

Analisis Metode Rekayasa Relokasi Gas Engine Compressor Set Menggunakan Multi-Axle Trailer, Jacking-Skidding, dan Mobile Crane di area Operasi Migas

Irhas Zulfikar*^{1,2}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi Indonesia, Jl. Raya Puspipstek, Setu, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

²PT GAP Logistics, Jl. R.E. Martadinata No. 100 Blok C10, Tanjung Priok, Jakarta Utara 14310, Indonesia

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 6 May 2026 Accepted 8 July 2026 <i>Keywords:</i> Heavy transport, multi-axle trailer, tractive effort, cargo securing, jacking-skidding	<i>Relocation of two 60 t gas compressor sets in an operating oil-and-gas facility requires integrated validation of transport, cargo securing, lifting, jacking-skidding, and risk controls. This descriptive-quantitative case study triangulated Method Statement Rev.2, transport and lifting plans, manufacturer data, standards, and safety literature. The gross combination mass was 112.8 t. At a 30% grade and 3% rolling resistance, the combination required 349.8 kN tractive force and approximately 489 HP at 3 km/h, so one 400 HP prime mover was inadequate without assistance. Sixteen D13 lashing legs provided 813.7 kN horizontal capacity against 588.6 kN demand, subject to verified lashing and anchor capacities. Maximum mobile-crane utilization was 42.2%, while four 50 t jacks provided a nominal capacity factor of 3.33. The resulting framework separates verified data, design assumptions, and field hold points to support conditional-go decisions.</i>

Info Artikel	Abstrak
<i>Histori Artikel:</i> Diserahkan: 6 Mei 2026 Diterima: 8 Juli 2026 <i>Kata Kunci:</i> Transportasi muatan berat, trailer multi-axle, gaya traksi, pengamanan muatan, jacking-skidding	Relokasi dua gas compressor set bermassa 60 ton di fasilitas migas aktif memerlukan validasi terpadu atas transportasi, pengamanan muatan, lifting, jacking-skidding, dan pengendalian risiko. Studi kasus deskriptif-kuantitatif ini mentriangulasi Method Statement Rev.2, transport plan, lifting plan, data pabrikan, standar, dan literatur keselamatan. Gross combination mass sebesar 112,8 ton. Pada kemiringan 30% dan rolling resistance 3%, rangkaian memerlukan gaya traksi 349,8 kN dan sekitar 489 HP pada 3 km/jam; satu prime mover 400 HP tidak memadai tanpa unit bantu. Enam belas lashing leg D13 menyediakan kapasitas horizontal 813,7 kN terhadap demand 588,6 kN, dengan syarat kapasitas lashing dan anchor terverifikasi. Utilisasi maksimum mobile crane sebesar 42,2%, sedangkan empat jack 50 ton memberikan faktor kapasitas nominal 3,33. Kerangka hasil penelitian memisahkan data terverifikasi, asumsi desain, dan hold point lapangan untuk mendukung keputusan conditional go.

1. PENDAHULUAN

Relokasi gas compressor set di fasilitas migas aktif merupakan operasi *brownfield* yang mempertemukan risiko mekanis, keterbatasan ruang, integritas fasilitas, dan kebutuhan menjaga kontinuitas operasi. Pemilihan multi-axle trailer dapat menyebarkan beban ke beberapa axle line, tetapi kecukupannya tetap ditentukan oleh posisi tumpuan, distribusi beban, kemampuan jalan, dan stabilitas terhadap guling. Penelitian mengenai SPMT

*Corresponding author. Irhas Zulfikar
Email address: irhaszulfikar08@gmail.com

menunjukkan bahwa posisi tumpuan mengubah distribusi tegangan dan tahanan guling struktur yang dipindahkan, sedangkan studi instalasi vessel pada fasilitas aktif menunjukkan bahwa transporter modular dapat mengurangi ketergantungan pada crane besar dan waktu beban tergantung. Temuan tersebut didukung oleh Yu *et al.* (2022) dan Stogdill *et al.* (2022).

Aspek lifting juga tidak dapat diperlakukan hanya sebagai perbandingan berat muatan terhadap kapasitas nominal crane. Kajian sistematis atas 74 publikasi mengidentifikasi puluhan faktor risiko crane, termasuk informasi beban, kondisi tanah, organisasi kerja, kompetensi, komunikasi, dan cuaca (Sadeghi *et al.*, 2021). Analisis risiko overturning menegaskan bahwa kegagalan data beban/peralatan, kondisi tanah, dan instruksi kerja merupakan kontributor penting (Kargar *et al.*, 2022). Untuk transportasi jalan, EN 12195-1 menetapkan prinsip perhitungan gaya pengamanan muatan, sedangkan EN 12195-3 mengatur lashing chain (European Committee for Standardization, 2010, 2001).

Penelitian terdahulu umumnya membahas salah satu subsistem secara terpisah: distribusi beban transporter, cargo securing, atau keselamatan crane. Masih terbatas studi kasus keinsinyuran yang mengintegrasikan kebutuhan daya dan traksi, distribusi axle, lashing, lifting, jacking-skidding, serta pengendalian HSE untuk satu keputusan relokasi equipment pada fasilitas migas aktif. Kesenjangan tersebut penting karena kegagalan satu subsistem dapat membatalkan kecukupan subsistem lainnya.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) memvalidasi konsistensi data transport dan distribusi beban; (2) menguji kecukupan prime mover pada variasi grade; (3) mengevaluasi lashing terhadap EN 12195-1; (4) mengevaluasi utilisasi crane dan sistem jacking-skidding; dan (5) merumuskan acceptance criteria serta hold point lapangan. Kebaruan praktis penelitian adalah kerangka gerbang keputusan terintegrasi yang membedakan data sumber, asumsi konservatif, dan data primer yang masih wajib diverifikasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Multi-Axle Heavy Transport dan Distribusi Beban

Trailer modular menggunakan suspensi hidraulik dan axle line berulang untuk mendistribusikan reaksi vertikal. Goldhofer THP/SL memiliki lebar dasar 3.000 mm, axle spacing 1.500 atau 1.800 mm, axle compensation 600 mm, serta rating hingga 45 ton per axle line pada 1 km/jam. Rating pabrikan tidak otomatis menjadi allowable axle load rute; batas operasi adalah nilai terendah antara kapasitas trailer, ban, koneksi, jalan, jembatan, dan izin yang berlaku. Spesifikasi pabrikan tersebut mengacu pada Goldhofer Aktiengesellschaft (2026); kepatuhan pengangkutan jalan dievaluasi terhadap Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (2019, 2021).

2.2 Tractive Effort dan Batas Adhesi

Gaya gerak pada tanjakan terdiri atas grade resistance dan rolling resistance. Daya mesin harus diterjemahkan menjadi daya roda melalui efisiensi drivetrain, sedangkan gaya tarik aktual dibatasi adhesi ban-jalan dan beban pada driven axle. Oleh karena itu, kecukupan horsepower tidak membuktikan kecukupan traksi. Pendekatan gaya gerak dan dinamika kendaraan mengacu pada Gillespie (1992) dan Wong (2008).

2.3 Cargo Securing

EN 12195-1 menggunakan koefisien percepatan untuk kondisi lalu lintas normal dan memperhitungkan arah gaya, gesekan, geometri lashing, serta kapasitas pengamanan. Untuk transport jalan digunakan acuan 0,8 g ke depan dan 0,5 g ke lateral/belakang. Kapasitas harus dinyatakan sebagai lashing capacity (LC) dari sertifikat, bukan semata diameter atau

istilah kekuatan putus. Anchor point dan setiap komponen load path juga harus memiliki kapasitas yang memadai. Parameter tersebut mengacu pada European Committee for Standardization (2010, 2001) serta pedoman European Commission (2014) dan International Road Transport Union (2014).

2.4 Jacking-Skidding, Lifting, dan Risk Control

Jacking-skidding memindahkan beban melalui siklus angkat bertahap, cribbing, rail, stopper, dan gaya dorong. ASME B30.1 mencakup konstruksi, operasi, inspeksi, pengujian, dan pemeliharaan hydraulic jack serta industrial roller. Lifting mobile crane harus menggunakan load chart pada radius, boom, dan konfigurasi outrigger aktual. ISO 31000 dan ISO 45001 menyediakan kerangka identifikasi, analisis, perlakuan, komunikasi, dan monitoring risiko. Persyaratan jacking dan mobile crane masing-masing merujuk pada American Society of Mechanical Engineers (2026) dan American Society of Mechanical Engineers (2025), sedangkan kerangka risiko dan K3 mengacu pada International Organization for Standardization (2018a, 2018b).

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian dan Sumber Data

Penelitian menggunakan studi kasus deskriptif-kuantitatif pada relokasi dua compressor set DR1 dan DR4. Unit analisis adalah satu rangkaian transport compressor beserta aktivitas lifting accessories dan jacking-skidding. Data bersifat sekunder dan diperoleh dari Method Statement Rev.2, transport plan, lashing calculation, lifting plan, serta spesifikasi pabrikan. Tidak dilakukan observasi lapangan atau wawancara dalam penelitian ini; kondisi rute, model prime mover, sertifikat lashing/anchor, dan data tanah yang tidak tersedia diperlakukan sebagai hold point, bukan diasumsikan sebagai fakta. Sumber proyek utama adalah PT Global Antar Persada (2025).

3.2 Variabel, Persamaan, dan Kriteria Validasi

Tabel 1.

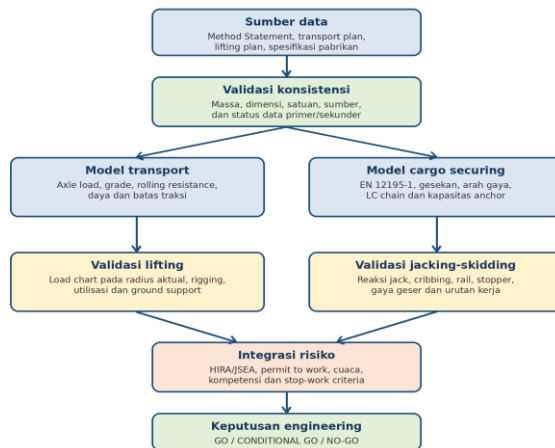
Variabel dan model analisis

Submodel	Persamaan utama	Kriteria
Kemiringan	$\theta = \arctan(i/100)$	Grade (%) dikonversi ke sudut secara konsisten
Gaya gerak	$F = m g [\sin(\theta) + C_{rr} \cos(\theta)]$	Demand dibandingkan dengan daya dan traksi
Daya mesin	$P_{engine} = F v / \eta$	$P_{engine} \leq \text{rated power}$ dengan margin operasi
Batas traksi	$F_{adh} \leq \mu W_{driven}$	Tidak melampaui adhesi driven axle
Axle line	$q = \text{reaksi grup} / \text{jumlah axle line}$	Di bawah rating equipment dan allowable route
Lashing	$F_{res} = (c - \mu) W$; $N = \text{ceil}(F_{res} / LC \cos \alpha)$	LC, sudut, anchor, dan arah terverifikasi
Crane	$\text{Utilisasi} = \text{gross lifted load} / \text{chart capacity}$	Di bawah batas proyek pada radius aktual
Jacking	$\text{Utilisasi} = \text{design reaction} / \text{jack capacity}$	Support stabil dan load path terkendali

Efisiensi drivetrain ditetapkan 0,80 sebagai asumsi analitis dan diuji secara transparan. Rolling resistance 3% dan skenario grade 30% berasal dari dokumen proyek, bukan hasil pengukuran route survey yang tersedia dalam lampiran penelitian. Karena itu, grade diuji pada rentang 10-30% dan keputusan akhir mensyaratkan survey station-by-station.

3.3 Alur Analisis

Analisis dimulai dengan validasi sumber dan konsistensi satuan. Data yang lolos pemeriksaan kemudian digunakan pada empat submodel: transport, cargo securing, lifting, dan jacking-skidding. Hasilnya diintegrasikan dengan kontrol risiko untuk menghasilkan keputusan go, conditional go, atau no-go sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1.
Kerangka validasi terintegrasi penelitian

3.4 Batasan Penelitian

Penelitian merupakan design review atas dokumen yang tersedia, bukan sertifikasi kesiapan operasi. Tidak tersedia profil elevasi rute per STA, make/model dan kurva torsi prime mover, load test lashing, kapasitas anchor point, bearing capacity tanah, serta ukuran cribbing/rail untuk verifikasi tegangan kontak. Kekurangan tersebut tidak diisi dengan data rekaan; setiap item dijadikan acceptance gate sebelum pekerjaan.

4. DATA TEKNIS STUDI KASUS

Tabel 2.
Data teknis transport yang telah divalidasi

Kelompok	Parameter	Nilai
argo	Gas compressor set	60,0 ton; 7,3 x 4,0 x 2,5 m
Trailer	Goldhofer THP/SL, 6 axle line	9.000 x 3.000 mm; spacing 1.500 mm
Deck	Loaded height	1.175 +/- 300 mm
Trailer dry	6 axle x 3,45 ton	20,7 ton
Accessories	Powerpack + turntable	0,5 + 3,6 = 4,1 ton
Gross trailer-cargo	Cargo + trailer + accessories	84,8 ton
Axle line load	Maksimum grup G1	14,4 ton/axle line
Overall transport	Panjang x lebar x tinggi	20,148 x 4,000 x 3,675 m (nominal)
Prime mover	Generic project input	400 HP; 8 ton + 20 ton ballast
Gross combination	Trailer-cargo + prime mover/ballast	112,8 ton
Kecepatan	Design speed	3 - 15 km/jam
Route input	Grade / rolling resistance	30% / 3% sebagai skenario desain

mengurangi durasi beban tergantung, tetapi memindahkan risiko ke kestabilan cribbing, sinkronisasi angkat, alignment rail, dan kapasitas stopper.

Tabel 4.

Perbandingan metode direct lifting dan jacking-skidding

Kriteria	Direct lifting	Jacking-skidding	Keputusan
Kapasitas	60 ton + rigging > crane 55 ton	4 x 50 ton jack; 2 x 100 ton push jack	Jacking-skidding
Ruang	Memerlukan radius, swing area, dan matting besar	Bekerja dekat pondasi pada rail	Jacking-skidding
Risiko dominan	Overturning, suspended load, ground failure	Cribbing collapse, jack eccentricity, pinch point	Kontrol spesifik wajib
Data yang tersedia	Tidak ada load chart untuk lift compressor	Ada layout, spesifikasi jack, dan urutan kerja	Jacking-skidding lebih dapat diverifikasi

5.2 Distribusi Beban Trailer

Transport plan membagi 60 ton cargo ke tiga hydraulic group masing-masing 20 ton. Setelah trailer, powerpack, dan turntable ditambahkan, gross trailer-cargo adalah 84,8 ton, bukan 80,7 ton. Reaksi maksimum 14,4 ton per axle line hanya 32% dari rating pabrikan 45 ton pada 1 km/jam. Perbandingan ini menunjukkan kapasitas equipment yang memadai, tetapi tidak membuktikan daya dukung jalan atau jembatan. Persetujuan rute dan batas muatan tetap mengikuti regulasi Indonesia.

5.3 Tractive Effort dan Sensitivitas Grade

Lembar sumber menuliskan cargo 60 kg, total 20.760 kg, grade 30% setara 13 derajat, dan kebutuhan 352 HP. Keempat angka tersebut tidak konsisten. Koreksi menggunakan gross combination mass 112,8 ton, 30% = 16,70 derajat, rolling resistance 3%, kecepatan 3 km/jam, dan efisiensi drivetrain 0,80. Hasil sensitivitas disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5.

Sensitivitas kebutuhan tractive effort pada gross combination 112,8 ton

Grade	Sudut (deg)	Gaya (kN)	Pengine (kW)	Daya (HP)	vs 400 HP
10%	5.71	143.1	149.1	200	Memenuhi
15%	8.53	197.0	205.2	275	Memenuhi
20%	11.31	249.6	260.0	349	Memenuhi
25%	14.04	300.6	313.1	420	Tidak memenuhi
30%	16.70	349.8	364.3	489	Tidak memenuhi

Pada 30%, kebutuhan 349,8 kN dan 489 HP melampaui prime mover 400 HP. Bahkan jika daya cukup dengan menurunkan kecepatan teoritis menjadi sekitar 2,46 km/jam, batas adhesi tetap kritis. Upper bound traksi, dengan asumsi seluruh 28 ton prime mover/ballast berada pada driven axle, hanya 82,4-164,8 kN untuk koefisien adhesi 0,3-0,6; nilai ini masih di bawah demand 349,8 kN. Dengan demikian, skenario 30% berstatus no-go untuk satu prime mover. Pilihan rekayasa adalah verifikasi bahwa grade aktual lebih rendah, penambahan pull/push assist, peningkatan driven-axle load dalam batas equipment, atau kombinasi tersebut.

5.4 Analisis Lashing Mengacu EN 12195-1

Data sumber menetapkan chain D13 dengan kapasitas 5,3 ton-force atau sekitar 52,0 kN dan sudut 12 derajat. Komponen horizontal satu lashing leg adalah 50,86 kN. Sesuai koefisien EN 12195-1, demand residu dihitung setelah kontribusi gesekan. Karena koefisien gesek aktual belum diuji, digunakan dua skenario 0,2 dan 0,3.

Tabel 6.

Kebutuhan lashing per arah

Kasus	Demand longitudinal (kN)	Minimum leg	Demand lateral (kN)	Minimum leg
EN 12195; $\mu = 0,20$	353,2	7	176,6	4
EN 12195; $\mu = 0,30$	294,3	6	117,7	3
Konservatif sumber: tanpa friction, $x 1,25$	588,6	12	367,9	8
Konfigurasi 16 leg	Kapasitas 813,7	Margin 1,38	Kapasitas 813,7	Margin 2,21

Konfigurasi 16 leg memenuhi skenario konservatif dengan utilisasi longitudinal 72,3%. Kesimpulan ini bersyarat: nilai 5,3 ton harus dikonfirmasi sebagai LC pada sertifikat; setiap leg harus memiliki load path dan tensioning yang independen; kapasitas anchor, shackle, hook, dan load binder tidak boleh lebih rendah; sudut aktual harus diukur; serta lashing wajib diperiksa ulang setelah initial movement. Satu rantai yang dirouting melalui dua titik tidak otomatis dihitung sebagai dua leg independen.

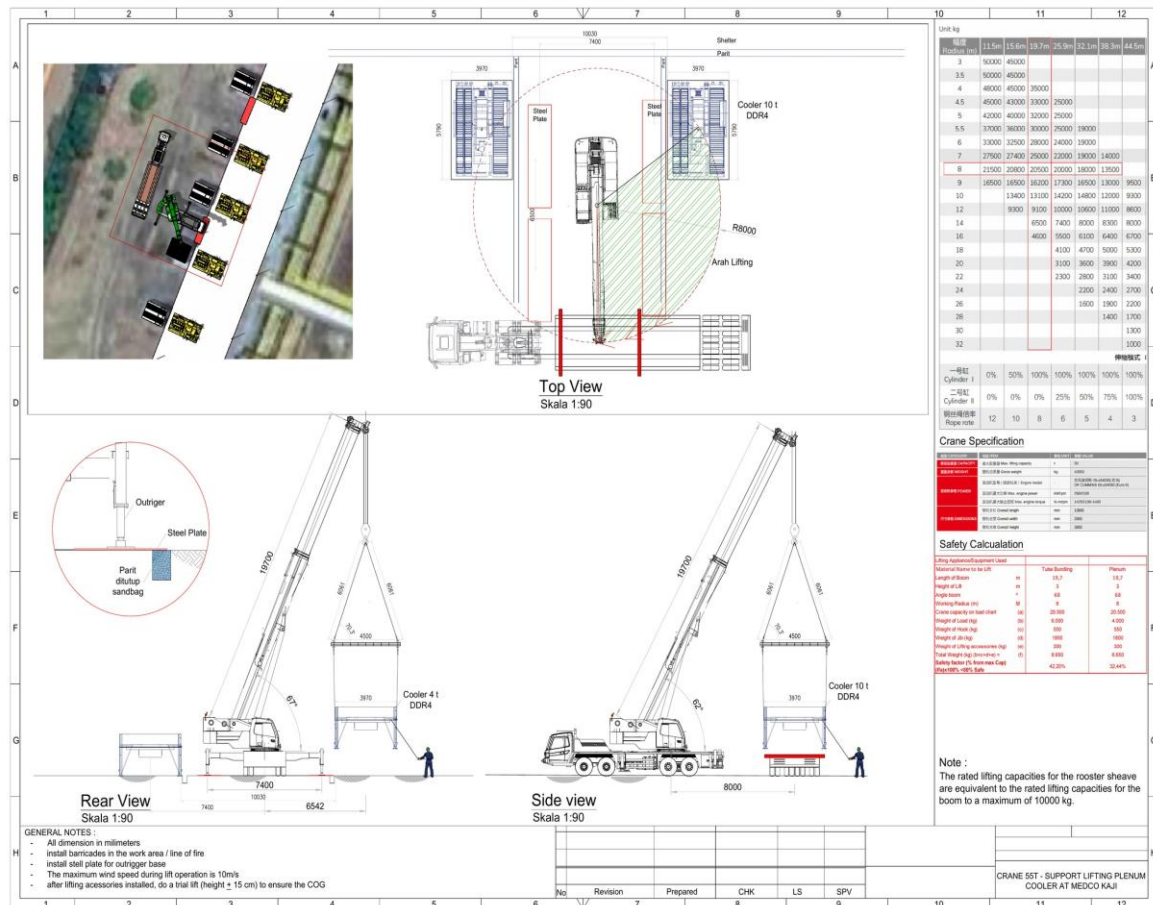
5.5 Validasi Lifting Plan

Lifting plan memuat load chart pada radius aktual sehingga evaluasi tidak lagi hanya bersifat kualitatif. Pada mobile crane 55 ton, boom 19,7 m dan radius 8 m memberikan chart capacity 20,5 ton. Gross lifted load tube bundle adalah 8,65 ton dan plenum 6,65 ton. TMC SQ16SK4Q menangani steel plate 0,7 ton pada radius sekitar 4,10 m dengan chart capacity 4,2 ton.

Tabel 7.

Utilisasi *lifting equipment*

Lift	Equipment / konfigurasi	Chart cap. (t)	Gross load (t)	Utilisasi	Status
Steel plate	TMC 16 t; R 4,10 m	4,20	0,70	16,7%	Memenuhi
Tube bundle	Crane 55 t; boom 19,7 m; R 8 m	20,50	8,65	42,2%	Memenuhi
Plenum	Crane 55 t; boom 19,7 m; R 8 m	20,50	6,65	32,4%	Memenuhi



Gambar 3.

Lifting plan cooler/tube bundle pada radius 8 m

Status memenuhi berlaku untuk kapasitas chart. Ground bearing pressure belum dapat divalidasi karena reaksi outrigger, luas mat, dan bearing capacity tanah tidak tersedia. Steel plate serta sandbag pada gambar tidak menggantikan perhitungan ground support. Dengan demikian, lifting tetap conditional go sampai ground bearing, sertifikat rigging, wind limit pabrikan, exclusion zone, dan trial lift 10-15 cm dikonfirmasi.

5.6 Validasi Jacking dan Skidding

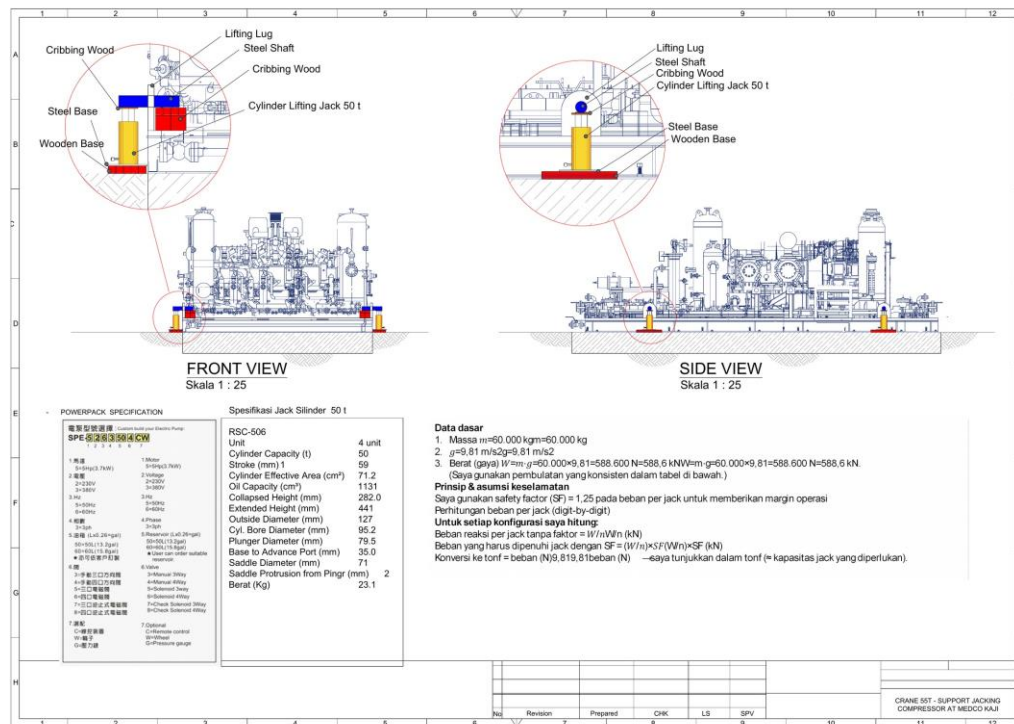
Empat cylinder jack masing-masing 50 ton memberikan kapasitas nominal 200 ton terhadap compressor 60 ton, atau capacity factor 3,33. Reaksi rata-rata adalah 15 ton per jack. Dengan faktor ketidakmerataan 1,25, design reaction menjadi 18,75 ton pada empat titik (utilisasi 37,5%) dan 25 ton apabila hanya tiga titik efektif menahan beban (utilisasi 50%). Kondisi dua titik efektif menghasilkan 37,5 ton per jack (utilisasi 75%) dan tidak boleh dijadikan metode normal karena kestabilan lateral sangat terbatas.

Tabel 8.

Sensitivitas reaksi jacking

Titik efektif	Reaksi rata-rata (t)	Design reaction x 1,25 (t)	Utilisasi jack 50 t	Capacity factor
4	15,0	18,75	37,5%	2,67
3	20,0	25,00	50,0%	2,00
2 (abnormal)	30,0	37,50	75,0%	1,33

Dua push jack 100 ton jauh melebihi gaya geser teoritis 29,4-117,7 kN untuk koefisien sliding 0,05-0,20. Namun kapasitas sistem dibatasi oleh rail, stopper, pin, sambungan, dan fondasi kayu/steel plate, bukan hanya kapasitas silinder. Hold point mencakup verifikasi luas cribbing, tegangan kontak, level rail, kapasitas stopper, kalibrasi pressure gauge, increment maksimum 100 mm, serta satu komando.



Gambar 4.
Konfigurasi empat cylinder jack 50 ton dan cribbing

5.7 Risk Management dan Operational Limitation

Kontrol proyek meliputi JSEA/HIRA, permit to work, lifting permit, toolbox meeting, fit-to-work, inspeksi alat, personel kompeten, barricade, gas detector, communication plan, dan stop work authority. Kontrol tersebut selaras dengan proses manajemen risiko ISO 31000 dan operational control ISO 45001.

Tabel 9.
Dasar dan status operational limitation

Parameter	Batas proyek	Batas	Status penggunaan
Angin umum	Beaufort 5 / 10,81 m/s	Manajemen GAP	Project-specific criterion
Angin lifting	Maksimum 10 m/s	Manajemen GAP	Gunakan nilai lebih ketat dan limit pabrikaan
Suhu	Maksimum 40 C	Manajemen GAP	Internal/client criterion
Visibilitas	> 100 m	Manajemen GAP	Internal/client criterion
Potensi petir	< 30%	Manajemen GAP	Internal/client criterion; hentikan jika alarm/site warning
Permukaan	Compacted dan traksi baik	Manajemen GAP	Wajib verifikasi aktual

Batas numerik cuaca di atas merupakan kebijakan proyek/client dan tidak diklaim sebagai angka universal dari ISO atau ASME. Untuk lifting, nilai yang berlaku adalah yang paling ketat antara 10 m/s pada lifting plan, manual manufacturer, dan keputusan lifting supervisor berdasarkan kondisi lapangan.

6. PEMBAHASAN

Temuan utama penelitian bukan sekadar bahwa peralatan tersedia, melainkan bahwa kecukupan setiap subsistem bersifat bersyarat. Multi-axle memiliki margin kapasitas yang besar, tetapi skenario grade 30% membatalkan kecukupan satu prime mover 400 HP. Lashing 16 leg memiliki margin terhadap demand konservatif, tetapi verdict tetap bergantung pada LC dan anchor. Load chart lifting menunjukkan utilisasi rendah, tetapi ground support belum tervalidasi. Jacking memiliki kapasitas silinder yang cukup, tetapi stopper, rail, dan cribbing menjadi weakest link. Kerangka ini konsisten dengan literatur yang menempatkan informasi beban, kondisi tanah, organisasi, dan human factors sebagai penentu keselamatan crane.

Dibanding direct lifting, jacking-skidding memberikan keunggulan yang dapat diukur: compressor 60 ton tidak menjadi suspended load pada crane 55 ton; kapasitas angkat tersebar pada empat titik; dan perpindahan dapat dilakukan pada footprint yang lebih kecil. Keunggulan tersebut tidak absolut karena sequential jacking menimbulkan reaksi tak merata dan skidding memerlukan load path horizontal yang lengkap. Kontribusi ilmiah penelitian adalah menunjukkan trade-off tersebut dalam satu model penerimaan, bukan menyatakan satu metode selalu lebih aman.

Implikasi teoritisnya adalah bahwa validasi heavy transport perlu memakai prinsip system-of-systems: trailer, prime mover, cargo securing, crane, jack, route, dan organisasi kerja berinteraksi melalui constraint yang paling lemah. Implikasi praktisnya adalah penggunaan hold point berbasis bukti untuk mencegah asumsi di dokumen awal berubah menjadi fakta lapangan tanpa verifikasi.

7. KESIMPULAN

Studi ini menghasilkan validasi terintegrasi relokasi gas compressor set 60 ton pada fasilitas migas aktif. Hasilnya menunjukkan bahwa metode dapat dilaksanakan secara conditional go, dengan syarat kekurangan data primer ditutup sebelum eksekusi. Kontribusi utama bukan pada angka kapasitas tunggal, melainkan pada pemisahan antara data terverifikasi, skenario desain, dan acceptance gate.

1. Gross trailer-cargo tervalidasi sebesar 84,8 ton dan gross combination mass 112,8 ton. Beban maksimum 14,4 ton per axle line masih di bawah rating equipment, tetapi memerlukan verifikasi kapasitas rute.
2. Grade 30% adalah skenario desain dari dokumen proyek, bukan hasil route survey yang terlampir. Pada 3 km/jam skenario ini membutuhkan 349,8 kN dan sekitar 489 HP, sehingga satu prime mover 400 HP berstatus no-go tanpa bantuan traksi.
3. Enam belas lashing leg D13 secara numerik memenuhi demand konservatif dengan kapasitas horizontal 813,7 kN dan utilisasi 72,3%, bersyarat pada LC, sudut, anchor point, dan load path yang tersertifikasi.
4. Lifting accessories memenuhi load chart dengan utilisasi maksimum 42,2%; direct lifting compressor tidak layak dengan crane 55 ton. Ground bearing tetap menjadi hold point.
5. Empat jack 50 ton memberikan capacity factor nominal 3,33 dan jacking-skidding lebih sesuai untuk constraint brownfield, tetapi rail, stopper, cribbing, sinkronisasi, serta pressure monitoring wajib diverifikasi.

6. Operational limitation cuaca pada dokumen merupakan batas proyek/client. Penerapan akhir harus menggunakan nilai paling ketat dari lifting plan, manufacturer, client, dan penilaian kondisi aktual.

DAFTAR PUSTAKA

1. American Society of Mechanical Engineers. (2025). ASME B30.5-2025: Mobile and locomotive cranes. New York, NY: ASME.
2. American Society of Mechanical Engineers. (2026). ASME B30.1-2026: Jacks, industrial rollers, air casters, and hydraulic gantries. New York, NY: ASME.
3. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. (2014). Cargo securing for road transport: 2014 European best practices guidelines. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2832/80373> Diakses 30 Juli 2026.
4. European Committee for Standardization. (2001). EN 12195-3:2001 Load restraint assemblies on road vehicles - Safety - Part 3: Lashing chains. Brussels: CEN.
5. European Committee for Standardization. (2010). EN 12195-1:2010 Load restraining on road vehicles - Safety - Part 1: Calculation of securing forces. Brussels: CEN.
6. Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale, PA: SAE International.
7. Goldhofer Aktiengesellschaft. (2026). THP/SL family: Technical data. https://www.goldhofer.com/fileadmin/downloads/BRO_TT/EN/BRO_THP-SL-Family_EN.pdf Diakses 30 Juli 2026.
8. International Organization for Standardization. (2018a). ISO 31000:2018 Risk management - Guidelines. Geneva: ISO.
9. International Organization for Standardization. (2018b). ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use, including ISO 45001:2018/Amd 1:2024. Geneva: ISO.
10. International Road Transport Union. (2014). International guidelines on safe load securing for road transport. Geneva: IRU.
11. Kargar, V., Jahangiri, M., Alimohammadlu, M., Kamalinia, M., & Mirazahossieninejad, M. (2022). Risk assessment of mobile crane overturning in asymmetric tandem lifting (ATL) operation based on fuzzy fault tree analysis (FFTA). *Results in Engineering*, 16, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100755>
12. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2019). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 60 Tahun 2019 tentang Penyelenggaraan Angkutan Barang dengan Kendaraan Bermotor di Jalan. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
13. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 18 Tahun 2021 tentang Pengawasan Muatan Angkutan Barang dan Penyelenggaraan Penimbangan Kendaraan Bermotor di Jalan. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
14. PT Global Antar Persada. (2025). GAP-110-BSP-Method Statement-Gas Compressor Medco Kaji to Tengah 6 Corridor-Rev.2. Dokumen internal proyek, 15 Oktober 2025.
15. Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N., & Rahnamayiezekavat, P. (2021). A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. *Safety Science*, 133, 105002. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002>

16. 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>
17. Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
18. 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>