

PEMODELAN BERBASIS UJI NON-DESTRUKTIF DAN SEMI-DESTRUKTIF YANG DIVALIDASI UJI VIBRASI PADA ASESMEN RELIABILITAS PONDASI JIBCRANE

Naufal Rafif Rizqullah¹, Heri Khoeri^{1,2*}, Haryo Koco Buwono², Badaruddin¹

¹ PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

*Email: naufalrafif@hesa.co.id

Abstrak

Untuk menjamin keamanan dalam pengoperasian Jibcrane dilakukan pemeriksaan berkala termasuk pada sistem pondasinya. Penelitian ini dilakukan untuk mendapat gambaran reliabilitas sistem pondasi setelah jibcrane beroperasi 10 tahun. Sistem pondasi jibcrane yang diteliti adalah tiang pancang pipa baja yang disatukan pile cap dan diperkuat bracing antar pipa. Pemeriksaan dilakukan dengan uji non-destruktif dan semi-destruktif untuk mendapatkan gambaran aktual dimensi dan mutu elemen struktur. Seluruh data uji dikompilasi sehingga menjadi data yang dapat dijadikan input dalam pemodelan struktur. Penentuan jumlah dan jenis uji mempengaruhi validitas model, dimana semakin banyak dan lengkap, maka model akan lebih merepresentasikan kondisi aktualnya. Validitas model dilakukan dengan uji vibrasi. Hasil analisis menghasilkan frekuensi alami 1,48 Hz, sementara hasil uji vibrasi sebesar 1,5 Hz, dengan nilai frekuensi yang berdekatan menunjukkan data input cukup valid yang menghasilkan respon dinamik mendekati aktualnya. Hasil analisis menunjukkan pondasi jibcrane masih reliabel dengan faktor keamanan 3,1. Kendatipun demikian, untuk memperlambat laju korosi pada baja perlu dilakukan perlindungan dengan melakukan pengecatan berkala permukaan pondasi pipa baja dan bracing pengakunya, melakukan injeksi pada beton yang retak, dan memproteksi beton dari pengaruh reaksi alkali-silika dengan pengecatan anti-korosi berbasis bituminous.

Kata kunci: asesmen, derek, non-destruktif, reliabilitas, semi-destruktif

Abstract

To ensure safety in operating the Jibcrane, regular inspections are conducted, including on its foundation system. This study was conducted to assess the reliability of the foundation system after 10 years of Jibcrane operation. The Jibcrane foundation system under investigation consists of steel pipe piles joined with a pile cap and reinforced with bracing between the pipes. Inspections were performed using non-destructive and semi-destructive tests to obtain actual dimensions and structural element quality. All test data were compiled to create input data for structural modeling. The selection of the number and types of tests affects the validity of the model, where more comprehensive testing leads to a more accurate representation of actual conditions. Model validity was assessed through vibration testing. The analysis yielded a natural frequency of 1.48 Hz, while the vibration test result was 1.5 Hz, indicating close agreement between the input data and dynamic response. The analysis results indicate that the Jibcrane foundation remains reliable with a safety factor of 3.1. However, to slow down corrosion of the steel, periodic protection measures are necessary, such as regular painting of the steel pipe foundation surface and bracing, injection of cracked concrete, and protection of concrete from alkali-silica reaction with corrosion-resistant bituminous painting.

Keywords: assessment, crane, non-destructive, reliability, semi-destructive

1. PENDAHULUAN

Industri saat ini butuh peralatan serba guna, efisien, hemat biaya, fleksibel dengan produktivitas tinggi. *Jibcrane* sangat signifikan membantu peningkatan efisiensi, khususnya pada area yang dengan aktivitas pengangkatan dan transfer beban berulang dalam rotasi yang tetap (Pavlović *et al.*, 2018). *Jibcrane* memiliki tiga derajat kebebasan yaitu vertikal, radial, dan rotasi, kelemahannya yaitu tapi tidak mampu mencapai sudut-sudut. Penempatan *Jibcrane* biasanya pada lokasi aktivitas pengangkatan

terkonsentrasi. Kapasitas dan jangkauannya bervariasi (Dhanoosha and Reddy, 2016).

Untuk menjamin keamanan dan keselamatan dalam pengoperasian *Jibcrane* tentunya perlu dilakukan pemeriksaan dan evaluasi berkala terhadap struktur dan pondasi *Jibcrane*. Pemilihan indeks evaluasi yang tepat sangat memengaruhi hasil evaluasi. Pemilihan indikator harus memperhatikan prinsip-prinsip keterjangkauan, representatif dan sensitivitas (Zhang, 2017). Prinsip-prinsip tertentu untuk memilih teknik pengujian selama bertahun-tahun terus dikembangkan, yang langkah pertamanya

adalah dimulai dengan observasi visual di lokasi dan pengujian non-destruktif (NDT) dan semi-destruktif (SDT). Tujuan dari inspeksi semacam itu adalah untuk mengidentifikasi cacat, menentukan tingkat korosi, dan untuk mengukur ketidaksempurnaan bentuk mesin, deformasi dari struktur pengangkut yang disebabkan oleh kejadian abnormal selama operasi crane. Langkah berikutnya adalah melakukan simulasi kekuatan secara numerik, dengan memperhitungkan tingkat degradasi crane yang terkait dengan efek jangka panjang lingkungan (Przybyłek and Więckowski, 2022). Berkurangnya ketebalan elemen-elemen crane diukur menggunakan metode *ultrasonic thickness test (UTT)* dan kekuatan material yang diukur dari pengujian lapangan menjadi dasar dalam implementasi pemodelan numerik (Hafid *et al.*, 2019). Model teoritik selanjutnya diuji keabsahannya dengan kesesuaiannya terhadap modus getar eksperimental (Bagiasna, 2017). Parameter-parameter penting yang diperiksa dalam asesmen *Jibcrane* diantaranya tegangan, defleksi, perilaku *buckling* torsi lateral elemen kantilever yang terkena beban terbagi rata (berat sendiri) dan beban terpusat di ujung (Chavan *et al.*, 2017).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui reliabilitas pondasi *Jibcrane* yang telah beroperasi 10 tahun dengan pemodelan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga (*FEM*) dengan *input* sesuai hasil pemeriksaan, pengukuran, *NDT* dan *SDT* di lapangan yang divalidasi dengan frekuensi alami hasil uji vibrasi.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan kegiatan dimulai dari pengumpulan data perencanaan, pengamatan visual, *non-destructive test*, *semi-destructive test*, uji beban dinamik, analisis struktur, sampai dengan penyusunan rekomendasi kelaikan *Jibcrane* dan rekomendasi perbaikan/ perkuatan jika diperlukan.



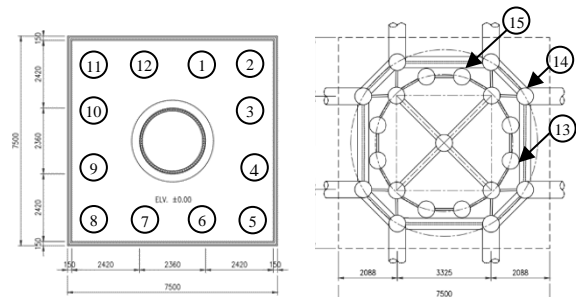
Gambar 1. *Jibcrane* yang diteliti

2.1. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan untuk mencatatkan kondisi aktual *Jibcrane* khususnya *defect* (cacat) yang terlihat seperti retak, miring, korosi, sekaligus menentukan titik-titik rencana pengujian, jenis uji dan jumlahnya (*British Standard*, 2016).

2.2. Non-destructive Test (NDT) dan Semi-destructive test (SDT)

NDT yang dilakukan antara lain: *rebound hammer test* (BSN, 2012),(ACI, 2019), *Ultrasonic pulse velocity test* (ACI, 2019), *carbonation test* (IAEA, 2002), *brinell test* (ASTM, 2023), *half cell test* (ASTM, 2010), dan *seismic shock test* (Higgs and Ismail, 1989), sementara SDT yang dilakukan adalah pengambilan sampel beton inti (BSN, 2018) dan pengujian kuat tekan beton inti (BSN, 2018). SDT dan NDT dilakukan pada sistem struktur pondasi *Jibcrane* dengan lokasi uji *upper deck* pada Gambar 2 (kiri), *under deck* pada Gambar 2 (kanan), dan keterangan jenis uji pada masing-masing titik ditabulasi pada Tabel 1.



Gambar 2. Lokasi dan Penomoran titik uji *upper deck* (kiri) dan *under deck* (kanan)

Tabel 1
 Jenis uji lokasi uji

No	RH	UPV	CD	C	HC	RS	HB	UT	SST
1	√	√	√	√	√	√			
2	√	√	√	√	√	√	√		
3	√	√							
4	√	√							
5	√	√	√	√	√	√	√		
6	√								
7	√	√							
8	√	√	√	√	√	√	√		
9	√								
10	√								
11	√	√							
12	√								
13							√	√	
14							√	√	
15							√	√	√

2.3. Uji Vibrasi

Uji vibrasi dilakukan dalam kondisi operasional dengan menempatkan *accelerometer* pada *pile cap* dan merekamnya selama beberapa menit. Data percepatan dalam domain waktu ditransformasi ke domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transformation* (Khoeri and Alisjahbana, 2023). Secara teoritis kerusakan menyebabkan perubahan pada properti dinamis seperti frekuensi, *mode shape*, dan redaman (Cao *et al.*, 2017). Penilaian kerusakan struktural dapat dinilai dari perubahan respons statis maupun dinamis (Feng and Feng, 2018; Peng *et al.*, 2023), (Avci *et al.*, 2021). Respon dinamik dari uji vibrasi dapat dijadikan acuan untuk verifikasi hasil analisis (Khoeri *et al.*, 2023).

2.4. Analisis Struktur dan Pondasi

Analisis struktur dan pondasi mengacu pada standar perencanaan yang terbaru baik persyaratan pembebanan (BSN, 2020a), gempa (BSN, 2019a), beton struktural (BSN, 2019b), baja struktural (BSN, 2020b), pondasi dan geoteknik (BSN, 2017). Juga mengacu pada persyaratan dari manufaktur *Jibcrane* untuk LFS 180 (Liebherr, 2014) dan pengamatan, pengujian lapangan dan laboratorium yang dilakukan.

Analisis akan dilakukan untuk 2 *case* yaitu kondisi normal (*Case 1*) dan kondisi *fishing* (*Case 2*). Analisis struktur menggunakan pembebanan layan dari manufaktur, yang mana sudah memperhitungkan beban mati (DL), beban hidup (LL), beban impact, getaran, dan angin (Tabel 2).

Tabel 2

Data manufaktur (Liebherr, 2014)

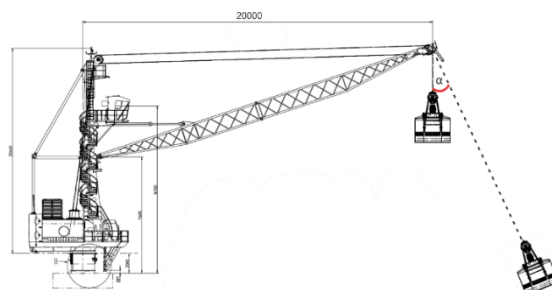
Beban Maksimum		Momen Maksimum	
Horisontal (kN)	Vertikal (kN)	Guling (kN.m)	Torsional (kN.m)
70	-1950	12200	975

Kondisi *fishing* merupakan situasi yang seharusnya dihindari oleh operator *crane* karena memberikan impact terhadap struktur yang besar jika dibanding kondisi normal. Sudut kemiringan akibat *fishing* yang digunakan dalam analisis ini terdiri dari 0°, 15°, 30°, dan 45° dengan *outreach* 20 m dan SWL 26,4 ton. Beban akibat *fishing* seperti pada Tabel 3.

Tabel 3

Besarnya beban akibat *fishing*

Sudut α	Gaya Max		Momen Max	
	Hor. [kN]	Vert [kN]	Guling [kNm]	Torsio [kNm]
0°	70	-1721	6039	975
15°	138	-1710	7367	975
30°	202	-1679	8569	975
45°	257	-1637	9478	975



Gambar 3. Ilustrasi *fishing*

Pada pondasi, daya dukung tiang tunggal dihitung berdasarkan N-SPT dengan formula berikut (Meyerhof, 1976):

$$Q_u = Q_b + Q_s \tag{1}$$

$$Q_b = 40 \cdot N_b' \cdot A_b \tag{2}$$

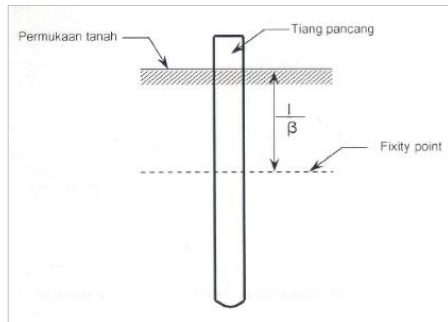
$$Q_s = 0,2 \frac{N'}{t} \cdot t \cdot k \tag{3}$$

$$Q_a = Q_u / FK \tag{4}$$

dengan: Q_u = Kapasitas daya dukung ultimit; Q_b = daya dukung ujung tiang; Q_s = daya dukung selimut tiang; W = berat sendiri tiang; A_b = luas penampang bored pile; k = keliling tiang; N' = nilai rata-rata N-SPT terkoreksi sepanjang tiang; N_b' = Nilai N-SPT terkoreksi bawah tiang; t = tebal lapisan tanah; dan FK = Faktor keamanan. Sementara kapasitas ultimit *uplift*, U_u :

$$U_u = Q_s + W \tag{5}$$

Daya dukung tiang lateral dihitung didasarkan teori tekanan tanah dengan asumsi sepanjang kedalaman tiang, tanah mencapai nilai ultimitnya. Dalam perhitungan disamping kondisi kepala, umumnya tiang perlu dibedakan berdasarkan perilakunya sebagai tiang pendek (kaku) atau tiang panjang (elastis) (Broms, 1964). Estimasi kapasitas lateral sesuai dengan besar deformasi izin kepala tiang yang dibatasi 12.5 mm (BSN, 2017). Titik jepit (*fixity point*) adalah jarak dari permukaan tanah sampai kedalaman tertentu dengan memodelkan tiang sebagai balok kantilever vertikal (Gambar 4).



Gambar 4. Fixity point

Untuk tiang dalam tanah kohesif pengkaitan tipe tiang dan jepitan tiang berdasarkan faktor tak berdimensi β adalah sebagai berikut (Broms, 1964):

$$\beta = \left(\frac{k_h d}{4E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

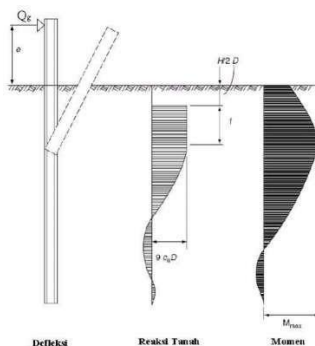
Persamaan untuk tiang panjang:

$$y_0 = \frac{2H_a \beta (e\beta + 1)}{K_h D} \quad (7)$$

Persamaan (8) dapat dituliskan menjadi:

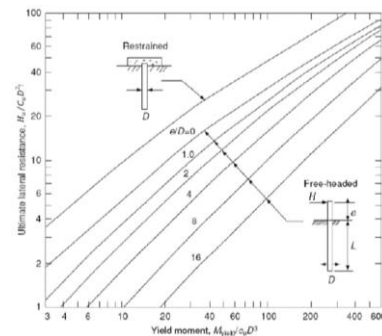
$$H_a = \frac{y_0 K_h D}{2\beta (e\beta + 1)} \quad (8)$$

Untuk tiang panjang, mekanisme keruntuhan tanah, distribusi tahanan tanah serta momen lentur di tunjukkan pada Gambar 5 (Broms, 1964). Dari gambar tersebut terlihat bahwa defleksi tiang terutama berada di daerah dekat permukaan tanah sehingga respon tanah di bagian bawah tiang semakin mengecil, begitu pula besarnya momen dan distribusinya.



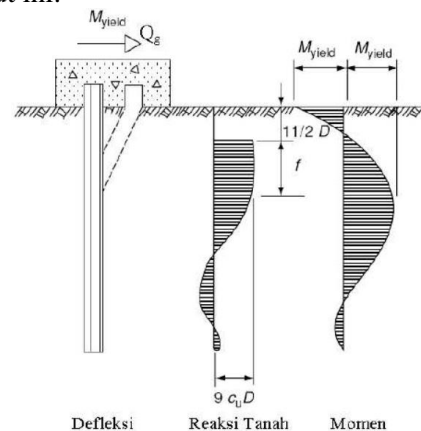
Gambar 5. Defleksi lateral dan mekanisme keruntuhan pondasi tiang panjang dengan kepala tiang bebas pada tanah kohesif

Untuk pondasi tiang panjang, beban lateral ultimit, H_u diperoleh berdasarkan grafik pada Gambar 6 (Broms, 1964). Dengan mengetahui nilai $\frac{M_u}{C_u D^3}$ maka nilai $\frac{H_u}{C_u D^2}$ dapat ditentukan.



Gambar 6. Kapasitas beban lateral untuk pondasi tiang panjang pada tanah kohesif

Dengan memplotkan nilai $\frac{M_{crack}}{C_u D^3}$ ke dalam Gambar 6 diperoleh nilai $\frac{H_u}{C_u D^2}$. Mekanisme keruntuhan, distribusi tahanan ultimit tanah, serta momen lentur sepanjang tiang untuk kondisi kepala tiang terjepit pada tanah kohesif dideskripsikan pada Gambar 7 (Broms, 1964) berikut ini:



Gambar 7. Defleksi lateral pondasi tiang panjang dengan kondisi kepala tiang terjepit pada tanah kohesif

Momen maks. dan gaya lateral ultimit pada tanah kohesif dihitung dengan pers.(9) (Broms, 1964):

$$M_{max} = H_u (e + 1,5D + 0,5f) \quad (9)$$

dengan:

$$f = \frac{H_u}{9C_u D} \quad (10)$$

2.5. Pemodelan Pembebanan

Pembebanan pada struktur *jibcrane* diaplikasikan pada *pile cap* saat *crane* dalam kondisi normal dan *fishing*. *Safe working load*, *SWL* dari *load chart crane* hanya berlaku jika posisi *crane* relatif datar terhadap permukaan tanah, sehingga jika posisi *crane* miring akibat penurunan tanah berlebih saat *crane* beroperasi maka *SWL* akan menurun drastis dan dapat menyebabkan *overturning* (Badaruddin, 2021).

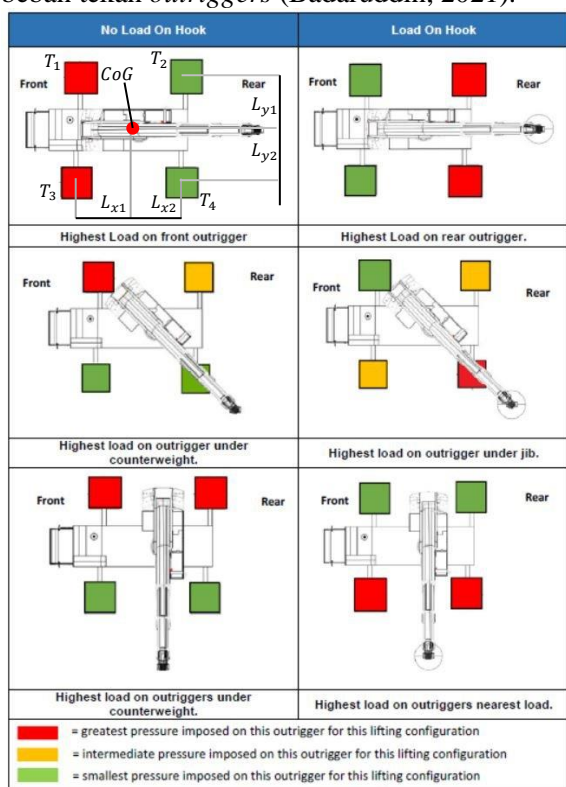
Gambar 8 menyajikan kondisi-kondisi beban maks. dan min. sebagai referensi untuk perhitungan pada kondisi dengan atau tanpa beban pada hook untuk berbagai konfigurasi. Untuk menentukan besaran beban tekan yang terjadi pada outriggers crane, khususnya pada point kritis (warna merah) adalah dengan load moment, dimana secara matematis dituliskan:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= W_{total} \frac{L_{x2}}{L_{x\ total}} + \frac{L_{y2}}{L_{y\ total}}; \\
 T_2 &= W_{total} \frac{L_{x1}}{L_{x\ total}} + \frac{L_{y2}}{L_{y\ total}} \\
 T_3 &= W_{total} \frac{L_{x2}}{L_{x\ total}} + \frac{L_{y1}}{L_{y\ total}}; \\
 T_4 &= W_{total} \frac{L_{x1}}{L_{x\ total}} + \frac{L_{y1}}{L_{y\ total}}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

dengan,

$$L_{x\ total} = L_{x1} + L_{x2} \text{ dan } L_{y\ total} = L_{y1} + L_{y2}.$$

Dari persamaan (12) hal terpenting yang harus ditentukan adalah center of gravity (CoG) gabungan crane dan beban. Untuk menentukan CoG gabungan harus diketahui CoG beban dan crane itu sendiri. Metode pendekatan lainnya dengan Rule of thumb tipping load (beban angkat yang membuat crane tipping) dimana untuk crane buatan belanda, SWL pada load chart adalah 66.7% tipping load, USA 85% tipping load dan Germany 75% tipping load. Dengan mengetahui rasio tersebut, maka dapat ditentukan beban tekan outriggers (Badaruddin, 2021).



Gambar 8. Perubahan beban pada Outrigger Load akibat kondisi pembebanan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengamatan visual

Dari hasil pengamatan visual terlihat permukaan baja struktur pondasi mengalami korosi (Gambar 9), dan beton sudah terkena reaksi alkali-silika permukaannya (Gambar 10).



Gambar 9. Korosi pada permukaan struktur pondasi Jibcrane



Gambar 10. Reaksi alkali-silika pada beton

Defect yang terlihat dari hasil observasi visual akan diperdalam dengan NDT dan SDT, untuk memastikan tingkat kerusakannya.

3.2. Hasil NDT dan SDT

Pengujian palu pantul (rebound hammer test, RH) seperti diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil rebound hammer test

No	Pantulan (mm)										rerata (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	46	45	48	44	45	46	48	48	46	49	46.5
2	48	48	47	49	49	50	48	48	46	48	48.1
3	44	48	45	46	48	48	47	45	49	48	46.8
4	46	46	48	47	49	49	48	50	49	46	47.8
5	44	49	48	48	46	47	48	48	49	45	47.2
6	49	49	51	50	48	49	49	46	47	48	48.6
7	48	49	48	48	49	50	49	49	48	47	48.5
8	44	48	48	46	45	49	49	46	47	48	47
9	46	48	48	49	45	45	47	45	48	49	47
10	48	47	47	46	45	45	46	48	44	49	46.5
11	49	44	44	46	45	46	47	47	45	44	45,7
12	48	47	48	48	46	45	45	49	46	47	46,9

Data *RH* menunjukkan beton memiliki keragaman yang baik dengan rerata 47,5 mm dan deviasi standar 1,16 mm (2,5% dari rata-ratanya).

Tabel 5
Hasil *ultrasonic pulse velocity test*

No.	Dist. (m)	Average time 1 (μs)	Average time 2 (μs)	Velocity (m/s)
1	0.2	48.2	97.4	4084
2	0.2	48.4	94.4	4353.4
3	0.2	48.2	99.4	3912.8
4	0.2	49.4	95.6	4356.6
5	0.5	132.4	0	3777.4
8	0.2	48.2	95	4278.4
11	0.5	126.2	0	3962
12	0.2	46.6	95.4	4100.8

Pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik (*UPV*) pun menunjukkan hal yang sama dengan rata-rata *UPV* 4103,1 m/detik dengan deviasi standar 213,9 m/detik (5,2% dari rata-ratanya), dimana *range* kecepatan 3,5 km/detik sampai 4,5 km/detik menunjukkan beton dalam kondisi baik (IAEA, 2002). Untuk memverifikasi hasil NDT baik dengan *RH* maupun dengan *UPV* diambil sampel beton inti yang selanjutnya dilakukan uji kuat tekan di laboratorium, yang hasilnya seperti pada Tabel 6.

Tabel 6
Hasil pengujian sampel beton inti

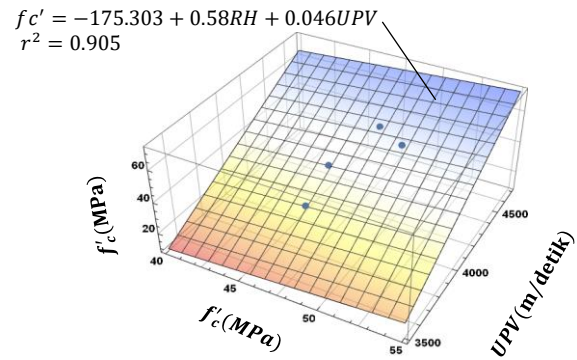
No	D (cm)	H (cm)	H/D	SFC	W (kg)	CS (MPa)	fc' (MPa)
1	6,8	9,5	1,4	0,95	810	445,14	41,92
2	6,8	9,5	1,4	0,95	825	569,89	53,67
5	6,8	9,5	1,4	0,95	825	424,92	40,02
8	6,8	9,5	1,4	0,95	825	551,4	51,93

Dengan, *D* = diameter, *H* = tinggi, *SFC* = faktor koreksi, *W* = berat sampel, *CS* = kuat tekan saat sampel hancur.

Dengan regresi *multilinear* diperoleh persamaan hubungan *fc'*, *RH* dan *UPV* yang diberikan pada persamaan (1) dan Gambar 11.

$$f_c' = -175.303 + 0.58RH + 0.046UPV \quad (1)$$

Dengan faktor determinasi $r^2=0.905$, maka faktor kesalahan pers. (1) kurang dari 10%.



Gambar 11. Hubungan *fc'*, *RH* dan *UPV*

Dengan mensubstitusi *RH* dan *UPV* ke pers. (1), diperoleh estimasi *fc'* pada titik yang tidak diambil *sample* beton intinya (Tabel 7).

Tabel 7
Estimasi *fc'* dari *RH* dan *UPV*

Titik uji	<i>RH</i> (mm)	<i>UPV</i> (m/detik)	<i>fc'</i> (MPa)
1	46.5	4084.0	41.9
2	48.1	4353.4	53.7
3	46.8	3912.8	41.0
4	47.8	4356.6	51.2
5	47.2	3777.4	40.0
8	47.0	4278.4	51.9
11	45.7	3962.0	40.3
12	49.9	4100.0	49.4

Rata-rata $\bar{f}_c' = 46,2$ MPa dengan deviasi 5,9 MPa (12,8% \bar{f}_c'), dengan nilai tersebut berarti \bar{f}_c' dari semua *sample* masih di atas 85% \bar{f}_c' , sehingga dapat digunakan dalam analisis. Mutu, densitas dan keragaman beton dinilai baik, dan hasil uji karbonasi pun menunjukkan semua *sample* belum terkarbonasi (Tabel 8).

Tabel 8
Hasil uji karbonasi sampel beton inti

No.	dokumentasi	karbonasi (cm)	keterangan
1		0.0	tidak terkarbonasi
2		0.0	tidak terkarbonasi
5		0.0	tidak terkarbonasi
8		0.0	tidak terkarbonasi

Uji *half cell* dilakukan untuk melihat potensi korosi pada tulangan, dimana hasilnya menunjukkan nilai beda potensial antara 0 sampai

dengan -350 mV yang artinya kemungkinan tulangan terkorosi kurang dari 50%. Hal ini linier dengan hasil uji karbonasi, dimana umumnya proses korosi diinisiasi selimut beton kehilangan sifat alkalinnya, dan ketika kedalaman karbonasi sudah mencapai tulangan, maka korosi dimulai.

Tabel 9
Hasil Hardness Brinell Test

No.	Brinell Blows (HL)					HL	Perkiraan fy (N/mm ²)
	1	2	3	4	5		
2	507	561	503	521	524	523.2	350,444
5	489	539	527	555	561	534.2	358,331
8	545	481	560	501	533	524.0	351,018
13	545	570	621	594	589	583.8	393,895
14	564	574	596	550	574	571.6	385,147
15	594	546	567	539	584	566.0	381,132

Pengujian *ultrasonic thickness* dilakukan untuk mengetahui ketebalan profil baja. Hasilnya menunjukkan ketebalan profil baja berkurang akibat permukaannya terkorosi (Tabel 10).

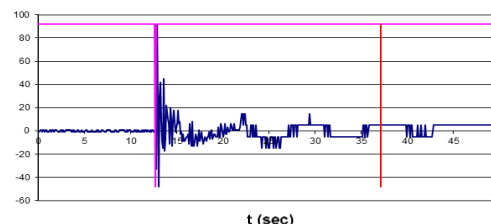
Tabel 10
Hasil Ultrasonic Thickness Test

No.	t (mm)	Inisial (mm)
13	11,75	12,0
14	11,90	12,0
15	11,88	12,0

Ketebalan berkurang 0,8%-2,1%, artinya laju korosi selama 10 tahun diestimasi 0,21%/tahun. Selanjutnya dalam pemodelan digunakan reduksi tebal penampang 2,1%.

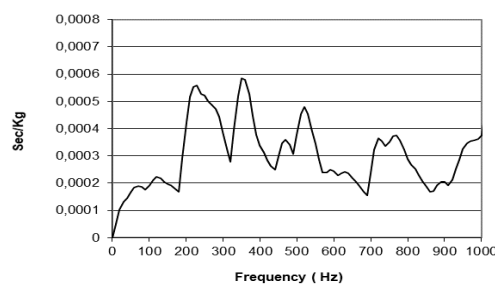
Seismic Shock Test (SST) adalah uji seismik menggunakan pukulan palu sebagai gaya dan sebuah transduser untuk menangkap getaran yang dihasilkan. Dengan penerapan teknik *digital filtering*, dari hubungan frekuensi dan *mechanical admittance* digunakan untuk mengestimasi performa *pile* (Davis and Dunn, 1974). *Mechanical admittance* yang dimaksud adalah ukuran respons dinamis dari interaksi tanah dan struktur (*soil structure interaction*) terhadap pukulan palu. Kekakuan kepala *pile* berbanding lurus dengan kebalikan kemiringan bagian awal plot *mechanical admittance* vs. frekuensi. Ini terkait dengan karakteristik beban aksial pada *pile* pada uji beban statik sebagai grafik hubungan penurunan dan beban. Karena *pile* hanya diberi ketukan palu maka hanya bisa mengindikasikan perilaku elastis interaksi tanah dan struktur, tidak merepresentasikan kapasitas beban total (Higgs and Tongue, 1984). Respon dinamik yang diperoleh digunakan untuk evaluasi karakteristik kekakuan dan perilaku elastis

interaksi tanah dan struktur, yang dapat diinterpretasi untuk identifikasi kedalaman, daya dukung dan integritas tiang. Dari waktu dan cepat rambat gelombang, terdeteksi panjang tiang 26,04 m. Respon akibat ketukan palu yang terbaca oleh *transducer* seperti Gambar 12.



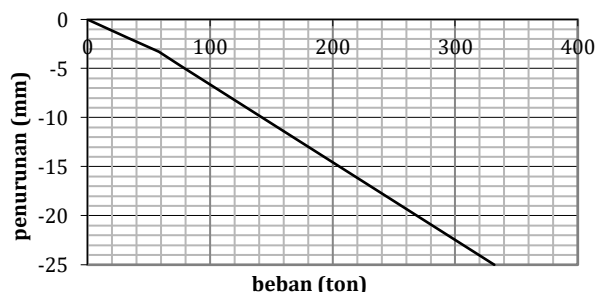
Gambar 12. Grafik Seismic Pile Jibcrane

Selanjutnya data (Gambar 12) ditransformasi ke domain frekuensi (Gambar 13).



Gambar 13. Hubungan mechanical admittance dengan frekuensi

Frekuensi getar erat hubungannya dengan kekakuan struktur. Dari interpretasi frekuensi dominan diketahui kekakuan sistem yang merupakan hubungan beban dan deformasi dalam kondisi elastis. Teridentifikasi kekakuan maksimum, $S_{max} = 24,32$ ton/mm dan minimum $S_{min} = 12,62$ ton/mm. Perubahan kekakuan terjadi pada deformasi 3 mm (Gambar 14).



Gambar 14. Hubungan beban dan deformasi (penurunan)

Dengan pertimbangan keamanan, untuk perhitungan daya dukung, dibatasi pada kondisi elastis dengan maksimum penurunan 12,5 mm, dan diperoleh daya dukung ijin sebesar 179,8 ton.

Interpretasi hasil uji NDT dan SDT selanjutnya akan digunakan dalam pemodelan

dan analisis (Tabel 11). Sementara untuk daya dukung tiang hasil SST akan dibandingkan dengan perhitungan dari hasil penyelidikan tanah.

Tabel 11
Interpretasi mutu material hasil NDT dan SDT

Material	Elemen	Mutu Material
Beton	<i>Pile cap</i>	$f_c' = 46,2$ MPa
Baja	Steel Pipe Pile	$f_y = 350,8$ MPa
	Tulangan Baja	$f_y = 390$ MPa

3.3. Daya Dukung aksial pondasi tiang

Stratifikasi tanah di radius tidak lebih dari 25 m dari pondasi *jibcrane* seperti pada Tabel 12.

Tabel 12
Stratifikasi Tanah

Z (m)	N-SPT	Deskripsi
0	0	Coal
2	19	Silty Sand
4	9	Silty Clay
6	12	Silty Clay
8	7	Silty Clay
10	4	Silty Clay
12	6	Sandy Silt
14	10	Sandy Silt
16	25	Silty Sand
18	38	Silty Sand
20	49	Silty Sand
22	46	Silty Sand
24	60	Cemented Silt
26	60	Cemented Silt
28	60	Cemented Silt
30	60	Cemented Silt

Daya dukung tanah untuk panjang tiang 26 m sesuai Panjang tiang terdeteksi dari SST diperoleh hasil kapasitas aksial tekan ultimit $Q_u = 414$ ton dan aksial tarik ultimit, $U_u = 283,2$ ton selanjutnya dengan membaginya dengan $FK=2,5$, maka kapasitas tekan ijin, $Q_a = 165$ ton dan kapasitas aksial tarik ijin, $U_a = 94,4$ ton.

3.4. Daya Dukung Ijin Tiang Lateral

Daya dukung tiang lateral dihitung didasarkan teori tekanan tanah dengan asumsi sepanjang kedalaman tiang, tanah mencapai nilai ultimitnya.

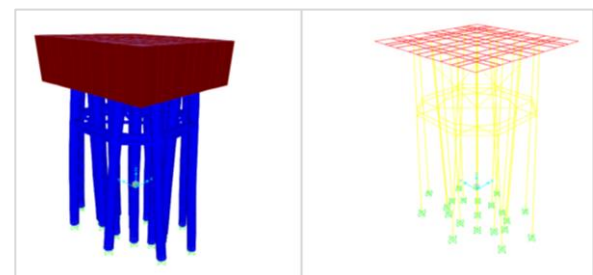
Dengan: $k_h = 0,691 N_{av}^{0,406} =$ Modulus of subgrade reaction; $d =$ diameter tiang = 600 m; $E_p =$ Modulus elastisitas tiang; dan $I_p = \frac{1}{64} \pi D^4 =$ momen inersia tiang. β dapat dihitung sebesar 0,39, maka panjang *fixity point* dari dasar sungai (*river bed*) dapat ditentukan sebagai $1/\beta = 2,55$ m. Selanjutnya pada pemodelan struktur dengan SAP 2000, panjang

pile di extend 2,55 meter dari dasar laut sebagai titik penjepitan *Steel pipe pile* diameter 600 mm. $\beta L = 0,39 \times 26 = 10,16 > 2,5$ tiang Panjang (Broms, 1964)

maka kapasitas lateral tiang tunggal ultimit dapat diestimasi sebesar $H_u = 40,5$ ton, dengan faktor keamanan 2,5, maka $H_a = 16,2$ ton

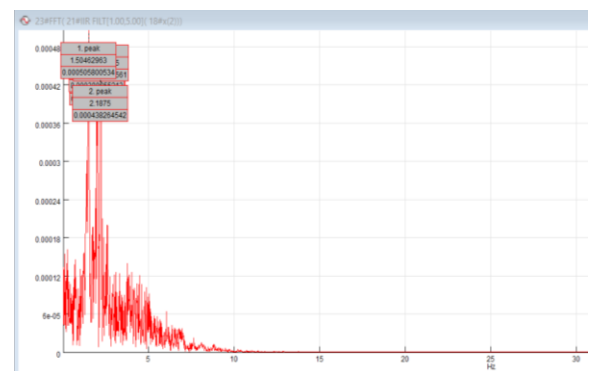
3.5. Pemodelan Struktur dan validasi dengan mode-1 (lateral) hasil uji vibrasi

Pengecekan kekuatan struktur dilakukan berdasarkan desain tegangan izin (*Allowable Stress Design*). Analisis menggunakan bantuan SAP2000 v22.0. *Pile* dan *bracing* dimodelkan sebagai *frame element*, sementara *pile cap* dimodelkan sebagai *shell element* (Gambar 15).



Gambar 15. Pemodelan pondasi *Jibcrane* pada SAP 2000

Validasi model dilakukan dengan membandingkan frekuensi alami hasil pemodelan dibandingkan dengan hasil pengujian, dimana hasil analisis modal didapatkan frekuensi alami 1,48 Hz, sementara hasil transformasi FFT data percepatan hasil uji vibrasi (domain waktu) ke domain frekuensi 1,5 Hz Gambar 16.



Gambar 16. Frekuensi dari hasil uji vibrasi

Frekuensi alami model 1,3% lebih kecil dibanding hasil uji, dengan deviasi kurang dari 3%, maka model dianggap *valid* dan lebih konservatif dari aktualnya.

3.6. Analisis Struktur pada Kondisi Normal

Dari analisis struktur diperoleh gaya-gaya dalam elemen struktur. Dari gaya dalam dilakukan pengecekan rasio tegangan dengan AISC-ASD (*Allowable Stress Design*). Hasil pengecekan rasio tegangan seperti pada Tabel 13.

Tabel 13
Rasio tegangan (AISC 360-16) pada kondisi normal

Design Section	Design Type	Maximum Ratio
CNP	Beam	0.2242480
Bracing H-Beam	Brace	0.082543
Bracing Pipe (Dia.20)	Beam	0.072449
Bracing Pipe (dia. 40)	Beam	0.14991
SPP	Pile	0.271463

PM Ratio untuk seluruh elemen sistem pondasi < 1, sehingga disimpulkan sistem struktur pondasi *Jibcrane* tidak berpotensi *buckling* ataupun *overstress* akibat beban normal, dengan defleksi terbesar 9,574 mm Sementara batas ijin *sway* adalah $L/500$ (AISC, 2016). Artinya *sway* yang terjadi < *sway* yang diijinkan (27,1 mm). Kemiringan maksimum yang diizinkan oleh manufaktur yaitu sebesar 3° (Liebherr, 2014), sedangkan hasil analisis menunjukkan maksimum 0,04° artinya struktur masih memenuhi persyaratan.

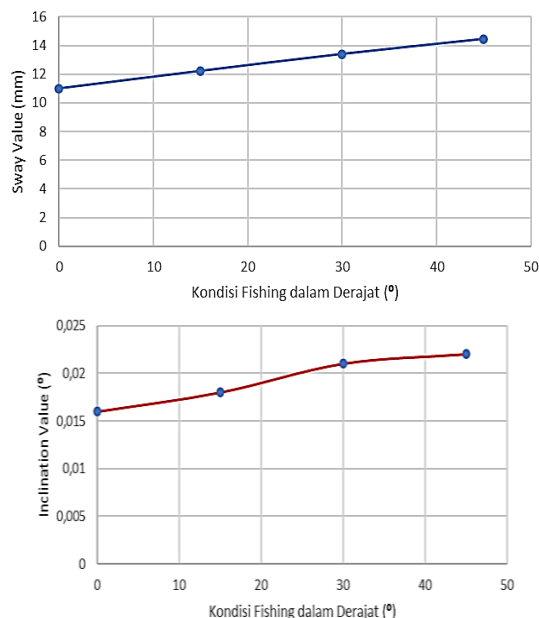
3.7. Analisis sistem pondasi kondisi Fishing

Hasil pengecekan rasio tegangan dengan AISC-ASD seperti pada Tabel 14.

Tabel 14
Rasio tegangan pada kondisi fishing

Design Section	Rasio			
	0°	15°	30°	45°
CNP	0.127	0.105	0.125	0.15
Bracing H-Beam	0.052	0.059	0.065	0.071
Bracing Pipe 20 cm	0.045	0.04	0.039	0.046
Bracing Pipe 40 cm	0.105	0.105	0.121	0.136
SPP	0.125	0.138	0.151	0.262

PM Ratio untuk seluruh elemen dalam sistem struktur pondasi saat kondisi *fishing* dengan berbagai kombinasi < 1, sehingga dapat disimpulkan bahwa elemen dalam sistem struktur pondasi *Jibcrane* tidak berpotensi *buckling* ataupun *overstress* saat kondisi *fishing*.



Gambar 17. Sway sistem pondasi kondisi fishing (atas), kemiringan pondasi (bawah)

Sway terbesar (resultan defleksi arah $x = 10,458$ mm; $y = 6,376$; dan $z = 2,391$ mm) saat kondisi *fishing* (Gambar 17 kiri) dengan sudut 45° adalah sebesar 14,442 mm. Dengan batas ijin *sway* $L/500$ (AISC, 2016), maka *sway* yang terjadi pada saat kondisi *fishing* (14,442 mm) < *sway* yang diijinkan (27,1 mm). Sementara kemiringan maksimum yang terjadi pada sistem struktur saat kondisi *fishing* yaitu 0,022° (Gambar 17 kanan) yang mana nilai tersebut masih lebih kecil dibandingkan kemiringan izin 3° (Liebherr, 2014), artinya struktur memenuhi syarat.

3.8. Pengecekan Kapasitas Tiang Pancang

Faktor keamanan aktual pondasi dapat dihitung berdasarkan gaya maksimum yang terjadi dibandingkan dengan daya dukung ultimitnya. Hasil analisis dengan pembebanan dalam kondisi normal dan kondisi *fishing* dengan beberapa variasi sudut seperti pada Tabel 15.

Tabel 15. Summary Reaksi Tumpuan Maksimum pada SAP 2000

Kondisi	F_x (ton)	F_y (ton)	F_z (ton)	
Normal	-8,4875	-0,6002	88,2528	
	1,2534	-7,7566	74,6821	
	-3,1452	1,1517	-33,8927	
	-6,1297	-0,6102	61,2061	
	0	0,7837	-5,6317	53,3252
Fishing	-1,3046	1,1741	-7,4076	
	-6,9951	-0,6178	68,8946	
	15	0,6477	-5,8699	55,6861
	-2,5383	1,1952	-16,8108	
	-7,7768	-0,6253	75,765	
	30	0,5147	-6,0638	57,6034
	-3,6876	1,2155	-25,4528	
	-8,4144	-0,6319	81,2856	
	45	0,395	-6,1988	58,9326
	-4,6618	1,2335	-32,649	

Seluruh beban yang diterima oleh *pile* dari semua kombinasi beban masih di bawah kapasitas ijin tiang tunggal, dimana kapasitas kapasitas tekan ijin, $Q_a = 138$ ton, kapasitas tarik ijin, $U_a = 94,4$ ton dan kapasitas lateral ijin, $H_a = 16,2$ ton. Faktor keamanan (FK) seperti Tabel 16.

Tabel 16 Faktor keamanan *single pile*

	Beban Max.(ton)	Kapasitas Ult. (ton)	FK
Aksial tekan	88.2528	345	3.91
Aksial Tarik	74.076	236	3.19
Lateral	12.335	40.5	3.28

Seluruh hasil pengujian menunjukkan performa yang baik, kerusakan yang terlihat pada bagian permukaan baja dan permukaan beton tidak mempengaruhi performa struktur. Namun perbaikan tetap harus dilakukan pada profil baja agar tidak semakin mengikis ketebalan baja memasang anoda tumbal dan *coating* permukaannya (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2022), menginjeksi beton retak dan melapisi permukaan beton dengan anti korosi berbasis *Bituminous* (Astuti and Fahma, 2022).

4. KESIMPULAN

Secara visual terlihat korosi pada *pile* dan *bracing* baja, juga retak dan kerusakan pada permukaan beton akibat reaksi silika-alkali. Namun hasil asesmen secara komprehensif menunjukkan bahwa kerusakan tersebut tidak mempengaruhi reliabilitas pengoperasian *jibcrane*. *Ultrasonic thickness test* menunjukkan ketebalan *pile* dan *bracing* baja berkurang 2,1% akibat terkorosi dalam 10 tahun usianya atau laju korosinya 0,21%/tahun. Sedangkan hasil

pengujian keragaman, integritas dan mutu menunjukkan beton dalam kondisi baik, dengan $f'c = 46,2 MPa \pm 5,9 MPa$, belum terkarbonasi dan potensi probabilitas korosi tulangan kurang dari 50%. Dengan memasukkan parameter hasil uji ke dalam model struktur, diperoleh frekuensi alami 1,48 Hz, sementara hasil uji beban dinamik 1,5 Hz, dengan nilai frekuensi yang berdekatan menunjukkan input data cukup *valid* karena menghasilkan respon dinamik mendekati aktualnya. Hasil analisis menunjukkan pondasi *jibcrane* saat beroperasi masih memiliki faktor keamanan lebih dari 3. Kendatipun demikian, untuk memperlambat laju korosi pada baja perlu dilakukan perlindungan dengan memasang anoda tumbal, melakukan pengecatan berkala permukaan pondasi pipa baja dan *bracing* pengakunya, melakukan injeksi pada beton yang retak, dan memproteksi beton dari pengaruh reaksi alkali-silika dengan pengecatan anti-korosi berbasis *Bituminous*.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI. (2019), *ACI 228.1R-19 Report on Methods for Estimating In-Place Strength*, American Concrete Institute.
- AISC. (2016), *ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings*.
- ASTM. (2010), *ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- ASTM. (2023), *ASTM E10-18, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.
- Astuti, P. and Fahma, R.K. (2022), "Pencegahan Korosi pada Beton dalam Masa Perawatan dengan Cat Anti-korosi berbasis Bituminous", *SIKLUS Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 8 No. 2, pp. 197–205, doi: 10.31849/siklus.v8i2.9865.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. and Inman, D.J. (2021), "A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 147, p. 107077, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107077.
- Badaruddin. (2021), "Outrigger Crane - Ground Bearing Pressure (GBP)", 15 April, available at: <https://www.linkedin.com/pulse/outrigger-crane-ground-bearing-pressure-gbp->

- badaruddin-kendari/?originalSubdomain=id.
- Bagiasna, K. (2017), “Penerapan Analisis Modus Getar Eksperimental untuk Identifikasi Parameter Modus Getar Struktur Mekanik”, *Mesin*, Vol. 9 No. 1 & amp;2, pp. 9–23.
- British Standard. (2016), *EN 13018-Non-Destructive Testing, Visual Testing, General Principles*, BSI.
- Broms, B.B. (1964), “Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90 No. 3, pp. 123–156, doi: 10.1061/JSFEAQ.0000614.
- BSN. (2012), *SNI ASTM C805:2012, Metode Uji Angka Pantul Beton Keras*.
- BSN. (2017), *SNI 8640:2017; Persyaratan Perancangan Geoteknik*.
- BSN. (2018), *SNI 2492:2018, Metode Pengambilan Dan Pengujian Inti Beton Hasil Pemboran Dan Balok Beton Hasil Pematangan*.
- BSN. (2019a), *SNI 1726:2019; Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*.
- BSN. (2019b), *SNI 2847: 2019; Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*.
- BSN. (2020a), *SNI 1727: 2020; Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung Dan Struktur Lain*.
- BSN. (2020b), *SNI 1729: 2020; Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*.
- Cao, M.S., Sha, G.G., Gao, Y.F. and Ostachowicz, W. (2017), “Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 26 No. 4, p. 043001, doi: 10.1088/1361-665X/aa550a.
- Chavan, V.S., Waydande, S.S. and Scholar, R. (2017), “Design optimization and Modal Analysis of Cantilever I-section Beam For 0.5 ton capacity of Floor Mounted Jib Crane”, *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, Vol. 5 No. 1, pp. 85–99.
- Davis, A.G. and Dunn, C.S. (1974), “From Theory to Field Experience with The Non-Destructive Vibration Testing of Piles”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 57 No. 4, pp. 571–593, doi: 10.1680/iicep.1974.3895.
- Dhanoosha, M. and Reddy, V.G. (2016), “Detail Design and Analysis of A Free Standing I Beam Jib Crane”, *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2022), *Skh-1.7.53, Perlindungan Korosi Tiang Pancang Baja / Beton Di Lingkungan Air Laut Dengan Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban Galvanic Zinc*, Jakarta.
- Feng, D. and Feng, M.Q. (2018), “Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review”, *Engineering Structures*, Vol. 156, pp. 105–117, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.018.
- Hafid, A., Salimi, D., Ewitha and Nur, S.H. (2019), “Analysis and Design of Crane Beam of Experimental Power Plant Turbine Building”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1198 No. 8, p. 082031, doi: 10.1088/1742-6596/1198/8/082031.
- Higgs, J.S. and Ismail, H. (1989), *Seismic Shock Test (SST): A New Method for Assessing the Integrity of Piles*, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Higgs, J.S. and Tongue, D.J. (1984), “Advances in The Use of The ‘Modified Shock Test’ System”, *Integrity Testing Pty. Ltd*.
- IAEA. (2002), *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Khoeri, H. and Alisjahbana, S.W. (2023), “Pemeriksaan Getaran Struktur dan Rekomendasi Perkuatan untuk Peningkatan Kapasitas Beban dan Pengurangan Getaran”, *Konstruksia*, Vol. 15 No. 1, p. 79, doi: 10.24853/jk.15.1.79-96.
- Khoeri, H., Alisjahbana, S.W., Widjajakusuma, J. and Najid, N. (2023), “Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar”, *Konstruksia*, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Vol. 14 No. 2, pp. 175–188, doi: 10.24853/jk.14.2.175-188.
- Liebherr. (2014), *Mobile Crane Harbour, Product Range*.
- Meyerhof, G.G. (1976), “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102 No. 3, pp. 197–228, doi: 10.1061/AJGEB6.0000243.

- Pavlović, G., Savković, M., Marković, G., Zdravković, N. and Stanojković, J. (2018), "Optimal design of welded I-beam of slewing pillar jib crane", *IMK-14 - Istraživanje i Razvoj*, Vol. 24 No. 3, pp. 75–82, doi: 10.5937/IMK1803075P.
- Peng, X., Yang, Q., Qin, F. and Sun, B. (2023), "Structural Damage Detection Based on Static and Dynamic Flexibility: A Review and Comparative Study", *Coatings*, Vol. 14 No. 1, p. 31, doi: 10.3390/coatings14010031.
- Przybyłek, G. and Więckowski, J. (2022), "Method of assessing the technical condition and failure of overhead cranes designed to work in difficult conditions", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 16, p. e00811, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00811.
- Zhang, Y. (2017), "Structure Performance Evaluation Method Research of Harbor Portal Crane", *7th International Conference on Education and Management (ICEM)*, Wuhan.