

Analisis Barge Sea Transport, Roll-Off Operation, dan Land Transport Menggunakan SPMT/Multi-axle Trailer

Irhas Zulfikar^{1*}, Mega Bagus Herlambang², Zaenal Muttaqien³

Institut Teknologi Indonesia, Indonesia^{1,2}

Universitas Jenderal Achmad Yani Bandung, Indonesia³

Email: irhaszulfikar08@gmail.com^{1*}, mega.herlambang@iti.ac.id²,

zaenal.muttaqien@lecture.unjani.ac.id³

Keywords:

*Heavy Lift; Roll-Off;;
SPMT; Barge Stability;
Risk Management*

Abstract

The transportation of the BR-106 Oxidation Reactor integrates the barge, ramp, jetty, SPMT/multi-axle trailer, route, and personnel; inconsistent input can affect stability, load distribution, and operational decisions. This retrospective engineering case study evaluates data consistency, technical adequacy, and alignment between the design basis, controls, and actual outcomes. The method combines documentary triangulation of project documents with independent recalculations of capacity, pressure, ramp geometry, stability, and mooring; sensitivity analysis; semi-quantitative FMEA; and confirmation of execution by the lead author as project practitioner. The gross shipment weight of 456.05 t and design payload of 471.60 t are reconciled as context-specific values, with the higher value conservatively used in the design model. Configuration reconciliation confirms 28 physical axle lines; a denominator of 14 therefore represents load per pair/station, not per axle line. The GPIS document served as the controlled work method during execution. Sea transport, roll-off, land transport, and jack-down were completed successfully, and the cargo arrived safely. The study contributes an auditable traceability-stop-hold-check model linking source data, calculations, risks, acceptance evidence, decision owners, and successful outcomes.

Kata Kunci:

*Heavy Lift; Roll-Off;
SPMT; Stabilitas Barge;
Manajemen Risiko.*

Abstrak

Transportasi Oxidation Reactor BR-106 mengintegrasikan barge, ramp, jetty, SPMT/multi-axle trailer, rute, dan personel; ketidakonsistenan input dapat memengaruhi stabilitas, distribusi beban, dan keputusan operasional. Studi kasus rekayasa retrospektif ini mengevaluasi konsistensi data, kecukupan teknis, serta keselarasan antara dasar desain, pengendalian, dan hasil aktual. Metode menggabungkan triangulasi dokumen proyek dengan perhitungan ulang independen atas kapasitas, tekanan, geometri ramp, stabilitas, dan mooring; analisis sensitivitas; FMEA semi-kuantitatif; serta konfirmasi pelaksanaan oleh penulis utama sebagai praktisi proyek. Berat gross shipment 456,05 ton dan design payload 471,60 ton direkonsiliasi sebagai nilai dengan konteks berbeda, dan nilai yang lebih tinggi digunakan secara konservatif dalam model desain. Rekonsiliasi konfigurasi membuktikan 28 physical axle lines; penyebut 14 menunjukkan beban per pair/station, bukan per axle line. Dokumen GPIS digunakan sebagai metode kerja terkendali selama pelaksanaan. Operasi sea transport, roll-off, land transport, dan jack-down selesai dilaksanakan, serta kargo tiba dengan aman. Kontribusi penelitian adalah model *traceability-stop-hold-check* yang dapat diaudit untuk menghubungkan sumber data, perhitungan, risiko, bukti penerimaan, pemegang keputusan, dan keberhasilan operasi.

PENDAHULUAN

Project logistics menangani kargo yang besar, berat, *out-of-gauge*, bernilai tinggi, dan kritis terhadap jadwal proyek. Perencanaannya harus mengintegrasikan biaya, waktu, rute, pemilihan moda, keselamatan teknis, serta koordinasi antarpemangku kepentingan (Turbaningsih, 2022; Turbaningsih et al., 2022). Pada kasus BR-106, sistem heavy lift mempertemukan aspek marine engineering, transport engineering, struktur, keselamatan, dan rantai pasok. Perubahan ballast mengubah trim serta elevasi barge; perubahan elevasi memengaruhi sudut ramp; transisi ramp mengubah reaksi axle; dan perubahan reaksi dapat meningkatkan tekanan lokal pada deck, jetty, atau tanah. Karena itu, keberhasilan operasi tidak cukup dibuktikan oleh kapasitas nominal alat, tetapi memerlukan verifikasi konfigurasi, jalur beban, kondisi lingkungan, dan kesiapan personel (DB Schenker Indonesia, 2020; DNV, 2021a, 2021b, 2023).

Penelitian terdahulu membahas optimasi rute multimoda untuk muatan oversize, geometri dan hambatan jalan, kelayakan lintasan jembatan, serta pemilihan rute berbasis multikriteria (Gnap et al., 2022; Huang & Han, 2021; Luo et al., 2021; Petru & Krivda, 2021; Wolnowska & Konicki, 2019). Kajian SPMT menunjukkan bahwa posisi support dan hydraulic grouping memengaruhi tegangan, defleksi, serta stabilitas sistem angkut (Baihaque et al., 2018; Yu et al., 2022). (Stogdill et al., 2022) menunjukkan manfaat SPMT untuk instalasi vessel, sedangkan Federal Highway Administration (2007) menekankan bahwa kapasitas axle nominal dapat dibatasi oleh ground bearing pressure dan tinggi *center of gravity*.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi konsistensi data, kecukupan teknis, dan keselarasan antara dasar desain, pengendalian, dan hasil aktual pada transportasi Oxidation Reactor BR-106. Kebaruan penelitian ini adalah model *traceability-stop-hold-check* yang mengubah method statement menjadi hubungan terukur antara sumber data, analisis, risiko, bukti close-out, keputusan, dan hasil operasi. Manfaat teoretis penelitian ini adalah memperkaya literatur tentang transportasi heavy lift multimoda, khususnya dalam integrasi antara analisis teknis, manajemen risiko, dan acceptance gate. Manfaat praktisnya adalah memberikan panduan bagi praktisi dalam merancang dan mengeksekusi transportasi heavy lift yang dapat diaudit, serta memberikan rekomendasi bagi pengambil keputusan dalam menetapkan *acceptance criteria* pada setiap antarmuka operasi. Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka *traceability-stop-hold-check* yang dapat digunakan pada proyek transportasi heavy lift lainnya, serta pada rekonsiliasi data kritis yang memungkinkan audit independen terhadap perhitungan dan keputusan operasional.

METODE PENELITIAN

Desain kajian, sumber data, dan validasi

Penelitian menggunakan studi kasus rekayasa retrospektif deskriptif-evaluatif dengan unit analisis berupa antarmuka *cargo-barge-ramp-jetty-transporter-route*. Analisis numerik mencakup rekonsiliasi berat, gaya gravitasi, volume, beban axle, utilisasi kapasitas, tekanan rata-rata, ramp grade, waktu towage, stabilitas, ballast, dan mooring. Evaluasi kualitatif mencakup *route obstacle*, organisasi, komunikasi, *contingency plan*, status dokumen, keputusan go/no-go, dan hasil operasi. Input penelitian terdiri atas data dokumenter proyek berupa GPIS-BPPI-2010016, *packing list*, *calculation sheet*, *project drawing*, presentasi praktik keinsinyuran, serta konfirmasi pelaksanaan oleh penulis utama yang terlibat sebagai

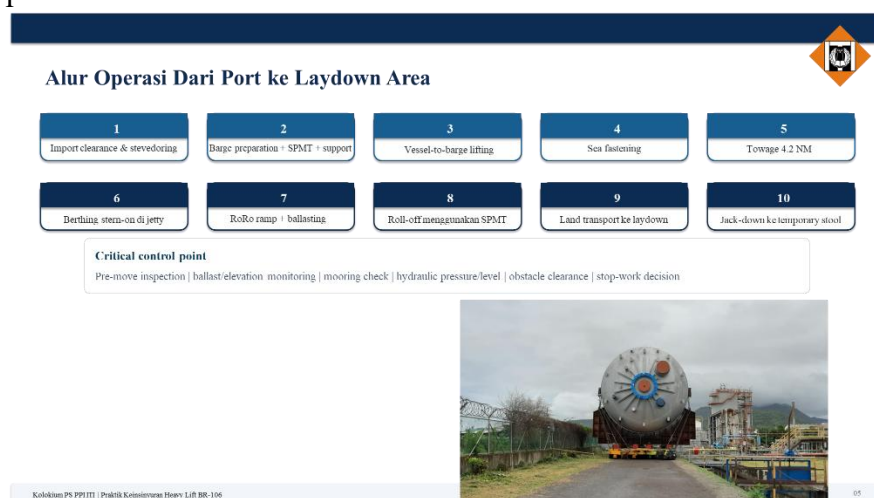
praktisi proyek (DB Schenker Indonesia, 2020; Zulfikar, 2026). Status Issued for Approval (IFA) dan label PRELIMINARY dicatat sebagai metadata administratif pada dokumen; secara faktual, paket GPIS yang sama digunakan sebagai metode kerja terkendali selama eksekusi hingga kargo tiba aman di lokasi tujuan.

Validasi dilakukan melalui empat langkah. Pertama, triangulasi nilai yang sama pada packing list, transport drawing, stability drawing, GPIS, dan PPT. Kedua, pemeriksaan dimensi, satuan, penyebut, serta rekalkulasi aritmetika. Ketiga, perbandingan demand-capacity dan sensitivitas konservatif. Keempat, evaluasi risiko dan kelengkapan bukti terhadap standar/pedoman relevan. Nilai yang tidak konsisten tidak dirata-ratakan, melainkan ditempatkan sebagai ketidaksesuaian dan titik henti sampai sumber final tersedia. Keterlacakan sumber data, keluaran analisis, dan keterbatasan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Keterlacakan sumber data, keluaran analisis, dan keterbatasan.

Sumber	Data yang digunakan	Keluaran analisis	Status/keterbatasan
<i>Packing list</i>	<i>Net/gross weight; dimensi; volume</i>	<i>Baseline shipment</i>	Dokumenter; data shipment
<i>Transport drawing</i>	<i>28 axle lines; payload; deadweight; COG; hydraulic grouping</i>	<i>Axle load; utilization; stability transporter</i>	Drawing pelaksanaan; label preliminary dipertahankan
<i>Stability & ballast drawing</i>	<i>Lightship; payload; KG; KMT; GM; ballast</i>	<i>Stability screen; ballast hold point</i>	Model rencana; diaktualkan melalui kontrol lapangan
<i>Deck/ground drawing</i>	<i>3,4; 4,6; 2,7; 5,0 ton/m²</i>	<i>Bearing and load-spreading check</i>	Dokumenter; <i>local check required</i>
<i>Mooring calculation</i>	<i>Current, wind, wave; line geometry</i>	<i>Total force and line tension</i>	Dokumenter; <i>certificate/SWL not attached</i>
<i>Route/risk information</i>	<i>Obstacle; failure mode; contingency</i>	<i>FMEA and route clearance register</i>	Hasil tersaji; register rinci per STA tidak terlampir

Alur analisis mengikuti urutan operasi aktual dari persiapan port, load-out, sea fastening, towage, berthing, roll-off, hingga land transport dan jack-down. Pada setiap perpindahan antarmuka ditempatkan hold point agar perubahan kondisi tidak diteruskan tanpa verifikasi. Alur operasi dari port sampai laydown area berdasarkan presentasi praktik keinsinyuran ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur operasi dari port sampai laydown area berdasarkan presentasi praktik keinsinyuran (Zulfikar, 2026).

Model analisis dan asumsi

Perhitungan dilakukan sebagai screening engineering, bukan desain final. Tanda desimal dalam perhitungan dinormalisasi dan hasil dibulatkan secara wajar. Rating pabrikan, mechanical capacity, axle capacity, average pressure, dan local structural capacity dipisahkan agar tidak diperlakukan sebagai besaran yang setara.

$$\text{Gaya berat: } F = m \times g$$

$$\text{Beban axle rata-rata: } W_{\text{axle}} = W_{\text{gross}} / n_{\text{axle}}$$

$$\text{Utilisasi: } U = \text{Demand} / \text{Capacity} \times 100\%$$

$$\text{Kebutuhan area distribusi minimum: } A_{\text{req}} = R / q_{\text{allow}}$$

$$\text{Ramp grade: } \text{Grade} = \tan(\theta) \times 100\%$$

$$\text{Risk Priority Number: } \text{RPN} = S \times O \times D$$

FMEA menggunakan skala ordinal 1-5 untuk *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) mengikuti IEC 60812 dan literatur FMEA (*International Electrotechnical Commission* [IEC], 2018; Stamatis, 2003). Skor residual merupakan screening penulis setelah kontrol diterapkan, bukan frekuensi statistik dari data insiden. Prinsip pengelolaan risikonya mengacu pada ISO 31000, ISO 45001, dan DNV-RP-N101 (*International Organization for Standardization* [ISO], 2018a, 2018b; DNV, 2021a).

Data proyek dan kargo

Data utama proyek dan kargo disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data utama proyek dan kargo (DB Schenker Indonesia, 2020; Zulfikar, 2026).

Parameter	Nilai
Project	Freight Forwarding Service CA2020-021 Merak Cakra Donya; RFQ 285317-DL01
Customer	PT BP Petrochemicals Indonesia
Dokumen	GPIS-BPPI-2010016; 4 Desember 2020; berlabel IFA dan digunakan sebagai metode kerja pelaksanaan
Kargo utama	Oxidation Reactor BR-106 dengan steel saddle
Gross shipment	456.050 kg (BR-106 455.600 kg + accessory 450 kg)
Dimensi BR-106	18,10 m x 11,20 m x 11,10 m
Rute laut	Ciwandan Port - Lotte BPPI Jetty; 4,2 NM atau sekitar 7,8 km
Metode	Vessel-to-barge lifting; sea fastening; towage; stern-on berthing; roll-off; land transport; jack-down

Berdasarkan gross shipment 456,05 ton, gaya gravitasi adalah $456,05 \times 9,81 = 4.473,85$ kN. Volume geometris utama $18,10 \times 11,20 \times 11,10 = 2.250,192 \text{ m}^3$. Angka gaya merupakan load basis awal, sedangkan load path aktual tetap mengikuti saddle, beam, axle group, matting, deck, ramp, dan jetty.

Rekonsiliasi angka kritis

Rekonsiliasi data berat dan konfigurasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekonsiliasi data berat dan konfigurasi.

Besaran	Packing list	Transport drawing	Stability drawing	Keputusan kajian
Kargo/shipment	456,05 t shipment	455,6 t netto + 16,0 t saddle = 471,6 t	BR-106 471,60 t	456,05 t = shipment; 471,60 t = design payload konservatif
Transporter	-	Requested deadweight 93,8 t; gross 565,4 t	Multiaxle 105,93 t	Perbedaan konteks dicatat; gross design 565,4 t digunakan
Jumlah axle	-	14 posisi memanjang x 2 sisi = 28 axle lines	Konfigurasi side-by-side terlihat pada stowage	Beban per 14 posisi disebut per pair/station, bukan per axle line
Barge	-	-	Lightship 590,54 t; displacement 1.168,07 t	1.168,07 = 590,54 + 105,93 + 471,60
Status	Issued data	IFA/PRELIMINAR Y; komentar review pada lembar	Aktualisasi dilakukan saat pelaksanaan	Implemented GO; GPIS dipakai dan operasi selesai aman

Rekonsiliasi menjawab asal angka 1.168,07 ton dan mencegah penggunaan ganda angka 565,4 ton sebagai payload maupun gross. Angka 1.168,07 ton adalah displacement pada model rencana yang digunakan untuk pengendalian pelaksanaan, bukan cargo weight. Demikian pula 64,9 ton/m² adalah load capacity jetty yang dinyatakan pada method statement. Keberhasilan aktual operasi mendukung kewajaran design basis tersebut, sedangkan gambar struktur, wheel-path, load-spreading, dan local stress check tetap diperlukan apabila analisis hendak direplikasi atau diaudit secara independen.

Peralatan utama dan batas ketersediaan data

Konfigurasi peralatan utama disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konfigurasi peralatan utama (DB Schenker Indonesia, 2020; Goldhofer Aktiengesellschaft, n.d.).

Peralatan	Konfigurasi	Fungsi
Barge	230 ft; drawing ASIAPRIDE 70,15 x 18,30 x 4,27 m	Sea transport; roll-off platform
Goldhofer PST/SL	1 unit x 6 axle lines	Driven/self-propelled module
Goldhofer THP/SL	4 unit x 4 axle lines + 1 unit x 6 axle lines	Towed modular lines; side-by-side grouping
Axle geometry	28 physical axle lines; 14 stations x 2 sisi; spacing tipikal 1.500 mm pada drawing	Load distribution dan swept path
PPU	390 kW/530 PS	Hydraulic power and propulsion
Support	Steel plate, Dura-Base, sandbag/dunnage, elephant leg	Load spreading, ramp, temporary support

Sejumlah bukti rinci, yaitu route survey per STA, measured clearance, ground allowable aktual, wheel-path reaction, sertifikat transporter/PPU, konfigurasi barge aktual, dan as-built jetty, tidak terlampir dalam paket sumber artikel. Ketidaktersediaan lampiran tersebut merupakan keterbatasan keterlacakan akademik dan tidak dapat disamakan dengan ketidaktersediaannya saat operasi. GPIS digunakan sebagai metode kerja, keputusan GO telah

dijalankan, dan pengangkutan selesai aman; untuk audit independen, dokumen rinci tersebut tetap perlu diarsipkan sebagai evidence close-out.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dasar pemilihan metode roll-off dan SPMT/multi-axle

Metode roll-off dipilih untuk menghindari ketergantungan pada satu lifting operation berkapasitas sangat besar di jetty tujuan dan untuk menjaga cargo tetap pada support system yang sama dari barge ke laydown area. Dibanding direct lifting, metode ini memberi kesinambungan load path, kemampuan steering, dan kendali elevasi melalui hydraulic suspension. Namun, keunggulan tersebut hanya berlaku bila stabilitas barge, ramp transition, hydraulic grouping, ground support, dan route clearance dikendalikan secara serempak. Literatur menunjukkan SPMT efektif untuk vessel installation dan load-out, tetapi respons support serta barge tetap harus dianalisis (Baihaque et al., 2018; Stogdill et al., 2022; Yu et al., 2022). Vessel-to-barge lifting pada port asal tidak dievaluasi sebagai lifting plan final karena load chart, rigging certificate, radius, outrigger reaction, dan ground data final tidak tersedia.

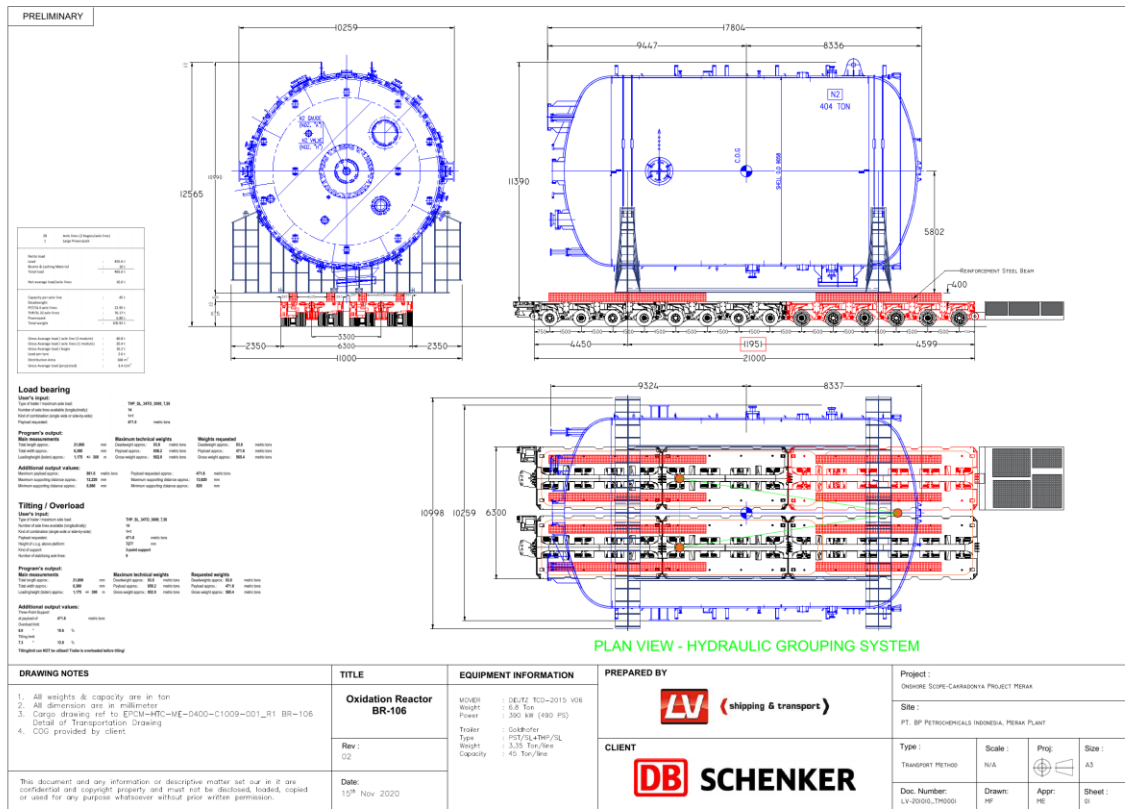
Kapasitas multi-axle/SPMT dan hydraulic grouping

Validasi kapasitas multi-axle/SPMT disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Validasi kapasitas multi-axle/SPMT.

<i>Check</i>	<i>Rumus/basis</i>	<i>Hasil</i>	<i>Interpretasi</i>
<i>Design payload</i>	<i>Transport drawing</i>	471,60 t	Mencakup cargo 455,60 t + saddle 16,00 t
<i>Gross combination</i>	<i>Requested value</i>	565,40 t	Demand mekanis konfigurasi
<i>Average axle load</i>	565,40 / 28	20,19 t/axle line	Nilai fisik per axle line
<i>Average station load</i>	565,40 / 14	40,39 t/pair	Dua axle lines per posisi memanjang
<i>Mechanical utilization</i>	565,40 / 952,0	59,4%	Mengacu mechanical gross capacity
<i>Summed axle rating</i>	28 x 45 t	1.260 t	Rating nominal 45 t/line pada 1 km/jam (Goldhofer, n.d.)
<i>Axle-rating utilization</i>	565,40 / 1.260	44,9%	Bukan pengganti structural/mechanical capacity
<i>Load per tyre</i>	<i>Drawing output</i>	sekitar 2,6 t/tyre	Monitor hydraulic pressure dan leveling
<i>COG/support</i>	<i>Drawing output</i>	7.277 mm; 3-point support	Kontrol tilting, overload, dan cross-level

Konfigurasi transporter, hydraulic grouping, kapasitas, dan stabilitas pada drawing proyek ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi transporter, hydraulic grouping, kapasitas, dan stabilitas pada drawing proyek (DB Schenker Indonesia, 2020).

Perbedaan penting dengan bahan presentasi adalah penyebut. Nilai sekitar 35,83-37,46 ton yang dihitung per 14 posisi memanjang tidak boleh disebut ton per axle line. Pada konfigurasi side-by-side, satu posisi memanjang memuat dua axle lines. Untuk monitoring alat, besaran yang relevan adalah beban per physical axle line, tekanan hydraulic group, perbedaan pressure kiri-kanan, level platform, dan respons support. Sensitivitas demand terhadap faktor dinamis konservatif disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Sensitivitas demand terhadap faktor dinamis konservatif.

Skenario konservatif	Gross demand	Per axle line (28)	Utilisasi 952 t	Utilisasi 1.260 t
Baseline	565,40 t	20,19 t	59,4%	44,9%
DAF 10%	621,94 t	22,21 t	65,3%	49,4%
DAF 15%	650,21 t	23,22 t	68,3%	51,6%

Tabel 6 merupakan sensitivitas screening, bukan dynamic amplification factor yang disetujui proyek. Hasil menunjukkan margin global masih tersedia, tetapi margin global tidak membuktikan tidak adanya overload lokal pada satu hydraulic group, saddle, beam, atau axle. Hal ini konsisten dengan literatur SPMT yang menempatkan support position dan hydraulic grouping sebagai variabel struktural (Baihaque et al., 2018; Federal Highway Administration, 2007; Yu et al., 2022).

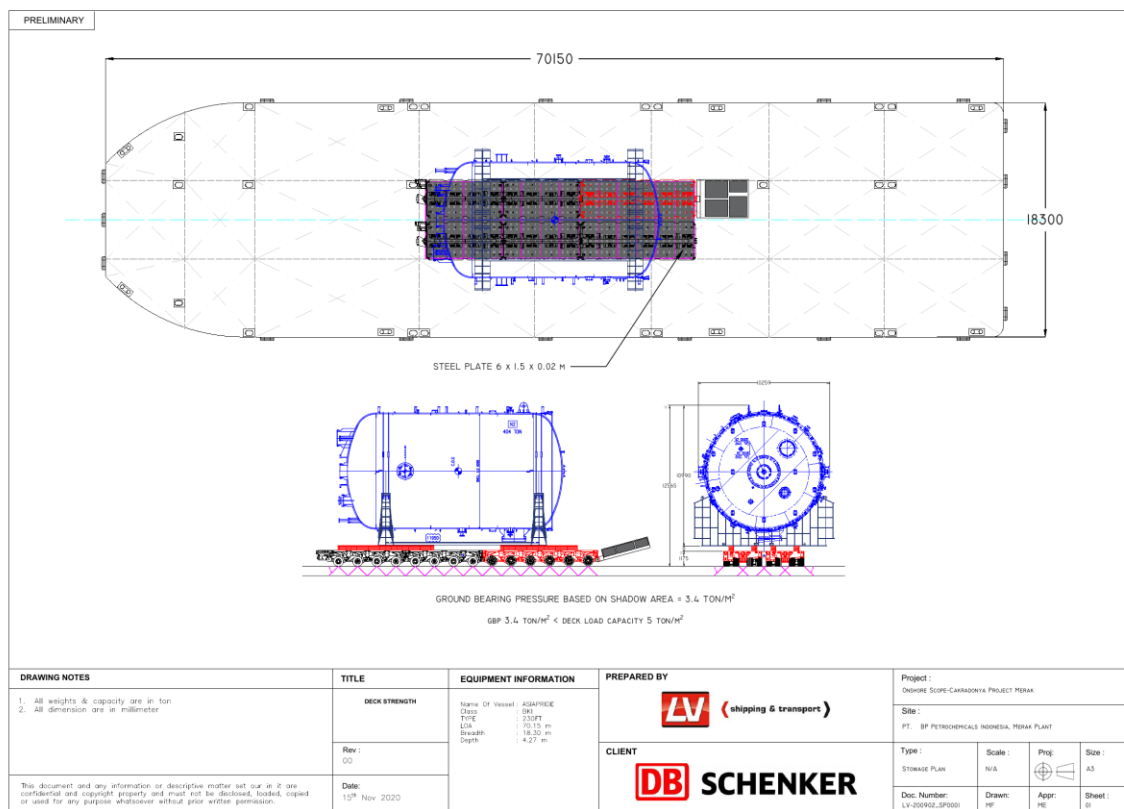
Deck strength, jetty bearing, dan ground support

Bearing pressure, load spreading, dan sensitivitas disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Bearing pressure, load spreading, dan sensitivitas.

Lokasi/check	Demand	Capacity/control	Utilisasi/hasil	Catatan
Barge deck	3,4 t/m ²	5,0 t/m ²	68%; margin 1,6 t/m ²	Average shadow-area pressure
Barge deck +10%	3,74 t/m ²	5,0 t/m ²	74,8%	Sensitivity screening
Barge deck +15%	3,91 t/m ²	5,0 t/m ²	78,2%	Sensitivity screening
Land route before matting	4,6 t/m ²	Local bearing to verify	-	Nominal pressure/tyre 194 kPa
Land route after Dura-Base	2,7 t/m ²	Ground allowable to verify	Pressure turun 41,3%	24 sheets shown on drawing
Jetty statement	Station load 40,39 t/pair	64,9 t/m ²	A_req sekitar 0,62 m ² /station	Local structural and wheel-path check mandatory

Preliminary deck strength check: 3,4 ton/m² dibanding kapasitas deck 5,0 ton/m² ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Preliminary deck strength check: 3,4 ton/m² dibanding kapasitas deck 5,0 ton/m² (DB Schenker Indonesia, 2020).

Average pressure berfungsi sebagai screening dan hasilnya konsisten dengan keberhasilan pelaksanaan, tetapi tidak dapat berdiri sendiri sebagai pembuktian seluruh respons lokal. Audit atau replikasi membutuhkan reaksi wheel path, jarak axle, orientasi terhadap deck framing, ketebalan dan bentang plate, kapasitas ramp, punching/local bending, serta kapasitas aktual jetty. DNV-ST-N001 menempatkan loading and structural strength sebagai bagian dari design basis marine operation (DNV, 2023). Oleh karena itu, pernyataan $3,4 < 5,0$ ton/m² dan 0,62 m²/station harus dibaca bersama kontrol lapangan dan hasil aktual.

Geometri ramp dan kontrol elevasi roll-off

Sensitivitas ramp grade dan keputusan operasi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Sensitivitas ramp grade dan keputusan operasi.

Sudut ramp	Grade	Status relatif terhadap limit 5,9°	Keputusan
3,0°	5,24%	Operasi rencana	Proceed hanya bila elevasi dan ballast stabil
4,0°	6,99%	Mendekati limit	Hold; verifikasi transition/clearance
5,0°	8,75%	Margin kecil	Hold dan re-ballast
5,9°	10,33%	Batas maksimum dokumen	Stop; tidak boleh dilampaui

Ramp menggunakan portable steel ramp, sandbag/dunnage sekitar 1,2 m, steel plate, dan Dura-Base. Selama roll-off, deck barge harus dipertahankan paling rendah 20 mm di bawah dan paling tinggi 200 mm di atas top level sandbag, sehingga window kontrol total adalah 220 mm (DB Schenker Indonesia, 2020). Barge dipertahankan positive trim, SPMT bergerak lambat, dan perintah berasal dari single command. Hold point ditempatkan sebelum ramp, saat front axle memasuki ramp, saat front axle mencapai jetty, ketika sekitar 50% beban telah keluar dari barge, dan setelah seluruh kombinasi clear dari ramp. Sudut 3° dan batas 5,9° merupakan kriteria proyek pada GPIS, bukan batas universal untuk seluruh operasi heavy lift.

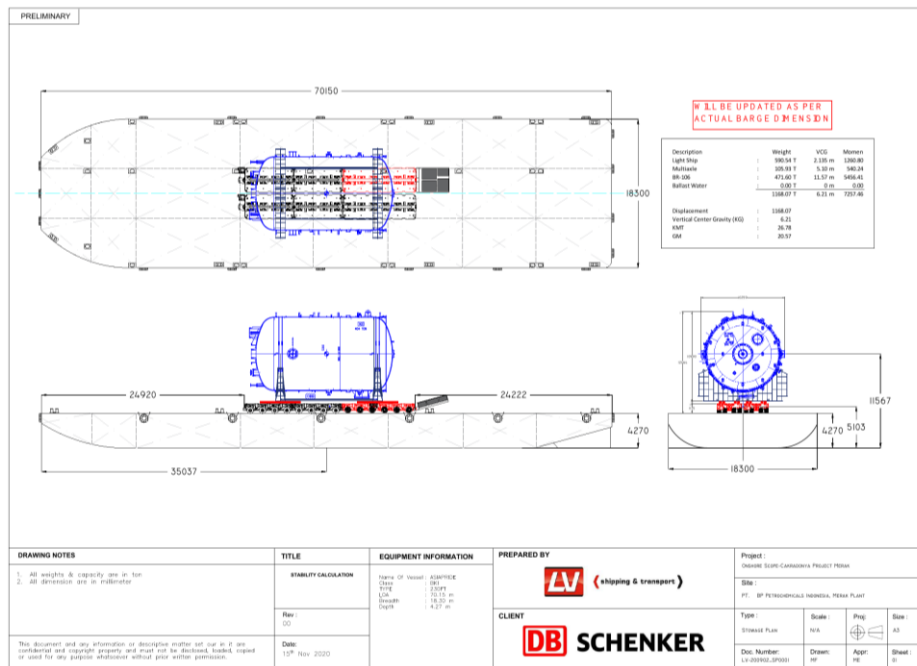
Stabilitas barge dan ballasting

Stability dan ballast screening disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Stability dan ballast screening.

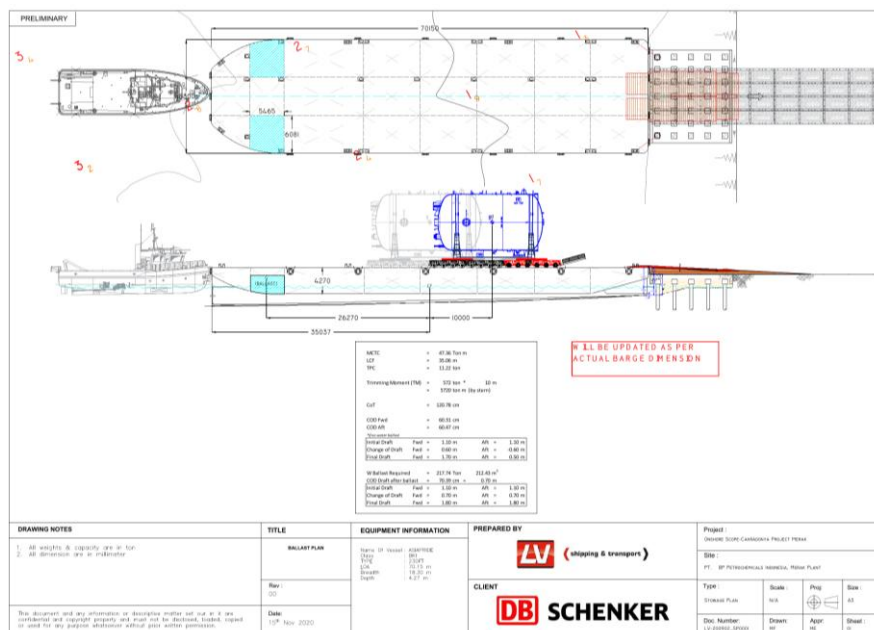
Parameter	Nilai preliminary	Makna/keterbatasan
Lightship	590,54 t	Input stability drawing
Multi-axle	105,93 t	Berbeda dari requested deadweight 93,8 t pada load-bearing sheet
BR-106 design load	471,60 t	Termasuk saddle; bukan shipment 456,05 t
Total displacement	1.168,07 t	590,54 + 105,93 + 471,60
KG	6,21 m	Vertical center of gravity
KMT	26,78 m	Transverse metacentric reference
GM	20,57 m	KMT - KG; positif pada skenario statis
Ballast required	217,74 t atau 212,43 m ³	Model rencana; sounding/pump log aktual tidak terlampir
Final draft pada sheet	Fwd 1,80 m; Aft 1,80 m	Perlu konfirmasi terhadap actual barge dan tide

Preliminary stability calculation dan asal total displacement 1.168,07 ton ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Preliminary stability calculation dan asal total displacement 1.168,07 ton (DB Schenker Indonesia, 2020).

Preliminary ballast plan; aktualisasi dimensi barge dinyatakan masih diperlukan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Preliminary ballast plan; aktualisasi dimensi barge dinyatakan masih diperlukan (DB Schenker Indonesia, 2020).

GM positif menunjukkan margin statis besar pada model, tetapi bukan bukti tunggal keamanan roll-off. Pada saat load transfer, posisi center of gravity sistem berubah, free-surface effect dapat meningkat, draft dan trim berubah, serta mooring dan ramp menambah constraint. Gambar secara eksplisit bertanda PRELIMINARY dan 'will be updated as per actual barge dimension'; pada pelaksanaan, nilai rencana tersebut diterjemahkan melalui kontrol ballast,

sounding, elevasi ramp, draft/trim, dan hold point. Operasi yang selesai aman menunjukkan bahwa kontrol implementasi berfungsi pada kasus ini. Namun, karena stability booklet, tank table, sounding log, pump record, dan acceptance record tidak seluruhnya terlampir dalam sumber artikel, kajian tidak mengklaim verifikasi independen terhadap setiap parameter aktual (DNV, 2021b, 2023).

Mooring, towage, dan weather window

Mooring, towage, dan environmental criteria disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Mooring, towage, dan environmental criteria.

Parameter	Hasil GPIS	Keterangan
<i>Current force</i>	7,79 MT	V_current 1,39 m/s; drag coefficient 1
<i>Wind force</i>	0,21 MT	V_wind 3,06 m/s pada calculation sheet
<i>Wave drift force</i>	2,25 MT	Hs 0,50 m; formulation mengacu DNV-RP-H103
<i>Total environmental force</i>	10,24 MT	Resultan lateral pada x sekitar 35,07 m
<i>Port forward line</i>	19,405 MT	Line tension terbesar
<i>Starboard forward line</i>	18,983 MT	Line tension kedua terbesar
<i>Port aft / Starboard aft</i>	5,908 / 5,104 MT	Tension hasil keseimbangan gaya dan momen
<i>Towage</i>	4,2 NM / 3 knots = 84 menit	Method statement mengalokasikan 1,5-2 jam
<i>Weather start criterion</i>	Beaufort 5 dan menurun; visibility ≥ 100 m; sea state code 3, Hs 0,5-1,25 m	Forecast minimal 24 jam atau 3x durasi operasi

Mooring force dan line-tension calculation pada GPIS ditunjukkan pada Gambar 6.

MOORING FORCES CALCULATION (STERN ON QUAY) LV Logistics Indonesia				
Final Forces and Tensions on Mooring Lines				
Final Environmental Forces				
Current Force	F_c		7.79	MT
Location of Current Force (from Stern)	X_c		35.08	m
Wind Force	F_w		0.21	MT
Location of Wind Force (from Stern)	X_w		35.05	m
Wave Drift Force	F_{wd}		2.25	MT
Location of Wave Force (from Stern)	X_{wd}		35.08	m
Total Force	F_{TOT}		10.24	MT
Location of Total Force (from Stern)	X_{TOT}		35.07	m
Mooring Line Configuration				
	Line SA	Line SF	Line PA	Line PF
Distance of Fastening Point on Quay from Vessel Side (m)	Y_{SA}	Y_{SF}	Y_{PA}	Y_{PF}
	6.86	23.39	5.87	23.11
Distance of Fastening Point on Vessel from Vessel Stern (m)	X_A	X_F	X_A	X_F
	2.09	48.23	2.09	48.23
Distance of Fastening Point on Vessel from Vessel Stern (m)	Z_{SA}	Z_{SF}	Z_{PA}	Z_{PF}
	7.74	7.71	8.23	8.49
Angle of the Mooring line with vessel Longitudinal Axis (degrees)	α_{SA}	α_{SF}	α_{PA}	α_{PF}
	34.91	22.69	29.63	22.17
Calculation of Line Tension				
Port Side				
A. Balance of Forces in Transverse Direction gives:				
$T_{pf} \sin \alpha_{pf} + T_{pa} \sin \alpha_{pa} = F_{TOT}$				
$\Rightarrow T_{pf} \sin 22.17 + T_{pa} \sin 29.63 = 10.24$				
$\Rightarrow T_{pf} \times 0.38 + T_{pa} \times 0.49 = 10.24$ ----- Equation (i)				
B. Balance of Moments about Point B				
$T_{pf} \sin \alpha_{pf} \times (X_f - X_A) = F_{TOT} \times (X_{TOT} - X_A)$				
$\Rightarrow T_{pf} \sin 22.17 \times (48.23 - 2.09) = 10.24 \times (35.07 - 2.09)$				
$\Rightarrow T_{pf} \times 0.38 \times 46.14 = 10.24 \times 32.98$ ----- Equation (ii)				
Solving Equations (i) & (ii)				
$\Rightarrow T_{pf}$ (Tension in Mooring Line Port Fwd) = " 19.405 MT				
$\Rightarrow T_{pa}$ (Tension in Mooring Line Port Aft) = " 5.908 MT				
Stbd Side				
A. Balance of Forces in Transverse Direction gives:				
$T_{sf} \sin \alpha_{sf} + T_{sa} \sin \alpha_{sa} = F_{TOT}$				
$\Rightarrow T_{sf} \sin 22.69 + T_{sa} \sin 34.91 = 10.24$				
$\Rightarrow T_{sf} \times 0.39 + T_{sa} \times 0.57 = 10.24$ ----- Equation (i)				
B. Balance of Moments about Point D				
$T_{sf} \sin \alpha_{sf} \times (X_f - X_A) = F_{TOT} \times (X_{TOT} - X_A)$				
$\Rightarrow T_{sf} \sin 22.69 \times (48.23 - 2.09) = 10.24 \times (35.07 - 2.09)$				
$\Rightarrow T_{sf} \times 0.39 \times 46.14 = 10.24 \times 32.98$ ----- Equation (ii)				
Solving Equations (i) & (ii)				
$\Rightarrow T_{sf}$ (Tension in Mooring Line Stbd Fwd) = " 18.983 MT				
$\Rightarrow T_{sa}$ (Tension in Mooring Line Stbd Aft) = " 5.104 MT				

Gambar 6. *Mooring force dan line-tension calculation* pada GPIS (DB Schenker Indonesia, 2020).

Angka mooring dalam ringkasan PPT yang tidak dapat ditelusuri ke lampiran GPIS tidak digunakan sebagai basis rekalkulasi. Perhitungan GPIS menghasilkan line tension maksimum 19,405 MT dan menjadi bagian dari metode kerja yang benar-benar digunakan. Hasil pengangkutan yang aman mengonfirmasi kecukupan operasional pada kondisi proyek tersebut, tetapi kajian tidak dapat merekonstruksi margin aktual secara independen karena MBL dan *certificate mooring line, bollard SWL, shackle/pad-eye capacity, lead angle, kondisi line, safety factor*, dan *tug-readiness record* tidak seluruhnya terlampir. Kriteria cuaca pada Tabel 10 merupakan operational limitation proyek, bukan standar universal. Prinsip stowage/securing dan kesiapan marine operation mengacu pada CSS Code, SOLAS Chapter VI, serta pedoman klasifikasi dan marine operation (Shipping, 1985) dan (DNV, 2021b, 2023; *International Maritime Organization* [IMO], 1974, 1991).

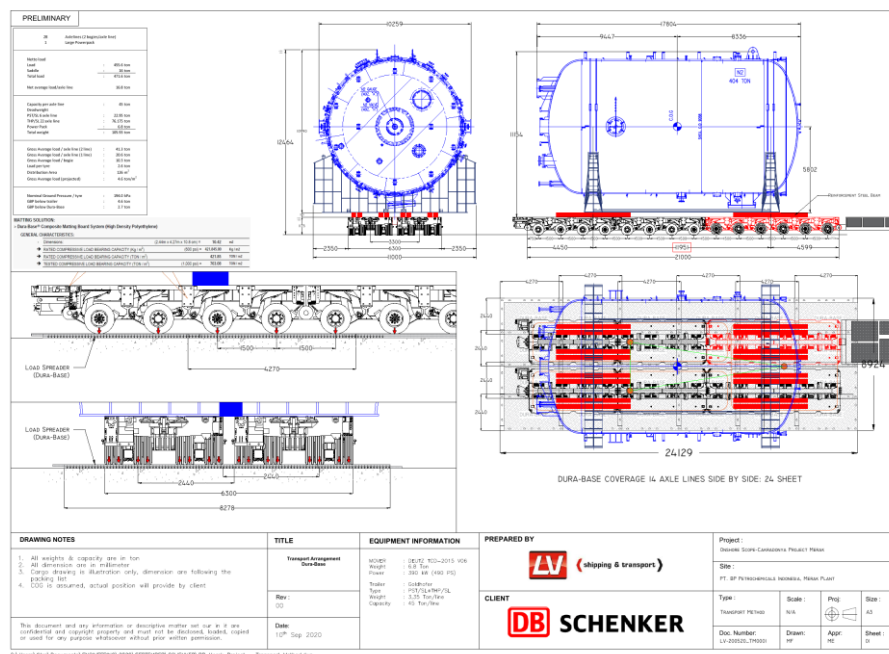
Route obstacle, land transport, securing, dan ground control

Route clearance register minimum disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Route clearance register minimum

Obstacle/kondisi	Risiko	Engineering control	Bukti close-out
Fence/gate	Cargo envelope contact	Dismantle sebelum move; reinstatement plan	Foto before-after; clearance record
Lamp pole/road sign	Side clearance tidak cukup	Temporary removal/relocation	Permit; status register
Tree branches	Top/side clearance	Trimming; observer dan escort	Route walkdown H-1
Drainage/soft area	Settlement atau local failure	Steel plate, Dura-Base, bridging; bearing check	Ground sign-off; settlement marker
Pinch point	Steering envelope tidak cukup	Swept path; 360° steering plan; spotter	Measured clearance; simulation/drawing
Laydown/jack-down	Turning atau support failure	Level survey; temporary stool; exclusion zone	Jack-down checklist

Dura-Base coverage dan perubahan ground bearing pressure pada land transport ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Dura-Base coverage dan perubahan ground bearing pressure pada land transport (DB Schenker Indonesia, 2020).

Route movement dilaksanakan dengan *check-before-move*, *route-clearance control*, *steering coordination*, *escort*, dan *stop-work authority*. SPMT harus dihentikan apabila *settlement abnormal*, *clearance* tidak sesuai, steering tidak sinkron, *hydraulic pressure* menyimpang, atau *communication line* terganggu. Literatur menegaskan bahwa perencanaan muatan *oversize* perlu menggabungkan geometri simpang, swept path, tinggi dan lebar bebas, kapasitas lintasan jembatan, hambatan administratif, serta alternatif rute multimoda (Gnap et al., 2022; Huang & Han, 2021; Juściński, 2023; Luo et al., 2021; Petru & Krivda, 2021; Wolnowska & Konicki, 2019). Manual SPMT juga menempatkan ground pressure dan tinggi center of gravity sebagai pembatas kapasitas axle maksimum (Federal Highway Administration, 2007). Prinsip perhitungan securing force mengacu pada EN 12195-1 (European Committee for Standardization, 2010). Lashing layout, pretension, coefficient of

friction, LC/STF, serta sertifikat chain dan tensioner tidak seluruhnya terlampir dalam paket artikel; hal ini membatasi audit detail, tetapi tidak meniadakan fakta bahwa land transport dan jack-down selesai aman.

Risk assessment berbasis FMEA

FMEA semi-kuantitatif sebelum dan setelah kontrol disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. FMEA semi-kuantitatif sebelum dan setelah kontrol.

<i>Failure mode</i>	S-O-D awal	RPN awal	Kontrol utama	S-O-D residual	RPN residual
<i>Elevasi roll-off di luar window</i>	5-3-3	45	<i>Ballast plan; level monitoring; stop-hold-check</i>	5-1-2	10
<i>Obstacle route belum clear</i>	4-4-3	48	<i>Route register; walkdown H-1; escort</i>	4-1-2	8
<i>Ground/deck local failure</i>	5-3-3	45	<i>Plate/matting; local bearing; settlement check</i>	5-2-2	20
<i>Hydraulic/PPU failure</i>	4-3-3	36	<i>Function test; spare; technician; set-down plan</i>	4-1-2	8
<i>Mooring line failure</i>	5-2-3	30	<i>Line inspection; bollard/SWL check; tug standby</i>	5-1-2	10

Skor residual terbesar adalah 20 pada ground/deck local failure karena severity tetap tinggi dan ketidakpastian lokal tidak dapat dihapus hanya dengan average-pressure check. FMEA digunakan untuk prioritas kontrol, bukan untuk mengubah risiko heavy lift menjadi angka pasti. Penilaian risiko muatan berat perlu menghubungkan probabilitas, konsekuensi, dampak terhadap infrastruktur, dan keputusan rute (Palšaitis & Petraška, 2012). Pada operasi berkonsekuensi tinggi, kualitas data, deteksi dini, stop-work authority, dan contingency response tetap dominan (DNV, 2021a; IEC, 2018; Kargar et al., 2022; Stamatis, 2003).

Acceptance gate dan stop-hold-check

Acceptance gate untuk keputusan go/no-go disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. *Acceptance gate* untuk keputusan go/no-go.

Gate	Bukti wajib	Acceptance criterion	PIC/keputusan
G0 - Design freeze	Approved cargo weight/COG; final barge; final transporter configuration	Tidak ada mismatch terbuka	Transport Engineer / PM
G1 - Marine readiness	Stability, deck, ballast, mooring, towage, seafastening; certificates	Calculation approved; MBL/SWL adequate	Marine Coordinator / MWS/Client
G2 - Jetty/ramp readiness	Jetty capacity; ramp/plate/matting; tide and elevation survey	3° target; <5,9°; -20 sampai +200 mm	Barge Supervisor / Civil
G3 - SPMT readiness	Function test; hydraulic group; pressure; steering; PPU; spare	Zero fault; level/trim within plan	SPMT Supervisor
G4 - Route readiness	Obstacle register; swept path; ground support; escort; laydown	Semua close-out terdokumentasi	Transport Coordinator / HSE
G5 - Weather and command	Forecast; visibility; wave; radio; toolbox; emergency signal	Weather within criteria; single command active	PM / HSE / Marine
G6 - Dynamic hold points	Pressure, level, trim, mooring, ramp, settlement log	Tidak ada trend abnormal	Field PIC; stop/continue

Nilai tambah kajian adalah menjadikan hold point sebagai evidence gate, bukan hanya urutan pekerjaan. Setiap gate memiliki data yang harus ditutup, acceptance criterion, dan pemegang keputusan. Dengan struktur ini, pengalaman lapangan tetap digunakan, tetapi keputusan dapat ditelusuri dan dipertanggungjawabkan.

Integrasi Body of Knowledge IISE

Penerapan empat knowledge area IISE disajikan pada Tabel 14.

Tabel 14. Penerapan empat knowledge area IISE (IISE, 2021).

BoK IISE	Penerapan pada BR-106	Output kajian
#7 Operations Engineering & Management	Sequence, kapasitas alat, schedule, hold point, go/no-go	Operational control sheet
#8 Supply Chain Management	Aliran port-barge-jetty-site dan koordinasi antarpihak	Interface and handover map
#10 Safety	HIRA/JSA, FMEA, securing, roll-off safety, emergency response	Risk register dan contingency
#14 Systems Design & Engineering	Integrasi cargo, barge, ramp, SPMT, route, manusia, informasi, cuaca	Traceability dan acceptance gate

Empat BoK digunakan karena kasus BR-106 bukan hanya aktivitas transportasi, melainkan sistem yang mengintegrasikan manusia, material, equipment, information, energy, dan environment. Pendekatan ini sesuai definisi Industrial and Systems Engineering sebagai desain, perbaikan, dan instalasi sistem terintegrasi (Institute of Industrial and Systems Engineers [IISE], 2021).

Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Posisi penelitian dan kontribusi disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Posisi penelitian dan kontribusi.

Sumber	Fokus	Relevansi	Perbedaan/kontribusi kajian ini
Turbaningsih (2022)	Project logistics, moda, port, dan risiko	Kerangka end-to-end kargo proyek	Menurunkan kerangka umum menjadi evidence gate pada satu heavy-lift case
Turbaningsih et al. (2022)	Optimasi multimoda project logistics	Integrasi transport darat dan laut	Berfokus pada validasi rekayasa, bukan optimasi biaya-waktu
Luo et al. (2021)	Perencanaan multi-route muatan oversize	Alternatif moda dan rekonstruksi rute	Menambahkan acceptance criterion per antarmuka
Petru & Krivda (2021)	Geometri jaringan jalan untuk oversize cargo	Clearance dan swept path	Mengintegrasikan route register dengan SPMT, matting, dan stop-work
Gnap et al. (2022)	Kelayakan lintasan jembatan	Kapasitas infrastruktur lokal	Memisahkan average pressure dari local wheel-path check
Baihaque et al. (2018)	SPMT load-out; 3-point vs 4-point support; barge response	Hydraulic grouping dan load transfer	Menyatukan grouping dengan ballast, ramp, mooring, route, dan acceptance gate
Yu et al. (2022)	Optimasi posisi support SPMT dan safety factor	Distribusi reaksi dan stabilitas	Merekonsiliasi konfigurasi 14 x 2 dan membedakan pair vs axle line
Stogdill et al. (2022)	SPMT untuk vessel installation	Efisiensi dan alternatif crane	Fokus multimoda port-barge-jetty-site

DB Schenker (2020)	Metode kerja dan lampiran kalkulasi pelaksanaan	Sumber proyek utama yang digunakan saat eksekusi	Menghubungkan prosedur, kalkulasi, FMEA, evidence gate, dan hasil aktual
--------------------	---	--	--

Status dokumen, hasil aktual, dan keterbatasan kajian

Kajian menggunakan GPIS-BPPI-2010016 yang pada lembar dokumennya berstatus IFA. Beberapa gambar bertanda PRELIMINARY, stability/ballast drawing memuat catatan pembaruan berdasarkan dimensi barge aktual, dan komentar review tetap terlihat pada salinan yang tersedia. Label tersebut harus dilaporkan secara transparan, tetapi tidak tepat ditafsirkan bahwa dokumen tidak digunakan. Berdasarkan konfirmasi penulis utama sebagai praktisi proyek dan alur pelaksanaan yang terdokumentasi dalam presentasi praktik keinsinyuran, paket GPIS yang sama menjadi metode kerja terkendali selama vessel-to-barge lifting, sea fastening, towage, berthing, roll-off, land transport, dan jack-down. Seluruh rangkaian pekerjaan selesai dan BR-106 tiba dengan aman di lokasi tujuan.

Bukti formal yang tidak seluruhnya terlampir dalam paket sumber artikel meliputi approval/close-out sheet, actual weight/COG record, route survey per STA, measured clearance, tank sounding, pump test, transporter certificate, mooring certificate, bollard SWL, jetty structural calculation, local wheel-path check, lashing calculation/certificate, weather log, dan post-job record. Kekurangan lampiran tersebut membatasi audit independen, kuantifikasi margin aktual, dan replikasi kajian, tetapi bukan bukti bahwa kontrol tidak dilaksanakan. Untuk mengurangi bias karena penulis utama merupakan praktisi proyek, nilai teknis direkalkulasi, konteks setiap angka direkonsiliasi, dan hasil dibandingkan dengan standar serta literatur eksternal. Nilai FMEA, DAF 10-15%, dan area distribusi tetap diperlakukan sebagai screening analitis, sedangkan keberhasilan transportasi diperlakukan sebagai hasil empiris kasus.

KESIMPULAN

Secara ilmiah, kajian ini menunjukkan bahwa kelayakan heavy lift multimoda tidak dapat ditentukan dari satu angka kapasitas. Kontribusi utamanya adalah rekonsiliasi penyebut 14 pair/station menjadi 28 physical axle lines dan integrasi traceability-stop-hold-check sebagai model keputusan yang menghubungkan perhitungan, ketidakpastian data, risiko residual, dan bukti penerimaan. Judul dan lingkup terbaru menempatkan BR-106 sebagai integrasi barge sea transport, roll-off operation, dan land transport menggunakan SPMT/multi-axle trailer. Gross shipment adalah 456,05 ton, sedangkan design payload drawing adalah 471,60 ton. Gross combination 565,40 ton menghasilkan 20,19 ton per 28 physical axle lines, bukan 35-37 ton per axle line. Utilisasi global adalah 59,4% terhadap mechanical gross capacity 952 ton dan 44,9% terhadap summed axle rating 1.260 ton. Margin global tidak menggantikan pemeriksaan hydraulic group, saddle, beam, wheel path, dan ground lokal. Deck pressure 3,4 ton/m² berada di bawah kapasitas rata-rata 5,0 ton/m²; ramp 3° berada di bawah limit 5,9°; dan model stability memberi GM 20,57 m. Margin hasil rekalkulasi konsisten dengan keberhasilan aktual operasi, tetapi local check tetap diperlukan untuk replikasi proyek lain. Gaya lingkungan mooring pada GPIS adalah 10,24 MT dengan line tension maksimum 19,405 MT. Angka lain pada PPT yang tidak terlacak tidak digunakan sebagai basis keputusan. Risiko prioritas adalah elevasi roll-off, obstacle route, ground/deck local failure, hydraulic/PPU failure, dan mooring failure.

Acceptance gate dan stop-hold-check mengubah risiko tersebut menjadi kontrol yang dapat diaudit. Kesimpulan akhir adalah implemented GO dan layak secara teknis untuk kondisi kasus yang diteliti. Walaupun GPIS serta beberapa lampirannya memuat label IFA/PRELIMINARY, dokumen tersebut merupakan working method yang digunakan saat eksekusi; operasi sea transport, roll-off, land transport, dan jack-down telah selesai, serta kargo tiba aman di lokasi tujuan. Keterbatasan yang tersisa berkaitan dengan kelengkapan arsip untuk audit independen dan generalisasi, bukan kegagalan pelaksanaan.

REFERENSI

- Shipping, A. B. of. (1985). *Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units, 1985*. American Bureau of Shipping.
- Baihaque, M. R., Koto, J., Nofrizal, & Ridho, B. N. (2018). Loading of offshore structure on barge using SPMT. *Journal of Subsea and Offshore Science and Engineering*, 15(1), 6–12.
- DB Schenker Indonesia/PT Schenker Petrolog Utama. (2020). GPIS-BPPI-2010016 method statement for barge transport, roll off & land transport of Oxidation Reactor BR-106 (Issued for Approval; used as controlled working method during project execution) [Project method statement]. PT BP Petrochemicals Indonesia.
- DNV. (2021a). DNV-RP-N101: Risk management in marine and subsea operations (Edition 2019-09, amended 2021-09).
- DNV. (2021b). DNV-RP-N103: Modelling and analysis of marine operations (Edition 2017-07, amended 2021-09).
- DNV. (2023). DNV-ST-N001: Marine operations and marine warranty (Edition 2023-12).
- European Committee for Standardization. (2010). EN 12195-1:2010 load restraining on road vehicles—Safety—Part 1: Calculation of securing forces. <https://knowledge.bsigroup.com/products/load-restraining-on-road-vehicles-safety-calculation-of-securing-forces>
- Federal Highway Administration. (2007). Manual on use of self-propelled modular transporters to remove and replace bridges (FHWA-HIF-07-022). U.S. Department of Transportation.
- Gnap, J., Jagelčák, J., Marienka, P., Frančák, M., & Vojteková, M. (2022). Global assessment of bridge passage in relation to oversized and excessive transport: Case study intended for Slovakia. *Applied Sciences*, 12(4), 1931. <https://doi.org/10.3390/app12041931>
- Goldhofer Aktiengesellschaft. (n.d.). THP/SL family: Heavy-duty modules—Technical features. https://www.goldhofer.com/fileadmin/downloads/BRO_TT/EN/BRO_THP-SL-Family_EN.pdf
- Huang, D., & Han, M. (2021). An optimization route selection method of urban oversize cargo transportation. *Applied Sciences*, 11(5), 2213. <https://doi.org/10.3390/app11052213>
- Institute of Industrial and Systems Engineers. (2021). Industrial and systems engineering body of knowledge.
- International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60812:2018 failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).
- International Maritime Organization. (1974). International Convention for the Safety of Life at Sea, Chapter VI—Carriage of cargoes (as amended).
- International Maritime Organization. (1991). Code of safe practice for cargo stowage and securing (Resolution A.714(17), as amended).
- International Organization for Standardization. (2018a). ISO 31000:2018 risk management—Guidelines.
- International Organization for Standardization. (2018b). ISO 45001:2018 occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use.

- Juściński, S. (2023). Comprehensive analysis of oversized cargo transportation market in Poland (2001–2022): Trends, regulations, and industry dynamics. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 8(2), 136–152. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2023.8-2.10>
- Kargar, V., Jahangiri, M., Alimohammadlu, M., Kamalinia, M., & Mirazahossieninejad, M. (2022). Risk assessment of mobile crane overturning in asymmetric tandem lifting operation based on fuzzy fault tree analysis. *Results in Engineering*, 16, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100755>
- Luo, Y., Zhang, Y., Huang, J., & Yang, H. (2021). Multi-route planning of multimodal transportation for oversize and heavyweight cargo based on reconstruction. *Computers & Operations Research*, 128, 105172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105172>
- Palšaitis, R., & Petraška, A. (2012). Heavyweight and oversized cargo transportation risk management. *Transport and Telecommunication*, 13(1), 51–56. <https://doi.org/10.2478/v10244-012-0005-9>
- Petru, J., & Krivda, V. (2021). The transport of oversized cargoes from the perspective of sustainable transport infrastructure in cities. *Sustainability*, 13(10), 5524. <https://doi.org/10.3390/su13105524>
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Stogdill, M. A., Al-Dossary, M. K., & Al-Khalifah, N. H. (2022). Deployment of self-propelled modular transporter for vessel installation. *Open Journal of Civil Engineering*, 12, 554–558. <https://doi.org/10.4236/ojce.2022.124030>
- Turbaningsih, O. (2022). The study of project cargo logistics operation: A general overview. *Journal of Shipping and Trade*, 7, Article 24. <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00125-6>
- Turbaningsih, O., Buana, I. G. N. S., Nur, H. I., & Pertiwi, A. (2022). The multimodal transport analysis for project logistics: Export of Indonesia's train manufacturer. *Cogent Social Sciences*, 8(1), 2095081. <https://doi.org/10.1080/23311886.2022.2095081>
- Wolnowska, A. E., & Konicki, W. (2019). Multi-criterial analysis of oversize cargo transport through the city, using the AHP method. *Transportation Research Procedia*, 39, 614–623. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.063>
- Yu, X., Wang, H., & Jing, H. (2022). Support position optimization with safety factor in the demolition and rebuilding of a bridge using the SPMT method: A case study. *Advances in Structural Engineering*, 25(8), 1701–1713. <https://doi.org/10.1177/13694332211053692>
- Zulfikar, I. (2026). Analisis barge sea transport, roll-off operation, dan land transport menggunakan SPMT/multi-axle trailer [Presentasi praktik keinsinyuran]. Institut Teknologi Indonesia.