

Evaluasi Kinerja Statik dan Fatik Dermaga Peti Kemas Eksisting Akibat Operasional Harbour Mobile Crane

Article History:

Received
9 Juli 2026
Revised
19 Juli 2026
Accepted
20 Juli 2026

JAYA VIA DEWATA^{1*}, MUHAMMAD SIGIT DARMAWAN²,
AFIF NAVIR REFANI², MOH. FADHLAN ROSYIDI²
KO HAR YUDOPRASETYO²

¹Mahasiswa S2 Terapan Teknik Infrastruktur Sipil Institut Teknologi
Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

²Dosen S2 Terapan Teknik Infrastruktur Sipil Institut Teknologi Sepuluh
Nopember, Surabaya, Indonesia

*Corresponding email: 3035241002@student.its.ac.id

ABSTRAK

Dermaga Petikemas Tarakan yang telah beroperasi sekitar 20 tahun direncanakan menerima tambahan beban Harbour Mobile Crane (HMC). Penelitian ini mengevaluasi kinerja statik dan fatik struktur eksisting menggunakan data survei visual, Non-Destructive Test, core drill, pemodelan SAP2000, kurva Wöhler/S-N, dan aturan Palmgren-Miner. Kuat tekan minimum core drill 24,63 MPa digunakan sebagai parameter konservatif. Hasil statik menunjukkan balok dan pelat 450 mm memenuhi, sedangkan pelat 350 mm tidak memenuhi. Analisis fatik menunjukkan beton pelat 350 mm gagal dengan $D = 5.443.281,091$, sementara beton pelat 450 mm dan balok masih memenuhi dengan D masing-masing 0,6047 dan $3,177 \times 10^{-8}$. Operasional HMC perlu dibatasi pada area yang memenuhi atau disertai redistribusi beban dan perkuatan lokal.

Kata kunci: analisis fatik, analisis statik, dermaga petikemas, Harbour Mobile Crane, Palmgren-Miner

ABSTRACT

The 20-year-old Tarakan Container Wharf is planned to accommodate additional Harbour Mobile Crane (HMC) loading. This study evaluates the static and fatigue performance of the existing wharf by integrating visual inspection, Non-Destructive Testing, core drilling, SAP2000 modelling, Wöhler/S-N curves, and Palmgren-Miner damage accumulation. The minimum core compressive strength of 24.63 MPa was adopted as a conservative material parameter. Static evaluation indicates that the beams and 450 mm slab remain adequate, whereas the 350 mm slab is inadequate. Fatigue analysis shows that the concrete of the 350 mm slab fails with $D = 5,443,281.091$, while the 450 mm slab and beam satisfy the fatigue limit with D values of 0.6047 and 3.177×10^{-8} , respectively. HMC operation should therefore be limited to acceptable areas or supported by load redistribution and local strengthening.

Keywords: fatigue analysis, static analysis, container wharf, Harbour Mobile Crane, Palmgren-Miner

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



PENDAHULUAN

Dermaga peti kemas merupakan infrastruktur penting dalam rantai logistik maritim karena menjadi titik transfer utama antara moda laut dan darat. Peningkatan arus peti kemas mendorong operator pelabuhan untuk meningkatkan produktivitas alat bongkar muat. Pada dermaga eksisting, strategi yang sering dipilih adalah relokasi atau penambahan alat berupa *Harbour Mobile Crane* (HMC) karena alat ini lebih fleksibel dibandingkan dengan *Quay Container Crane* (QCC). Akan tetapi, fleksibilitas HMC menghasilkan pola pembebanan yang berbeda dari QCC. QCC bekerja pada jalur rel yang telah didesain khusus, sedangkan HMC menyalurkan beban terpusat melalui *stabilizer pad* yang posisinya dapat berpindah sesuai area operasi.

Perbedaan mekanisme pembebanan tersebut menjadi penting pada dermaga yang telah berumur. Pada struktur beton bertulang di lingkungan laut, kapasitas aktual dapat berubah akibat *spalling*, retak, penetrasi klorida, korosi tulangan, serta pengurangan ketebalan pipa baja. Oleh karena itu, evaluasi kelayakan tidak cukup dilakukan menggunakan data *as-built drawing*, tetapi perlu memasukkan parameter aktual dari survei visual, pengujian tidak merusak, dan pengujian destruktif. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan evaluasi struktur eksisting yang menekankan integrasi data kondisi lapangan dan analisis numerik [1], [2], [3], [4].

Aspek lain yang sering kurang diperhatikan pada evaluasi dermaga terhadap alat berat adalah fatik. Operasi HMC menghasilkan pembebanan berulang akibat gerakan masuk-keluar alat, pemutaran *boom*, pengangkatan, dan penurunan peti kemas. Pada beton bertulang, fatik dapat menyebabkan pertumbuhan retak mikro, degradasi kekakuan, pelebaran retak, dan pada tulangan baja dapat memicu propagasi retak lelah pada tegangan yang lebih rendah dari kekuatan leleh [5], [6], [7], [8]. Dengan demikian, elemen yang lolos pengecekan statik belum tentu memiliki umur fatik yang memadai bila menerima siklus pembebanan yang besar.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan Dermaga Peti Kemas Tarakan terhadap rencana operasional HMC melalui perbandingan analisis statik dan fatik. Kontribusi utama penelitian adalah penyusunan evaluasi berbasis kondisi aktual material, pemodelan struktur tiga dimensi,

konversi spektrum operasi HMC menjadi siklus tahunan, serta identifikasi elemen kritis berdasarkan kapasitas statik dan akumulasi kerusakan fatik.

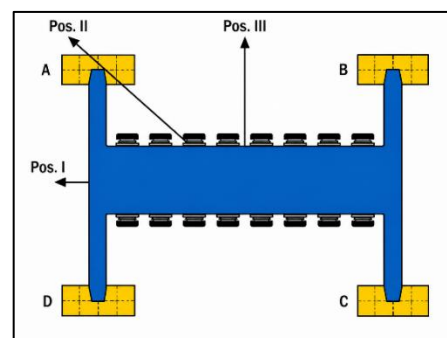
METODE

Objek Penelitian dan Karakteristik Beban HMC

Objek penelitian adalah Dermaga Petikemas Tarakan yang telah beroperasi sekitar 20 tahun (**Tabel 1**). Struktur dermaga terdiri atas sistem pelat beton bertulang, balok beton bertulang, *pile cap*, dan *steel pipe pile*. Data geometri utama diambil dari dokumen *as-built*, sedangkan parameter material aktual diperoleh dari rangkaian pengujian lapangan dan laboratorium. Rencana alat yang dievaluasi adalah HMC tipe G HMK 4406 dengan kapasitas angkat maksimum 100 ton (**Gambar 1**). Beban maksimum *stabilizer pad* terbesar terjadi pada posisi *boom* tertentu dan digunakan sebagai kondisi kritis untuk analisis statik serta sebagai bagian spektrum analisis fatik.

Survei Kondisi Aktual dan Pengujian Material

Kondisi aktual struktur dikaji melalui survei visual dan pengujian material. Survei visual digunakan untuk memetakan kerusakan permukaan seperti *spalling*, *honeycomb*, retak, dan tulangan terekspos (**Tabel 2**). Pengujian *rebound hammer* dan UPV digunakan sebagai indikator keseragaman serta kualitas internal beton. *Half-cell potential* digunakan untuk menilai probabilitas korosi tulangan, sedangkan *underwater thickness measurement* digunakan untuk mengetahui ketebalan aktual *steel pipe pile*. Nilai kuat tekan beton aktual diperoleh dari *core drill* dan digunakan sebagai dasar pemilihan parameter konservatif analisis fatik.



Gambar 1. Konfigurasi Posisi Boom dan Stabilizer Pad HMC

Evaluasi Kinerja Statik dan Fatik Dermaga Peti Kemas Eksisting Akibat Operasional *Harbour Mobile Crane*

Pemodelan Struktur dan Evaluasi Statik

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan SAP2000 dalam model tiga dimensi (**Gambar 2**). *Steel pipe pile* dimodelkan sebagai *line element*, balok sebagai *frame element*, sedangkan pelat dan *pile cap* dimodelkan sebagai *shell element*. Interaksi tanah-struktur disederhanakan menggunakan pendekatan titik jepit virtual. Berdasarkan interpretasi data tanah, lapisan tanah lunak dengan NSPT 0-8 dianggap tidak efektif dalam menahan gaya lateral. Panjang *freestanding* dari bawah *pile cap* sampai lapisan tanah efektif adalah 25 m, kemudian ditambah kedalaman titik jepit 6 m,

sehingga panjang tiang terjepit dalam model adalah 31 m.

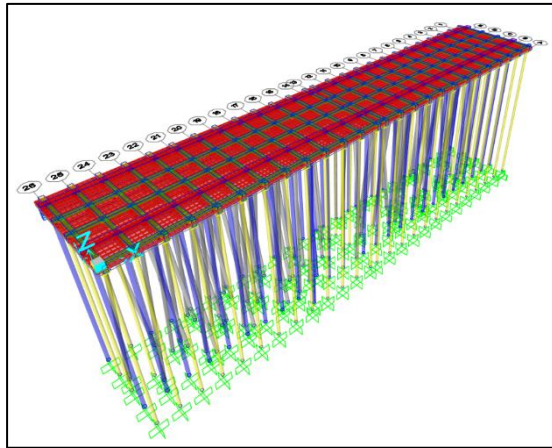
Evaluasi statik dilakukan dengan membandingkan gaya dalam akibat kombinasi beban HMC terhadap kapasitas elemen (**Gambar 3**). Kontrol utama meliputi kapasitas balok, kapasitas pelat 450 mm, dan kapasitas pelat 350 mm. Beban *stabilizer pad* dimodelkan sebagai beban area pada posisi kritis dan faktor dampak digunakan untuk merepresentasikan efek dinamis operasi *crane*.

Tabel 1. Data Utama Struktur Eksisting dan Beban HMC

Parameter	Nilai	Keterangan
Lokasi studi	Dermaga Peti Kemas Tarakan	Dermaga eksisting dengan umur operasi sekitar 20 tahun
Dimensi segmen	Segmen 1: 33,8 m × 25 m; Segmen 2: 31,2 m × 25 m; Segmen 3: 65 m × 25 m	Total panjang model sekitar 130 m
Tipe pelat	Pelat beton 350 mm dan 450 mm	Elemen pelat 350 mm menjadi fokus kritis
Tulangan pelat	D19-100 atas dan bawah	Digunakan untuk evaluasi tegangan tulangan
Tipe balok utama	800 × 1500 mm; 1000 × 1500 mm; 1400 × 2000 mm	Balok dimodelkan sebagai <i>frame element</i>
Fondasi	<i>Steel pipe pile</i> Ø914,4 mm dan Ø711,2 mm dengan variasi tebal	Dimodelkan sebagai <i>line element</i> dengan titik jepit virtual
Tipe HMC	G HMK 4406	Kapasitas angkat maksimum 100 ton
Berat <i>crane</i> dan beban maksimum	360 ton dan 100 ton	Total beban operasi maksimum 460 ton
Ukuran <i>stabilizer pad</i>	2 m × 4,5 m = 9 m ²	Beban terkonsentrasi pada area <i>pad</i>
Beban <i>pad</i> terbesar	219,4 ton atau 24,4 t/m ²	Setelah faktor dampak 1,1 menjadi 26,62 t/m ²

Tabel 2. Ringkasan Hasil Survei Visual, NDT, dan DT

Jenis Pemeriksaan	Hasil Utama	Implikasi Teknis
Survei visual	Pelat dan balok mengalami spalling, <i>honeycomb</i> , dan tulangan terekspos pada beberapa lokasi	Menunjukkan adanya degradasi lokal yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi kapasitas
<i>Rebound hammer</i>	Seluruh nilai <i>rebound</i> menunjukkan kualitas permukaan baik hingga sangat baik; tidak ada nilai di bawah kategori baik	Dipakai sebagai pemetaan awal keseragaman, bukan sebagai satu-satunya dasar kuat tekan
<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	12 titik uji: 4 titik <i>excellent</i> dan 8 titik <i>good</i> ; rentang 3617-4808 m/s	Tidak ditemukan indikasi awal kerusakan internal besar pada titik uji
<i>Half-cell potential</i>	3 titik risiko rendah; 7 titik tidak menentu; 2 titik risiko tinggi, yaitu B2 dan PC4	Menunjukkan adanya zona yang perlu inspeksi berkala terhadap korosi tulangan
<i>Underwater thickness</i>	<i>Remaining thickness</i> 82-96%, rata-rata sekitar 92%; titik kritis T9 = 82%, T5 = 85%, T11 = 90%	Sebagian besar pipa masih baik, tetapi titik kehilangan ketebalan terbesar perlu dipantau
<i>Core drill</i>	f_c min = 24,63 MPa; f_c rata-rata = 31,07 MPa; f_c maks = 44,20 MPa	Nilai minimum 24,63 MPa digunakan sebagai parameter konservatif analisis fatik



Gambar 2. Pemodelan Dermaga SAP2000

Analisis Fatik

Analisis fatik dilakukan dengan mengubah aktivitas operasional HMC menjadi spektrum siklus tahunan. Satu siklus didefinisikan sebagai kejadian naik-turun tegangan akibat operasi HMC (**Gambar 4**). Data arus peti kemas maksimum tahunan sebesar 86.126

TEUs dikonversi menjadi rencana kinerja HMC berdasarkan *proporsi Box Crane Hour*, sehingga diperoleh 34.511 TEUs per tahun untuk HMC. Spektrum beban dibagi menjadi kondisi bergerak masuk, operasional tanpa beban, operasional beban penuh, operasional beban kosong, dan bergerak keluar (**Tabel 4**).

Tegangan beton dan tulangan dihitung pada penampang retak dengan pendekatan elastis (**Tabel 3**). Untuk beton, umur fatik dihitung menggunakan kurva Wöhler sesuai DNVGL-ST-C502 [9], sedangkan untuk tulangan baja digunakan kurva S-N. Akumulasi kerusakan dihitung menggunakan aturan Palmgren-Miner sebagaimana **Persamaan 1**, dengan D adalah rasio kerusakan kumulatif, n_i jumlah siklus aktual pada tingkat tegangan ke- i , dan N_i jumlah siklus hingga kegagalan pada tingkat tegangan yang sama [8], [9].

$$D = \sum(n_i/N_i) \quad (1)$$

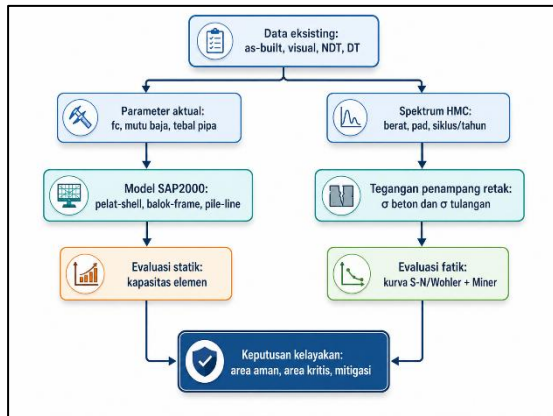
Tabel 3. Properti Material yang Digunakan Dalam Analisis Fatik

Parameter	Nilai	Keterangan
Mutu beton minimum, f_c	24,6 MPa	Berdasarkan nilai minimum <i>core drill</i>
Faktor material beton, γ_c	1,35	Mengacu DNVGL-ST-C502 [9]
Kuat tekan desain fatik beton, f_{cd}	18,22 MPa	f_c/γ_c
Kuat tarik karakteristik beton, f_{tk}	2,38 MPa	Parameter beton untuk evaluasi
Modulus elastisitas beton, E_c	28.820,61 MPa	Berdasarkan formulasi material
Modulus elastisitas beton fatik, E_{cn}	23.056,49 MPa	Parameter FLS
Mutu tulangan, f_s	390 MPa	Data <i>as-built drawing</i>
Faktor material baja, γ_s	1,10	Mengacu DNVGL-ST-C502 [9]
Kuat desain tulangan, f_{sd}	354,55 MPa	f_s/γ_s
Modulus elastisitas baja, E_s	200.000 MPa	Data material baja

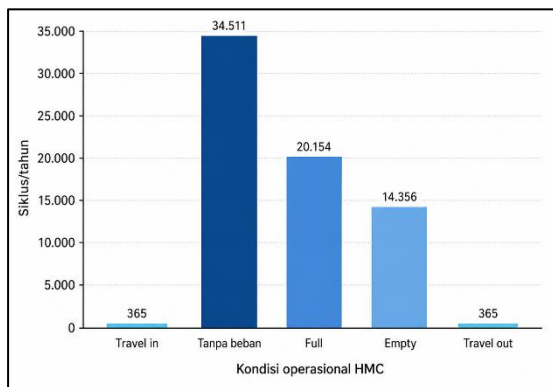
Tabel 4. Distribusi Siklus Beban Tahunan HMC

Kondisi operasional	Siklus/tahun	Pembebanan
Bergerak menuju area dermaga	365	Beban setiap roda 15 ton
Operasional tanpa beban	34.511	Beban area <i>pad</i> terbesar 10 t/m ²
Operasional beban penuh	20.154	Beban area <i>pad</i> terbesar 22,09 t/m ²
Operasional beban kosong	14.356	Beban area <i>pad</i> terbesar 13,49 t/m ²
Bergerak keluar area dermaga	365	Beban setiap roda 15 ton
Total	69.751	Jumlah siklus tahunan yang dianalisis

Evaluasi Kinerja Statik dan Fatik Dermaga Peti Kemas Eksisting Akibat Operasional *Harbour Mobile Crane*



Gambar 3. Alur Evaluasi Statik dan Fatik Struktur Dermaga



Gambar 4. Distribusi Siklus Operasional HMC Dalam Satu Tahun

HASIL DAN PEMBAHASAN

Interpretasi Kondisi Aktual Struktur

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas beton secara umum masih baik berdasarkan *rebound hammer* dan UPV, tetapi kondisi

permukaan tidak sepenuhnya homogen karena terdapat *spalling*, *honeycomb*, dan tulangan terekspos. Perbedaan antara kualitas internal beton yang masih baik dan kerusakan lokal permukaan merupakan karakteristik umum struktur beton bertulang pada lingkungan laut. Oleh karena itu, nilai *core drill* minimum digunakan sebagai parameter konservatif agar analisis tidak terlalu optimistis terhadap kondisi material [10], [11], [12], [13].

Hasil *half-cell potential* memperlihatkan bahwa sebagian besar titik berada pada zona tidak menentu, sedangkan dua titik menunjukkan probabilitas korosi tinggi [14]. Di sisi lain, *underwater thickness* menunjukkan bahwa mayoritas *steel pipe pile* masih memiliki sisa ketebalan di atas 90%, walaupun terdapat tiga titik dengan kehilangan ketebalan relatif lebih besar. Temuan ini tidak langsung menjadikan seluruh struktur tidak aman, tetapi mengindikasikan perlunya pengawasan lokasi spesifik yang berpotensi mengalami degradasi progresif.

Interpretasi Kondisi Aktual Struktur

Evaluasi statik menunjukkan bahwa respons setiap elemen tidak seragam (**Tabel 5**). Balok masih memenuhi kapasitas terhadap rencana operasional HMC, demikian pula pelat lantai dermaga tebal 450 mm. Sebaliknya, pelat tebal 350 mm tidak memenuhi kapasitas statik akibat besarnya konsentrasi beban dari *stabilizer pad*. Hasil ini menunjukkan bahwa kelayakan operasional HMC tidak dapat dinyatakan untuk seluruh area dermaga, melainkan harus dibatasi berdasarkan zona elemen yang memenuhi.

Tabel 5. Ringkasan Evaluasi Statik Elemen Struktur

Elemen Struktur	Hasil Statik	Keterangan Teknis
Balok beton bertulang	Memenuhi	Gaya dalam akibat HMC masih dapat ditahan oleh kapasitas elemen balok
Pelat tebal 450 mm	Memenuhi	Kapasitas pelat masih cukup terhadap beban rencana HMC
Pelat tebal 350 mm	Tidak memenuhi	Kapasitas statik tidak cukup akibat konsentrasi beban <i>stabilizer pad</i>

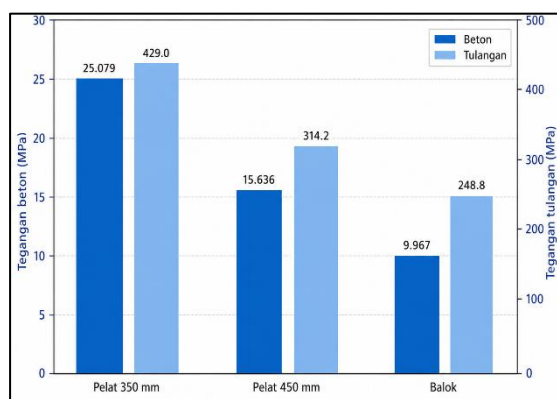
Tegangan Beton dan Tulangan pada Spektrum Beban HMC

Perhitungan tegangan pada penampang retak menunjukkan bahwa pelat 350 mm menghasilkan tegangan terbesar pada hampir seluruh kondisi operasional. Pada kondisi beban penuh, tegangan beton pelat 350 mm mencapai 25,079 MPa dan tegangan tulangan

mencapai 428,985 MPa (**Tabel 6**). Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan pelat 450 mm dan balok (**Gambar 5**). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tebal pelat dan distribusi kekakuan sistem struktur secara langsung menurunkan tegangan kerja dan meningkatkan ketahanan terhadap fatik.

Tabel 6. Tegangan Beton dan Tulangan Untuk Setiap Kondisi Operasional

Elemen	Kondisi	Siklus/tahun	σ beton (MPa)	σ tulangan (MPa)
Pelat 350 mm	Travel in	365	9,878	168,964
	Tanpa beban	34.511	10,930	186,959
	Beban penuh	20.154	25,079	428,985
	Beban kosong	14.356	14,375	245,888
	Travel out	365	9,878	168,964
Pelat 450 mm	Travel in	365	6,159	123,739
	Tanpa beban	34.511	6,814	136,917
	Beban penuh	20.154	15,636	314,163
	Beban kosong	14.356	8,962	180,073
	Travel out	365	6,159	123,739
Balok	Travel in	365	6,820	170,239
	Tanpa beban	34.511	6,085	151,879
	Beban penuh	20.154	9,967	248,787
	Beban kosong	14.356	6,877	171,642
	Travel out	365	6,820	170,239



Gambar 5. Perbandingan Tegangan Beton dan Tulangan pada Kondisi Beban Penuh

Umur Fatik, Rasio Kerusakan Kumulatif, dan Sisa Umur

Umur fatik tiap blok tegangan dihitung dari nilai rentang tegangan dan jumlah siklus aktual (**Tabel 7**). Kondisi beban penuh merupakan penyumbang kerusakan dominan, khususnya pada beton pelat 350 mm [15]. Pada elemen tersebut, rentang tegangan beton sebesar 15,201 MPa menghasilkan umur fatik N_i hanya 0,003702546 siklus, jauh lebih kecil dari jumlah siklus aktual 20.154 siklus per tahun. Hal ini menyebabkan rasio kerusakan kumulatif meningkat sangat besar dan langsung melampaui batas izin.

Tabel 7. Ringkasan Umur Fatik pada Kondisi Operasional Beban Penuh

Elemen	$\Delta\sigma$ beton (MPa)	N_i beton (siklus)	$\Delta\sigma$ tulangan (MPa)	N_i tulangan (siklus)
Pelat 350 mm	15,201	0,003702546	260,021	67.992,476
Pelat 450 mm	9,478	33.328,530	190,424	21.914.664,34
Balok	3,883	$6,34297 \times 10^{11}$	96,909	1.109.197,245

Rekapitulasi kerusakan kumulatif (**Tabel 8**) memperlihatkan bahwa satu-satunya elemen yang gagal terhadap *Fatigue Limit State* adalah beton pelat 350 mm dengan $D = 5.443.281,091$. Baja tulangan pada pelat 350 mm masih memenuhi dengan $D = 0,298978189$, tetapi status elemen pelat secara keseluruhan tetap tidak dapat dinyatakan aman karena beton sebagai bagian penampang mengalami kegagalan fatik. Pelat 450 mm masih memenuhi untuk beton dan tulangan, sedangkan balok memiliki cadangan fatik terbesar.

Implikasi Teknis dan Strategi Mitigasi

Perbandingan analisis statik dan fatik (**Gambar 6 dan Gambar 7**) menghasilkan identifikasi elemen kritis yang konsisten, yaitu pelat lantai dermaga tebal 350 mm. Analisis statik menunjukkan kapasitas pelat ini tidak cukup untuk beban HMC, sedangkan analisis fatik menunjukkan beton pelat 350 mm mengalami kerusakan kumulatif yang jauh di atas batas izin. Dengan demikian, operasional HMC tidak dapat diberikan izin secara menyeluruh tanpa pembatasan zona, redistribusi beban, atau perkuatan lokal (**Tabel 9**).

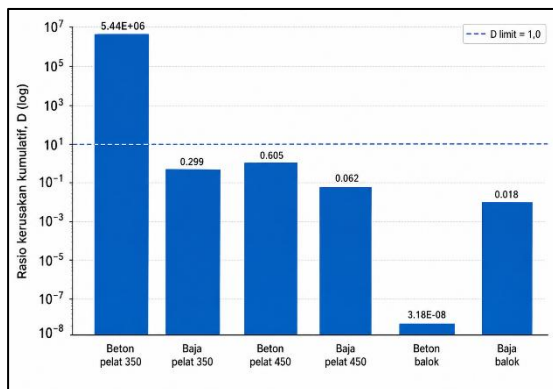
Evaluasi Kinerja Statik dan Fatik Dermaga Peti Kemas Eksisting Akibat Operasional *Harbour Mobile Crane*

Area pelat 450 mm dan elemen balok secara umum dapat dipertimbangkan sebagai zona operasi yang lebih aman, tetapi tetap memerlukan pengendalian posisi *stabilizer pad* dan inspeksi berkala. Pada pelat 350 mm, solusi teknis harus diarahkan untuk menurunkan tegangan lokal akibat beban *pad*. Penggunaan *steel plate* atau *load spreader*

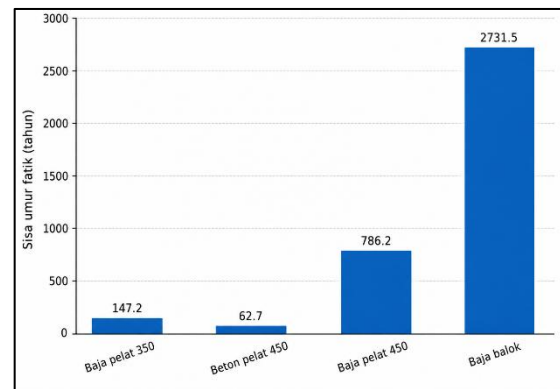
dapat memperbesar bidang distribusi beban sehingga beban tidak terkonsentrasi pada area *pad* yang kecil. Apabila area pelat 350 mm harus digunakan secara rutin, diperlukan perkuatan permanen seperti peningkatan tebal efektif, sistem komposit, atau sistem transfer beban menuju balok utama.

Tabel 8. Rekapitulasi Kerusakan Kumulatif dan Sisa Umur Fatik

Elemen	D total	D limit	Status	Sisa Umur Setelah 20 tahun Operasional
Beton pelat 350 mm	5.443.281,091	1,0	<i>Failed</i>	<i>Failed</i>
Baja pelat 350 mm	0,298978189	1,0	<i>Pass</i>	147,236 tahun
Beton pelat 450 mm	0,604707138	1,0	<i>Pass</i>	62,684 tahun
Baja pelat 450 mm	0,062022583	1,0	<i>Pass</i>	786,158 tahun
Beton balok	$3,17738 \times 10^{-8}$	1,0	<i>Pass</i>	Sangat besar/praktis aman
Baja balok	0,018172029	1,0	<i>Pass</i>	2731,481 tahun



Gambar 6. Perbandingan Rasio Kerusakan Kumulatif Seluruh Elemen



Gambar 7. Estimasi Sisa Umur Fatik Elemen yang Masih Memenuhi

Tabel 9. Rekomendasi Mitigasi Berdasarkan Hasil Evaluasi

Objek	Temuan Utama	Mitigasi Teknis
Pelat 350 mm	Gagal statik dan gagal fatik beton	Tidak direkomendasikan menerima beban HMC langsung; lakukan perkuatan lokal atau redistribusi beban
Pelat 450 mm	Memenuhi statik dan fatik, tetapi D beton = 0,6047	Dapat digunakan dengan pengendalian posisi <i>pad</i> , inspeksi retak, dan pembatasan pola operasi
Balok	Memenuhi statik dan fatik dengan cadangan besar	Tetap dipantau pada area sambungan dan zona transfer beban
<i>Steel pipe pile</i>	Sebagian besar sisa tebal >90%, titik T9 dan T5 lebih kritis	Lakukan inspeksi underwater berkala dan pemantauan kehilangan ketebalan
Zona HCP tinggi	B2 dan PC4 menunjukkan indikasi risiko korosi tinggi	Lakukan inspeksi lanjutan, perlindungan korosi, dan perbaikan selimut beton bila diperlukan

KESIMPULAN

Evaluasi berbasis integrasi survei visual, NDT, DT, pemodelan SAP2000, dan analisis fatik memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kelayakan Dermaga Petikemas Tarakan untuk menerima

operasional HMC. Hasil statik menunjukkan bahwa balok dan pelat 450 mm masih mampu menahan beban rencana, sedangkan pelat 350 mm tidak memenuhi kapasitas akibat konsentrasi beban *stabilizer pad*.

Analisis fatik menunjukkan bahwa beton pelat 350 mm merupakan elemen paling kritis dengan rasio kerusakan kumulatif $D = 5.443.281,091$, jauh melampaui batas izin D limit = 1,0. Baja pelat 350 mm masih memenuhi dengan $D = 0,298978189$, tetapi status elemen tidak aman karena beton pada penampang yang sama gagal. Pelat 450 mm masih memenuhi dengan D beton = 0,604707138 dan D baja = 0,062022583, sedangkan balok memiliki kinerja fatik sangat baik dengan D beton = $3,17738 \times 10^{-8}$ dan D baja = 0,018172029.

Berdasarkan hasil tersebut, operasional HMC pada dermaga eksisting tidak boleh dinyatakan aman untuk seluruh area. HMC dapat dipertimbangkan untuk beroperasi pada area yang memenuhi kapasitas statik dan fatik, terutama area pelat 450 mm dan zona yang didukung balok memadai, dengan tetap mengendalikan posisi stabilizer pad. Area pelat 350 mm perlu dihindari atau diberi perkuatan lokal, *steel plate*, *load spreader*, maupun sistem transfer beban sebelum digunakan sebagai area operasi HMC. Program inspeksi berkala terhadap retak, korosi tulangan, dan kehilangan ketebalan *steel pipe pile* harus menjadi bagian dari mitigasi risiko jangka panjang.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] F. Kurniadi, F. Teknik, U. I. Sunan Giri Surabaya Jl Brigjen Katamso, K. Waru, and K. Sidoarjo, "Analisis Struktur Dermaga terhadap Beban Operasional Harbor Mobile Crane (HMC)," *PORTAL: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 110–115, Apr. 2024, doi: 10.30811/portal.v16i2.5440.
- [2] N. Setiani, G. Pribadi, and A. Romdhansyah, "Analisis Kekuatan Pelat Lantai Dermaga di Pelabuhan Ciwandan Banten Terhadap Penambahan BMC," *Jurnal Sipil Krisna*, vol. 8, no. 1, pp. 62–68, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.61488/sipilkrisna.v8i1.161>.
- [3] A. W. Efendi, "Identification of damage and assessment of the jetty using Non destructive method (NDT)," *Dinamika Bahari*, vol. 6, no. 1, pp. 22–31, May 2025, doi: 10.46484/db.v6i1.750.
- [4] Y. Herdiansah and W. P. Cendana, "Evaluasi Kuat Tekan Beton Terpasang pada Struktur Dermaga Eksisting Berdasarkan Pengujian Destructive dan Non-Destructive," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 21, no. 1, pp. 109–127, Apr. 2025, doi: 10.28932/jts.v21i1.8698.
- [5] F. Liu, J. Zhou, and L. Yan, "Study of stiffness and bearing capacity degradation of reinforced concrete beams under constant-amplitude fatigue," *PLoS One*, vol. 13, no. 3, pp. e0192797–, Mar. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0192797.
- [6] B. Wu, Y. Tang, Z. Li, and K. Tang, "Fatigue damage accumulation modelling of critical components subjected to moving crane loads in reinforced-concrete industrial buildings," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 119, p. 104951, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.104951.
- [7] G. Zhao, Y. Liu, and N. Ye, "An improved fatigue accumulation damage model based on load interaction and strength degradation," *Int. J. Fatigue*, vol. 156, p. 106636, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2021.106636.
- [8] S. Cho, W. Cho, and T. Koo, "Fatigue Assessment of Pier Structures Under Dynamic Forces," *Buildings*, vol. 14, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/buildings14103320.
- [9] DNV GL AS, "DNVGL-ST-C502 Offshore concrete structures," Feb. 2018. [Online]. Available: <http://www.dnvgl.com>,
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2492:2018 Metode pengambilan dan pengujian inti beton hasil pemotongan (ASTM C42/C42M-13, IDT)," Jakarta, 2018. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [11] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD)," Jakarta, 2019.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, "SNI ASTM C597:2012 Metode uji kecepatan rambat gelombang melalui beton," 2012.
- [13] ACI Committee 228, "ACI 228.2R-13: Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures," American Concrete Institute, 2013.
- [14] ASTM International, "ASTM C876-22b: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," 2022, doi: 10.1520/C0876-22B.

- [15] ACI Committee 215, "ACI PRC-215-21: Concrete Structure Design for Fatigue Loading—Report," American Concrete Institute, 2022.