



Jurnal Artikel

## Relevansi Penggunaan Bilangan *Froude* terhadap Bilangan *Reynolds* dalam Simulasi Lambung Kapal

Rachmad Irwanto<sup>1\*</sup>, Nidya Jullanar Salman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret

<sup>1</sup>rachmad.irwanto@umj.ac.id, <sup>2</sup>nidyajullanars@student.uns.ac.id

\*Corresponding author – Email : rachmad.irwanto@uta45jakarta.ac.id

Artikel Info - : Received : 15/11/2024

; Revised : 25/11/2024

; Accepted: 3/12/2024

### Abstrak

Tulisan ini menjelaskan peran krusial bilangan *Froude* dalam simulasi lambung kapal, khususnya dalam memprediksi hambatan akibat pembentukan gelombang, yang mendominasi pada kapal displacement dalam kecepatan operasional. Dengan menggunakan kerangka teoretis serta simulasi iteratif menggunakan Matlab yang mencakup panjang kapal dari 50 m hingga 150 m dan bilangan *Froude* dari 0.1 hingga 0.4, telah ditunjukkan bahwa penskalaan berbasis bilangan *Froude* memastikan prediksi hambatan gelombang yang akurat dalam uji model. Sebaliknya, penskalaan berbasis bilangan *Reynolds*, yang menuntut kesetaraan bilangan *Reynolds*, menghasilkan kecepatan model yang tidak realistis serta pola gelombang yang terdistorsi, sehingga memunculkan estimasi hambatan yang keliru. Hasil simulasi dalam tulisan ini didukung oleh literatur terbaru, yang menegaskan peran esensial bilangan *Froude* dalam arsitektur kapal modern. Studi ini bertujuan untuk memberikan kejelasan mengenai penerapan angka tak berdimensi dalam desain kapal, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi prediksi performa kapal bagi para arsitek kapal dan mahasiswa yang mempelajari bidang ini.

**Kata kunci:** Bilangan *Froude*, Bilangan *Reynolds*, simulasi lambung kapal, koefisien resistensi

### Abstract

This paper elucidates the critical role of the *Froude* number in ship hull simulations, particularly for predicting wave-making resistance, which dominates in displacement ships at operational speeds. By employing a theoretical framework and an iterative Matlab simulation that spans ship lengths from 50 m to 150 m and *Froude* numbers from 0.1 to 0.4, it is demonstrated that *Froude*-based scaling ensures accurate wave resistance predictions in model tests. Conversely, *Reynolds*-based scaling, which necessitates matching the *Reynolds* number, results in impractical model velocities and distorted wave patterns, leading to erroneous resistance estimates. These findings are substantiated by recent literature, which underscores the *Froude* number's indispensable role in modern naval architecture. This study aims to provide clarity on the appropriate application of dimensionless numbers in ship design, thereby enhancing the accuracy and efficiency of performance predictions for naval architects and students alike.

**Keywords:** *Froude* numbers, *Reynolds* numbers, hull simulation, resistance coefficients

## 1. Latar Belakang

Dalam bidang arsitektur kapal, memprediksi kinerja kapal secara akurat sangatlah penting untuk merancang kapal yang efisien dan ekonomis. Angka-angka tak berdimensi memiliki peran krusial dalam proses ini, memungkinkan para insinyur untuk mengonversi hasil dari uji model ke kapal skala penuh. Dua angka tak berdimensi utama, yaitu bilangan *Froude* ( $Fr$ ) dan bilangan *Reynolds* ( $Re$ ), mengendalikan aspek berbeda dari aliran fluida di sekitar lambung kapal. Bilangan *Froude*, yang didefinisikan sebagai

$$(1.1) \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

di mana ( $V$ ) adalah kecepatan kapal, ( $g$ ) adalah percepatan gravitasi, dan ( $L$ ) adalah panjang karakteristik, sangat penting dalam memahami hambatan akibat pembentukan gelombang. Hambatan ini menjadi semakin signifikan pada kecepatan tinggi dan sering kali mendominasi hambatan total pada kapal displacement berkecepatan tinggi. Sebaliknya, bilangan *Reynolds*, yang didefinisikan sebagai

$$(1.2) \quad Re = \frac{VL}{\nu}$$

di mana ( $\nu$ ) disini merepresentasikan viskositas kinematik fluida, mengukur perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos, serta sangat penting untuk menganalisis hambatan gesekan yang lebih dominan pada kecepatan rendah.

Pentingnya masing-masing bilangan ini bergantung pada kondisi operasional kapal dan jenis hambatan yang dikaji. Untuk simulasi lambung kapal yang berfokus pada hambatan gelombang, terutama pada kapal displacement yang beroperasi dalam rentang kecepatan tertentu, bilangan *Froude* umumnya menjadi parameter penskalaan utama. Namun, terdapat kesalahpahaman umum di kalangan mahasiswa dan beberapa praktisi yang menganggap bahwa bilangan *Reynolds* harus selalu diprioritaskan dalam permasalahan aliran fluida, termasuk

simulasi kapal. Kesalahan ini dapat menyebabkan penskalaan yang keliru dalam uji model, sehingga menghasilkan prediksi performa kapal skala penuh yang tidak akurat.

Mengapa perbedaan ini penting? Prediksi hambatan yang tidak akurat dapat mengarah pada desain kapal yang kurang optimal, meningkatkan konsumsi bahan bakar, biaya operasional, serta dampak lingkungan. Dengan memperjelas kapan sebaiknya memprioritaskan bilangan *Froude* dibandingkan bilangan *Reynolds*, tulisan ini bertujuan untuk memberikan panduan bagi insinyur dan peneliti guna menghasilkan simulasi yang lebih akurat dan dapat diandalkan. Meskipun prinsip-prinsip ini telah lama dikenal, penjelasan yang sistematis serta demonstrasi praktis tetap memberikan nilai edukatif, terutama bagi mereka yang baru mempelajari arsitektur kapal.

Tulisan ini menjelaskan mengapa bilangan *Froude* lebih relevan dibandingkan bilangan *Reynolds* dalam simulasi lambung kapal yang bertujuan untuk menganalisis hambatan gelombang. Melalui diskusi teoretis dan simulasi sederhana menggunakan Matlab, tulisan ini menguraikan implikasi praktis dari pemilihan bilangan tak berdimensi yang tepat, memperkuat pentingnya penskalaan yang akurat dalam menghasilkan desain kapal yang lebih efektif.

## 2. Tinjauan Pustaka

Bagian tinjauan pustaka teoretis ini memberikan penjelasan ringkas mengenai alasan bilangan *Froude* diprioritaskan dalam simulasi lambung kapal. Dijelaskan bahwa hambatan akibat pembentukan gelombang, yang dikendalikan oleh bilangan *Froude*, merupakan komponen utama dari total hambatan pada kapal berukuran besar yang beroperasi dalam rentang kecepatan tertentu.

Sebaliknya, bilangan *Reynolds*, meskipun memiliki peran penting dalam efek viskositas, mencapai nilai antara  $10^8$  hingga  $10^9$  pada kapal skala penuh,

sehingga sulit untuk direplikasi secara langsung dalam pengujian model akibat keterbatasan skala. Bagian ini juga merujuk pada metode ITTC, yang memprioritaskan kesetaraan bilangan *Froude* dan melakukan koreksi terpisah terhadap efek viskositas, sehingga semakin menegaskan pentingnya bilangan *Froude* dalam penskalaan simulasi lambung kapal. Penerapan angka tak berdimensi dalam arsitektur kapal, khususnya bilangan *Froude* dan bilangan *Reynolds*, berasal dari hukum kesamaan yang dikemukakan oleh William *Froude* pada abad ke-19. *Froude* membedakan hambatan akibat pembentukan gelombang dari hambatan gesekan dalam pengujian model kapal (Mecaflux: Froude number and wave ship resistance similarity, 2024). Penelitian *Froude* menetapkan bahwa bilangan *Froude* menjamin kesamaan dinamis dalam pola gelombang, yang sangat penting bagi kapal displacement, di mana hambatan gelombang menyumbang 40–60% dari hambatan total pada kecepatan operasional (editor, 2024). Pendekatan ini kemudian diformalkan oleh International Towing Tank Conference (ITTC) melalui garis gesekan  $C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}$  (ITTC-1957), yang digunakan untuk estimasi hambatan viskos (Gibbs, Ericsson, Isherwood, Taylor, & Stevens, 2024). Studi terbaru dari 2015 hingga 2025 semakin menegaskan pentingnya penskalaan berdasarkan bilangan *Froude* dalam simulasi lambung kapal. (He, et al., 2019) menganalisis konvergensi representasi *Fourier–Kochin* untuk hambatan gelombang, menunjukkan bahwa bilangan *Froude* sangat mempengaruhi pola gelombang di berbagai bentuk lambung. Kemudian (Dambrine, Pierre, & Rousseaux, 2016) mengoptimalkan bentuk lambung menggunakan hambatan gelombang, tulisan tersebut membuktikan bahwa desain optimal bergantung pada bilangan *Froude*, dengan hambatan gelombang berkurang pada nilai bilangan *Froude* yang

tinggi. (Oliveira, Larsson, & Granhag, 2018) meneliti dampak *biofouling* pada hambatan lambung, mencatat bahwa penskalaan berdasarkan bilangan *Froude* secara akurat memprediksi peningkatan hambatan gelombang akibat kekasaran permukaan. (Niklas & Pruszko, 2019) dan (Niklas & Pruszko, 2019) dalam dua tulisan yang berbeda menggunakan CFD skala penuh untuk memprediksi hambatan kapal, menekankan peran bilangan *Froude* dalam hambatan akibat pembentukan gelombang dibandingkan efek viskos dari bilangan *Reynolds*. (Karabulut, Özdemir, & Barlas, 2018) mensimulasikan dampak kekasaran permukaan, mengonfirmasi bahwa model yang diskalakan berdasarkan bilangan *Froude* lebih baik dalam menangkap perubahan hambatan gelombang. (Wang, Zhu, Zha, & Gu, 2022) menyelidiki hambatan pada lambung katamaran secara numerik, menemukan bahwa penskalaan berdasarkan bilangan *Froude* sangat penting untuk prediksi pola gelombang yang akurat. (Huang, Wang, & Yang, 2015) menggunakan CFD dan optimasi global untuk mengurangi hambatan lambung, memprioritaskan bilangan *Froude* untuk hambatan gelombang. Studi ini secara kolektif menegaskan bahwa mencocokkan bilangan *Froude* dalam pengujian model menjamin prediksi hambatan gelombang yang akurat, sementara mencocokkan bilangan *Reynolds* sering kali tidak layak dilakukan karena nilai skala penuh yang tinggi yang memerlukan kecepatan model yang tidak praktis. Kesalahpahaman umum di kalangan praktisi adalah memprioritaskan bilangan *Reynolds* untuk semua masalah aliran fluida, yang dapat menyebabkan estimasi hambatan yang keliru. Tulisan ini mengembangkan temuan-temuan tersebut dengan menggunakan simulasi Matlab iteratif yang dilengkapi visualisasi langsung untuk mendemonstrasikan keuntungan praktis dari penskalaan berbasis bilangan *Froude* untuk tujuan pendidikan, sehingga prinsip-prinsip ini

lebih mudah dipahami oleh mahasiswa dan insinyur.

Tabel 1 Ringkasan penjelasan Bilangan *Froude* dan Bilangan *Reynolds*

Dimensionless Number	Formula	Fungsi utama	Relevansi dalam simulasi lambung kapal
<i>Froude</i> ( <i>Fr</i> )	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$	Kontrol efek terhadap resistensi gelombang	Kritikal untuk kapal kapal kecepatan tinggi dimana ketahanan terhadap gelombang mendominasi (40-60% of total resistance)
<i>Reynolds</i> ( <i>Re</i> )	$Re = \frac{VL}{\nu}$	Kontrol terhadap resistensi gesekan ( <i>frictional</i> )	Lebih relevan untuk kapal kapal berkecepatan rendah dimana ketahanan gesekan lebih dominan (70-90%)

### 3. Metodologi

Pada bagian ini akan dijelaskan metodologi yang dilakukan oleh penulis dalam melakukan kajian. Mengulang kembali bahwa penekanan tujuan tulisan ini adalah dalam untuk tujuan pembelajaran. kami melakukan simulasi iterasi penggunaan bilangan *Froude* dan bilangan *Reynolds* menggunakan Matlab R2023b.

Mengapa Menggunakan Simulasi Iteratif? Simulasi iteratif memungkinkan eksplorasi bagaimana bilangan *Froude* (*Fr*) dan bilangan *Reynolds* (*Re*) mempengaruhi koefisien hambatan pada berbagai ukuran kapal (*L*) dan kecepatan (*V*). Dengan memvariasikan parameter-parameter ini, akan didapatkan:

- Menunjukkan bahwa penskalaan berdasarkan bilangan *Froude* secara konsisten memprediksi hambatan gelombang yang akurat di berbagai ukuran dan kecepatan kapal.
- Menyoroti keterbatasan penskalaan berdasarkan bilangan *Reynolds*, karena cenderung menghasilkan kecepatan dan nilai hambatan gelombang yang tidak realistis dalam sebagian besar kasus.
- Memberikan demonstrasi yang lebih kuat tentang relevansi bilangan *Froude*, sehingga tulisan menjadi lebih meyakinkan tanpa menambah kompleksitas yang berlebihan.

### 3.1 Simulasi MATLAB

Simulasi Matlab Untuk menunjukkan dominasi bilangan *Froude* (*Fr*) dibandingkan bilangan *Reynolds* (*Re*) dalam simulasi lambung kapal, dilakukan simulasi iteratif menggunakan Matlab. Simulasi ini mengevaluasi koefisien hambatan untuk berbagai panjang kapal skala penuh ( $L_{full} = 50$  m hingga 150 m, dengan interval 50 m) dan bilangan *Froude* ( $Fr = 0.1$  hingga 0.4, dengan interval 0.1), yang mencerminkan kondisi operasional khas *displacement* kapal. Viskositas kinematik air diasumsikan sebesar  $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, dan percepatan gravitasi adalah  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>. Model skala digunakan dengan  $L_{model} = 1$  m, yang sesuai dengan rasio skala

$$(3.1) \quad \lambda = \frac{L_{full}}{L_{model}}$$

Koefisien Hambatan Total menggunakan asumsi  $C_t = C_f + C_w$  di mana  $C_f$ , koefisien hambatan viskos,

$$(3.2) \quad C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}$$

dihitung menggunakan garis gesekan yang merujuk pada ITTC-1957, dan  $C_w$ , koefisien hambatan gelombang, didekati sebagai

$$(3.3) \quad C_w = 0.004 Fr^2$$

Model yang disederhanakan ini dikalibrasi berdasarkan nilai khas untuk perpindahan (*displacement*) kapal. Untuk setiap kombinasi  $L_{full}$  dan *Fr*, kecepatan

skala penuh adalah

$$(3.4) \quad V_{full} = Fr \sqrt{g L_{full}}$$

dan bilangan *Reynolds* skala penuh dihitung sebagai:

$$(3.5) \quad Re_{full} = \frac{V_{full} L_{full}}{\nu}$$

Pada tahap perbandingan simulasi, penskalaan *Froude* dihitung sebagai

$$(3.6) \quad V_{model} = \frac{V_{full}}{\lambda}$$

sehingga  $Fr_{model} = Fr_{full}$ . Sedangkan penskalaan *Reynolds* dihitung sebagai

$$(3.7) \quad V_{model} = V_{full} \lambda$$

untuk memastikan  $Re_{model} = Re_{full}$  namun tetap menghasilkan nilai  $Fr_{model}$  yang sesuai. Untuk perhitungan luas permukaan basah, simulasi menggunakan skala

$$(3.8) \quad S_{full} = S_{model} \lambda^2$$

dengan asumsi kesamaan geometris untuk memastikan perhitungan hambatan yang sesuai.

Berikut adalah snippet MATLAB yang digunakan untuk simulasi.

```
% Parameters
g = 9.81; nu = 1e-6; rho = 1000;
L_model = 1; S_model = 10; % Approx.
model wetted area
L_full_range = 50:50:150; % Ship lengths (m)
Fr_range = 0.1:0.1:0.4; % Froude numbers
results = [];
```

```
% Iterate over lengths and Froude numbers
for L_full = L_full_range
    lambda = L_full / L_model;
    S_full = S_model * lambda^2; % Scale
    wetted area
    for Fr = Fr_range
        % Full-scale
        V_full = Fr * sqrt(g * L_full);
        Re_full = V_full * L_full / nu;
        Cf_full = 0.075 / (log10(Re_full) - 2)^2;
        Cw_full = 0.04 * Fr^2;
        Ct_full = Cf_full + Cw_full;

        % Froude scaling
        V_model_Fr = V_full / sqrt(lambda);
        Re_model_Fr = V_model_Fr * L_model /
nu;
        Cf_model_Fr = 0.075 /
(log10(Re_model_Fr) - 2)^2;
        Cw_model_Fr = 0.04 * Fr^2;
```

$$Ct_{model\_Fr} = Cf_{model\_Fr} + Cw_{model\_Fr};$$

```
% Reynolds scaling
V_model_Re = V_full * lambda;
Fr_model_Re = V_model_Re / sqrt(g *
L_model);
Re_model_Re = V_model_Re * L_model /
nu;
Cf_model_Re = 0.075 /
(log10(Re_model_Re) - 2)^2;
Cw_model_Re = 0.04 * Fr_model_Re^2;
Ct_model_Re = Cf_model_Re +
Cw_model_Re;

% Store results
results = [results; L_full, Fr, Ct_full,
Ct_model_Fr, Ct_model_Re];
end
end
```

```
% Display results table
fprintf('L_full (m) | Fr | Ct_full | Ct_model_Fr |
Ct_model_Re\n');
fprintf('-----\n');
for i = 1:size(results, 1)
    fprintf('%0.0f | %0.1f | %0.4f | %0.4f | %0.4f\n',
results(i,:));
end
```

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi yang dilakukan menghasilkan koefisien koefisien resistensi untuk kombinasi kombinasi dari  $L_{full}$  dan  $Fr$  seperti yang ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Koefisien koefisien resistensi

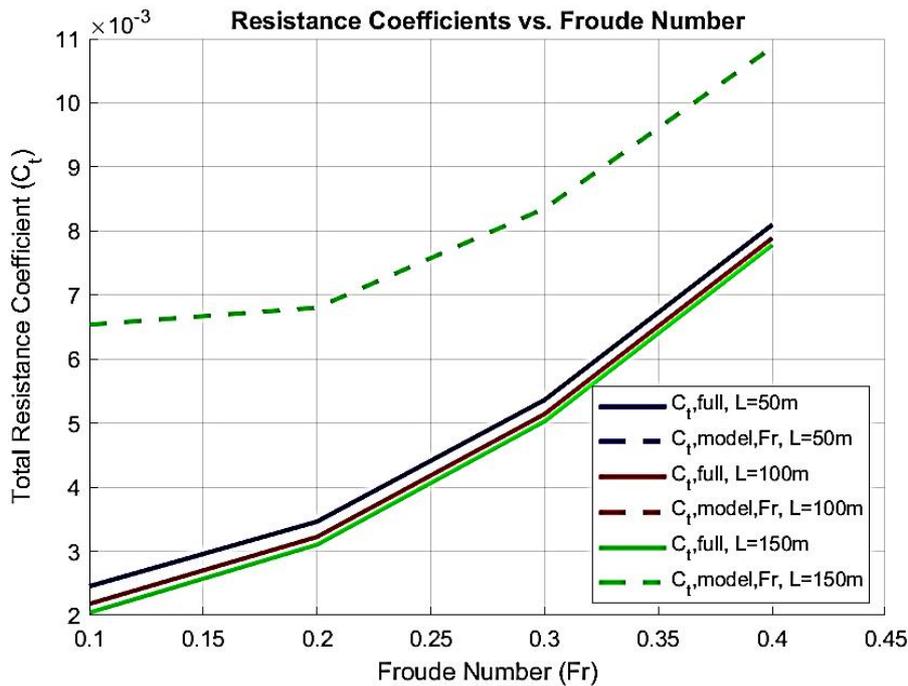
$L_{full}$ (m)	Fr	$C_{t, full}$	$C_{t, model, Fr}$	$C_{t, model, Re}$
50	0.1	0.0029	0.0066	64.0015
50	0.4	0.0078	0.0115	1024.0015
100	0.1	0.0027	0.0062	256.0014
100	0.4	0.0076	0.0111	4096.0014
150	0.1	0.0026	0.0060	576.0014
150	0.4	0.0075	0.0109	9216.0014

Secara umum, hasil simulasi adalah:

1. Penskalaan Penuh  $C_t$  berkisar antara 0.0026 hingga 0.0078, meningkat seiring dengan  $Fr$  karena nilai  $C_w$  yang lebih tinggi, dan sedikit menurun dengan bertambahnya  $L_{full}$  akibat nilai  $C_f$  yang lebih rendah (nilai  $Re$  yang lebih tinggi).
2. Penskalaan *Froude*: Nilai  $C_{t, model, Fr}$  berkisar antara 0.0060 hingga 0.0115, memungkinkan ekstrapolasi yang akurat ke  $C_{t, full}$  (0.0026 hingga 0.0078) yang menggunakan metode ITTC, karena kesetaraan bilangan *Froude* ( $Fr_{model} = Fr_{full}$ ) mempertahankan kesamaan hambatan gelombang.
3. Penskalaan *Reynolds*: Nilai  $C_{t, model, Re}$  meningkat secara tidak realistis (64

hingga 9216), yang didorong oleh nilai  $C_w$  yang berlebihan akibat ketidaksesuaian bilangan *Froude* model ( $Fr_{model}$ ), yang meningkat seiring dengan rasio skala ( $\lambda$ ) dan bilangan *Froude* ( $Fr$ ).

Tren ini berlaku untuk semua panjang kapal dan nilai bilangan *Froude* yang diuji, mengonfirmasi bahwa penskalaan berdasarkan bilangan *Froude* secara konsisten menghasilkan prediksi yang lebih andal, sedangkan penskalaan berdasarkan bilangan *Reynolds* menghasilkan hasil yang tidak praktis akibat distorsi pola gelombang (misalnya, 346 m/s untuk  $L_{full} = 50$  m dengan  $Fr = 0.4$ ).



Gambar 1 Hasil simulasi koefisien resistensi

## 5. KESIMPULAN

Tulisan ini menegaskan kembali bahwa bilangan *Froude* ( $Fr$ ) merupakan parameter tak berdimensi yang krusial dalam simulasi lambung kapal, khususnya dalam skenario di mana hambatan akibat pembentukan gelombang mendominasi,

seperti yang umum terjadi pada kapal displacement dalam kecepatan operasional. Melalui analisis teoretis yang komprehensif, didukung oleh simulasi iteratif menggunakan Matlab dengan visualisasi langsung, kami telah menunjukkan bahwa penskalaan berbasis bilangan *Froude* memastikan prediksi

hambatan gelombang yang akurat dalam uji model. Simulasi ini, yang mengiterasi berbagai panjang kapal ( $L_{full} = 50, 100, 150$  m) dan bilangan *Froude* ( $Fr = 0.1$  hingga  $0.4$ ), secara konsisten menunjukkan bahwa penskalaan *Froude* mempertahankan kesamaan pola gelombang, menghasilkan koefisien hambatan total ( $C_t$ ) yang sesuai dengan nilai skala penuh ( $0.0026$  hingga  $0.0078$ ) ketika diekstrapolasi menggunakan metode ITTC. Sebaliknya, penskalaan berdasarkan bilangan *Reynolds*, yang menuntut kesetaraan menghasilkan kecepatan model yang tidak praktis serta nilai  $C_t$  yang sangat besar ( $64$  hingga  $9216$ ), yang disebabkan oleh pola gelombang yang tidak sesuai.

Hasil simulasi dalam tulisan ini menekankan peran kunci bilangan *Froude* dalam prediksi hambatan gelombang, sekaligus menyoroti keterbatasan praktis penskalaan bilangan *Reynolds* akibat tingginya nilai skala penuh  $Re$  ( $10^8 - 10^9$ ). Tulisan ini juga membahas kesalahpahaman umum yang ditemukan dalam diskusi akademik, di mana beberapa praktisi secara keliru memprioritaskan bilangan *Reynolds* untuk semua permasalahan aliran fluida, yang dapat mengarah pada estimasi hambatan yang tidak akurat.

Dengan menyajikan prinsip-prinsip ini melalui kerangka teoretis yang jelas, alat simulasi yang praktis, serta sintesis penelitian terkini, tulisan ini berfungsi sebagai sumber edukasi bagi mahasiswa dan insinyur muda. Tulisan ini menekankan pentingnya pemilihan parameter penskalaan yang tepat untuk mengoptimalkan performa kapal, mengurangi konsumsi bahan bakar, serta meminimalkan biaya operasional. Wawasan yang disajikan dalam tulisan ini memperkuat prinsip hidrodinamika yang telah mapan dan berkontribusi pada pengembangan praktik desain kapal yang lebih akurat dan efisien, mendukung kemajuan rekayasa yang berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Dambrine, J., Pierre, M., & Rousseaux, G. (2016). A theoretical and numerical determination of optimal ship forms based on Michell's wave resistance. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 22(1), 88-111. editor, W. (2024, 03 14). *Wärtsilä*. Diambil kembali dari Wartsila: Ship Resistance: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/ship-resistance>
2. Gibbs, W., Ericsson, J., Isherwood, B., Taylor, D., & Stevens, R. L. (2024, 03 14). *Resistance and propulsion*. Diambil kembali dari Britannica: <https://www.britannica.com/technology/naval-architecture/Resistance-and-propulsion>
3. He, J., Wu, H., Ma, C., Yang, C.-J., Zhu, R., Li, W., & Noblesse, F. (2019). Froude number, hull shape, and convergence of integral representation of ship waves. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 78, 216-229.
4. Huang, F., Wang, L., & Yang, C. (2015). Hull Form Optimization for Reduced Drag and Improved Seakeeping Using a Surrogate-Based Method. *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-I-15-846*. Kona, Hawaii: ISOPE.
5. Karabulut, U. C., Özdemir, Y. H., & Barlas, B. (2018). Numerical Simulation of the Effect of Surface Roughness on Ship Resistance. *International Science and Academic Congress'18*, (hal. 139).
6. *Mecaflux: Froude number and wave ship resistance similarity*. (2024, 03 14). Diambil kembali dari Mecaflux: [https://www.mecaflux.com/en/nombre\\_de\\_froude.htm](https://www.mecaflux.com/en/nombre_de_froude.htm)
7. Niklas, K., & Pruszko, H. (2019). Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments. *Ocean Engineering*,

- 190, 106435.  
doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106435
8. Niklas, K., & Pruszek, H. (2019). Prediction of Ship Resistance with the Use of Full-Scale CFD Simulations. *MARINE 2019*. VIII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering.
  9. Oliveira, D., Larsson, A. I., & Granhag, L. (2018). Effect of ship hull form on the resistance penalty from biofouling. *Biofouling*, 34(3), 262-272. doi:10.1080/08927014.2018.1434157
  10. Wang, H., Zhu, R., Zha, L., & Gu, M. (2022). Experimental and numerical investigation on the resistance characteristics of a high-speed planing catamaran in calm water. *Ocean Engineering*, 258, 111837. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.111837