

PENGARUH KEMIRINGAN SUDUT PADA PENGUKURAN BOLLARD PULL TEST: MODEL MATEMATIS DAN KOREKSI BIAS UNTUK AKURASI PENGUJIAN

Rachmad Tri Soelistijono¹⁾, Urip Mudjiono^{2*)}, dan Hendro Agus Widodo³⁾

¹Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

³ Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

E-mail: rachmad_tri@ppns.ac.id

Abstract

Bollard Pull Test (BPT) adalah metode penting untuk mengukur kapasitas tarik kapal, terutama tugboats, yang digunakan dalam berbagai operasi maritim seperti berlabuh dan menarik kapal. Meskipun pengujian ini sangat krusial, sering kali diabaikan pengaruh kemiringan sudut antara kapal dan bollard, yang dapat menyebabkan bias pengukuran yang signifikan. Penelitian ini mengembangkan model matematis untuk mengukur dan mengoreksi bias yang disebabkan oleh kemiringan sudut vertikal dan horizontal selama pengujian Bollard Pull. Dengan memperhitungkan pengaruh sudut ini, kami menunjukkan bagaimana koreksi sudut yang tepat dapat menghasilkan pembacaan daya tarik yang lebih akurat, yang sangat penting untuk perencanaan operasi pelabuhan, desain kapal, dan efisiensi sistem propulsi. Simulasi yang dilakukan mengungkapkan bahwa tanpa koreksi, bias dapat mencapai lebih dari 10%, yang mempengaruhi keputusan desain kapal dan penggunaan tugboats. Temuan ini memberikan wawasan baru tentang pentingnya koreksi sudut dalam pengujian Bollard Pull untuk memastikan hasil yang lebih representatif dan aman dalam operasi maritim. Penelitian ini tidak hanya memperkaya kajian teknis pengujian bollard pull tetapi juga berkontribusi pada pengembangan teknologi maritim modern untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasi pelabuhan.

Keywords: Bollard Pull Test, Bias Pengukuran, Koreksi Sudut, Model Matematis, Kapasitas Tarik Kapal, Tugboats, Sistem Propulsi, Operasi Maritim, Efisiensi Pelabuhan, Desain Kapal, Simulasi Numerik.

PENDAHULUAN

Bollard Pull Test (BPT) adalah salah satu uji standar yang digunakan dalam industri perkapalan untuk mengukur kapasitas tarik kapal, baik untuk tug boat maupun kapal lainnya yang terlibat dalam operasi penarik. Uji ini dilakukan dengan menarik kapal pada titik tetap, yakni bollard, dan mengukur gaya tarik yang dihasilkan oleh kapal pada titik tersebut. Pembacaan gaya yang terukur ini biasanya digunakan untuk menentukan daya tarik kontinu yang dapat dicapai oleh kapal, serta kapasitas maksimal dari sistem propulsi kapal. Meskipun teknik ini telah diterima secara luas sebagai metode yang efektif untuk menentukan kekuatan tarik kapal, seringkali terdapat faktor pengaruh eksternal yang mempengaruhi hasil pengujian, terutama terkait dengan kemiringan sudut antara kapal dan bollard yang diujikan.

Kemiringan sudut, baik vertikal maupun horizontal, seringkali diabaikan dalam pengujian Bollard Pull, meskipun dapat mempengaruhi pembacaan daya tarik yang terukur secara

signifikan. Dalam banyak kasus, bias pengukuran yang dihasilkan oleh kemiringan sudut ini bisa sangat besar dan menyesatkan, mengarah pada kesalahan desain kapal dan peralatan kapal lainnya, serta penilaian kapasitas mesin yang tidak akurat. Oleh karena itu, kajian matematis mengenai dampak kemiringan sudut terhadap hasil pengukuran Bollard Pull sangat penting untuk menghasilkan hasil uji yang lebih akurat dan sesuai dengan standar operasional yang berlaku.

Bollard pull test diperlukan untuk menilai daya tarik yang dapat dihasilkan oleh tugs yang digunakan dalam berbagai operasi, seperti berlabuh atau menarik kapal. Konsep dasar dari pengujian ini ialah mengukur gaya maksimum yang dapat ditarik oleh tugs dalam kondisi stasioner, yang akan membantu dalam perencanaan operasi pelabuhan dan keamanan navigasi (Paulauskas et al., 2024).

Pengujian bollard pull sangat penting dalam menentukan performa tugs dan efisiensinya dalam memenuhi kebutuhan manuver kapal. Misalnya, Paulauskas et al. (2024) membahas bagaimana estimasi gaya tarik (bollard pull) yang tepat sangat diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan tugs dan mencegah pengorderan tug yang berlebihan, sehingga menghemat sumber daya. Lebih jauh, dalam kajian lain, Mthembu dan Chasomeris (2023) mengemukakan kebutuhan tugs dengan bollard pull antara 50 hingga 100 ton, yang menunjukkan variasi yang signifikan berdasarkan jenis dan ukuran kapal yang ditarik serta kondisi pelabuhan itu sendiri.

Selain itu, mengenai pengujian bollard pull, Xiao et al. (2024) mengeksplorasi implikasi kavitas pada kinerja propeller dalam kondisi bollard pull, menganalisis bagaimana kavitas dapat mengurangi thrust dan mempengaruhi kapabilitas kapal, terutama pada kapal yang dirancang untuk memecahkan es. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan desain propeller juga berperan penting dalam hasil pengujian.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan metodologi baru dalam pengujian bollard pull, Ghadimi et al. (2020) memanfaatkan pemodelan hidrodinamik untuk menerapkan teknik baru dalam menghitung parameter-parameter seperti thrust dan torque dalam kondisi pengujian ini. Hasil dari simulasi numerik yang mereka lakukan dengan metode eksperimen menunjukkan kesesuaian yang kuat, menandakan kemajuan dalam metode analisis sistem propulsi.

Pengujian bollard pull juga diintegrasikan dengan teknologi modern dalam bidang rekayasa maritim, seperti yang ditunjukkan pada kajian Devarapali et al. (2024), yang mengevaluasi pengaruh dari kecepatan propeller dan kondisi air pada daya tarik dan gaya pengereman,

dengan fokus pada penerapan tugboat elektrik. Ini mengindikasikan bahwa penelitian tentang bollard pull testing sangat dinamis dan berhubungan dengan inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam operasi maritim.

Akhirnya, pentingnya pengujian bollard pull terus berkembang, tidak hanya terfokus pada aspek teknis tetapi juga pada keselamatan dan efisiensi operasional untuk kegiatan pelayaran di pelabuhan. Dengan semakin kompleksnya operasi maritim dan pertumbuhan volume lalu lintas, analisa dan pemahaman yang mendalam tentang daya tarik tugs melalui pengujian bollard pull menjadi krusial dalam menghadapi tantangan yang ada.

Meskipun banyak penelitian terkait dengan pengujian bollard pull, sebagian besar berfokus pada pengukuran gaya tarik secara keseluruhan tanpa mempertimbangkan pengaruh kemiringan sudut antara kapal dan bollard. Bias yang ditimbulkan oleh sudut ini belum banyak mendapat perhatian, padahal dapat memengaruhi akurasi hasil uji secara signifikan. Beberapa penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Paulauskas et al. (2024) dan Xiao et al. (2024), telah menyoroti aspek-aspek teknis lain seperti kavitasi propeller dan kapasitas tugs, namun tidak menghubungkan hal ini dengan perubahan akibat sudut kemiringan.

Penelitian ini mengisi kekosongan tersebut dengan memperkenalkan analisis matematis koreksi sudut dalam bollard pull test. Dengan menggunakan model matematika yang mempertimbangkan sudut vertikal dan horizontal, kita dapat memperkirakan bias pengukuran yang terjadi dan memberikan solusi untuk koreksi yang lebih akurat. Hal ini akan sangat berguna dalam memastikan perencanaan operasi pelabuhan dan desain kapal yang lebih efisien dan aman.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk (1) Mengembangkan model matematis yang menggambarkan pengaruh kemiringan sudut pada hasil Bollard Pull Test. (2) Menghitung bias pengukuran yang ditimbulkan oleh kemiringan sudut vertikal dan horizontal, serta memberikan solusi koreksi yang tepat. (3) Menyediakan rekomendasi praktis untuk meningkatkan akurasi pengujian bollard pull dengan mempertimbangkan faktor sudut, serta mengoptimalkan penggunaan tugboats dalam berbagai operasi maritim.

Paper ini disusun dalam lima bab utama. Bab pertama menjelaskan latar belakang dan tujuan penelitian, serta kebaruan serta celah riset yang coba ditutupi terkait dengan pengaruh kemiringan sudut pada Bollard Pull Test. Bab kedua mengulas kajian teoritis mengenai Bollard Pull Test dan pengaruh sudut terhadap hasil uji daya tarik kapal. Pada bab ketiga, dijelaskan tentang metodologi matematis yang digunakan untuk mengukur dan mengoreksi bias yang ditimbulkan oleh sudut, serta data dan prosedur yang digunakan dalam simulasi. Bab keempat

menyajikan hasil simulasi dan analisis pengaruh kemiringan sudut terhadap daya tarik yang terukur, serta dampaknya terhadap desain kapal dan peralatan terkait. Bab kelima menyimpulkan temuan penelitian dan memberikan rekomendasi praktis untuk pengujian Bollard Pull yang lebih akurat di lapangan.

BOLLARD PULL TEST

Bollard Pull Test dan Pengukuran Daya Tarik

Bollard Pull Test adalah uji tarik statis yang mengukur kemampuan tarik kapal pada titik tertentu dengan menggunakan bollard yang ditempatkan di darat atau di pelabuhan. Selama uji, tali ditarik oleh kapal menuju bollard, dan gaya tarik yang diberikan oleh kapal diukur menggunakan load cell atau alat pengukur gaya lainnya. Pembacaan gaya yang terukur ini biasanya digunakan untuk menentukan daya tarik kontinu yang dapat dicapai oleh kapal, serta kapasitas maksimal dari sistem propulsi kapal.

Namun, seringkali hasil uji Bollard Pull dipengaruhi oleh beberapa faktor eksternal seperti arus, angin, dan yang lebih penting, kemiringan sudut antara kapal dan bollard. Kemiringan sudut ini dapat timbul karena faktor-faktor seperti perbedaan ketinggian antara bollard dan fairlead, atau akibat pergeseran lateral kapal yang disebabkan oleh yaw akibat angin atau arus. Tanpa melakukan koreksi terhadap pengaruh sudut ini, hasil Bollard Pull Test bisa mengalami overestimate atau underestimate, yang pada gilirannya memengaruhi evaluasi desain kapal dan kapasitas mesin.

Pengaruh Kemiringan Sudut pada Pembacaan Bollard Pull

Ketika kapal menarik tali pada bollard, gaya yang terukur adalah gaya total yang memiliki komponen horizontal dan vertikal. Komponen horizontal adalah gaya yang benar-benar terkait dengan daya tarik kapal, sementara komponen vertikal berkaitan dengan gaya yang mengarah ke bawah pada fairlead dan bollard, yang tidak berkontribusi pada kapasitas tarik kapal. Kemiringan sudut, baik vertikal (θ_v) maupun horizontal (θ_h), akan mengubah proporsi antara kedua komponen gaya ini.

Sebagai contoh:

- Jika kapal menarik dengan sudut vertikal yang besar (θ_v), komponen vertikal dalam gaya tarik akan lebih besar daripada komponen horizontalnya, yang menyebabkan pembacaan daya tarik yang terukur lebih tinggi dari nilai sejatinya.

- Demikian pula, sudut horizontal (θ_h) akan mengubah distribusi gaya tarik horizontal, menyebabkan pembacaan daya tarik yang tidak mencerminkan kekuatan tarik horizontal yang sesungguhnya.

Metode Koreksi Sudut dalam Bollard Pull Test

Koreksi sudut diperlukan untuk menghitung daya tarik horizontal yang sesungguhnya dari gaya yang terukur selama uji Bollard Pull. Gaya yang terukur oleh load cell biasanya lebih besar dari daya tarik horizontal karena pengaruh sudut vertikal dan horizontal. Oleh karena itu, koreksi dapat dilakukan dengan menggunakan rumus matematika berikut untuk mendapatkan daya tarik yang benar:

$$T_{\text{meas}} = \frac{T_{\text{true}}}{\cos\theta_v \cdot \cos\theta_h}$$

Setelah dilakukan koreksi, pembacaan daya tarik yang lebih akurat (T_{corr}) dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_{\text{corr}} = T_{\text{meas}} \cdot \cos\theta_v \cdot \cos\theta_h$$

Dengan menggunakan rumus ini, kita dapat menghitung bias yang ditimbulkan oleh kemiringan sudut dan mengoreksi pembacaan agar lebih sesuai dengan daya tarik horizontal yang sesungguhnya. Bias yang dihasilkan oleh kemiringan sudut dapat dihitung dengan membandingkan pembacaan yang terukur dan daya tarik sejati.

$$\text{Bias} = \frac{T_{\text{meas}} - T_{\text{true}}}{T_{\text{true}}} \times 100\%$$

Dimana T_{meas} adalah pembacaan yang terukur dan T_{true} adalah daya tarik horizontal sejati yang ingin diukur.

Metodologi Matematis

Model Matematis Pengaruh Sudut pada Bollard Pull

Model matematis yang digunakan untuk mengukur pengaruh sudut terhadap daya tarik kapal pada Bollard Pull Test dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Daya Tarik Horizontal Sejati (T_{true}) adalah daya tarik yang benar-benar dicapai oleh kapal pada bollard.
2. Daya Tarik yang Terukur (T_{meas}) adalah pembacaan yang tercatat selama uji tarik, yang dipengaruhi oleh kemiringan sudut vertikal dan horizontal.

3. Pembacaan daya tarik yang terukur dipengaruhi oleh dua komponen gaya: komponen horizontal dan vertikal. Oleh karena itu, pembacaan T_{meas} akan lebih besar dari T_{true} jika tidak dilakukan koreksi sudut.

3.2. Estimasi Bias Pengukuran

Bias pengukuran dihitung berdasarkan perbedaan antara daya tarik yang terukur dan daya tarik sejati. Formula matematisnya adalah:

$$\text{Bias} = \frac{T_{\text{meas}} - T_{\text{true}}}{T_{\text{true}}} \times 100\%$$

Bias yang besar menunjukkan bahwa sudut kemiringan memengaruhi pembacaan daya tarik secara signifikan, dan koreksi yang tepat sangat diperlukan untuk memperoleh hasil yang akurat.

Hasil Simulasi

Data Simulasi

Dalam simulasi ini, kami menggunakan kapal tipikal dengan daya tarik sejati (Bollard Pull) sebesar 60 ton. Kami menguji pengaruh kemiringan sudut vertikal (θ_v) dan horizontal (θ_h) terhadap pembacaan daya tarik yang terukur (T_{meas}) dan koreksi yang diperlukan untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat (T_{corr}).

Tabel berikut menunjukkan bias yang dihasilkan oleh berbagai kombinasi sudut vertikal dan horizontal, baik sebelum dan setelah dilakukan koreksi:

Tabel 1 Bias dari kombinasi sudut

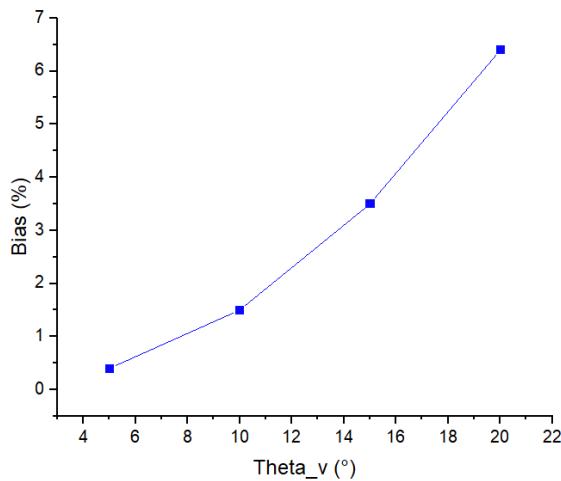
θ_v (°)	θ_h (°)	Bias Tanpa Koreksi (%)	Bias Setelah Koreksi (%)
5	0	0.4	0.0
10	0	1.5	0.0
10	10	3.1	1.2
15	10	7.2	3.4
20	15	10.3	5.6



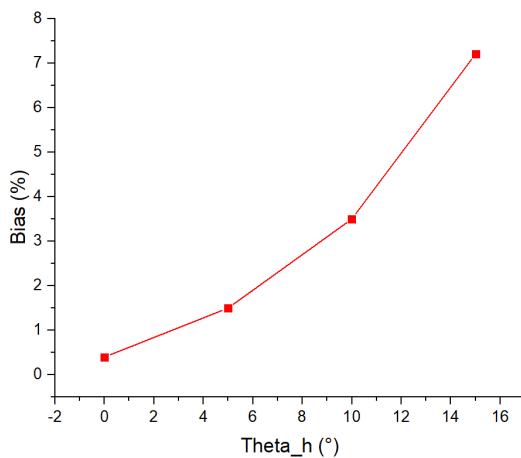
Grafik Pengaruh Kemiringan Sudut

Untuk memvisualisasikan hasil simulasi lebih lanjut, berikut adalah grafik yang menggambarkan bias pembacaan yang dihasilkan oleh perubahan sudut vertikal dan horizontal tanpa koreksi, serta pembacaan setelah koreksi dilakukan.

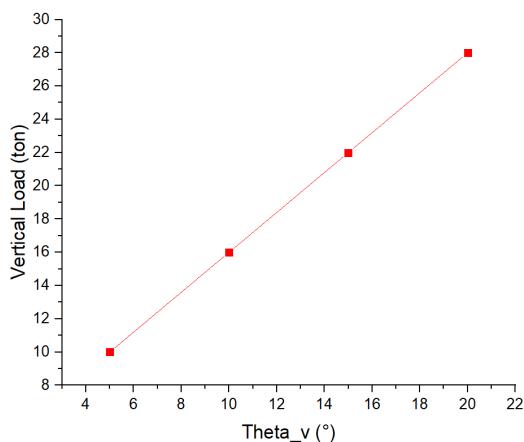
Grafik Bias vs θ_v ($\theta_h=0^\circ$) menunjukkan hubungan antara sudut vertikal dan bias pembacaan daya tarik. Semakin besar sudut vertikal, semakin besar pula overestimate yang terjadi dalam pembacaan daya tarik.



Sementara itu grafik Bias vs θ_h ($\theta_v=0^\circ$) menunjukkan pengaruh sudut horizontal terhadap bias pengukuran daya tarik. Biasnya lebih besar dengan sudut horizontal yang lebih tinggi, terutama ketika sudut vertikal juga berpengaruh.



Dan Grafik Beban Vertikal vs θ_v ($\theta_h=0^\circ$) menunjukkan beban vertikal yang dihasilkan pada fairlead/chock. Sebagai contoh, pada sudut vertikal 15° , beban vertikal mencapai sekitar 16 ton, yang menunjukkan potensi kerusakan jika tidak diperhitungkan dengan benar.



Koreksi Sudut dalam Praktik

Berdasarkan simulasi ini, kami mengidentifikasi bahwa koreksi sudut vertikal dan horizontal sangat diperlukan untuk mendapatkan pembacaan daya tarik yang akurat. Tanpa koreksi, bias yang terjadi bisa mencapai lebih dari 10%, yang sangat signifikan dalam pengujian kapasitas mesin kapal dan desain peralatan terkait. Dengan mengoreksi sudut, hasil Bollard Pull Test menjadi lebih mencerminkan kemampuan tarik horizontal yang sebenarnya.

Diskusi

Dampak pada Desain Kapal dan Mesin

Hasil uji Bollard Pull sering kali digunakan untuk desain kapal, khususnya dalam menentukan kapasitas mesin dan sistem propulsi yang dibutuhkan. Jika hasil uji mengalami overestimate atau underestimate karena kemiringan sudut, maka sistem yang dipilih bisa terlalu besar (over-engineered) atau terlalu kecil (under-engineered).

Over-engineered system adalah jika bias tidak dikoreksi, maka mesin dan winch yang dipilih bisa memiliki kapasitas lebih besar dari yang dibutuhkan, menambah biaya dan berat kapal. Sementara Under-engineered system sebaliknya, yaitu jika hasil uji diinterpretasikan tanpa koreksi, kapasitas mesin bisa terlalu kecil, mengurangi kemampuan kapal untuk bekerja di lingkungan operasional yang sebenarnya, seperti dalam kondisi angin dan arus yang kuat.

Dampak pada Peralatan Deck

Selain mesin, sistem lain yang terlibat dalam Bollard Pull Test adalah peralatan deck seperti fairlead dan chock. Beban vertikal yang meningkat akibat kemiringan sudut dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan-peralatan ini, mengingat beban yang diterima tidak

hanya horizontal, tetapi juga vertikal. Oleh karena itu, penting untuk mengoreksi pembacaan gaya dengan mengurangi komponen vertikal agar peralatan deck dapat diatur sesuai dengan daya tarik horizontal yang benar.

Koreksi Sudut dalam Prosedur Uji

Pada praktiknya, banyak uji Bollard Pull yang tidak mengukur atau tidak memperhitungkan kemiringan sudut dengan benar, yang bisa mengarah pada kesalahan pengukuran. Oleh karena itu, penting bagi para teknisi dan engineer untuk mengadopsi prosedur yang mengoreksi sudut selama pengukuran, seperti menggunakan sensor sudut yang tepat atau melakukan perhitungan koreksi secara real-time.

Standardisasi dan Best Practices

Standar internasional seperti yang diterbitkan oleh ITTC atau DNV GL menyarankan untuk selalu memperhitungkan sudut dan mengoreksi pembacaan daya tarik dalam setiap uji Bollard Pull. Implementasi prosedur yang seragam dan terstandarisasi akan membantu mengurangi kesalahan pengukuran yang disebabkan oleh pengaruh sudut dan memberikan hasil yang lebih konsisten.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa kemiringan sudut pada Bollard Pull Test dapat memberikan bias yang signifikan terhadap pembacaan daya tarik, terutama ketika sudut vertikal dan horizontal lebih besar. Tanpa melakukan koreksi sudut, pembacaan daya tarik yang terukur dapat berlebihan dan tidak mencerminkan kapasitas tarik horizontal yang sesungguhnya. Koreksi sudut yang tepat, berdasarkan model matematis yang telah dijelaskan, dapat mengurangi bias tersebut dan memberikan hasil yang lebih akurat.

Saran

- **Koreksi Sudut:** Selalu melakukan koreksi terhadap sudut vertikal dan horizontal untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dalam uji Bollard Pull.
- **Peralatan yang Tepat:** Gunakan peralatan pengukur yang tepat, seperti sensor sudut dan load cell yang terkalibrasi, untuk meminimalkan kesalahan pengukuran.

- Standarisasi Prosedur: Adopsi prosedur uji yang lebih terstandarisasi yang memperhitungkan faktor-faktor eksternal, termasuk kemiringan sudut, untuk memastikan akurasi hasil uji.
- Evaluasi Desain Kapal dan Mesin: Berdasarkan hasil yang lebih akurat, evaluasi desain kapal dan kapasitas mesin secara tepat untuk menghindari over-engineering atau under-engineering yang merugikan.

Daftar Referensi

- ABS. (2019). Bollard Pull Test Procedures. American Bureau of Shipping.
- Devarapali, S., Manske, A., Khayamim, R., Jacobs, E., Li, B., Elmi, Z., ... & Dulebenets, M. (2024). Electric tugboat deployment in maritime transportation: Detailed analysis of advantages and disadvantages. *Maritime Business Review*, 9(3), 263-291.
<https://doi.org/10.1108/mabr-12-2023-0086>
- DNV GL. (2021). Guidelines for Bollard Pull Tests. DNV GL.
- Ghadimi, P., Donyavizadeh, N., & Taghikhani, P. (2020). Utilization of open-source OpenFOAM code to examine the hydrodynamic characteristics of a linear jet propulsion system with or without stator in bollard pull condition. *International Journal of Rotating Machinery*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8867416>
- ITTC. (2020). Standard Procedure for Bollard Pull Test. International Towing Tank Conference.
- Lickona, T. (1991). Educating for Character. Bantam.
- Mthembu, S., & Chasomeris, M. (2023). An assessment of the capacity and the performance of marine services in South Africa's ports. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 17. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v17i0.879>
- Paulauskas, V., Paulauskas, D., & Simutis, M. (2024). Estimation of tug pulling power (bollard pull) and number of tugs required during ship mooring operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1959. <https://doi.org/10.3390/jmse12111959>
- Xiao, W., Liu, Z., Xu, C., & Ding, J. (2024). Experimental and numerical investigation of the propeller thrust reduction in bollard pull condition. *Journal of Physics Conference Series*, 2691(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2691/1/012046>