



Studi Dampak Perairan Dangkal terhadap Gaya Lateral (*Sway Force*) dan Momen Berputar (*Yaw Moment*)

Rico Putranto^a, Fakhri Akbar Ayub^{a,*}

^a Teknik Perkapalan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta, Indonesia

Abstract

This study analyzes the influence of restricted waters on sway force and yaw moment acting on a ship due to the bank effect, using Computational Fluid Dynamics (CFD). The case study was conducted on a 1:40 scale KRISO Container Ship (KCS) model with variations in speed, water depth (1.3T and 1.6T), and drift angles from 2° to 10°. Simulation results show that restricted water conditions, particularly shallow depths and the ship's proximity to canal walls, significantly intensify the bank effect, leading to increased sway force and yaw moment. This phenomenon occurs due to a pressure imbalance around the ship's hull, especially on the side closer to the canal wall, caused by flow constriction that accelerates the surrounding water. Larger drift angles and higher ship speeds further amplify the generated lateral force and yaw moment. Shallow water conditions exacerbate the bank effect due to more extreme flow acceleration beneath the hull. These findings confirm that navigating in narrow and shallow waterways increases the risk of course deviation caused by bank effect. Therefore, the results of this study are expected to serve as a useful reference in planning ship maneuvering and designing safer navigation routes in restricted waters

Keywords: restricted waters; bank effect; sway force; yaw moment; CFD

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh perairan terbatas terhadap gaya samping (*sway force*) dan momen belok (*yaw moment*) pada kapal akibat fenomena *bank effect*, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Studi kasus dilakukan pada model kapal KRISO Container Ship (KCS) skala 1:40 dengan variasi kecepatan, kedalaman air (1.3T dan 1.6T), serta sudut drift 2° hingga 10°. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi perairan terbatas, terutama pada kedalaman dangkal dan jarak kapal dengan dinding kanal yang dekat, memperkuat *bank effect* yang menyebabkan peningkatan signifikan pada *sway force* dan *yaw moment*. Fenomena ini terjadi akibat ketidakseimbangan tekanan di sekitar lambung kapal, terutama di sisi yang lebih dekat dengan dinding kanal, akibat penyempitan ruang aliran yang mempercepat fluida. Semakin besar sudut drift dan semakin tinggi kecepatan kapal, semakin besar pula gaya lateral dan momen belok yang dihasilkan. Kedangkalan air memperparah *bank effect* karena percepatan aliran di bawah kapal lebih ekstrem. Temuan ini menegaskan bahwa navigasi di perairan sempit dan dangkal meningkatkan risiko penyimpangan jalur kapal akibat pengaruh *bank effect*. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penting dalam perencanaan manuver kapal dan desain rute navigasi di perairan terbatas.

Kata kunci: perairan terbatas; efek tepi (bank effect); gaya samping (sway force); momen belok (yaw moment); CFD.

1. Pendahuluan

Transportasi maritim sangat vital bagi perdagangan global, namun navigasi di perairan terbatas seperti kanal, pelabuhan, dan sungai dangkal menghadirkan tantangan hidrodinamika yang unik. Kondisi ini menyebabkan aliran air di sekitar lambung kapal menjadi terkompresi, memicu munculnya gaya lateral (*sway force*) dan momen rotasi (*yaw moment*) yang signifikan. Fenomena ini sangat memengaruhi kemampuan manuver dan stabilitas kapal, dan sering diperparah oleh karakteristik seperti kedalaman dangkal dan kedekatan dengan tepi perairan atau "*bank effect*." Dalam kondisi ekstrem, interaksi ini bisa sangat berbahaya, meningkatkan risiko kecelakaan seperti yang terlihat pada insiden

* 2110313021@mahasiswa.upnj.ac.id:

kapal Ever Given di Terusan Suez pada tahun 2021, di mana *bank effect* turut berperan dalam kesulitan pengendalian kapal.

Mengingat semakin besarnya ukuran kapal dan seringnya navigasi di perairan sempit, risiko kecelakaan dan dampaknya terhadap rantai pasok global semakin meningkat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman mengenai dampak *sway force* dan *yaw moment* di perairan terbatas. Kami akan menganalisis karakteristik gaya-gaya ini dan mengidentifikasi *hydrodynamics derivative* yang memengaruhinya. Dengan menggunakan perangkat lunak Computational Fluid Dynamics (CFD), yang terbukti efektif dalam memprediksi gaya dan momen interaksi, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru tentang perilaku hidrodinamika kapal, berkontribusi pada ilmu perkapalan, dan membantu merancang metode navigasi yang lebih aman dan efisien di perairan yang menantang.

Secara spesifik, penelitian ini berfokus pada kapal KRISO Container Ship (KCS) dan hanya menganalisis *sway force* serta *yaw moment* pada variasi kecepatan dan *drift angle* tertentu, menggunakan simulasi CFD. Dengan demikian, hasil studi ini diharapkan dapat meminimalkan risiko kecelakaan dan meningkatkan keselamatan serta efisiensi operasi kapal di perairan terbatas.

2. Tinjauan Pustaka

Perairan terbatas, seperti kanal, pelabuhan, atau jalur pelayaran dangkal, menghadirkan kondisi navigasi yang kompleks dengan ruang gerak terbatas, arus kuat, dan lalu lintas tinggi. Faktor-faktor seperti kedalaman air dan jarak dari tepi kanal sangat memengaruhi manuver kapal, yaitu proses mengendalikan arah, kecepatan, dan posisi kapal. Desain kapal, sistem kemudi, serta kondisi lingkungan turut berperan dalam manuver, di mana perairan dangkal atau sempit dapat meningkatkan resistansi dan mengurangi kemampuan manuver akibat perubahan gaya hidrodinamika. Untuk memahami interaksi ini, Model Matematika Manuver Kapal (MMG), khususnya komponen lambung (H), digunakan karena dampaknya yang signifikan terhadap prediksi manuver. Selain itu, konsep static drift — kondisi aliran menyamping yang mantap tanpa rotasi yaw — penting untuk menentukan hydrodynamic derivatives seperti Y' dan N' , yang esensial dalam pemodelan manuver.

Hydrodynamic derivatives sendiri adalah koefisien matematis yang menggambarkan perubahan gaya dan momen hidrodinamika kapal akibat gerakannya di air, krusial untuk memprediksi stabilitas dan manuverabilitas. Dalam konteks ini, dua gaya hidrodinamika utama yang menjadi fokus adalah gaya sway (lateral force), yaitu komponen gaya samping yang menyebabkan gerakan horizontal tanpa perubahan arah signifikan, dan momen yaw, momen yang menyebabkan kapal berputar pada sumbu vertikalnya, vital untuk proses berbelok. Untuk mensimulasikan fenomena ini, metode Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) digunakan untuk menyederhanakan persamaan aliran fluida, dilengkapi dengan model turbulensi Realizable $k-\varepsilon$, yang lebih akurat dalam memprediksi viskositas turbulen dan telah terbukti efektif dalam menganalisis stabilitas lintasan kapal besar di perairan dangkal.

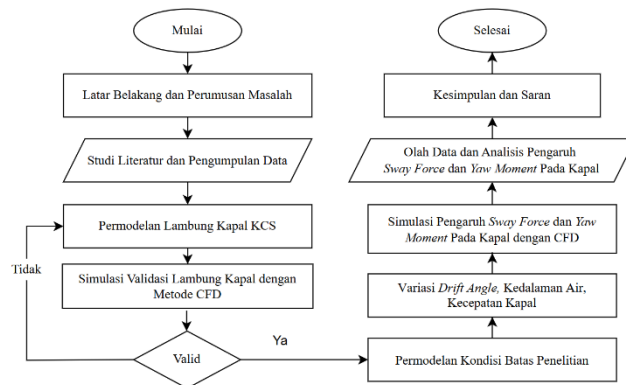
Salah satu fenomena krusial yang dibahas adalah bank effect atau interaksi kapal-tepi, yang terjadi ketika kapal berlayar dekat dengan dinding dermaga atau kanal. Efek ini timbul akibat ketidakseimbangan bidang tekanan di sekitar kapal, yang disebabkan oleh pembatas atau asimetri di sisi kapal, bahkan ketika kapal berada di garis tengah. Fenomena ini berpotensi berbahaya karena dapat menyebabkan kapal bergeser atau berbelok tak terduga, meningkatkan risiko kecelakaan seperti tabrakan atau kandas, dan memengaruhi aksesibilitas nautika di pelabuhan serta jalur masuk.

Persamaan dan rumus :

$$N'_H = N'_\beta \beta + N'_r r + N'_{\beta\beta} \beta |\beta| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{\beta r} \beta + N'_{\beta r r'}) \beta r' \quad (1)$$

$$Y'_H = Y'_\beta \beta + Y'_r r + Y'_{\beta\beta} \beta |\beta| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{\beta r} \beta + Y'_{\beta r r'}) \beta r' \quad (2)$$

3. Metodologi Penelitian



Dalam penelitian ini, proses dimulai dengan mempelajari teori dasar mengenai bank effect, gaya-gaya hidrodinamika kapal, serta bagaimana Computational Fluid Dynamics (CFD) digunakan dalam menganalisis perilaku kapal di perairan terbatas. Objek penelitian yang digunakan adalah kapal KRISO Container Ship (KCS) berskala 1:40, yang sudah umum dijadikan model referensi dalam studi hidrodinamika. Model kapal dibuat dalam bentuk digital lalu dimasukkan ke dalam domain simulasi yang disusun menyerupai kondisi nyata, termasuk dinding kanal dan variasi kedalaman perairan (1.3T dan 1.6T). Setelah model kapal dan domain selesai, dilakukan proses pembuatan mesh hingga mendapatkan hasil yang stabil dan akurat. Simulasi dilakukan menggunakan CFD, dengan pendekatan RANS dan model turbulensi Realizable $k-\epsilon$ untuk memprediksi aliran di sekitar lambung kapal. Dalam proses simulasi, digunakan beberapa variasi seperti sudut drift kapal (antara 2° hingga 10°), kecepatan kapal, dan kedalaman air. Hasil simulasi berupa data sway force dan yaw moment dianalisis untuk melihat bagaimana pengaruh kondisi perairan terhadap manuver kapal. Selain itu, pola aliran fluida di sekitar kapal juga diamati untuk memahami lebih jelas bagaimana bank effect terbentuk.

4. Hasil dan Pembahasan

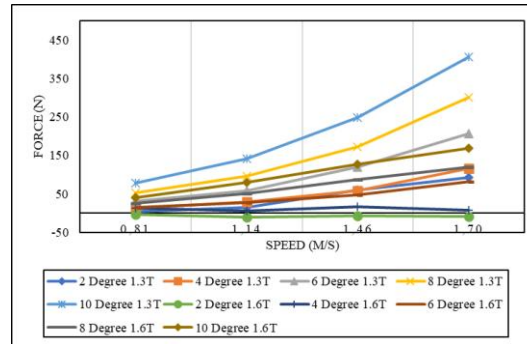
Tabel 4.1 Gaya Lateral 1.3T

Speed (m/s)	Y'H (N)				
	2°	4°	6°	8°	10°
0,81	3,621	12,428	30,064	52,964	77,639
1,14	14,135	29,102	58,130	95,680	141,756
1,46	59,1111	58,178	118,95	172,875	247,753
1,70	92,002	116,197	206,101	300,836	404,894

Tabel 4.2 Gaya Lateral 1.6T

Speed (m/s)	Y'H (N)				
	2°	4°	6°	8°	10°
0,81	3,621	12,428	30,064	52,964	77,639
1,14	14,135	29,102	58,130	95,680	141,756
1,46	59,1111	58,178	118,95	172,875	247,753
1,70	92,002	116,197	206,101	300,836	404,894

Grafik 4.1 Grafik Perbandingan Nilai Gaya Lateral



Pada Grafik 4.1 terlihat bahwa nilai sway force ($Y'H$) pada kedalaman 1.3T lebih tinggi dibandingkan kondisi kedalaman 1.6T pada semua variasi drift angle dan kecepatan, yang menunjukkan bahwa kedalaman air merupakan faktor penting dalam mempengaruhi besar kecilnya gaya lateral kapal di perairan terbatas. Pada kedalaman 1.3T, kapal berada di perairan dangkal dengan volume air di bawah dan di samping lambung kapal yang lebih sempit, sehingga aliran fluida di bawah lambung dan di sisi kapal menjadi terkompresi. Pemampatan aliran ini meningkatkan kecepatan tekanan dan menurunkan tekanan di sisi kapal, terutama di sisi yang dekat dinding kanal, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara sisi kiri dan kanan kapal yang memicu terbentuknya gaya lateral (sway force) lebih besar. Sebaliknya, pada kedalaman 1.6T, aliran fluida memiliki ruang gerak yang lebih luas di bawah kapal sehingga perbedaan tekanan di kedua sisi kapal tidak sebesar pada kondisi air dangkal, menyebabkan sway force yang dihasilkan lebih rendah meskipun tetap meningkat dengan bertambahnya drift angle. Peningkatan $Y'H$ pada kedalaman 1.3T juga terlihat lebih tajam pada drift angle di atas 6° , yang menunjukkan bahwa kombinasi antara kondisi dangkal dan drift angle besar menghasilkan gaya samping dominan sehingga kapal lebih sulit dikendalikan secara lateral dan rentan terdorong keluar jalur, khususnya saat kecepatan kapal tinggi. Oleh karena itu, kapal yang beroperasi di perairan dangkal memiliki risiko lebih besar terhadap gangguan arah akibat bank effect karena gaya lateral yang jauh lebih besar, sehingga navigasi di kanal sempit dan dangkal harus dilakukan secara lebih hati-hati untuk mengurangi potensi penyimpangan jalur.

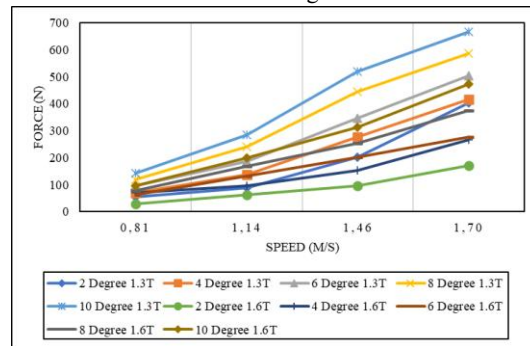
Tabel 4.3 Tabel Momen Yaw 1.3T

Speed (m/s)	N'H (N/m)				
	2°	4°	6°	8°	10°
0,81	55,682	71,294	95,354	119,010	142,363
1,14	88,18	136,378	186,639	239,795	285,637
1,46	200,516	275,582	346,001	444,242	519,436
1,70	403,684	415,337	504,271	585,732	666,57

Tabel 4.4 Tabel Momen Yaw 1.6T

Speed (m/s)	N'H (N/m)				
	2°	4°	6°	8°	10°
0,81	27,829	71,294	61,178	77,096	96,123
1,14	62,198	96,677	132,084	168,994	199,709
1,46	95,621	152,69	202,754	252,535	313,0421
1,70	169,716	266,434	275,431	373,558	472,891

Grafik 4.2 Grafik Perbandingan Nilai Momen Yaw



Grafik 4.3 menunjukkan bahwa nilai yaw moment ($N'H$) pada kedalaman 1.3T secara konsisten lebih besar dibandingkan pada kedalaman 1.6T untuk semua variasi drift angle dan kecepatan, yang menunjukkan bahwa perairan dangkal memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan momen belok pada kapal. Pada kondisi kedalaman 1.3T, kapal berada di lingkungan aliran yang lebih sempit di bawah lambungnya, menyebabkan aliran fluida di sisi kapal, terutama yang dekat dengan dinding kanal, menjadi lebih cepat sehingga tekanan di sisi tersebut menurun drastis, sementara tekanan di sisi lainnya tetap tinggi, menciptakan ketidakseimbangan tekanan di sepanjang lambung kapal yang menghasilkan momen putar ($N'H$) lebih besar. Semakin dangkal perairan, semakin kuat ketidakseimbangan tekanan ini terjadi. Sebaliknya, pada kedalaman 1.6T, aliran fluida di bawah kapal memiliki ruang lebih besar untuk bergerak sehingga tidak terlalu tertekan dan distribusi tekanan di kedua sisi lambung menjadi lebih merata, menghasilkan momen belok yang lebih kecil meskipun tetap meningkat seiring bertambahnya drift angle. Peningkatan yaw moment pada kondisi 1.3T juga tampak lebih tajam ketika drift angle melebihi 6° , terutama pada kecepatan tinggi, yang menunjukkan bahwa kapal di perairan dangkal lebih rentan mengalami perubahan arah tidak diinginkan akibat momen belok yang lebih besar. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa kedalaman air yang dangkal (1.3T) memiliki peran besar dalam memperkuat pengaruh bank effect terhadap yaw moment, sehingga kapal menjadi lebih sulit dikendalikan arah geraknya dibandingkan saat beroperasi pada kedalaman yang lebih dalam seperti 1.6T.

5. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi CFD pada kapal KRISO Container Ship (KCS), penelitian ini menyimpulkan bahwa perairan terbatas secara signifikan meningkatkan *sway force* dan *yaw moment* pada kapal, terutama pada *drift angle* dan kecepatan tinggi. Fenomena ini diperparah oleh kedalaman air yang lebih dangkal (1.3T vs 1.6T) akibat peningkatan efek tekanan dan pemampatan aliran air di sekitar lambung, yang juga memicu *bank effect* karena ketidakseimbangan tekanan antara sisi kapal. Peningkatan gaya dan momen ini mengindikasikan bahwa manuver kapal di perairan terbatas menjadi lebih sulit dan menantang. Selain itu, teknologi CFD terbukti efektif dan akurat dalam memprediksi kondisi hidrodinamika yang kompleks ini, memberikan gambaran realistis tentang perilaku kapal. Untuk pengembangan studi di masa depan, disarankan untuk mengintegrasikan variabel lingkungan tambahan seperti angin samping atau arus, menganalisis gerakan kapal secara tiga dimensi (termasuk *pitch*, *roll*, dan *heave*), serta melakukan simulasi manuver dinamis untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang respons kapal di perairan terbatas.

Nomenklatur

N'_H	Momen Yaw
Y'_H	Gaya Lateral
β	Drift angle
r	Kecepatan rotasi

Referensi

- Ayub, M., & Furukawa, S. (2024). *Recent Advances in Ship Hydrodynamics and Maneuvering*. (Catatan: Pastikan ini adalah sumber yang sudah terbit).
- Bertram, V. (2002). *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann.
- Coldwell, J. (1983). *Ship Handling: Theory and Practice*. Stanford Maritime.
- Delefortrie, G., Lataire, E., & Vantorre, M. (2024). Advances in ship-bank interaction research. *Ocean Engineering*, 297, 116817. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116817> (Catatan: Pastikan ini adalah sumber yang sudah terbit dan DOI sesuai jika ada).
- Faltinsen, O. M. (2005). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- Larsson, L., Raven, H. C., & Hoekstra, M. (2010). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Hydromechanics*. Cambridge University Press.
- Lee, C. K., & Lee, S. (2008). Numerical prediction of the maneuvering forces of a ship in shallow water. *Ocean Engineering*, 35(5-6), 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.12.001>

- Lee, S., & Hong, S. (2017). Maneuvering performance of large vessels in shallow water using RANS simulation. *Ocean Engineering*, 142, 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.036>
- Lewis, E. V. (Ed.). (1989). *Principles of Naval Architecture (Vol. II): Resistance, Propulsion, and Vibration*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Liu, K., Su, B., Yu, D., & Zou, L. (2021). Numerical investigation on the bank effect of a ship in restricted waters. *Ocean Engineering*, 225, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108745>
- Longo, J., & Stern, F. (2002). Uncertainty assessment for EFD, CFD, and predictions of ship maneuvering in shallow and deep water. *Journal of Ship Research*, 46(4), 282–301.
- Maimun, A., & Muhammad, A. (2006). *Ship Manoeuvring in Restricted Waters*. Universiti Teknologi Malaysia.
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory (Vol. 2): Ship Resistance and Propulsion, Seakeeping, Ship Dynamics and Response*. Butterworth-Heinemann.
- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k- ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)