knot. Koefisien tekanan didefinisikan sebagai $CP = (P_s - P_\infty) / 0.5\rho V^2$, di mana di mana P_s tekanan aliran statis dan P_∞ tekanan aliran bebas di dekat lambung dan medan jauh, ρ adalah densitas fluida dan V mewakili kecepatan aliran masuk ke lambung.

Distribusi tekanan di sekitar kapal yang terendam dan area dengan tekanan tertinggi adalah haluan, tepi depan sail, dan tepi depan rudder buritan.

Dari perbandingan C_p kapal selam Sub Off dari hasil simulasi numerik, terlihat bahwa nilai C_p berkaitan erat dengan bentuk geometri sepanjang kapal. Fluktuasi nilai C_p paling jelas terlihat sebelum posisi layar ($x/L = 0,2$). Hasil simulasi menunjukkan bahwa C_p memiliki nilai maksimum pada titik stagnasi ($x/L = 0$), kemudian menurun dengan cepat sebelum mencapai trip wire ($x/L = 0,04$). Di bagian belakang tripwire, C_p memiliki puncak lokal di sepanjang garis membujur di depan sail ($x/L = 0,21$) dan kemudian mengalami penurunan tajam. Karena wake dari sail mempengaruhi tekanan sebelum $x/L = 0,4$, C_p bervariasi secara konstan hanya di daerah $0,4 < x/L < 0,7$. Sepertinya, gradien tekanan yang berlawanan terjadi di buritan ($0,7 < x/L < 0,88$) dan kemudian mencapai lokal maksimum di depan kemudi ($x/L = 0,88$). Nilai variasi C_p di buritan ($0,7 < x/L < 0,88$) disebabkan oleh interaksi lapisan batas dengan kemudi. Di depan bodi belakang ($x/L = 0,8$), nilai C_p relatif naik seiring dengan mengecilnya diameter lambung dan juga mengecil di depan kemudi.



Gambar.5. Koefisien pressure spanwise lambung kapal selam darpa dari hasil simulasi numerik (a). Data hasil eksperimen dan simulasi numerik oleh Wei dkk (2013) (b)

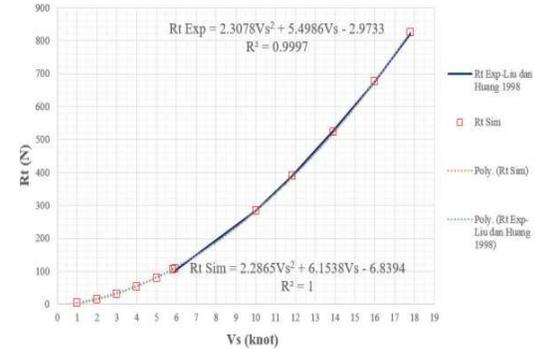
Secara umum, hasil prediksi koefisien tekanan dengan simulasi numerik hampir bersesuaian dengan baik dengan data eksperimen oleh Wei dkk (2013).

Besarnya nilai hambatan model kapal selam dari hasil simulasi numerik kemudian divalidasi dengan

data hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Liu dan Huang (1998). Hasil simulasi numerik hambatan model kapal selam Darpa Suboff terlihat pada tabel.2 dan gambar grafik 6.dibawah ini.

Tabel.2. Hasil Simulasi Numerik Hambatan Model Darpa Suboff

Model speed (knot)	Model speed (m/s)	Coefficient Total (CT)-CFD	Resistance Experiment (N)	Resistance (N) CFD Simulasi 1.57 Jt cell
1	0.51444	0.0051112	-	4.3097079
2	1.02888	0.0044538	-	15.024025
3	1.54332	0.0041322	-	31.36258
4	2.05776	0.0039265	-	52.980635
5	2.5722	0.0037784	-	79.660151
5.832	3.0000	0.0036817	-	105.58839
5.93	3.05063	0.0036714	102.3	108.878 ($\Delta=6.43\%$)
10.00	5.1444	0.0034953	283.8	284.416 ($\Delta=0.217\%$)
11.85	6.09611	0.0033726	389.2	388.97 ($\Delta=0.05963\%$)
13.92	7.16101	0.0032846	526.6	523.6045 ($\Delta=0.57\%$)
16.00	8.23104	0.0032043	675.6	677.34 ($\Delta=0.258\%$)
17.79	9.15189	0.0031375	821.1	824.22 ($\Delta=0.3796\%$)



Gambar.6. Grafik Hambatan Darpa Suboff model scale

Prediksi hambatan kapal selam dengan metode simulasi dan memiliki selisih (Δ) kurang dari 7 %. Besarnya hambatan kapal selam model hasil eksperimen dan hasil simulasi numerik masing-masing memiliki bentuk rumus polinomial kuadrat

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian hambatan kapal selam Darpa Suboff adalah :

1. Dengan menambahkan sail ke lambung mempengaruhi hambatan dan medan aliran dari kapal selam. Penebalan lapisan batas lambung disebabkan oleh gradien tekanan yang merugikan pada sail, yang pada akhirnya menyebabkan pemisahan aliran dan pembentukan wake. Wake buritan yang dihasilkan oleh sail rudder mempengaruhi wake secara keseluruhan. Selain distribusi kecepatan di medan aliran, distribusi tekanan pada kapal selam merupakan faktor penting dalam proses desain.

2. Prediksi hambatan kapal selam dengan metode simulasi dan memiliki selisih (Δ) kurang dari 7 %. Besarnya hambatan kapal selam model hasil eksperimen dan hasil simulasi numerik masing-masing memiliki bentuk rumus polynomial kuadrat

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Indonesia telah mendukung secara finansial studi ini. Pekerjaan simulasi didukung oleh Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alin N., Bensow R.E., Fureby C., Huuva T., and Svennerberg U. 2010. "Current Capabilities of DES and LES for Submarines at Straight Course," *J. Ship Research* 54, pp. 184-196.
- [2] Bull, P. 1996. "The validation of CFD predictions of nominal wake for the SUBOFF fully appended geometry," Twenty-first Symposium on Naval Hydrodynamics. Trondheim, Norway.
- [3] Budak, G., Beji, S. (2016). Computational Resistance Analyses of a Generic Submarine Hull Form and its Geometric Variants, *The Journal of Ocean Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 77-86.
- [4] Crook, B., 1990. Resistance for DARPA Suboff as Represented by Model 5470.
- [5] David Taylor Research Center Report, Maryland, USA, Report No: DTRC/SHD-1298-07.
- [6] Fidkowski, K.J. 2007, A Cut-Cell Adaptive Method for High-Order Discretizations of the Compressible Navier-Stokes Equations. Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology.
- [7] Gross, A.; Kremheller, A.; and Fasel, H.F. 2011. Simulation of flow over Suboff bare hull model. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, January. Orlando, Florida.
- [8] Groves, N.C., Huang, T.T., Chang, M.S., 1989. Geometric Characteristics of DARPA Suboff Models. (DTRC Model Nos. 5470 and 5471) (No. DTRC/SHD- 1298-01)
- [9] Huang, T.T., H.-L. Liu, N.C. Groves, 1989. Experiments of the DARPA SUBOFF. Program DTRC Report SHD-1298-02
- [10] Huang L., 1998. Summary of DARPA SUBOFF Experimental Program Data, Report No. CRDKNSWC/HD-1298-11, June.
- [11] Li, D. Q. 2006. Validation of RANS predictions of open water performance of a highly skewed propeller with experiments. *Journal of Hydrodynamics*, 18(3), Supplement, pp.520-528. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60106-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60106-6)
- [12] Menter, F. R., 1994, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA J.*, 32(8), pp. 1598-1605.
- [13] Moonesun, M.; Javadi, M.; Charmdooz, P.; and Mikhailovich, K.U. [2013]. Evaluation of submarine model test in towing tank and comparison with CFD and experimental formulas for fully submerged resistance. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 42, No. 8
- [14] Toxopeus, S. (2008). Viscous-flow calculations for bare hull DARPA SUBOFF submarine at incidence, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 55, No. 3, pp. 227-251, 2008
- [15] Wei, Y, 2013, Unsteady hydrodynamics of blade forces and acoustic responses of model scaled submarine excited by propellers thrust and side forces, *Journal of Sound and Vibration* 332. 2038-2056