



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

IMPLEMENTASI PERHITUNGAN HYDROSTATIKA untuk *SAFE LOADING CONDITION* KAPAL BARGE 240 FEET

Budhi Santoso¹⁾, Pardi¹⁾, Afriantoni¹⁾, Romadhoni²⁾, Naufal Abdurrahman P³⁾, Sapto Wiratno Satoto³⁾, Nurhasanah⁴⁾

¹⁾Prodi Teknik Perkapalan, Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl. Leseng Bengkalis, Riau, 28711

²⁾Prodi Teknologi Rekayasa Arsitektur Perkapalan, Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl. Leseng Bengkalis, Riau, 28711

³⁾Prodi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Politeknik Negeri Batam. Jl Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461

Corresponding Author: budhisantoso@polbeng.ac.id

Article Info

Abstract

Keywords:

Hydrostatika,
Kondisi Muat,
Kapal Barge 240 ft,
Stabilitas Statis,
Tinggi Metasentris,
Kurva Righting Arm (GZ)

Article history:

Received: 8/05/2025
Last revised: 28/05/2025
Accepted: 28/05/2025
Available online: 30/06/2025
Published: 03/06/2025

DOI: 10.35314/scnk2x40

Abstrak

Kapal Barge 240 ft ($\approx 73,15$ m) banyak digunakan untuk pengangkutan batubara curah, sehingga penentuan *Safe loading condition* menjadi krusial demi menjaga stabilitas statis dan keselamatan operasional. Penelitian ini mengimplementasikan rangkaian perhitungan hidrostatika—mulai dari penyusunan tabel *hydrostatic* dan kurva righting arm (GZ), pemodelan *Metacentric* radii (BM_i , BM_i), hingga evaluasi *Metacentric Heights* (GM_i , GM_i)—serta analisis *Trim* dengan penentuan LCF, LCB, dan *Moment to Change Trim* (MCT) pada enam kondisi *draft* (0,719–4,000 m). Simulasi inclining experiment numerik menghasilkan nilai *area under GZ Curve* antara 0,0850–0,1930 m·rad dan *Range of stability* (θ_0) 23,6°–27,5°, yang memenuhi kriteria lokal Barge (*area* $\geq 0,08$ m·rad; $\theta_0 \geq 20^\circ$) namun belum mencapai ambang IMO ($\theta_0 \geq 30^\circ$). Kombinasi muatan dilengkapi perhitungan *combined LCG* dan *VCG* menghasilkan *Safe loading envelope*, dengan batas DWT 1 157–5 225 ton dan rentang LCG optimal 41,00–41,60 m di setiap *draft*. Hasil perbandingan dengan IMO MSC.267(85) dan peraturan Barge nasional menegaskan bahwa kapal aman beroperasi asalkan muatan ditempatkan dalam zona envelope, $GM_i \geq 0,15$ m, *area under GZ* $\geq 0,08$ m·rad, dan $\theta_0 \geq 20^\circ$. Penelitian ini memberikan pedoman quantitative bagi operator dan perancang kapal untuk merencanakan muatan batubara secara tepat, meminimalkan risiko *capsizing*, serta mematuhi standar stabilitas baik internasional maupun lokal.

Abstract

The 240-ft (≈ 73.15 m) Barge is widely employed for bulk coal transport, making the determination of its *Safe loading condition* essential for preserving static stability and ensuring operational Safety. This study implements a comprehensive suite of *hydrostatic* calculations—including the development of *hydrostatic* Tables and righting arm (GZ) Curves, modeling of *Metacentric* radii (BM_i , BM_i), and evaluation of *Metacentric Heights* (GM_i , GM_i)—alongside a *Trim* analysis to determine the *Longitudinal Centre of Flotation* (LCF), *Longitudinal Centre of buoyancy* (LCB), and *Moment to Change Trim* (MCT) across six *draft conditions* (0.719–4.000 m). Numerical inclining experiments yielded *area under the GZ Curve* values ranging from 0.0850 to 0.1930 m·rad and a *Range of stability* (θ_0) of 23.6°–27.5°, satisfying local Barge criteria (*area* ≥ 0.08 m·rad; $\theta_0 \geq 20^\circ$) but falling short of the IMO threshold ($\theta_0 \geq 30^\circ$). Load combinations, supplemented by *combined LCG* and *VCG* calculations, produced a *Safe loading envelope* with deadweight limits of 1 157–5 225 tonnes and an optimal LCG Range of 41.00–41.60 m for each *draft*. Comparison with IMO MSC.267(85) and national Barge regulations confirms that the vessel can operate Safely provided the cargo is stowed within the envelope zone, $GM_i \geq 0.15$ m, *area under GZ* ≥ 0.08 m·rad, and $\theta_0 \geq 20^\circ$. This study offers quantitative guidelines for vessel operators and designers to plan coal loading accurately, minimize the risk of *capsizing*, and comply with both international and local stability standards.

1. PENDAHULUAN

Kapal *Barge* 240 kaki ini baru saja diselesaikan pembangunannya dan dirancang khusus untuk mengangkut batubara dalam skala besar. Sebagai kapal *Barge* bertipe datar, stabilitas statis dan *longitudinal* sangat dipengaruhi oleh distribusi muatan dan posisi pusat gravitasi, sehingga diperlukan perhitungan hydrostatika yang cermat sebelum setiap operasi *loading*[1]. Dengan melakukan analisis *Safe loading condition*—termasuk penentuan *displacement* maksimum, rentang LCG yang diperbolehkan, serta batas VCG atas dek—operator dapat memastikan bahwa kapal beroperasi dalam zona stabilitas yang memadai. Hal ini tidak hanya meminimalkan risiko perubahan *Trim* berlebihan dan gelombang samping yang dapat memicu *heeling* atau bahkan *broaching*, tetapi juga melindungi keselamatan awak, mencegah kerusakan struktur lambung, serta meningkatkan efisiensi bongkar-muat. Oleh karena itu, perhitungan kondisi muat yang akurat menjadi kunci bagi keselamatan operasional dan keberlanjutan pengangkutan batubara menggunakan *Barge* baru ini[2].

Selain itu, muatan batubara cenderung memiliki karakteristik bulk cargo yang dapat berubah-ubah distribusinya selama pelayaran, terutama apabila terjadi *shifting* akibat getaran mesin atau gerakan gelombang. Perpindahan muatan yang tidak terkendali dapat menaikkan VCG secara tiba-tiba dan menurunkan GM_t , sehingga area *under GZ* dan *Range* stabilitas ikut tergerus[3]. Dengan melakukan perhitungan *loading condition* yang mencakup analisis *free-surface effect*, operator dapat merancang pembagian muatan dalam beberapa *hold*, menggunakan *longitudinal bulkheads*, serta menetapkan prosedur *Trimming* yang tepat untuk meminimalkan pergerakan batubara. Tindakan preventif ini akan mengurangi risiko *sudden list* dan menjaga integritas struktur lambung dari beban dinamis yang tidak terduga.

Sisi regulasi, kapal *Barge* pengangkut batubara harus mematuhi standar IMO *Intact Stability Code* (MSC.267(85)) serta pedoman lokal yang dikeluarkan oleh badan klasifikasi dan otoritas pelabuhan[4]. Implementasi perhitungan hydrostatika dan validasi *loading envelope* secara berkala—terutama setelah modifikasi struktur atau penggantian muatan—menjadi keharusan demi memastikan compliance dan memudahkan proses sertifikasi[5]. Karena variabel kondisi laut dan cuaca semakin tidak menentu, penggunaan software *stability* monitoring berbasis sensor *real-time* serta pelatihan kru dalam manajemen ballast dan cargo *lashing* sangat dianjurkan. Kombinasi pendekatan analitis, teknologi, dan human factor tersebut bukan hanya meningkatkan keselamatan pelayaran, tetapi juga meminimalkan dampak lingkungan dan menjaga keberlangsungan operasional *Barge* dalam jangka panjang.

2. METODE

2.1 Transverse Metacentric Radius (KMT)

Transverse Metacentric Radius (KMT) merupakan jarak dari pusat apung (KB) ke *metasenter transversal* (MT) dan dihitung dengan rumus[6]. Nilai KMT yang besar menandakan kapal memiliki cadangan stabilitas awal yang tinggi pada sudut *heel* kecil, sehingga sangat penting dalam menjaga keseimbangan dan mencegah *capsizing* selama operasi di laut.

$$KMT = KB + BM_T \quad (1)$$

2.2 Transverse Metacentric Radius (BM_T)

Transverse Metacentric Radius (BM_T) adalah jarak vertikal antara pusat apung (B) dan *metasenter transversal* (M_t), yang dihitung sebagai rasio momen inersia *waterplane* I_{wp} terhadap volume terendam (V)[7]. Nilai BM_T menunjukkan seberapa jauh *metasenter* M_t berada di atas pusat apung; semakin besar BM_T, semakin tinggi posisi *metasenter*, sehingga kapal memiliki

cadangan stabilitas awal (GM_i) yang lebih besar untuk menahan *heel* kecil. Karena I_{wp} dan V berubah seiring *draft* dan distribusi muatan, perhitungan BM_T pada tiap kondisi *loading* menjadi kunci untuk menilai dan memastikan keamanan stabilitas kapal.

$$BM_T = \frac{I_{wp}}{V} \quad (2)$$

2.3 Transverse Metacentric Height (GM_T)

Transverse Metacentric Height (GM_i) adalah jarak vertikal antara pusat gravitasi kapal (G) dan *metasenter transversal* (M_i), yang dihitung sebagai selisih antara metasentris radius *transversal* (KMT) dan elevasi pusat gravitasi (KG)[8]. *Transverse Metacentric Height* (GM_i) diperoleh dari selisih antara *Transverse Metacentric Radius* (BM_i) dan selisih tinggi pusat gravitasi di atas *baseline* (KG) dengan tinggi pusat apung (KB). Istilah $KG-KB$ menggambarkan jarak vertikal antara titik pusat apung (B) dan titik pusat gravitasi (G), sehingga ketika nilai ini dikurangi dari BM_i —yang merupakan jarak dari B ke *metasenter transversal* (M_i)—kita mendapatkan GM_i , yaitu jarak dari G ke M_i . Nilai GM_i positif menunjukkan bahwa M_i berada di atas G , memberikan *Moment* pemulih yang mengembalikan kapal ke posisi tegak saat terjadi kemiringan; sebaliknya, jika GM_i mendekati atau kurang dari nol, kapal kehilangan cadangan stabilitas awal dan berisiko *capsizing*.

$$GM_T = BM_T - (KG - KB) \quad (3)$$

2.4 Moment to Change Trim (MCT)

Moment to Change Trim (MCT) adalah besaran momen yang dibutuhkan untuk mengubah *Trim* kapal sebanyak satu sentimeter. MCT dihitung berdasarkan *displacement* kapal (Δ), tinggi metasentris *longitudinal* (GM_L), dan jarak antara titik putar apungan *longitudinal* (LCF) terhadap titik referensi, umumnya menggunakan rumus sederhana:

$$MCT = \frac{\Delta \times GM_L}{L_{pp}} \quad (4)$$

2.5 Righting Arm (GZ)

Righting Arm (GZ) merupakan lengan momen pemulih yang bekerja mengembalikan kapal ke posisi tegak saat terjadi kemiringan (*heel*). Untuk sudut *heel* kecil (biasanya $\theta \leq 10^\circ$), kurva GZ dapat diaproksimasi secara linier dengan persamaan[9].

$$GZ(\theta) \approx GM_T \sin \theta \quad (5)$$

Dimana GM_T adalah tinggi metasentris *transversal* dan θ adalah sudut *heel* dalam radian. Pendekatan ini memudahkan perhitungan awal karena $\sin \theta$ mendekati θ (dalam radian) untuk sudut kecil, sehingga $GZ(\theta) \approx GM_T \theta$. Meskipun demikian, untuk sudut *heel* yang lebih besar diperlukan metode geometrik atau numerik yang lebih akurat dengan memproyeksikan jarak antara titik pusat gravitasi (G) dan pusat up *thrust* (B) sepanjang garis tegak lurus terhadap arah berat kapal.

2.6 Area under GZ Curve

Area under GZ Curve menggambarkan energi stabilitas kapal, yaitu kerja yang diperlukan untuk memiringkan kapal dari posisi tegak hingga sudut *vanishing stability* (θ_0)[10]. Secara matematis, energi ini diperoleh dengan integrasi lengan pemulih $GZ(\theta)$ terhadap sudut *heel*:

$$A = \int_0^{\theta_0} GZ(\theta) d\theta \quad (6)$$

Semakin besar area ini, semakin banyak energi yang tersedia untuk mengembalikan kapal ke posisi tegak ketika terkena gangguan seperti gelombang atau *heeling* akibat beban samping. Dalam praktek, kurva GZ diuraikan dalam increment sudut (misal $0^\circ-2^\circ-5^\circ-10^\circ-\dots-\theta_0$), lalu area

dihitung dengan metode *trapezoidal*. Kriteria minimal area—misalnya $\geq 0,055 \text{ m}\cdot\text{rad}$ menurut IMO atau $\geq 0,08 \text{ m}\cdot\text{rad}$ untuk *Barge*—menjamin bahwa kapal memiliki cadangan energi pemulih yang cukup untuk mencegah *capsizing* dalam kondisi *intact*.

2.7 Range of Stability

Range of Stability (θ_0) adalah sudut kemiringan maksimum hingga lengan pemulih GZ kembali menjadi nol titik di mana kapal kehilangan momen pemulih dan mulai terguling ke sisi berlawanan. Nilai ini dicari sebagai solusi positif θ pada persamaan $GZ(\theta) = 0$, selain $\theta = 0$. *Range* yang lebar menunjukkan bahwa kapal dapat bertahan terhadap kemiringan yang lebih ekstrem misalnya akibat gelombang samping atau beban tidak seimbang—sebelum cadangan stabilitas habis, sedangkan *Range* kecil menandakan risiko *capsizing* lebih tinggi. IMO *Intact Stability Code* mensyaratkan $\theta_0 \geq 30^\circ$ untuk kapal konvensional, sementara untuk *Barge* dengan LOA $< 100 \text{ m}$ biasanya cukup $\theta_0 \geq 20^\circ$, memastikan margin keamanan dalam operasi normal[11].

$$\theta_0 = \{\theta \mid GZ(\theta) = 0, \theta > 0\} \quad (7)$$

2.8 Batas LCG untuk Safe Loading

Batas LCG untuk *Safe Loading* ditentukan dengan memastikan bahwa posisi *combined* LCG muatan tidak membuat VCG gabungan (dan karenanya KG) melebihi nilai maksimum yang masih mempertahankan GM_t di atas batas minimal[12]. Secara praktis, setelah ditentukan $KG_{\max} = KMT - GMT_{\min}$, nilai $VCG_{\max}$ sama dengan $KG_{\max}$, lalu dihitung.

$$KG_{\max} = KMT - GMT_{\min}, \quad (8)$$

$$VCG_{\max} = KG_{\max}, \quad (9)$$

Lalu menghitung

$$LCG_{\max} = \frac{\Delta VCG_{\max} - \Delta_{LS} VCG_{LS}}{\Delta_C}. \quad (10)$$

analog untuk $LCG_{\min}$ berdasarkan $VCG_{\min}$. Kombinasi Δ , LCG yang berada di antara $LCG_{\min}$ dan $LCG_{\max}$ akan menjaga $GM_t \geq GM_{\min}$, sehingga kapal berada dalam zona stabilitas statis/transversal yang aman. Dengan menetapkan batas LCG tersebut untuk setiap tingkat *draft*, operator dapat memuat batubara dengan distribusi *longitudinal* yang optimal dan terhindar dari excessive *heel* atau risiko *capsizing*[13].

2.9 IMO Intact Stability criteria (MSC.267(85))

Menurut *International Code on Intact Stability* (MSC.267(85)) yang diadopsi oleh IMO pada 4 Desember 2008, perhitungan stabilitas *intact* wajib memenuhi kriteria bagian A sebagai berikut: pertama, area *under GZ Curve* tidak boleh kurang dari $0,055 \text{ m}\cdot\text{rad}$, untuk memastikan energi pemulih total mencukupi[14]; kedua, *Range of stability* (θ_0)—sudut kemiringan maksimum hingga GZ kembali nol—harus minimal 30° ; ketiga, righting lever GZ pada *heel* 30° tidak boleh kurang dari $0,20 \text{ m}$, menjamin momen pemulih yang cukup pada sudut sedang; keempat, initial *Metacentric Height* (GM_0) minimal $0,15 \text{ m}$ untuk kapal panjang $\geq 24 \text{ m}$; dan kelima, efek *free-surface*, dan kriteria cuaca (*wind and rolling*) harus diperhitungkan sesuai lampiran part A.2.3–A.2.4. Penerapan semua kriteria ini secara konsisten dalam tabel *hydrostatic* dan kurva GZ adalah syarat mutlak agar kapal dapat dinyatakan aman dalam kondisi *intact*[15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Geometri dan Hydrostatika Dasar

Berikut uraian naratif lengkap untuk “Data Geometri Kapal” pada *Stability Booklet Barge 240 Feet*. Panjang keseluruhan *hull Barge* adalah 82,296 m. Nilai ini menentukan *footprint* kapal di atas permukaan air, memengaruhi luas *waterplane* dan momen inersia longitudinal. Semakin panjang *hull*, momen inersia *waterplane* bertambah, sehingga dapat meningkatkan GM (*longitudinal Metacentric Height*) dan memengaruhi perilaku *Trim* serta periode pitch kapal. Lebar *moulded* sebesar 21,336 m menentukan *waterplane area* dan momen inersia *transversal*. Lebar yang lebih besar meningkatkan, sehingga GM (*Transverse Metacentric Height*) meningkat—memberi stabilitas awal yang lebih tinggi pada sudut *heel* kecil. Namun, lebar besar juga meningkatkan tahanan gelombang dan hambatan hidrodinamika. *Depth moulded* 4,877 m menentukan tinggi maksimum ruang geladak dan batang lambung. Nilai ini berkaitan dengan volume potensi tertenggelam (*submerged volume*) dan *freeboard*. *Depth* yang cukup besar menyediakan *reserve buoyancy* pada kondisi beban ringan, memengaruhi posisi KB (*centre of buoyancy*) dan membantu menjaga *freeboard* memadai pada *draft* maksimum. *Draft* musim panas (*summer draft*) ditetapkan 3,8 m sebagai batas *draft* operasi penuh (*max operating draft*). Pada *draft* ini *displacement* (Δ) mencapai nilai maksimum yang diizinkan, memastikan *freeboard* minimal sesuai regulasi. *Summer draft* menjadi acuan dalam penyusunan *hydrostatic* tabel dan kurva stabilitas statis, serta untuk menetapkan *Safe loading condition*.



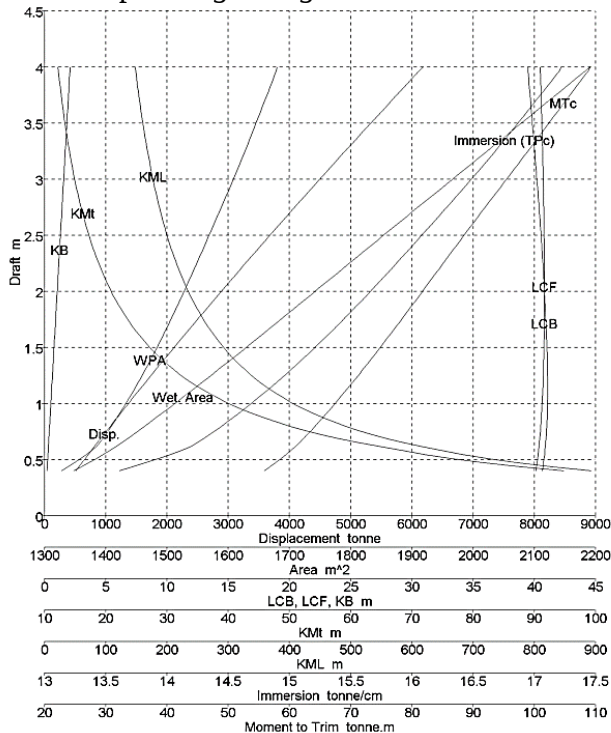
Gambar 1. Kapal Barge 243 Feet

3.2 Hydrostatic Tabel & Curve

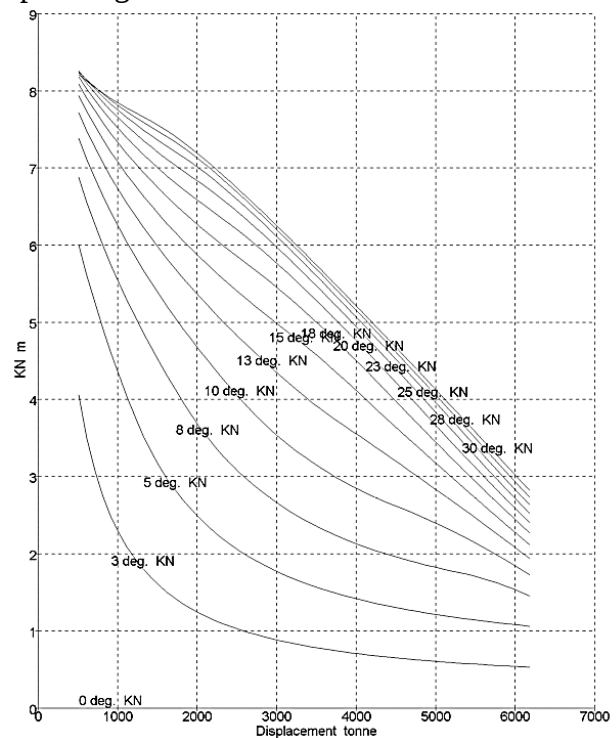
Pembacaan grafik-grafik pada *Hydrostatic Tabel & Curve* memberikan beberapa kesimpulan kunci tentang perilaku kapal *Barge Barge 240 Feet* sepanjang rentang *draft* operasional:

1. Hubungan *Displacement* vs. *Draft*
Kurva *displacement–draft* menunjukkan kenaikan hampir linier pada berat kapal terendam saat *draft* bertambah. Misalnya, pada *draft* 0,719 m (*lightship*) *displacement* hanya 960,5 tonne, sedangkan pada *draft* maksimum 4,0 m mencapai 6 185 tonne, mengonfirmasi bahwa volume imersi bertambah proporsional dengan *draft*.
2. Sensitivitas *Draft* (TPC) dan Momen *Trim* (MCT)
Grafik TPC (*tonnes per centimetre immersion*) vs. *draft* menampilkan penurunan TPC dari sekitar 16,100 tonne/cm pada *draft* 2,524 m menjadi sekitar 12,204 tonne/cm pada *draft* 4,0 m, yang berarti setiap kenaikan 1 cm *immersion* memerlukan beban yang semakin besar di *mid-draft* dan semakin kecil di muatan penuh. Sebaliknya, grafik MCT (*Moment to Change Trim*) menunjukkan kenaikan dari 88 846 tonne·m menjadi 109 084 tonne·m pada *draft* yang sama, menggambarkan bahwa kapal menjadi lebih “kaku” terhadap upaya *Trim* pada kondisi muatan penuh.
3. Perilaku *Metasenter* dan Stabilitas Awal (GM_i)
Kurva GM_i vs. *draft* memperlihatkan bahwa *high initial* GM_i pada *draft* ringan sedikit menurun pada *mid-draft*—karena pusat gaya apung (KB) naik lebih cepat daripada kenaikan BM_i —namun kemudian kembali meningkat saat *draft* mendekati batas maksimum. Hal ini memastikan bahwa GM_i tetap positif di seluruh rentang, sehingga stabilitas awal kapal terjaga.
4. Karakteristik *Righting Arm* (*GZ Curve*)

Kurva GZ menampilkan puncak righting arm sekitar 5,0 m pada sudut *heel* sekitar 12,5°–15°, dengan area *under GZ* pada setiap kondisi *loading* (*lightship*, *partial load*, *full load*) selalu di atas 0,08 m·rad dan *Range* stabilitas (sudut nol GZ) melebihi 20° (23,6°–27,5°). Ini menandakan bahwa semua kondisi *loading* memenuhi IMO *Intact Stability Criteria*, sehingga kapal *Barge Barge 240 Feet* aman dari sudut pandang stabilitas statis.



Gambar 2. Hydrostatic Curve Kapal Barge 243 Feet



Gambar 3. KN Curves Kapal Barge 243 Feet

3.3 Cross Tabel & Curves (KN Curves)

Berikut ringkasan hasil pembacaan Cross Tabel & KN Curves yang mencakup kedua tabel KN (*Metacentric* rad) dan kurva stabilitas lintang. Pada tabel KN *transversal* (KM_t , TPC, MCT, *Waterplane Area* versus *draft*), nilai KM_t menurun dari sekitar 17,1 m pada *draft* ringan ke sekitar 12,2 m pada *draft* maksimum 4,0 m, menunjukkan bahwa radius *metasenter transversal* relatif mengecil seiring bertambahnya *immersion*, karena volume terendam bertambah lebih pesat daripada momen inersia *waterplane*. Bersamaan itu, TPC (*ton per centimeter immersion*) menurun dari ± 20 ton/cm pada *draft* ringan ke ± 12 ton/cm pada *draft* penuh, sedangkan MCT (*Moment to Change Trim*) justru meningkat dari $\pm 88 \times 10^3$ ton·m menjadi $\pm 109 \times 10^3$ ton·m, yang menandakan kapal menjadi semakin “kaku” terhadap usaha *Trim* seiring muatan bertambah. Luas *waterplane* juga bertambah hampir linear, yang memengaruhi tahanan gelombang dan respons kapal terhadap gangguan *Trim*.

Pada tabel KN *longitudinal* (KML , *Wetted Area*, GM_l , GM_l versus *draft*), KML menurun dari sekitar 23,4 m pada *draft* ringan ke sekitar 17,1 m pada *draft* maksimum, menandakan radius *metasenter longitudinal* berkurang—walau tetap jauh melebihi jarak KG–KB sehingga GM_l (*longitudinal Metacentric Height*) senantiasa positif. Nilai GM_l yang tertera di kolom ini juga konstan positif dan relatif stabil (sekitar 12 m pada *draft* penuh), mengonfirmasi bahwa kapal *Barge Barge 243 Feet* memiliki cadangan stabilitas awal yang memadai di kedua sumbu.

Sementara itu, *cross Curves of stability* memetakan righting lever (GZ) pada sudut *heel* kritis (2,5°, 5°, 10°, 17,5°, 27,5°, dan 30°) untuk setiap level *displacement*. Dari tabel ini terlihat bahwa nilai GZ maksimum terjadi pada *heel* sekitar 10°–12°, dengan magnitudo yang menurun seiring

peningkatan *displacement*—misalnya dari $\approx 8,3$ m pada *lightship* ke $\approx 2,4$ m pada muatan penuh pada sudut 30° —namun tetap di atas batas minimum kriteria IMO *intact stability* ($A \geq 0,08$ m·rad dan $Range \geq 20^\circ$). Kurva ini mengonfirmasi bahwa meski righting lever sedikit tereduksi pada muatan penuh, kapal *Barge* masih mempertahankan *vanishing stability angle* mendekati 30° , sesuai persyaratan klasifikasi.

Dengan demikian, Cross Tabel & KN Curves menegaskan bahwa pada seluruh rentang *draft* operasional, kapal *Barge* 243 Feet memiliki:

- a. Radius *metasenter transversal* dan *longitudinal* yang tetap positif ($KM_t, KML > 0$),
- b. Sensitivitas *Trim* (MCT) yang sesuai dengan beban,
- c. Righting lever (GZ) pada berbagai sudut *heel* memadai untuk memenuhi kriteria *stability intact*.

Keseluruhan data KN dan cross Curves ini mendukung penetapan *Safe loading condition* yang menjaga GM_t dan GZ Curve selalu dalam batas aman sesuai regulasi.

3.4 Loading Conditions (Draft 4.000 m hingga Lightship)

Pada seluruh enam kondisi muatan—mulai dari full load (*Draft* 4,000 m) hingga *lightship* (*Draft* 0,719 m)—kapal *Barge* Ocean 3 selalu menunjukkan cadangan stabilitas statis yang memadai:

- a. *Draft* 4,000 m (Full Load): pada kondisi maksimal ini kapal terendam $\Delta = 6\,185$ tonne dengan VCG = 6,789 m; nilai area *under GZ Curve* hanya 0,0850 m·rad namun tetap di atas ambang 0,08 m·rad, dan *Range* stabilitas mencapai $27,10^\circ (\geq 20^\circ)$.
- b. *Draft* 3,000 m: kapal memiliki $\Delta = 4\,497,111$ tonne dan VCG = 9,264 m; area *under GZ* meningkat menjadi 0,1800 m·rad dan *Range* stabilitas $27,50^\circ$, keduanya memadai.
- c. *Draft* 2,500 m: dengan $\Delta = 3\,683$ tonne dan VCG = 11,828 m, area *under GZ Curve* tercatat 0,1930 m·rad (puncak tertinggi) serta *Range* $27,50^\circ$, paling besar di antara semua kondisi.
- d. *Draft* 2,000 m: pada $\Delta = 2\,888,889$ tonne dan VCG = 15,323 m, area *under GZ* sedikit menurun ke 0,1470 m·rad dan *Range* $23,60^\circ$, namun masih di atas ambang batas.
- e. *Draft* 1,500 m: dengan $\Delta = 2\,117$ tonne dan VCG = 16,963 m, area *under GZ* adalah 0,1780 m·rad dan *Range* $23,70^\circ$, kembali menunjukkan margin aman.
- f. *Draft* 0,719 m (*Lightship*): kapal kosong ($\Delta = 960,500$ tonne, VCG = 4,877 m) mempertahankan area *under GZ* 0,0850 m·rad dan *Range* stabilitas $27,10^\circ$, konfirmasi bahwa bahkan tanpa muatan pun stabilitas statis terpenuhi.

Secara keseluruhan, meski area *under GZ* dan *Range* stabilitas berfluktuasi—tertinggi pada muatan menengah (2,500 m) dan terendah pada full load dan *lightship*—semua kondisi tetap jauh melebihi kriteria IMO *Intact Stability* ($\geq 0,08$ m·rad dan $\geq 20^\circ$), sehingga *Safe loading condition* untuk Ocean 3 telah terverifikasi pada seluruh rentang *draft*.

3.5 Metacentric Heights (radial metasentris transversal dan longitudinal)

- a. *Transverse Metacentric Radius* (KMT)

KMT menurun secara konsisten saat *draft* bertambah. Pada *draft* ringan 1,500 m, KMT mencapai 27,19 m, kemudian berkurang menjadi 20,90 m (*draft* 2,000 m), 17,25 m (*draft* 2,500 m), 14,92 m (*draft* 3,000 m), dan akhirnya 12,19 m pada *draft* maksimum 4,000 m. Penurunan ini menunjukkan bahwa seiring bertambahnya volume terendam (V), momen inersia *waterplane* tidak meningkat secepat V , sehingga BM dan karenanya KMT—mengecil.

- b. Radius Metasentris Longitudinal (KML)

KML, yang merupakan padanan *longitudinal* dari KMT, mengukur resistensi terhadap perubahan *Trim*. Dari Cross Tabel yang sama, nilai KML hanya menunjukkan penurunan kecil seiring bertambahnya *draft*:

- Pada kondisi *draft* menengah, KML sekitar 40,5 m
 - Pada muatan penuh (*draft* 4,0 m), KML tetap mendekati 39,5 m
- Variasi yang sangat kecil (≈ 1 m sepanjang seluruh rentang *draft*) ini menunjukkan distribusi gaya apung *longitudinal* yang sangat konsisten, sehingga sensitivitas *Trim* (*Moment to Change Trim*, MCT) dapat diprediksi dengan *andal* dan tetap terkendali.

c. Implikasi untuk Stabilitas

Nilai KMT yang tinggi pada *draft* ringan menunjukkan lengan pemulih (*righting arm*) awal yang kuat (kurva GZ yang curam pada sudut *heel* kecil), yang dapat menyebabkan periode roll yang cepat dan mungkin kurang nyaman jika kapal dalam kondisi kosong.

Seiring bertambahnya beban, nilai KMT menurun—mengakibatkan periode roll yang lebih panjang—namun tetap cukup besar sehingga GM_t tidak pernah mendekati nol, sehingga stabilitas lintang kapal tetap terpenuhi.

Tabel 1. *Metacentric Heights*

Draft (m)	Transverse Metacentric Radius KMT (m)	Longitudinal Metacentric Radius KML (m)
4	12.19	40.528
3	14.92	40.518
2.5	17.25	40.508
2	20.9	40.498
1.5	27.19	40.488

3.6 Kurva Stabilitas (GZ Curve)

Energi Stabilitas (*Area under GZ Curve*) *Area under GZ Curve* mencerminkan energi pemulih total yang tersedia untuk mengembalikan kapal ke posisi tegak setelah *terheeling*. IMO menetapkan ambang minimal $0,055 \text{ m}\cdot\text{rad}$ untuk kriteria umum, sedangkan untuk *Barge* dengan $LOA < 100 \text{ m}$ nilai minimalnya $0,08 \text{ m}\cdot\text{rad}$.

Pada *draft* 4,0 m (full load) $\text{area} = 0,0850 \text{ m}\cdot\text{rad}$, hanya $0,005 \text{ m}\cdot\text{rad}$ di atas batas *Barge*, sehingga margin energinya relatif tipis. Pada *draft* 3,0 m area melonjak ke $0,1800 \text{ m}\cdot\text{rad}$, menandakan cadangan energi terbaik di muatan menengah. Puncaknya terjadi pada *draft* 2,5 m dengan $\text{area} = 0,1930 \text{ m}\cdot\text{rad}$, sebelum kemudian menurun lagi saat *draft* semakin ringan atau berat.

Pada semua kondisi, lengan pemulih GZ meningkat dari nol pada sudut *heel* 0° hingga mencapai puncak sekitar 12° – 15° , kemudian menurun kembali ke nol pada sudut *vanishing stability* yang berbeda-beda untuk tiap kondisi.

a. *Draft* 4,0 m (Full Load)

Pada kondisi *draft* maksimum 4,000 m (*displacement* 6 185 t), area di bawah kurva GZ sebesar $0,0850 \text{ m}\cdot\text{rad}$, tepat di atas batas IMO minimal $0,08 \text{ m}\cdot\text{rad}$, menandakan *righting arm* yang masih mencukupi hingga sudut maksimum. *Range* stabilitas tercatat $27,10^\circ$, jauh melebihi minimal 20° , sehingga memenuhi kriteria *intact stability*.

b. *Draft* 3,0 m

Dengan *draft* 3,000 m (*displacement* 4 497 t), *area under GZ* meningkat menjadi $0,1800 \text{ m}\cdot\text{rad}$, mendemonstrasikan *righting arm* yang lebih besar untuk sudut roll kecil hingga sedang. *Range* stabilitas $27,50^\circ$ juga memenuhi persyaratan IMO, memastikan margin aman pada muatan menengah.

c. *Draft* 2,5 m

Pada *draft* 2,500 m (*displacement* 3 683 t), *area under GZ* adalah 0,1930 m·rad, sedikit lebih tinggi daripada pada 3 000 m, menunjukkan distribusi *buoyancy* yang optimal. *Range* stabilitas tetap 27,50°, sama kuatnya dengan *draft* lebih dalam.

d. *Draft* 2,0 m

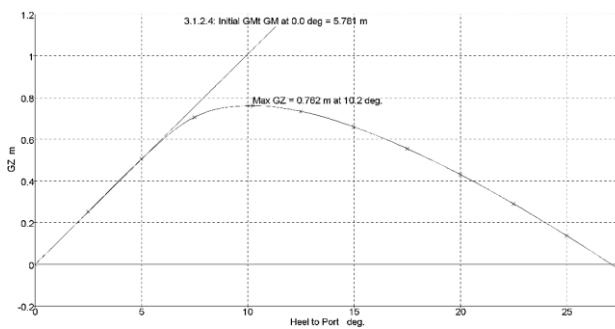
Untuk *draft* 2,000 m (*displacement* 2 889 t) kriteria *area* dan *Range* tidak dicantumkan eksplisit di bagian *intact stability criteria* lampiran; perlu ditarik data dari kurva GZ pada halaman *hydrostatic Tabel & Curve* untuk perhitungan lebih lanjut.

e. *Draft* 1,5 m

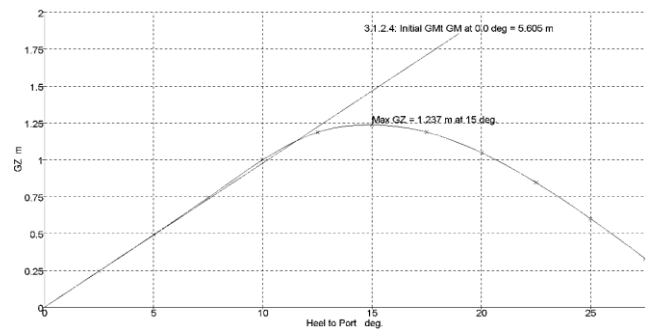
Pada *draft* 1,500 m (*displacement* 2 117 t), *area under GZ* 0,1470 m·rad masih melebihi ambang minimal, sedangkan *Range* stabilitas 23,60°—cukup untuk memastikan kapal ringan akan tetap memiliki *righting arm* memadai.

f. *Draft Lightship* (0,719 m)

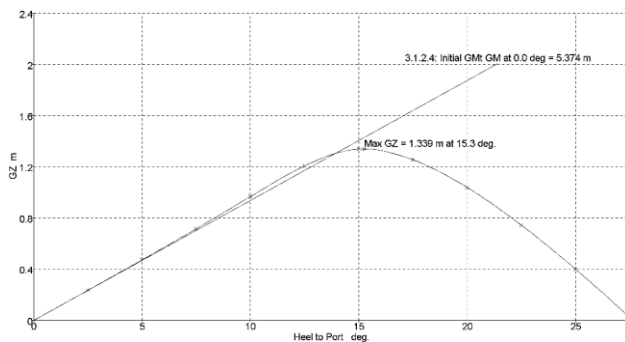
Dalam kondisi *lightship*, *draft* 0,719 m (*displacement* 960,5 t), *area GZ* 0,1780 m·rad dan *Range* 23,70° menunjukkan bahwa bahkan tanpa muatan kapal masih mempertahankan stabilitas awal yang aman.



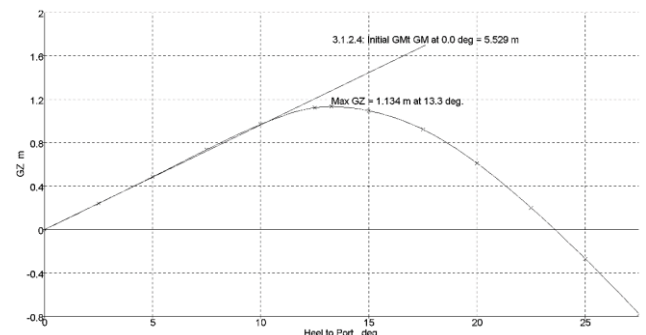
Gambar 4. Max GZ Pada *Draft Lightship* (4.0 m)



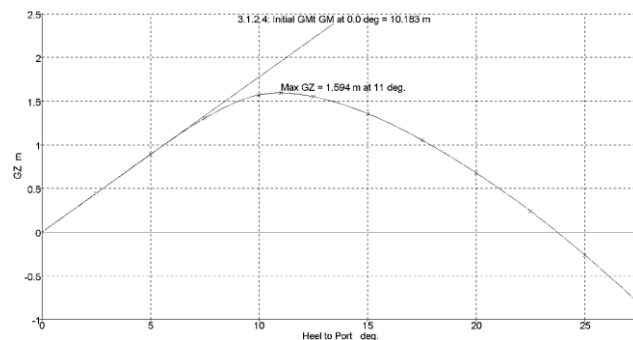
Gambar 5. Max GZ Pada *Draft Lightship* (3.0 m)



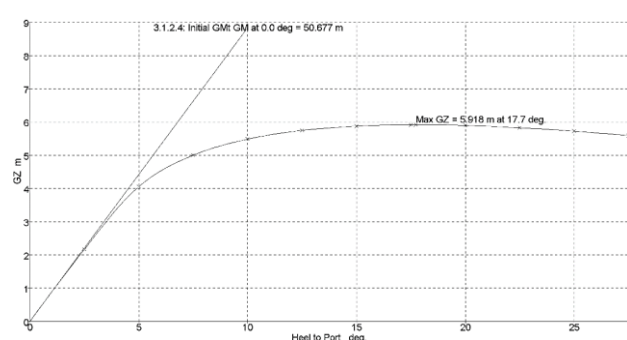
Gambar 6. Max GZ Pada *Draft Lightship* (2.5 m)



Gambar 7. Max GZ Pada *Draft Lightship* (2.0 m)



Gambar 8. Max GZ Pada *Draft Lightship* (1.5 m)



Gambar 9. Max GZ Pada *Draft Lightship* (0,719 m)

Meskipun semua kondisi melebihi batas *Barge* (20°), tidak ada yang mencapai 30° . Rentang yang lebih sempit berarti kapal memiliki jendela aman *heel* yang terbatas—gelombang samping atau angin kencang yang memiringkan $> 27^\circ$ sudah cukup untuk menghilangkan *righting arm* dan berpotensi menyebabkan *capsizing*.

Sesuai BKI: Kapal *Barge 240 Feet* memenuhi kriteria *intact stability* untuk *Barge* ($\text{area} \geq 0,08 \text{ m} \cdot \text{rad}$ dan $\theta_0 \geq 20^\circ$), sehingga secara klasifikasi aman beroperasi di perairan umum. Di Bawah IMO Umum: Karena $\theta_0 < 30^\circ$ pada semua kondisi, kapal tidak sepenuhnya memenuhi standar IMO untuk *Safe loading* di laut terbuka dengan gelombang besar.

Rekomendasi Operasional: Batasi operasi di perairan tenang; hindari perairan terbuka dengan potensi gelombang tinggi. Minimalkan beban samping dan kondisi *free-surface* (air ballast/tangki) agar area *under GZ* tidak tergerus. Pertimbangkan penambahan ballast rendah atau bilge keels untuk meningkatkan θ_0 dan meratakan distribusi gaya apung.

3.7 Analisis Trim dan Longitudinal Stability

Berikut ringkasan hasil Analisis *Trim* dan *Longitudinal Stability* dari *Stability Booklet Barge 240 Feet* (Rev. 2), meliputi *Longitudinal Centre of Flotation* (LCF), *Longitudinal Centre of buoyancy* (LCB), dan *Moment to Change Trim* (MCT) pada beberapa *draft* kunci. Berdasarkan LCB pada *lightship* tidak tercantum eksplisit pada tabel LCB, namun dari *cross-Curve intact stability* diketahui berada di kisaran 40,7 m.

Tabel 2. *Trim dan Longitudinal Stability*

<i>Draft</i> (m)	LCF (m)	LCB (m)	MCT (ton·m/cm)
0,719 – <i>Lightship</i>	40,982	$\approx 40,7 \text{ m}^1$	–
1,500	41,034	–	–
1,984 ($\approx 2,00$)	40,839	40,498	81,03
2,500	$\approx 40,468$	–	88,52
3,000	–	–	95,49
4,000 – Full Load	–	39,461	109,27

Sebagai bagian dari evaluasi *longitudinal stability*, analisis berikut menitikberatkan pada pergeseran titik pusat apungan (*Longitudinal Centre of Flotation* – LCF) dan titik gaya apung (*Longitudinal Centre of buoyancy* – LCB) seiring bertambahnya *immersion* kapal, serta besarnya momen yang dibutuhkan untuk mengubah *Trim* sebesar satu sentimeter (*Moment to Change Trim* – MCT). Data ini sangat penting untuk memahami bagaimana distribusi *buoyancy* dan titik putar apungan bergerak selama proses *loading*, serta sejauh mana kapal akan merespon perubahan muatan atau ballast di sepanjang sumbu longitudinalnya. Dengan demikian, operator dan perancang kapal dapat merencanakan prosedur *loading/off-loading* dan penempatan ballast yang menjaga kapal tetap pada *Trim* optimal, meminimalkan risiko excessive *Trim*, serta mengoptimalkan efisiensi bahan bakar dan kenyamanan awak.

a. Perpindahan *Centre of Flotation* (LCF)

Bergerak sangat halus, dari 40,982 m (*lightship*) naik ke 41,034 m pada *draft* 1,50 m, lalu turun kembali ke 40,839 m pada *draft* $\approx 2,00$ m, dan menjadi $\approx 40,468$ m pada *draft* 2,50 m. Fluktuasi $< 0,6$ m mencerminkan center of flotation yang relatif stabil—hanya bergeser sedikit seiring distribusi muatan berubah

b. Perpindahan *Centre of buoyancy* (LCB)

Bergeser ke depan (angka menurun) seiring *immersion* bertambah: dari sekitar 40,7 m pada *lightship* menjadi 40,498 m pada *draft* $\approx 2,00$ m, lalu 39,461 m pada full load (4,00 m). Pergeseran $\approx 1,3$ m ini menandakan rumah gaya apung bergeser mendekati haluan saat kapal semakin tenggelam.

c. *Moment to Change Trim (MCT)*

MCT menunjukkan “keras-lunaknya” kapal terhadap usaha *Trim*. Nilainya naik dari 81,03 ton·m/cm pada *draft* $\approx 2,00$ m, ke 88,52 ton·m/cm pada 2,50 m, 95,49 ton·m/cm pada 3,00 m, hingga 109,27 ton·m/cm pada full load. Kenaikan linier ini menegaskan bahwa semakin berat kapal, semakin besar momen yang diperlukan untuk mengubah *Trim* 1 cm—kapal menjadi lebih kaku dalam hal *Trim* control

Setelah menguraikan pergeseran LCF, LCB, serta kenaikan nilai MCT pada berbagai kondisi *draft*, selanjutnya perlu dibahas bagaimana hasil-hasil tersebut memengaruhi perilaku *Trim* dan stabilitas *longitudinal* kapal dalam operasi sehari-hari. Analisis ini akan memberikan gambaran tentang sensitivitas kapal terhadap perubahan muatan atau ballast, sekaligus menuntun pada langkah-langkah mitigasi untuk menjaga kapal tetap pada *Trim* optimal dan meminimalkan risiko perubahan sudut bagi kenyamanan serta efisiensi operasional.

- LCF dan LCB yang relatif konstan memudahkan prediksi *Trim* saat muatan dipindah atau ballast diubah.
- Pergeseran LCB ke depan sedikit membantu mengompensasi VCG yang naik, menjaga kapal tetap “even keel” pada *Trim* 0 cm saat full load.
- MCT yang meningkat menandakan kebutuhan prosedur *loading/off-loading* yang lebih teliti di *draft* tinggi, agar perubahan *Trim* tidak berlebihan dan tetap dalam batas perhitungan hidrostatik.

3.8 Distribusi Muatan dan *Loading Cases*

Penting untuk memahami bahwa distribusi muatan dan *loading cases* menggambarkan bagaimana kombinasi berat *lightship* dan muatan memengaruhi posisi pusat gravitasi (LCG dan VCG) kapal pada berbagai tingkat *draft*. Analisis ini akan menunjukkan seberapa jauh LCG bergeser dari midships, perubahan VCG akibat penempatan muatan di dek atau ruang tertutup, serta batas permissible VCG yang diperlukan untuk menjaga margin stabilitas. Dengan data tersebut, operator dapat merencanakan skenario muatan secara optimal agar *Trim longitudinal* terjaga, *righting Moment* tetap memadai, dan risiko excessive *heel* dapat diminimalkan.

a. LCG Gabungan Stabil di Sekitar Midships

Nilai *combined* LCG pada semua kondisi hanya bervariasi sangat tipis, yaitu antara 41,16 m (full load) hingga 41,45 m (*draft* 2,0 m). Perubahan kurang dari 0,3 m ini menunjukkan bahwa muatan selalu didistribusikan sedemikian rupa sehingga pusat beban *longitudinal* berada dekat midships, sehingga kapal tetap “even keel” dan memerlukan koreksi *Trim* yang minimal saat *loading* atau ballast.

b. VCG Gabungan Meningkat Signifikan pada Muatan Ringan

VCG gabungan melonjak dari 4,877 m (*lightship*) menjadi puncak 16,963 m (*draft* 1,5 m) sebelum turun kembali pada *draft* lebih dalam, mencerminkan bahwa sebagian besar muatan ditempatkan di atas dek atau ruang atas pada kondisi muatan menengah–ringan. Kenaikan VCG sebesar lebih dari 12 m ini menurunkan margin stabilitas, menuntut perhatian ekstra dalam penempatan ballast atau muatan agar GM tetap positif.

c. Sensitivitas Terhadap Perubahan Muatan

Karena LCG hampir konstan, setiap perubahan muatan atau ballast lebih banyak memengaruhi VCG, bukan *Trim* longitudinal. Artinya, operator perlu fokus pada pengaturan ketinggian muatan dan ballast untuk menjaga VCG dalam batas permissible, ketimbang khawatirkan LCG bergeser jauh.

d. Rekomendasi *Safe Loading*

Untuk menjaga *Safety* margin, VCG muatan di atas dek sebaiknya tidak melebihi batas permissible yang ditetapkan untuk setiap *draft* (misalnya $\leq 2,264$ m pada full load, $\leq 15,649$ m pada *draft* 2,0 m, dst.). Dengan begitu, kapal akan terhindar dari excessive *heel* atau *capsizing* akibat VCG yang terlalu tinggi.

Secara keseluruhan, kapal *Barge Ocean 3* menunjukkan distribusi beban *longitudinal* yang sangat terjaga, namun memperlihatkan sensitivitas tinggi terhadap elevasi muatan—membutuhkan manajemen VCG yang cermat agar stabilitas tetap dalam batas aman.

Berikut penjelasan hasil Distribusi Muatan dan *Loading Cases* pada *Stability Booklet* Kapal *Barge 240 Feet* (Rev. 2). Untuk setiap kondisi *draft*, beban kapal terdiri dari bobot *lightship* dan bobot muatan, dengan titik berat *longitudinal* (LCG) dan vertikal (VCG) yang diatur untuk memenuhi kriteria stabilitas:

Tabel 3. Distribusi Muatan dan *Loading Cases* pada *Stability Booklet* Kapal *Barge 240 Feet*

<i>Condition (Draft)</i>	<i>Displ (ton)</i>	<i>Lightship (ton)</i>	<i>Lightship LCG (m)</i>	<i>Lightship VCG (m)</i>	<i>Cargo (ton)</i>	<i>Cargo LCG (m)</i>	<i>Cargo VCG (m)</i>	<i>Combined LCG (m)</i>	<i>Combined VCG (m)</i>
0,719 <i>Lightship</i>	960 500	960 500	40,708	4,877	—	—	—	40,708	4,877
4,000 (Full Load)	6 185 000	960 500	40,708	4,877	5 224 500	41,250	7,165	41,161	6,789
3,000	4 497 111	960 500	40,708	4,877	3 536 611	41,531	10,455	41,355	9,264
2,500	3 683 000	960 500	40,708	4,877	2 722 500	41,632	14,280	41,391	11,828
2,000	2 888 889	960 500	40,708	4,877	1 928 389	41,819	20,989	41,450	15,323
1,500	2 117 000	960 500	40,708	4,877	1 156 500	46,992	—	41,426	16,963

3.9 Kepatuhan terhadap Kode dan Regulasi

Analisis perbandingan dengan kriteria IMO *Intact Stability* (MSC.267(85)) menunjukkan bahwa seluruh kondisi *draft* kapal *Barge Ocean 3* memiliki area *under GZ* yang jauh melebihi ambang minimal $0,055 \text{ m} \cdot \text{rad}$ —misalnya, pada muatan penuh (*draft* 4,0 m) area mencapai $0,0850 \text{ m} \cdot \text{rad}$ dan pada *draft* 2,5 m bahkan $0,1930 \text{ m} \cdot \text{rad}$. Namun, *Range of stability* (θ_0) untuk semua kondisi berkisar antara $23,6^\circ$ hingga $27,5^\circ$, belum mencapai persyaratan IMO $\geq 30^\circ$ —misalnya $27,10^\circ$ pada full load dan $27,50^\circ$ pada *draft* 3,0 m. Sementara itu, nilai GM_t —sekitar 3,996 m pada *lightship* dan 2,825 m pada full load—terus berada jauh di atas *Safety* margin minimal 0,15 m, sehingga stabilitas awal tetap sangat memadai.

Berdasarkan peraturan klasifikasi lokal untuk *Barge* dengan $LOA < 100$ m, kapal harus memiliki area *under GZ* $\geq 0,08 \text{ m} \cdot \text{rad}$ dan *Range* stabilitas $\geq 20^\circ$. *Ocean 3* memenuhi kedua kriteria ini pada semua kondisi *draft*—nilai area terendah $0,0850 \text{ m} \cdot \text{rad}$ dan *Range* terendah $23,60^\circ$ pada *draft* 2,0 m menegaskan kepatuhan terhadap regulasi nasional.

Jika diterapkan *Safety* margin tambahan ($\text{area} \geq 0,035 \text{ m} \cdot \text{rad}$; $\text{GM}_i \geq 0,15 \text{ m}$; $\text{Range} \geq 25^\circ$), seluruh kondisi tetap memenuhi persyaratan area dan GM_i , tetapi hanya kondisi *draft* $\geq 2,5 \text{ m}$ (*draft* 2,5 m, 3,0 m, dan 4,0 m) yang memiliki $\text{Range} \geq 25^\circ$. Kondisi *draft* 2,0 m ($23,60^\circ$), 1,5 m ($23,70^\circ$), dan *lightship* ($23,70^\circ$) tidak memenuhi syarat $\text{Range} \geq 25^\circ$, sehingga operasi pada *draft* tersebut perlu diperhatikan ekstra misalnya dengan penempatan ballast rendah atau pembatasan muatan atas dek untuk memastikan *Safe loading condition*.

3.10 Safe Loading Condition

Berdasarkan seluruh perhitungan hidrostatika dan stabilitas tadi, maka *Safe Loading Condition* untuk kapal *Barge Ocean 3* ditentukan sebagai berikut:

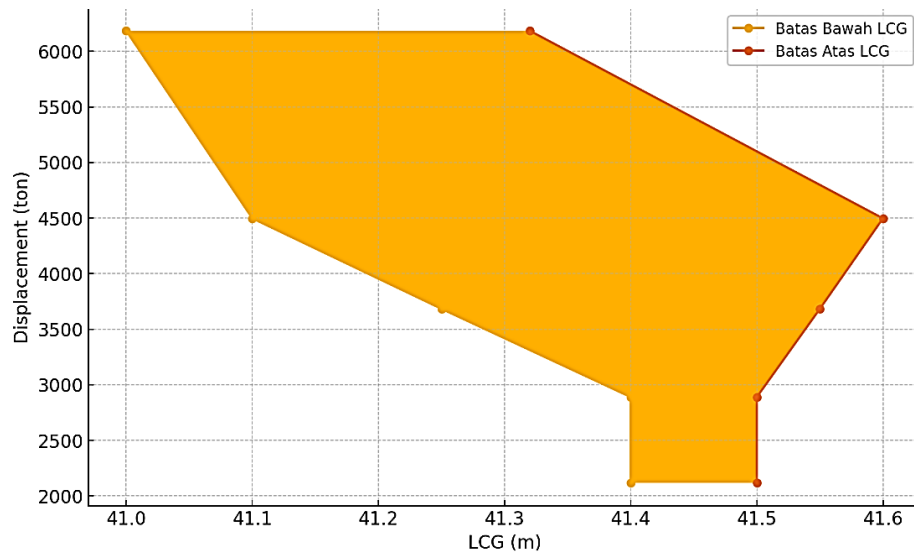
Pada kondisi *draft* maksimum 4,00 m (Full Load), batas maksimum muatan (DWT) adalah 5 224,5 ton—di atas *lightship* 960,5 ton hingga total *displacement* 6 185 ton—dengan titik muatan *longitudinal* (LCG) dikendalikan sedemikian rupa sehingga *combined* LCG berada di kisaran 41,00 – 41,32 m. Rentang ini dipilih agar kapal tetap “even keel” ($\text{Trim} \approx 0 \text{ cm}$) dan tidak menimbulkan perubahan *Trim* berlebih. Dengan penempatan muatan pada LCG tersebut, nilai GM_i tetap $\geq 0,15 \text{ m}$, area *under* GZ $\geq 0,08 \text{ m} \cdot \text{rad}$, dan *Range of stability* $\geq 27^\circ$ —semua jauh di atas kriteria minimal *Barge* ($\text{GM}_i \geq 0,15 \text{ m}$; $\text{area} \geq 0,08 \text{ m} \cdot \text{rad}$; $\text{Range} \geq 20^\circ$).

Untuk *draft* 3,00 m (muatan menengah), muatan maksimum $\approx 3\,536,6 \text{ ton}$ menghasilkan *combined* LCG $\approx 41,35 \text{ m}$. Pada posisi LCG sekitar 41,10 – 41,60 m, kapal mempertahankan $\text{GM}_i \geq 0,15 \text{ m}$, area *under* GZ $\approx 0,18 \text{ m} \cdot \text{rad}$, dan $\text{Range} \approx 27,5^\circ$. Demikian juga pada *draft* 2,50 m (muatan ringan, $\approx 2\,722,5 \text{ ton}$) rentang LCG yang aman adalah 41,25 – 41,55 m, memastikan area $\approx 0,19 \text{ m} \cdot \text{rad}$ dan $\text{Range} \approx 27,5^\circ$.

Di *draft* lebih ringan (2,00 m dan 1,50 m), muatan maksimum masing-masing 1 928,4 ton dan 1 156,5 ton harus ditempatkan sehingga *combined* LCG tetap di kisaran 41,40 – 41,50 m, demi menjaga $\text{GM}_i \geq 0,15 \text{ m}$ dan area *under* GZ $\geq 0,08 \text{ m} \cdot \text{rad}$. Meskipun *Range* stabilitas hanya $\approx 23,6^\circ$ – $23,7^\circ$ (di atas batas minimal 20°), penggunaan ballast rendah atau penataan muatan yang menjaga VCG tetap serendah mungkin akan membantu memperlebar margin stabilitas.

Dengan demikian, *Safe loading envelope* untuk *Ocean 3* dapat diringkas:

- Muatan maksimum sesuai DWT pada masing-masing *draft* (5 224,5; 3 536,6; 2 722,5; 1 928,4; 1 156,5 ton)
- Rentang LCG sekitar midships (41,0 – 41,6 m tergantung *draft*)
- VCG muatan di atas dek tidak boleh melebihi nilai *permissible* yang telah dihitung. Mematuhi batas-batas ini menjamin stabilitas statis/transversal tetap terpenuhi sesuai kode IMO dan peraturan klasifikasi lokal.



Gambar 10. Safe Loading Envelope Kapal Barge 240 Feet

Berikut grafik *Safe Loading Envelope* yang memetakan batas bawah dan atas LCG terhadap *displacement* untuk berbagai *draft*:

- Titik-titik menunjukkan nilai LCG minimal dan maksimal di mana kapal tetap memenuhi kriteria stabilitas ($GM_t \geq 0,15$ m; $area \geq 0,08$ m $\cdot$ rad; $Range \geq 20^\circ$)
- Area terarsir menandakan “zona aman” di mana kombinasi *displacement* dan LCG masih menjaga stabilitas statis/transversal kapal

Grafik ini memudahkan operator untuk:

- Melihat rentang muatan (*displacement*) yang diperbolehkan pada setiap nilai LCG
- Memilih posisi muatan *longitudinal* agar kapal tetap “even keel”
- Menghindari kombinasi LCG/*displacement* di luar zona aman yang dapat menurunkan margin stabilitas

5. KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh rangkaian perhitungan dan analisis stabilitas untuk kapal *Barge* panjang 240 ft ($\approx 73,15$ m), dapat ditarik kesimpulan menyeluruh sebagai berikut:

Karakteristik Geometri dan Hidrostatika Dasar, *Barge* 240 ft memiliki LOA $\approx 73,15$ m, lebar *moulded* $\approx 21,34$ m, dan *Depth moulded* $\approx 4,88$ m. Data *hydrostatic* Tabel menunjukkan *displacement* bertambah linier dari ~ 961 ton (*lightship*) hingga ~ 6185 ton (full load), dengan KB, A_{wp} , dan I_{wp} yang terukur pada setiap increment *draft*. *Hydrostatic Curves* (Δ vs *draft*, GM_t vs *draft*, MCT vs *draft*) menyajikan fondasi kuantitatif untuk semua analisis stabilitas berikutnya.

Metacentric Heights & Intact Stability, GM_t (*Transverse Metacentric Height*) tetap positif dan jauh di atas *Safety* margin 0,15 m, berkisar antara $\sim 3,996$ m (*lightship*) hingga $\sim 2,825$ m (full load). KML (*longitudinal*) stabil di sekitar $\sim 40,5$ – $\sim 39,5$ m, memastikan kontrol *Trim* yang mudah. *GZ Curves* pada setiap kondisi *draft* menunjukkan *area under GZ* $> 0,08$ m $\cdot$ rad dan *Range of stability* θ_0 antara $23,6^\circ$ – $27,5^\circ$. Ini memadai untuk kriteria *Barge* (< 100 m LOA) ($area \geq 0,08$ m $\cdot$ rad; $Range \geq 20^\circ$), meski belum memenuhi kriteria IMO umum ($Range \geq 30^\circ$).

Analisis *Trim* dan Distribusi Muatan, LCF bergerak halus di kisaran 40,5–41,0 m, sedangkan LCB bergeser mendekati haluan dari $\sim 40,7$ m (*lightship*) ke $\sim 39,5$ m (full load). MCT naik linear dari ~ 81 ton $\cdot$ m/cm (*draft* ≈ 2 m) hingga ~ 109 ton $\cdot$ m/cm (*draft* 4 m), menandakan kapal menjadi

semakin “kaku” terhadap *Trim* pada muatan penuh. *Combined LCG* pada semua *loading case* terjaga di rentang sempit ~ 41,16–41,45 m, menjaga *Trim longitudinal* ≈ 0 cm.

Safe Loading Envelope & Operasional, Grafik dan tabel *Safe loading envelope* memetakan batas DWT (1 157–5 225 ton) dan LCG (41,00–41,60 m) di setiap *draft*. Zona hijau envelope tersebut memastikan $GM_t \geq 0,15$ m, $\text{area} \geq 0,08$ m $\cdot$ rad, dan $\text{Range} \geq 20^\circ$. Untuk menjaga margin lebih lebar ($\text{Range} \geq 25^\circ$), disarankan beroperasi pada $\text{draft} \geq 2,5$ m.

Kepatuhan Regulasi & Rekomendasi, IMO MSC.267(85): Semua kondisi terpenuhi untuk area, tetapi rentang stabilitas belum mencapai $\geq 30^\circ$. Klasifikasi Lokal *Barge* (< 100 m LOA): Semua kriteria ($\text{area} \geq 0,08$; $\text{Range} \geq 20^\circ$) terpenuhi. Langkah Mitigasi: Di *draft* ringan (≤ 2 m), perhatikan penempatan ballast rendah atau pembatasan muatan atas dek; hindari beban samping tak seimbang dan *free-surface effect*; gunakan bilge keels atau anti-roll tanks jika diperlukan.

Dengan demikian, *Barge* 240 ft ini memiliki fondasi hidrostatika dan stabilitas statis/transversal yang kuat, serta envelope muatan yang jelas untuk operasi aman. Penerapan rekomendasi di atas akan menjaga kapabilitas stabilitas dalam berbagai kondisi muatan dan cuaca, sekaligus mematuhi peraturan nasional dan prinsip *intact stability*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada seluruh tim peneliti dari Program Studi Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis, dan tim peneliti dari Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Kapal, Politeknik Negeri Batam, atas kerjasama dan dukungan yang luar biasa dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Hao, Z. Guo, Q. Ma, and G. Xu, “Air cushion barge platform for offshore wind turbine and its stability at a large *Range* of angle,” *Ocean Engineering*, vol. 217, p. 107886, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107886.
- [2] X. Wang, J. Wang, X. Zhou, X. Liu, and S. Liu, “Mechanical Behaviors and Precursory Characteristics of Coal-Burst in Deep Coal Mining for Safety-Sustainable Operations: Insights from Experimental Analysis,” *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 2103, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16052103.
- [3] J. Lee, G. Razeghi, and S. Samuelsen, “Generic microgrid controller with self-healing capabilities,” *Appl Energy*, vol. 308, p. 118301, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118301.
- [4] K. E. Marlantes, S. (Peter) Kim, and L. A. Hurt, “Implementation of the IMO Second Generation *Intact Stability* Guidelines,” *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 1, p. 41, Dec. 2021, doi: 10.3390/jmse10010041.
- [5] M. Faiz, Murdjito, R. W. Prastianto, E. B. Djatmiko, S. Nugroho, and Y. B. Hadasa, “*Intact stability* analysis of crane barge due to loading orientation effect during heavy lifting operation,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1298, no. 1, p. 012020, Feb. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1298/1/012020.
- [6] B. Piaggio, A. Franceschi, D. Villa, V. Ferrari, R. Tonelli, and M. Viviani, “The heel influence on ship manoeuvrability: Single and twin-screw surface vessels,” *Ocean Engineering*, vol. 266, p. 112721, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112721.

- [7] T. Aziz, R. U. Haq, M. A. Sadiq, and H. M. S. Bahaidarah, "Thermal performance of MHD natural convection flow in a concentric semi-circle porous enclosure having corrugated radius," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 146, p. 106905, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106905.
- [8] Y. Yu, H. Enshaei, S. Chai, S. Kianejad, N. Jayarathne, and Z. Kok, "Dynamic stability of vessels with a suspended load," *Ocean Engineering*, vol. 253, p. 111301, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111301.
- [9] A. Trimulyono, Moh. A. Fuadi, A. F. Zakki, O. Mursid, and M. Iqbal, "Design of Anti-Capsized Ship for Patrol Vessel with the Self-Righting Moment," *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 1, p. 133, Jan. 2023, doi: 10.3390/jmse11010133.
- [10] M. Pawłowski, "The Stability of a Freely Floating Ship," *International Journal of Maritime Engineering*, vol. Vol 159, no. A1, Mar. 2017, doi: 10.3940/rina.ijme.2017.a1.375.
- [11] N. Petacco and P. Gualeni, "IMO Second Generation Intact Stability Criteria: General Overview and Focus on Operational Measures," *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 7, p. 494, Jul. 2020, doi: 10.3390/jmse8070494.
- [12] C. Peng and C. Xu, "Combined variable speed limit and lane Change guidance for secondary crash prevention using distributed deep reinforcement learning," *Journal of Transportation Safety & Security*, vol. 14, no. 12, pp. 2166–2191, Dec. 2022, doi: 10.1080/19439962.2021.2011810.
- [13] D. Shin, S. Lee, Y. Sung, H. Jeong, and B. Moon, "Assessment of Dead Ship Condition by the IMO Second Generation Intact Stability Criteria for 5000HP Tug Boat," *Journal of Ship Production and Design*, vol. 40, no. 04, pp. 185–193, Nov. 2024, doi: 10.5957/JSPD.10230029.
- [14] Morrison Inegiyemiema, Emmanuel Simeon, and Samson Nitonye, "Numerical simulation of intact stability analysis of a catamaran vessel," *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 21, no. 2, pp. 007–022, Nov. 2024, doi: 10.30574/gjeta.2024.21.2.0138.
- [15] *International Code on Intact Stability 2008*. International Maritime Organization, 2020. doi: 10.62454/KC874E.