

ANALISIS *BOLLARD PULL TEST* PADA KAPAL *TUG BOAT* GT.117 DENGAN SISTEM PROPULSI *FIXED PITCH PROPELLER (FPP)*

Muhammad Arsyad^{1*}, Andi Rachmianty²

¹ Program Studi Teknik Perkapalan, Politeknik Batulicin

² Program Studi Bisnis dan Logistik Maritim, Politeknik Maritim AMI Makassar

*Corresponding author: arsyad.navalengineer@gmail.com

Article history

Received:

26-04-2026

Accepted:

11-06-2026

Published:

30-06-2026

Copyright © 2026
Jurnal Teknologi dan
Riset Terapan

Open Access

Abstrak

Bollard Pull Test merupakan pengujian standar untuk mengukur kemampuan gaya tarik statis kapal *tug boat* pada kondisi operasi penuh. Penelitian ini menganalisis hasil *Bollard Pull Test* pada kapal *tug boat* GT.117 yang dilengkapi dua unit motor induk tipe 6HA2M-WDT dengan total daya 596 kW dan sistem propulsi berupa dua set baling-baling empat daun *Fixed Pitch Propeller (FPP)*. Pengujian dilaksanakan pada tanggal 2 Oktober 2025 selama 10 menit dengan beban mesin 100% (RPM = 1.850), menghasilkan 120 titik data gaya tarik. Analisis statistik deskriptif menunjukkan rata-rata *bollard pull* sebesar 8,567 ton, standar deviasi 0,335 ton, nilai maksimum 9,321 ton, nilai minimum 7,657 ton, dan koefisien variasi 3,91% yang mencerminkan stabilitas pengujian yang baik. Perbandingan dengan nilai teoritis berdasarkan teori cakram aktuator menghasilkan gaya dorong teoritis total sebesar 8,967 ton, sehingga rasio aktual terhadap teoritis mencapai 95,6%. Setelah koreksi resistansi angin sebesar 0,018 ton, *bollard pull* terkoreksi adalah 8,585 ton. Hasil pengujian memenuhi persyaratan klasifikasi *Bureau Veritas (BV)* dan standar operasi pelabuhan. Faktor kedalaman air ($h/T = 5,85$) dan kecepatan angin 8 knot dinilai tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap validitas hasil pengujian. Penelitian ini berkontribusi pada literatur teknik perkapalan Indonesia dengan menyediakan analisis kuantitatif komprehensif terhadap kinerja propulsi *tug boat* berbasis data pengujian lapangan yang terstandarisasi.

Kata Kunci: *Bollard Pull Test, Fixed Pitch Propeller, Gaya Tarik, Kapal Tug Boat, Kinerja Propulsi*

Abstract

Bollard Pull Test is a standard procedure to measure the static towing capacity of a *tug boat* under full engine load. This study analyzes the *Bollard Pull Test* results of *tug boat* GT.117, equipped with two 6HA2M-WDT main engines producing a combined power of 596 kW, and a propulsion system consisting of two sets of four-blade *Fixed Pitch Propellers (FPP)*. The test was conducted on October 2, 2025, for 10 minutes at 100% engine load (RPM = 1,850), generating 120 data points. Descriptive statistical analysis yields a mean *bollard pull* of 8.567 tons, standard deviation of 0.335 tons, maximum of 9.321 tons, minimum of 7.657 tons, and a coefficient of variation of 3.91%, indicating good test stability. Comparison with theoretical values based on actuator disk theory yields a total theoretical thrust of 8.967 tons, giving an actual-to-theoretical ratio of 95.6%. After wind resistance correction of 0.018 tons, the corrected *bollard pull* is 8.585 tons. Test results comply with *Bureau Veritas (BV)* classification requirements and port operational standards. Water depth factor $h/T = 5.85$ and wind speed of 8 knots are assessed to have no significant effect on test validity. This study contributes to Indonesian naval architecture literature by providing a comprehensive quantitative analysis of *tug boat* propulsion performance based on standardized field test data.

Keywords: *Bollard Pull Test, Fixed Pitch Propeller, Towing Force, Tug Boat, Propulsion Performance*

1.0 PENDAHULUAN

Kapal *tug boat* memiliki peran krusial dalam operasional pelabuhan dan industri maritim sebagai kapal pendorong dan penarik dalam manuver kapal besar di area terbatas, operasi pemanduan, dan kegiatan salvage[1], [2]. Kemampuan utama *tug boat* diukur dari gaya tarik statis pada kondisi beban penuh, yang dikenal dengan istilah *Bollard Pull* (BP). *Bollard Pull Test* merupakan pengujian wajib yang disyaratkan oleh badan klasifikasi internasional sebagai bagian dari sertifikasi kelayakan operasi *tug boat*[3], [4].

Pengujian dilakukan dengan menambatkan *tug boat* pada *bollard* menggunakan tali baja seperti pada Gambar 1, kemudian mengoperasikan mesin pada beban penuh sambil mengukur gaya tarik yang dihasilkan secara kontinu selama durasi tertentu menggunakan *load cell* yang telah terkalibrasi[5].



Gambar 1: *Bollard Pull* Kapal



Gambar 2: Proses *print* data dengan *JMC Scotload*

Nilai yang terekam di *Load cell* ditransmisikan ke perangkat pembaca (*load indicator /printer*) lihat gambar 2. Data direkam setiap 30 detik selama 10 menit pada setiap variasi putaran mesin (RPM) sehingga diperoleh data gaya tarik yang representatif pada setiap kondisi operasi.

Hasil pengujian menjadi dasar klasifikasi kapasitas *tug boat* oleh badan klasifikasi seperti *Bureau Veritas* (BV), Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), DNV-GL,

maupun *Lloyd's Register*, serta menjadi referensi kontraktual bagi operator pelabuhan[6], [7]. *Bollard Pull* merupakan parameter kinerja propulsi yang paling representatif karena mencerminkan kondisi kerja saat menarik atau mendorong kapal besar[8].

Prosedur Standar dan Regulasi Pengujian *Bollard Pull Test* pada kapal ukuran penuh (*full scale*) telah distandarisasi melalui sejumlah persyaratan teknis. Pertama, durasi pengujian minimum ditetapkan selama 10 menit pada kondisi beban mesin penuh (100% *MCR*), yang dihitung setelah kondisi *steady-state* tercapai. Kedua, kedalaman air minimum mensyaratkan rasio $h/T \geq 4,0$ untuk meminimalkan pengaruh perairan dangkal (*shallow water effect*). Ketiga, nilai *Bollard Pull* yang dilaporkan merupakan rata-rata aritmetika seluruh data valid selama periode pengujian, bukan nilai puncak sesaat. Keempat, pengujian dinyatakan valid apabila koefisien variasi (*coefficient of variation/CV*) data gaya tarik tidak melebihi 10%, sedangkan nilai $CV \leq 5\%$ menunjukkan kualitas pengujian yang sangat baik [8], [9].

Bureau Veritas menetapkan persyaratan melalui NR 527 Dt R07 E-2023, Bagian C (*Machinery*), Bab 1, Pasal 3: beban mesin harus mencapai 100% *MCR*; pengukuran menggunakan *load cell* bersertifikat kalibrasi dari lembaga terakreditasi; kedalaman perairan minimum $h/T \geq 4,0$; dan sertifikat BV mencantumkan nilai rata-rata hasil pengujian[10]. Pedoman *Guidelines for Safe Ocean Towing* menyatakan bahwa nilai minimum *Bollard Pull* untuk operasi tunda laut dipengaruhi oleh berat kapal yang ditunda, kondisi cuaca, dan jarak penundaan [11].

Pemenuhan kedalaman perairan penting dalam mencegah terjadinya sirkulasi balik aliran *discharge* propeler yang dapat menurunkan gaya dorong. Pada rasio h/T yang cukup besar, pengaruh perairan dangkal dapat diabaikan dalam analisis [8]. karena itu, koreksi akibat kedalaman signifikan apabila kondisi pengujian telah memenuhi persyaratan minimum yang ditetapkan oleh badan klasifikasi terkait [12]

Standarisasi prosedur *Bollard Pull Test* diterapkan oleh berbagai badan klasifikasi internasional lainnya, seperti Biro Klasifikasi Indonesia, DNV, Lloyd's Register, dan anggota lainnya. Secara umum, seluruh badan klasifikasi tersebut mensyaratkan pengujian dilakukan pada kondisi beban mesin 100% *MCR* selama minimum 10 menit dengan pengukuran kontinu menggunakan *load cell* terkalibrasi serta kedalaman air minimum empat kali sarat kapal[13].

Estimasi gaya dorong propeler dengan menggunakan Pendekatan teori cakram aktuator (*Actuator Disk Theory*) yang dikembangkan oleh Froude[14] dan disempurnakan oleh Rankine[15] untuk memperkirakan batas atas gaya dorong berdasarkan daya yang tersuplai[16]. Pada kondisi *bollard* (kecepatan kapal nol), gaya dorong ideal propeler dihitung menggunakan formula:

$$T = 2\rho A \left(\frac{1}{3}\right) (\eta_d P)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

dimana T adalah gaya dorong (N), ρ adalah massa jenis air laut (1.025 kg/m^3), A adalah luas cakram *propeller* (m^2), η_d adalah efisiensi pengiriman daya (*delivery efficiency*), dan P adalah daya yang tersuplai per poros (W).

Formula ini mengasumsikan aliran aksial ideal tanpa rugi rotasi. Dalam praktik, nilai η_d untuk *Fixed Pitch Propeller (FPP) tug boat* pada kondisi *bollard* berkisar antara $0,50-0,65$ [17]. Selain teori cakram aktuator, estimasi berbasis pendekatan hidrodinamika seperti metode Holtrop-Mennen[18] dan formulasi daya dorong propeler seri Wageningen B-Series[19] juga lazim digunakan sebagai pembanding kuantitatif terhadap nilai *bollard pull* terukur.

Dua faktor lingkungan utama yang mempengaruhi hasil *Bollard Pull Test* adalah resistansi angin dan efek perairan dangkal. Resistansi angin dihitung menggunakan persamaan:

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_D A_{frontal} V_{wind}^2 \quad (2)$$

dimana F_{wind} adalah gaya hambat (N), ρ_{air} adalah densitas udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$), C_D adalah koefisien hambat angin kapal tug ($\approx 1,0$ untuk bangunan atas kotak). $A_{Frontal}$ adalah luas penampang depan bangunan atas (m^2), dan V_{wind} adalah kecepatan angin (m/s).

Nilai F_{wind} yang diperoleh dari persamaan (2) selanjutnya dijumlahkan dengan gaya tarik terukur untuk mendapatkan *corrected bollard pull* yang bebas dari gangguan angin. Koreksi ini penting terutama apabila pengujian dilakukan di perairan terbuka dengan kecepatan angin yang signifikan[20]. Rasio kedalaman terhadap sarat:

$$h/T = 12,0/2,05 \text{ m} = 5,65 \geq 4,0 \quad (3)$$

Rasio $h/T = 5,85$ melampaui batas minimum ITTC 7.5-04-02-01 Pasal 3.3 [8] dan BV NR 527 [10] dengan margin yang cukup besar. Berdasarkan kurva koreksi[21], [22], pengaruh perairan dangkal pada $h/T = 5,85$ menghasilkan faktor koreksi kurang dari 1,5% dan bersifat negligible. Oleh karena itu, koreksi kedalaman tidak diterapkan dalam perhitungan akhir.

Beberapa peneliti terdahulu telah melakukan kajian empiris seperti, Huang dan Prastyo melakukan simulasi CFD untuk mereplikasi pengujian *bollard pull* pada *tug boat propeler* ganda dan membuktikan validitas pendekatan numerik sebagai komplementer terhadap data aktual[19], [23]. Nitonye, Adumene, dan Howells[24] menunjukkan bahwa pencocokan propeler terhadap mesin (*propeller-engine matching*) sangat menentukan performa *bollard pull optimal*. Dev[12] merekomendasikan penerapan standar yang lebih ketat terkait panjang tali tunda, kedalaman air, dan posisi pengujian. Viran dan Mentas[25] membandingkan sistem FPP, CPP, dan ASD dan menyimpulkan bahwa pemilihan sistem propulsi berdampak signifikan terhadap *bollard pull* statis.

Meski prosedur telah terstandarisasi secara internasional, publikasi ilmiah di Indonesia yang membahas analisis mendalam terhadap data pengujian *bollard pull* masih sangat terbatas [8], [10]. Kajian yang

ada umumnya berbentuk laporan teknis internal yang tidak mencakup: (1) statistik deskriptif komprehensif distribusi gaya tarik; (2) perbandingan kuantitatif nilai aktual dengan estimasi teoritis; (3) koreksi faktor lingkungan; dan (4) evaluasi kestabilan melalui analisis *time-series*[21], [26], [27].

Tulisan ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan tersebut dengan menyajikan kerangka analisis *Bollard Pull Test* yang terstruktur dan dapat direplikasi. Tujuan penelitian mencakup: (1) menganalisis karakteristik statistik gaya tarik selama 10 menit pengujian, (2) membandingkan nilai *bollard pull* aktual dengan estimasi teori cakram aktuator dan Wageningen B-Series dengan koreksi lingkungan, dan (3) mengevaluasi kesesuaian hasil terhadap persyaratan *Bureau Veritas*.

2.0 METODE

2.1 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah kapal *tug boat* GT.117 dengan nomor resmi 5335/PPM dan nomor BV 24263A. Pengujian dilaksanakan di perairan dengan kedalaman 12 m pada tanggal 2 Oktober 2025 di bawah pengawasan *surveyor Bureau Veritas*. Spesifikasi teknis lengkap kapal dan kondisi pengujian disajikan pada tabel 1 dan tabel 2, Kondisi visual kapal dapat dilihat pada Gambar 3.

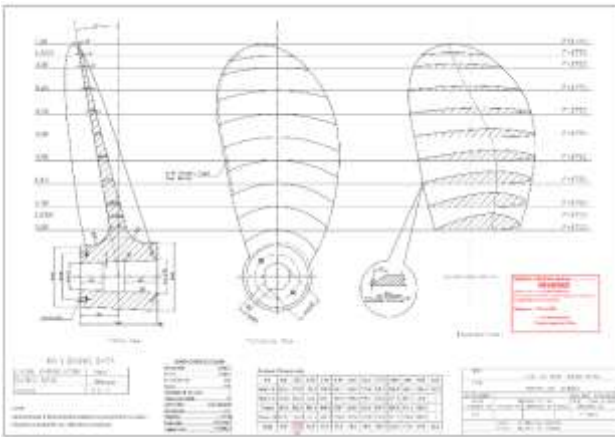
Tabel 1: Spesifikasi Teknis Kapal *Tug Boat GT.117*

Parameter	Keterangan
Nama Kapal	GT.117 / 5335/PPM
Nomor BV	24263A
Panjang (L)	22,00 m
Lebar (B)	7,00 m
Sarat Depan (FWD)	1,80 m
Sarat Tengah(CTR)	2,05 m
Tipe Motor Induk	6HA2M-WDT
Daya Total	$298 \text{ kW} \times 2 = 596 \text{ kW}$
RPM Motor Induk	1.850 rpm
Rasio <i>Gearbox</i>	6,1 : 1 (<i>reduction gear</i>)
RPM <i>Propeller</i>	303 rpm
Tipe <i>Propeller</i>	2 × 4 daun FPP (<i>cast copper solid</i>)
Kecepatan Bebas	12 knot

Sumber. *Bollard Pull Test Report* (2025)



Gambar 3: Kapal yang di uji *bollard*



Gambar 4: Gambar Diameter Baling-baling

Tabel 2: Parameter dan Kondisi Pengujian *Bollard Pull Test*

Parameter Pengujian	Nilai
Tanggal Pengujian	02 Oktober 2025
Beban Mesin	100% (RPM = 1.850)
Durasi Pengujian	10 menit (120 data titik)
Kedalaman Air	12 m
Panjang Tali Tunda	200 m, Ø 96 mm
Kecepatan Angin	8 knot
Ballast	28 ton
Fresh Water	34 ton
Trim	Even keel (FWD 1,80 m-CTR 2,05 m)

Sumber: *Bollard Pull Test Report*, 02 Oktober 2025

2.2 Prosedur Pengujian

Prosedur *Bollard Pull Test* dilaksanakan mengacu pada standar *ITTC Procedure No. 7.5-04-03-01*[8] dan persyaratan *Bureau Veritas (BV)*[10] dengan tahapan sebagai berikut. Pertama, persiapan pengujian meliputi kalibrasi *load cell* yang kapasitasnya disesuaikan dengan daya kapal, pemasangan tali baja berdiameter 96 mm sepanjang 200 meter pada *bollard* tetap, serta pemeriksaan menyeluruh terhadap kondisi kapal mencakup *sarat*, *ballast*, dan bahan bakar. Kedua, pemanasan mesin (*warm-up*) dilakukan dengan mengoperasikan motor induk pada beban parsial selama minimal 30 menit guna mencapai kondisi operasi termal yang stabil sebelum pengujian dimulai. Ketiga, pengujian beban penuh dilaksanakan dengan mengoperasikan mesin pada beban 100% MCR dengan putaran 1.850 RPM, di mana pengukuran gaya tarik dilakukan secara kontinu menggunakan *load cell* digital dengan interval pencatatan setiap 5 detik selama 10 menit sehingga diperoleh 120 titik data pengukuran. Keempat, pencatatan data dan penerbitan sertifikat dilakukan oleh pengawas pengujian yang mencatat seluruh parameter seperti RPM mesin, pembacaan *load cell*, kondisi angin, dan parameter lingkungan lainnya, dan setelah seluruh data diverifikasi, surveyor *Bureau Veritas* menerbitkan sertifikat hasil pengujian.

Kalibrasi dan verifikasi *load cell* dibuktikan melalui sertifikat yang masih berlaku (lihat Gambar 5), sehingga data gaya tarik hasil *Bollard Pull Test* dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dan metodologis.



Gambar 5: Sertifikat Kalibrasi

Analisis data dilakukan dalam tiga tahap: (1) statistik deskriptif komprehensif mencakup rata-rata, standar deviasi, median, nilai ekstrem, dan koefisien variasi; (2) analisis time-series gaya tarik per menit untuk mengevaluasi kestabilan pengujian; dan (3) perbandingan nilai aktual dengan estimasi teoritis berbasis teori cakram aktuator disertai koreksi faktor lingkungan (angin dan perairan dangkal).

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Statistik Deskriptif *Bollard Pull*

Pengujian menghasilkan 120 titik data gaya tarik selama 10 menit pada kondisi RPM = 1.850 (100% beban mesin). Hasil analisis statistik deskriptif secara lengkap disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3: Statistik Deskriptif Hasil *Bollard Pull Test GT.117*

Parameter Statistik	Nilai
Jumlah Data (N)	120 titik
Rata-Rata (<i>Mean</i>)	8,5673 ton
Standar Deviasi (SD)	0,3353 ton
Variansi	0,1124 ton ²
Nilai Maksimum	9,321 ton
Nilai Minimum	7,657 ton
Rentang (<i>Range</i>)	1,664 ton
Median	8,515 ton
Koefisien Variasi (CV)	3,91%
<i>Acceptance criteria</i>	CV ≤ 10% (sangat baik: CV ITTC 7.5-04-02-01 ≤ 5%)
Status	MEMENUHI (Sangat Baik)

Sumber: Hasil analisis data *Bollard Pull Test* (N = 120 titik data)

Nilai rata-rata *bollard pull* sebesar 8,567 ton merupakan parameter utama yang dicantumkan dalam sertifikat *Bureau Veritas*. Nilai tersebut diperoleh dari rata-rata aritmetika 120 titik data sesuai prosedur *International Towing Tank Conference (ITTC)*, yang mensyaratkan penggunaan rata-rata seluruh durasi pengujian sebagai representasi kinerja, bukan nilai puncak sesaat[8].

Standar deviasi sebesar 0,335 ton dan koefisien variasi (CV) 3,91% menunjukkan dispersi data yang rendah dan konsisten. Dalam pengujian *bollard pull*, nilai CV di bawah 5% umumnya menunjukkan kualitas pengujian yang baik serta kondisi mesin dan lingkungan yang stabil[28].

Perbedaan nilai minimum 7,657 ton dan maksimum 9,321 ton masih berada dalam batas wajar akibat variasi dinamis beban propeler yang dipengaruhi gaya hidrodinamis periodik. Nilai minimum pada menit pertama pengujian menunjukkan kondisi transien awal sebelum sistem propulsi mencapai kondisi steady-state penuh.

3.2 Analisis Kestabilan dan Time-Series Gaya Tarik

Untuk mengevaluasi kestabilan gaya tarik sepanjang durasi pengujian, data dikelompokkan berdasarkan interval per menit (12 pembacaan per interval, frekuensi pencatatan 5 detik). Hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4: Rekapitulasi *Bollard Pull* per Menit Pengujian

Interval	Min	Maks	Rata-rata	SD	Fase
	ton	ton	ton	ton	
Menit 1	7,657	9,290	8,545	~0,47	Transien
Menit 2	8,018	9,290	8,639	~0,38	Stabilisasi
Menit 3	8,030	9,290	8,659	~0,37	Stabilisasi
Menit 4	7,993	9,290	8,645	~0,38	Stabilisasi
Menit 5	8,145	9,321	8,589	~0,33	Fluktuasi
Menit 6	8,145	8,898	8,532	~0,23	Fluktuasi
Menit 7	7,979	8,978	8,496	~0,31	Fluktuasi
Menit 8	8,028	9,120	8,530	~0,33	Fluktuasi
Menit 9	8,028	9,249	8,551	~0,38	Pemulihan
Menit 10	8,028	9,249	8,576	~0,38	Pemulihan

Sumber: *Bollard Pull Test*, 02 Oktober 2025.

■ Rata-rata tertinggi ■ Rata-rata terendah

Berdasarkan data pada Tabel 4, analisis kestabilan gaya tarik menunjukkan pola time-series yang dapat dibagi menjadi empat fase sebagai berikut. Fase Transien Awal (Menit 1). Standar deviasi tertinggi tercatat pada menit pertama (~0,47 ton) dengan nilai minimum absolut 7,657 ton, yang merupakan initial transient saat sistem propulsi berpindah dari kondisi idle ke beban penuh. Standar ITTC mengizinkan pengabaian 30–60 detik pertama apabila terdapat indikasi transien; namun data menit pertama tetap diikutsertakan dalam analisis ini untuk konsistensi dengan protokol laporan BV.

Fase Stabilisasi Awal (Menit 2-4). Rata-rata gaya tarik meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai tertinggi 8,659 ton pada Menit 3, disertai penurunan standar deviasi yang mengindikasikan sistem propulsi mulai beroperasi secara stabil. Fase Fluktuasi (Menit 5-

8). Rata-rata gaya tarik mengalami penurunan bertahap menuju titik terendah 8,496 ton pada Menit 7, dengan standar deviasi berkisar antara ~0,23 hingga ~0,33 ton. Fluktuasi ini dalam batas yang dapat diterima dan tidak mengindikasikan ketidakstabilan sistem.

Fase Pemulihan (Menit 9-10). Rata-rata gaya tarik meningkat kembali mendekati rata-rata keseluruhan 8,567 ton, menunjukkan kestabilan sistem propulsi yang terjaga hingga akhir pengujian.

Secara keseluruhan, variasi rata-rata antar menit sebesar 0,163 ton (selisih Menit 3 dan Menit 7) atau sekitar 1,9% dari rata-rata keseluruhan, mengonfirmasi kestabilan sistem yang baik sepanjang durasi pengujian. Perlu dicatat bahwa pola yang terjadi bukanlah tren kenaikan monoton, melainkan: kenaikan cepat (M1-3), plateau (M3-4), penurunan (M4-7), dan pemulihan parsial (M7-10).

3.3 Perbandingan dengan Nilai Teoritis

Estimasi gaya dorong teoritis dilakukan menggunakan teori cakram aktuator[14], [15]. Diameter propeler diestimasi sebesar 1,40 m berdasarkan hubungan empiris antara daya poros, *RPM propeler* (303 rpm), dan rentang diameter propeler *tug boat* dalam kelas daya setara (0,9-1,5 m untuk *tug* 200-400 kW per poros). Seluruh nilai masukan, tahapan perhitungan, dan hasil perbandingan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5: Perbandingan *Bollard Pull* Teoritis dan Aktual

Parameter	Nilai	Satuan
Input Daya		
Daya motor induk per poros (P_{Shaft})	298	kW
Efisiensi mekanis (η_m), termasuk <i>losses gearbox & poros</i>	0,95	-
Daya terkirim per propeler ($P_D = \eta_m \times P_{Shaft}$)	283,1	kW
Parameter Propeler		
Estimasi diameter propeler	1,40 ± 0,05	m
Luas cakram ($A = \frac{\pi D^2}{4} \pi$)	1,5394	m ²
Efisiensi <i>open-water bollard</i> ($\eta_0, J = 0$)- Wageningen B4-55, P/D ≈ 0,8	0,58	-
Hasil Teoritis		
Gaya dorong teoritis per propeler	4,485	ton
Total gaya dorong teoritis (<i>2 propeler</i>)	8,967	ton
Hasil Aktual & Koreksi		
<i>Bollard pull</i> aktual rata-rata (N = 120)	8,567	ton
Koreksi angin (F_{wind})	+0,018	ton
<i>Bollard pull</i> aktual terkoreksi	8,585	ton
Rasio Kinerja		
Rasio aktual / teoritis	95,6%	Sangat Baik
Rasio terkoreksi / teoritis	95,7%	—

Sumber: Hasil perhitungan menggunakan teori cakram aktuator (Froude-Rankine). $\eta_m = 0,95$; $\eta_0 = 0,58$ (Wageningen B4-55, P/D ≈ 0,8).

Tabel 6: Analisis Sensitivitas Diameter *Propeler*

Skenario	D	A	T-total	Rasio
	m	m ²	Ton	Aktual/Teoritis %
Batas bawah	1,35	1,4314	8,713	98,3
Nilai tengah Acuan	1,40	1,5394	8,967	95,6
Batas atas	1,45	1,6513	9,213	93,0

Sumber: Hasil perhitungan

Bollard pull aktual 8,567 ton digunakan sebagai pembandingan tetap pada seluruh skenario. Substitusi numerik dilakukan secara bertahap sebagai berikut.

Daya terkirim per poros:

$$P_d = 298.000 \text{ W} \times 0,95 = 283.100 \text{ W}$$

Luas cakram:

$$A = \pi \times (1,40)^2 / 4 = 1,5394 \text{ m}^2$$

Faktor $(2\rho A)^{1/3}$:

$$2\rho A = 2 \times 1.025 \times 1,5394 = 3.155,7 \text{ kg/m}$$

$$(3.155,7)^{1/3} = 14,67$$

Faktor $(\eta_0 \cdot PD)^{2/3}$:

$$0,58 \times 283.100 = 164.198 \text{ W}$$

$$(164.198)^{2/3} = 2.996,1$$

Gaya dorong per propeler:

$$T = 14,67 \times 2.998,1 = 44.002$$

$$N = 4,485 \text{ ton}$$

Total gaya dorong (2 propeler):

$$T_{total} = 2 \times 4,485 = 8,967 \text{ ton}$$

Gaya dorong teoritis total sebesar 8,967 ton merupakan nilai ideal yang mengasumsikan efisiensi *open-water* propeler ($\eta_0 = 0,58$) dan efisiensi mekanis ($\eta_m = 0,95$). Nilai ini tidak memperhitungkan kerugian interaksi lambung-propeler maupun turbulensi aliran yang terjadi pada kondisi nyata.

Bollard pull aktual rata-rata sebesar 8,567 ton menghasilkan rasio aktual/teoritis sebesar 95,6%. Setelah ditambahkan koreksi angin ($F_{wind} = +0,018 \text{ ton}$), nilai terkoreksi menjadi 8,585 ton dengan rasio 95,7%. Dalam praktik industri, rasio antara 85-100% dianggap normal untuk *tug boat* dengan FPP; nilai 95,6% menempatkan *tug boat GT.117* dalam kategori kinerja propulsi sangat baik, mengindikasikan sistem propulsi beroperasi mendekati potensi maksimal teknisnya.

Mengingat diameter propeler hanya diestimasi dengan ketidakpastian $\pm 0,05 \text{ m}$, analisis sensitivitas dilakukan terhadap tiga skenario diameter sebagaimana disajikan pada Tabel 6. Rentang rasio aktual/teoritis yang dihasilkan adalah 93,0%-98,3%, yang seluruhnya masih berada dalam kategori sangat baik. Hal ini mengonfirmasi bahwa kesimpulan kinerja propulsi tidak sensitif terhadap ketidakpastian estimasi diameter propeler dalam batas yang wajar.

3.4 Koreksi Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan yang dianalisis dalam penelitian ini mencakup resistansi angin dan efek perairan dangkal, keduanya diidentifikasi memiliki pengaruh terhadap *performa bollard pull* kapal *tug boat*. Angin

menimbulkan gaya hambat eksternal yang bekerja berlawanan dengan gaya tarik kapal, sehingga berdampak langsung pada efektivitas *bollard pull* terukur. Sementara itu, kedalaman air menentukan karakteristik hidrodinamis di sekitar lambung dan sistem propulsi kapal; perairan dangkal cenderung menimbulkan efek *squat* dan peningkatan tahanan gesek yang dapat menurunkan kapasitas *bollard pull* secara signifikan. Oleh karena itu, kedua faktor ini diperhitungkan secara cermat guna memastikan validitas dan akurasi nilai *bollard pull* yang diperoleh.

Koreksi Resistansi Angin. Kecepatan angin terukur sebesar 8 knot (4,115 m/s) dengan estimasi luas frontal bangunan atas 17,5 m² (7,0 m × 2,5 m). Resistansi angin dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_D A_{frontal} V_{wind}^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 1,225 \times 1,0 \times 17,5 \times (4,115)^2$$

$$= 181,5 \text{ N} \approx 0,018 \text{ ton}$$

Nilai koreksi sebesar **0,018 ton** setara dengan **0,21%** dari *bollard pull* aktual, sehingga dapat dikategorikan sangat kecil. Dengan demikian, nilai terkoreksi angin menjadi:

$$BP_{korr} = 8,567 + 0,018 = 8,585 \text{ ton}$$

Hasil ini konsisten dengan temuan [29] yang menyatakan bahwa kecepatan angin di bawah 10 knot memberikan pengaruh kurang dari 0,5% terhadap hasil *bollard pull*, sehingga koreksi angin tidak mengubah nilai hasil secara signifikan.

Koreksi Efek Perairan Dangkal (Shallow Water Effect). Rasio kedalaman perairan terhadap sarat kapal dihitung sebagai berikut:

$$\frac{h}{T} = \frac{12,0 \text{ m}}{2,05} = 5,85 \geq 4,0$$

Nilai ini melampaui ambang batas minimum yang ditetapkan oleh *ITTC 7.5-04-02-01* (Pasal 3.3) [8] dan *Bureau Veritas NR 527* [30], yakni $h/T \geq 4,0$ dengan margin yang cukup besar. Secara hidrodinamis, rasio $h/T = 5,8$ merepresentasikan kondisi yang mendekati perairan dalam (*deep water equivalent*), sehingga distorsi aliran di bawah lunas akibat kedekatan dasar perairan bersifat minimal.

Berdasarkan kurva koreksi [31] untuk kondisi *bollard pull*, pengaruh perairan dangkal pada $h/T = 5,85$ menghasilkan faktor koreksi kurang dari 1,5%, yang tergolong negligible dalam konteks akurasi pengujian ini. Oleh karena itu, koreksi kedalaman tidak diterapkan dalam perhitungan akhir, meskipun nilai h/T tetap didokumentasikan sebagai bagian dari transparansi kondisi pengujian.

3.5 Evaluasi Kesesuaian dengan Standar Klasifikasi

Bureau Veritas menyertifikasi *bollard pull* berdasarkan nilai rata-rata hasil pengujian yang dilakukan sesuai prosedur standar, bukan berdasarkan nilai puncak. Nilai

rata-rata 8,567 ton yang terukur dengan prosedur terstandarisasi dan di bawah pengawasan langsung surveyor memenuhi seluruh persyaratan sertifikasi.

Untuk evaluasi kinerja operasional, *tug boat* dengan *bollard pull* 8-10 ton umumnya diklasifikasikan untuk operasi pemanduan (*harbour towage*) kapal berbobot 5.000-15.000 GT di perairan pelabuhan dengan kondisi cuaca terlindung hingga *Beaufort* 4 [28]. Kondisi pengujian dengan angin 8 knot (setara *Beaufort* 2-3) berada dalam rentang operasional normal yang sesuai.

Tabel 7: Matriks Kesesuaian dengan Standar

Persyaratan	Standar Acuan	Disyaratkan	Aktual	Status
Durasi pengujian	ITTC 7.5-04-02-01 Psl. 3.2	≥ 10 menit	10 menit	Memenuhi
Beban mesin	BV NR 527, Part C, Ch.1	100% MCR	100% (1.850 rpm)	Memenuhi
Kedalaman air (h/T)	ITTC 7.5-04-02-01 Psl. 3.3	≥ 4,0	5,85	Memenuhi
Kalibrasi load cell	ITTC 7.5-04-02-01 Psl. 2.3	Tersertifikasi	JMC Scotload	Memenuhi
Koefisien Variasi	ITTC 7.5-04-02-01 Psl. 5	≤ 10%	3,91%	Sangat Baik
Nilai rata-rata sbg BP	ITTC 7.5-04-02-01 Psl. 4.1	Rata-rata seluruh durasi	8,567 ton	Memenuhi
Pengawasan surveyor	BV NR 527	Surveyor BV hadir	Hadir	Memenuhi

Sumber: Hasil perhitungan

4.0 KESIMPULAN

Pengujian *Bollard Pull Test* kapal *tug boat GT.117* yang dilaksanakan selama 10 menit pada kondisi 100% MCR menghasilkan nilai rata-rata *bollard pull* sebesar 8,567 ton (maks. 9,321 ton; min. 7,657 ton). Koefisien variasi 3,91% jauh di bawah ambang batas ITTC 10% dan melampaui kriteria sangat baik ($CV \leq 5\%$), mengindikasikan kestabilan dan konsistensi pengukuran yang tinggi.

Ditinjau dari efisiensi propulsi, perbandingan nilai aktual dengan teori cakram aktuator menghasilkan rasio 95,6%, mencerminkan kinerja sistem propulsi yang mendekati nilai optimal. Analisis sensitivitas terhadap variasi diameter propeler $\pm 0,05$ m mempertahankan rentang rasio 93,0%–98,3%, sehingga kesimpulan kinerja bersifat robust.

Profil time-series mengungkapkan empat fase yang khas: transien awal (Menit 1), stabilisasi dan pencapaian puncak 8,659 ton (Menit 3), fluktuasi menuju titik terendah 8,496 ton (Menit 7), serta pemulihan parsial hingga 8,576 ton (Menit 10). Pola ini mencerminkan dinamika aliran propeler yang normal tanpa anomali sistemik.

Koreksi lingkungan bersifat *negligible*: resistansi angin 8 knot hanya +0,018 ton (0,21%), dan efek perairan dangkal $h/T = 5,85$ menghasilkan faktor koreksi $< 1,5\%$. Dengan terpenuhinya seluruh persyaratan ITTC 7.5-04-02-01 dan BV NR 527, sertifikat *Bureau Veritas* dengan *bollard pull* rata-rata 8,567 ton dinyatakan sah untuk diterbitkan, dan *tug boat GT.117* memenuhi persyaratan operasional untuk kategori *harbour towage*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen kapal *tug boat GT.117* dan *surveyor Bureau Veritas* yang telah memberikan izin akses terhadap data *Bollard Pull Test*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Y. Astutik, "Analisa performa tug boat dengan 27 ton bollard pull menggunakan caterpillar wosr 2 x 1000 HP sebagai main engine," *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2015.
- [2] M. Ragab Ahmed Abu Galal and A. Ismail Ahmed Hafez, "Pilotage and Tugboat Operation Interface Safety," *Jurnal Ilmiah Studi Bisnis dan Lingkungan*, vol. 14, no. 1, pp. 549–606, 2023.
- [3] R. H. AJI, "Proses perpanjangan Sertifikat Kapal Tug Boat TSE-3 Di PT Pelayaran Gema Bahari Cirebon," *KARYA TULIS*, 2021.
- [4] S. Sutulo and C. Guedes Soares, "Review on ship manoeuvrability criteria and standards," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 8, p. 904, 2021.
- [5] F. Amanda, "Prosedur Melaksanakan Bollard Pull Test TB. Slm Apollo 5 di PT. Buana Lintas Lautan Tbk Cabang Batam," 2025.
- [6] M. Ricesno and R. Nandika, "Perhitungan Dan Pengujian Beban Pada Generator Di Kapal Tugboat Hangtuah V," *Sigma Teknika*, vol. 3, no. 1, pp. 10–21, 2020.
- [7] S. Curtis, I. Gaunt, and W. Cecil, *The law of shipbuilding contracts*. Informa Law from Routledge, 2020.
- [8] ITTC, *Recommended procedures and guidelines: Propulsion/Bollard pull test (Procedure No. 7.5-02-03-01.1)*. <https://www.ittc.info/media/8011/75-02-03-011.pdf>, 2021, pp. 1–17.
- [9] "ITTC-Recommended Procedures Guidelines for Ship Trials in Ice ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines Guideline Guidelines for Ship Trials in Ice," 2024. Accessed: Apr. 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.ittc.info/media/11980/75-04-03-01.pdf>
- [10] B. Veritas, "Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships," *Nr*.
- [11] ALBERT EMBANKMEN, *GUIDELINES FOR SAFE OCEAN TOWING*. LONDON, 1998.
- [12] Arun Kr Dev, "Various aspects of bollard pull tests and analysis of test results," *Journal of Ship Production and Design*, vol. 34, no. 3, pp. 249–268, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.5957/JSPD.170001>.
- [13] R. Nersesian and S. Mahmood, "International association of classification societies," in *Handbook of Transnational Economic Governance Regimes*, Brill Nijhoff, 2010, pp. 765–774.

- [14] W. Froude, "On the elementary relation between pitch, slip, and propulsive efficiency," 1920.
- [15] W. J. M. Rankine, "On the mechanical principles of the action of propellers," *Transactions of the Institution of Naval Architects*, vol. 6, 1865.
- [16] C. Kusuma, *Desain Inovatif Kapal Patroli Cepat: Optimasi Lambung dan Sistem Propulsi untuk Kecepatan Maksimal*. Penerbit NEM, 2024.
- [17] L. Birk, *Fundamentals of ship hydrodynamics: Fluid mechanics, ship resistance and propulsion*. John Wiley & Sons, 2019.
- [18] J. Holtrop and G. G. J. Mennen, "An approximate power prediction method," *International shipbuilding progress*, vol. 29, no. 335, pp. 166–170, 1982.
- [19] T. Prastyo, M. S. Baital, A. Windyandari, and Z. Ariany, "Studi Perbandingan Thrust dan Torque pada Toroidal Propeller dengan Wageningen B-Series Propeller Menggunakan Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)," *WAVE: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, vol. 19, no. 1, pp. 1–13, 2025.
- [20] L. Zhou, C. Guo, Y. Cui, J. Wu, Y. Lv, and Z. Du, "Characteristics, cause, and severity analysis for hazmat transportation risk management," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 8, p. 2793, 2020.
- [21] Y. Linjia, L. S. Su, I. Kinzo, S. Hiroyuki, and S. Wataru, "Experimental study on braking force characteristics of tugboats in shallow water," in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE, 2008, p. ISOPE-I.
- [22] C. Mulder and P. Williams, "Improving the performance of shallow draft tugs in Northern Canada," *SNAME Trans*, vol. 114, 2006.
- [23] C. Xu and Z. Huang, "Three-dimensional CFD simulation of a circular OWC with a nonlinear power-takeoff: Model validation and a discussion on resonant sloshing inside the pneumatic chamber," *Ocean Engineering*, vol. 176, pp. 184–198, 2019.
- [24] S. , A. S. , & H. U. U. Nitonye, "Numerical design and performance analysis of a tug boat propulsion system," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 5, no. 11, pp. 80–98, Nov. 2017.
- [25] A. , & M. A. Viran, "Assessment of propulsion systems performance in tugboat," *Journal of ETA Maritime Science*, vol. 9, no. 4, pp. 53–66, 2021.
- [26] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability and statistics for engineers and scientists*, vol. 5. Macmillan New York, 1993.
- [27] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John wiley & sons, 2019.
- [28] O. O. A. Eruaga, "The role of the IMO in promoting maritime security," in *The Elgar Companion to the Law and Practice of the International Maritime Organization*, Edward Elgar Publishing, 2024, pp. 155–177.
- [29] L. Pramesti, R. D. E. Witjonarko, and B. B. A. Aji, "Analisis Performa Propeller Kaplan 4-55 dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD)," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 249–256, 2022.
- [30] BUREAU VERITAS MARINE & OFFSHORE, *Ships operating in polar waters and icebreakers*. Courbevoie - Franc: https://ruleexplorer-docs.bureauveritas.com/documents/nr527/jan2026/527-NR_2026-01.pdf, 2026.
- [31] V. Paulauskas, D. Paulauskas, and M. Simutis, "Estimation of Tug Pulling Power (Bollard Pull) and Number of Tugs Required During Ship Mooring Operations," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 11, p. 1959, 2024.