

## Evaluasi Struktur Dermaga Akibat Korosi Berdasarkan SNI 2833-2016 dan SNI 1725-2016

R. Buyung Anugraha A.<sup>1,\*</sup>, M. Sigit D.<sup>1</sup>, Ibnu P. R.<sup>1</sup>, Sulchan A.<sup>1</sup>, Nizarrahman Noor<sup>1</sup>, Yusuf Rahman<sup>1</sup>

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [r\\_buyung\\_aa@ce.its.ac.id](mailto:r_buyung_aa@ce.its.ac.id)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	2 Februari 2020	<i>A material deterioration in civil structures is significant in planning and construction to reach its service life. This paper describes the assessment of 43-year-old civil structures based on the latest standards. The civil structure of this assessment is a loading dock structure located in East Kalimantan. In this assessment, material properties were obtained directly from material testing on site and laboratory. The element's nominal capacity at the 2018 condition was calculated based on material testing results compared to the initial conditions to determine the value of material deterioration. The internal forces due to service load condition, calculated and simulated by using a structure analysis program with 3-dimensional structures modeling according to the latest standards. This loading dock structure assessment, which is modeled as the moment-resisting frame, indicates that the loading dock structure is still safe to use as it functions until 2018 based on safety factor and SNI minimum requirements.</i>
Diperbaiki	19 Agustus 2020	
Disetujui	20 Agustus 2020	

*Keywords: loading dock assessment, material deterioration, destructive test, non destructive test, safety factor.*

**Abstrak**  
Penurunan mutu material pada struktur bangunan merupakan salah satu hal yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan pelaksanaan pembangunannya agar struktur bangunan bisa mencapai umur layannya. Tulisan ini membahas mengenai penilaian (evaluasi) struktur bangunan yang sudah berumur 43 tahun berdasarkan standart perencanaan bangunan terbaru. Evaluasi ini dilakukan terhadap struktur dermaga (*loading dock*) yang terletak di Kalimantan Timur. Data mutu material yang digunakan dalam evaluasi diperoleh langsung dari pengujian dan pengambilan benda uji di lapangan serta uji laboratorium. Hasil pengujian material struktur selanjutnya digunakan dalam menghitung kapasitas penampang elemen struktur pada kondisi saat ini yang kemudian dibandingkan dengan kondisi awal. Gaya-gaya dalam yang digunakan dalam perhitungan diperoleh dari permodelan analisis struktur 3 dimensi dengan pembebanan mengacu pada peraturan yang terbaru. Hasil evaluasi struktur *loading dock* yang dimodelkan sebagai momen resisting frame menunjukkan bahwa struktur *loading dock* masih aman digunakan sebagaimana fungsinya sampai dengan tahun 2018.

Kata kunci: evaluasi loading dock, penurunan mutu material, uji destruktif, uji non destruktif, angka aman.

### 1. Pendahuluan

Korosi didefinisikan sebagai degradasi dari material logam yang diakibatkan oleh reaksi elektro kimia dengan senyawa lain dan lingkungannya [1]. Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimia pada bahan - bahan logam yang pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang kontak langsung dengan lingkungan berair dan oksigen. Berkurangnya kapasitas struktur disebabkan korosi pada baja tulangan yang mengakibatkan diameter tulangan berkurang sehingga luas tulangan tersisa lebih kecil dari luas tulangan mula-mula. Setiap struktur beton bertulang dapat mengalami pengaruh korosi terutama untuk struktur yang tidak terlindung atau dekat dengan laut seperti dermaga. Dalam melaksanakan atau merencanakan suatu konstruksi, kekuatan dan keawetan merupakan tujuan yang penting untuk dicapai. Stewart M.G. (2004), menyatakan korosi pada struktur beton bertulang dapat berakibat pada segi pelayanan (*serviceability*) dan jika

tidak dilakukan perawatan atau pencegahan dengan perbaikan pada struktur maka akan menyebabkan keruntuhan. Korosi pada baja tulangan struktur beton bertulang merupakan penyebab utama dari kerusakan struktural. Secara umum korosi diawali dari retak membujur yang berlanjut pada pengelupasan selimut beton. Pencemaran ion klorida ( $Cl^-$ ), selimut beton yang tidak memenuhi syarat dan kualitas beton yang rendah juga menjadi faktor yang dapat menjadi pemicu terjadinya korosi. Stewart M.G. (2004), juga menyatakan bahwa rendahnya kualitas pekerjaan beton menghasilkan beton yang tidak padat dan tebal selimut yang tidak memenuhi peraturan dan persyaratan teknis. Tebal selimut beton tidak sesuai dan beton yang tidak padat akan memungkinkan kadar garam (*chlorida*) dari air laut masuk kedalam beton sampai ke tulangan kemudian berakumulasi hingga konsentrasi tertentu dan menghancurkan lapisan perlindungan pasif pada tulangan [2].

Pengaruh air laut terhadap struktur beton bertulang dapat menyebabkan terjadinya penurunan (*deterioration*) mutu

material beton dan korosi pada baja. Struktur bangunan sipil yang sudah berumur lebih dari 25 tahun, pada umumnya mulai menunjukkan gejala kerusakan terutama yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan di sekitarnya. Lingkungan yang agresif (korosif) berdampak terjadinya penurunan mutu material beton dan korosi pada baja tulangan [3]. Disamping pengaruh lingkungan, dengan berjalannya waktu, proses penurunan kekuatan material (*material strength degradation*) terus berlangsung akibat umur material yang terus bertambah (*aging*). Sehubungan dengan hal tersebut, perlu langkah penanganan yang tepat agar tanda-tanda kerusakan pada bangunan bisa dikendalikan dan diatasi, sehingga tidak mengganggu pengoperasian fasilitas infrastruktur yang ada.

Perhitungan beban gempa mengacu pada standar perencanaan jembatan terhadap beban gempa SNI 2833-2016 [4] yang merupakan revisi dari standar sebelumnya SNI 2833-2008. Perubahan yang mendasar dalam standar ini adalah penggunaan peta zona gempa baru dan juga tata cara perhitungan beban gempa. Pada SNI 2833-2008 beban gempa direncanakan berdasarkan umur rencana jembatan 50 dan 100 tahun sebanding dengan periode ulang gempa 500 tahun dan 1000 tahun, sedangkan pada SNI 1726-2012 dibuat dengan periode ulang gempa 1000 tahun yang didasarkan pada probabilitas kejadian 7% dalam kurun waktu 75 tahun. Perbedaan periode ulang ini menyebabkan adanya peningkatan gaya gempa rencana yang harus diberikan pada struktur. Di tahun 2016 BSN juga mengeluarkan standar pembebanan pada jembatan SNI-1725-2016 [5] yang menggantikan standar sebelumnya RSNI T-02-2005. Untuk jenis pembebanan yang diperhitungkan tidak ada perbedaan antara SNI 1725-2016 dengan RSNI T02-2003, hanya saja secara garis besar SNI 1725-2016 mengelompokkan beban menjadi 2 kelompok besar, yaitu beban permanen dan beban transien. Adanya dua standar perencanaan yang baru yaitu SNI 2833-2016 dan SNI 1725-2016 tersebut, menyebabkan struktur bangunan yang telah beroperasi lebih dari 25 tahun perlu dievaluasi kembali kinerja strukturnya. Evaluasi terhadap kinerja struktur pada bangunan yang sudah berumur lebih dari 25 tahun perlu dilakukan karena selain struktur telah mengalami penurunan kekuatan material, perencanaan bangunan yang sudah berumur 25 tahun lebih dipastikan belum memperhitungkan beban gempa sebagaimana yang ada dalam peraturan terbaru. Penelitian mengenai evaluasi kinerja struktur akibat penurunan kekuatan material dan berdasarkan SNI telah dilakukan sebelumnya antara lain oleh Christiawan dkk. [6]; Madutujuh dkk. [7]; Refani dkk. [8]; Bayuaji dkk. [9]. Para peneliti tersebut melakukan evaluasi bangunan berdasarkan mutu

material dan kondisi struktur bangunan eksisting pada bangunan yang usianya berkisar antara 15 sampai dengan 50 tahun. Pada tulisan ini disampaikan hasil penelitian yang dilakukan pada salah satu fasilitas infrastruktur laut berupa dermaga (*loading dock*) dengan kapasitas kapal sandar sebesar 125.000 m<sup>3</sup> LNG atau setara dengan bobot kapal 114.277 GRT berlokasi di Kalimantan Timur.

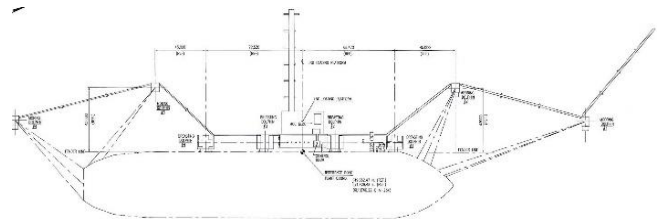
Hasil survei awal di *loading dock* yang telah beroperasi selama 43 (empat puluh tiga) tahun sejak dibangun pada tahun 1975, secara umum masih dalam kondisi baik, tetapi di beberapa tempat ditemukan gejala kerusakan akibat korosi yang perlu mendapat penanganan segera agar tidak terjadi kerusakan yang lebih parah. Evaluasi yang dilakukan terhadap struktur *loading dock* dengan umur 43 tahun tersebut didasarkan pada SNI 2833-2016 dan SNI 1725-2016 dengan kegiatan meliputi pengambilan sampling material kondisi aktual, analisa struktur dengan beban gempa serta evaluasi terhadap penampang elemen struktur.

## 2. Metode

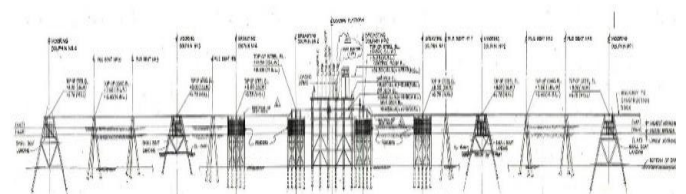
Kegiatan dalam pelaksanaan evaluasi struktur *loading dock* yang berlokasi di Kalimantan Timur ini meliputi survey kondisi struktur, pengumpulan data, analisis dan evaluasi struktur [10] dengan tahapan pelaksanaan evaluasi adalah sebagai berikut:

### 1. Survei pendahuluan

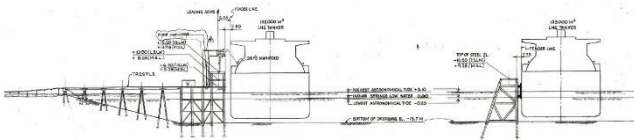
Survei pendahuluan dilakukan untuk memperoleh data-data dan dokumen teknis struktur *loading dock* yang meliputi informasi data sistem struktur, data material, parameter dan kriteria perencanaan yang digunakan perencanaan terdahulu. Kompilasi data dan pengukuran di lokasi *loading dock* sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 1** sampai dengan **Gambar 3** juga dilakukan guna keperluan evaluasi.



**Gambar 1.** Denah *Loading Dock*



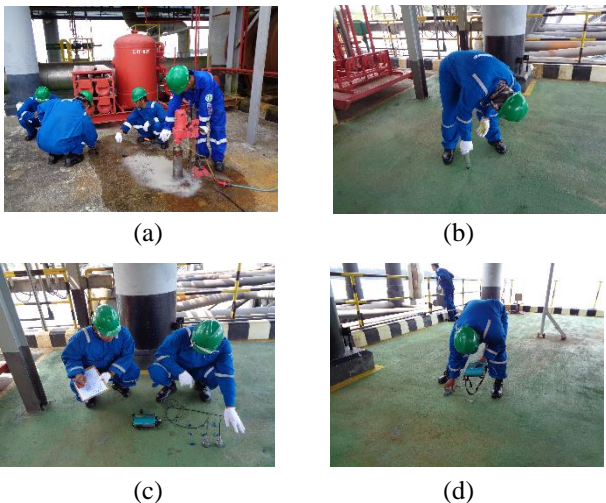
**Gambar 2.** Potongan Memanjang *Loading Dock*



**Gambar 3.** Potongan Melintang Loading Dock

## 2. Survei kondisi struktur, pengambilan sampel dan pengujian

Survei kondisi struktur secara visual dilakukan untuk memetakan kondisi dan jenis kerusakan sudah yang terjadi. Dokumentasi pengamatan visual yang dilakukan terhadap kerusakan-kerusakan meliputi lokasi retak, lokasi pelapukan, lokasi beton pecah (*spalling*) dan lokasi korosi. Untuk memastikan mutu material yang aktual, dilakukan pengambilan sampel di lapangan (*destructive test*) untuk diuji di laboratorium. Pengambilan sample dilakukan dengan *core drill* (ASTM C42/C42M - 13 2013) [11] yang selanjutnya dilakukan uji kuat tekan beton dan tarik baja terhadap sample dari lapangan tersebut. Pengujian *non destructive* di lapangan yang juga dilakukan untuk mengetahui mutu material beton dan letak baja tulangan adalah uji keseragaman mutu beton dengan *Schmidt Hammer* (ASTM C805/C805M - 13a 2013) [12], uji kepadatan beton dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* (ASTM C597 - 09 2009) [13] serta pengukuran tebal selimut beton dan jarak tulangan menggunakan *Profometer*. Pelaksanaan pengujian dan proses pengambilan data pada elemen struktur *loading dock* ditunjukkan pada **Gambar 4**.

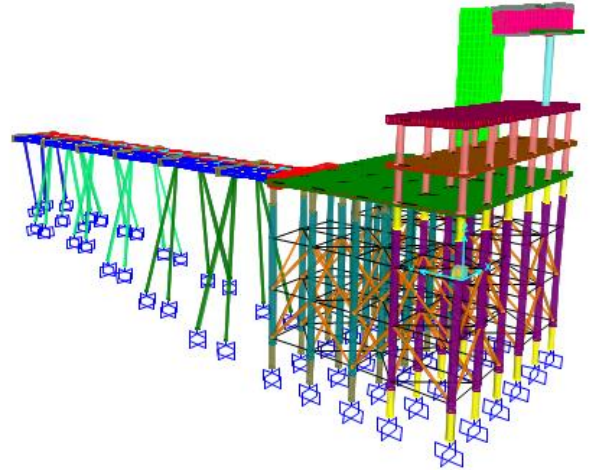


**Gambar 4.** (a) Pengambilan sample dengan *core drill*; (b) Uji *Schmidt Hammer*; (c) Uji *Ultrasonic Pulse Velocity*; (d) Uji *Profometer*.

## 3. Analisa Struktur

Setelah diperoleh data geometri dan penampang elemen struktur, selanjutnya dilakukan analisis struktur dengan membuat permodelan struktur *loading dock* menggunakan

data material hasil pengujian di lapangan dan di laboratorium. Permodelan struktur dilakukan dengan menggunakan program bantu SAP 2000 Versi 15 (*licensed*) seperti pada **Gambar 5**. Hasil *output* berupa gaya-gaya dalam dari program SAP 2000 selanjutnya digunakan pada analisa penampang untuk mengetahui apakah kapasitas penampang dengan kondisi material aktual masih memenuhi persyaratan menahan gaya-gaya dalam tersebut.



**Gambar 5.** Permodelan Struktur Loading Dock

Struktur *loading dock* dimodelkan menggunakan program bantu SAP2000 Versi 15 sebagai *momen resisting frame*. Evaluasi terhadap kinerja struktur dilakukan dengan mempertimbangkan *operation condition* dan *earthquake condition*. Hasil permodelan selanjutnya dianalisa sampai diperoleh angka keamanan (*safety factor*) kondisi awal. Tahapan berikutnya dilakukan perhitungan serta analisa kembali berdasarkan kondisi dan mutu material hasil pengujian. Kondisi dan mutu material yang diperhitungkan meliputi penurunan kualitas material beton, pengurangan diameter baja tulangan serta pengurangan ketebalan pipa tiang pancang baja (*steel pipe pile*) yang sudah terjadi selama 43 tahun, sehingga diperoleh angka keamanan (*safety factor*) kondisi saat ini.

Data elemen struktur, mutu bahan, kondisi oseanografi dan pembebanan yang digunakan sebagai input pada permodelan struktur *loading dock* adalah sebagai berikut:

### 1. Elemen Struktur

- Plat beton *loading platform* lantai 1 : 400 mm
- Plat beton *loading platform* lantai 2 : 450 mm
- Plat beton *loading platform* lantai 3 : 750 mm
- Kolom baja *steel pipe pile*  $\varnothing$  762 mm,  $t = 12.7$  mm
- Pondasi tiang pancang baja *steel pipe pile*  $\varnothing$  762 mm,  $t = 25.4$  mm dengan *bracing* baja *steel pipe*  $\varnothing$  324 mm,  $t = 9.5$  mm

### 2. Mutu Bahan



Pada perhitungan kondisi awal digunakan mutu beton ( $f'c$ ) sesuai mutu perencanaan sebesar 28 MPa (4000 psi), mutu baja tulangan pada struktur beton sesuai spesifikasi SII 0136 BJTD 40 atau setara dengan  $f_y = 4219 \text{ kg/cm}^2$ , sedangkan mutu baja pada tiang pancang baja adalah A 252 Grade 2 atau setara dengan 240 MPa.

### 3. Kondisi oseanografi

Data tinggi gelombang sebesar 1.20 m dengan kecepatan arus 0.25 m/s, sedangkan data elevasi pasang surut di lokasi struktur *loading dock* adalah sebagai berikut:

- M.S.L (mean sea level) :  $\pm 0.00$
- I.S.L.W (indian spring low water level): - 1.22 MSL
- L.A.T (Lowest Astronomical Tide) : - 1.42 MSL
- H.A.T (Highest Astronomical Tide) : + 1.88 MSL
- Elevasi *seabed* (dasar laut) : - 13.70 MSL

### 4. Pembebanan

#### - Beban Mati

Beban mati struktur *loading dock* dihitung berdasarkan berat satuan material beton bertulang sebesar  $2.40 \text{ t/m}^3$  dan material baja sebesar  $7.85 \text{ t/m}^3$ .

#### - Beban Hidup

Beban hidup merata yang digunakan dalam permodelan dan analisa struktur sebesar masing-masing  $1 \text{ t/m}^2$  pada *loading platform* lantai 1 dan *trestle*, serta masing-masing  $0.50 \text{ t/m}^2$  pada *loading platform* lantai 2, lantai 3, *berthing* dan *mooring dolphin*.

Beban hidup terpusat pada *trestle* dan *loading platform* lantai 1 berupa *crane driving* dengan beban maksimum 35 ton pada saat operasi. Pada *loading platform* lantai 3 terdapat 5 (lima) buah *load arm* dengan beban masing-masing pada saat operasi sebesar 50 kips.

#### - Beban Arus

Perhitungan beban arus pada pondasi tiang pancang berdasarkan *Technical standards for Port and Harbour Facilities in Japan* [14] dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_0 A_L U^2$$

dengan:

- FD : gaya seret akibat arus (kN)
- FL : gaya angkat akibat arus (kN)
- CD : koefisien seret
- CL : koefisien angkat
- $\rho$  : berat jenis air laut ( $\text{t/m}^3$ ) ( $\rho = 1,03 \text{ t/m}^3$ )
- A : luas penampang sejajar arus ( $\text{m}^2$ )
- AL : luas penampang tegak lurus arus ( $\text{m}^2$ )
- U : kecepatan arus (m/s)

Diameter (D) tiang pancang = 0.762 m

Panjang (L) tiang pancang = 15.58 m

Luas penampang sejajar arus:

$$A = \left( \pi \times \frac{D}{2} \right) \times (\text{L tiang pancang})$$

$$= \left( \pi \times \frac{0.762}{2} \right) \times (15.58) = 18.65 \text{ m}^2$$

Koefisien seret (CD) = 0.7

Kecepatan arus (U) = 0.25 m/s

Gaya seret akibat arus ( $F_D$ )

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \times 0,7 \times 1,03 \times 18,65 \times 0.25^2 = 0.420 \text{ KN}$$

Gaya angkat akibat arus ( $F_L$ )

Koefisien angkat (CL) = 0, maka gaya angkat (FL) akibat arus adalah 0 KN.

#### - Beban Gelombang

Gaya gelombang yang terjadi pada tiang-tiang pondasi dermaga, dihitung menggunakan persamaan Morison sebagai berikut:

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_o \cdot D \cdot S \cdot V^2 + C_M \cdot \rho_o \cdot a_n \cdot A \cdot S$$

dengan,

$F_n$  : gaya akibat gelombang (kN)

CD : koefisien drag

CM : koefisien inerti

$\rho$  : berat jenis air laut ( $\text{t/m}^3$ ) ( $\rho = 1,03 \text{ t/m}^3$ )

D : diameter tiang pancang (m)

S : tinggi gelombang (m)

V : kecepatan arus (m/s)

$a_n$  : percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A : luas penampang ( $\text{m}^2$ )

Koefisien drag (CD) = 1 dan koefisien inerti (CM) = 2

Luas penampang (A):

$$A = \left( \pi \times \frac{D}{4} \right) = \left( \pi \times \frac{0.762}{4} \right) = 0.456 \text{ m}^2$$

Tinggi gelombang (S) : 1.2 m

Kecepatan arus (V) : 0.25 m/s

Gaya akibat gelombang (FN)

$$F_n = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_o \cdot D \cdot S \cdot V^2 + C_M \cdot \rho_o \cdot a_n \cdot A \cdot S$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,03 \cdot 0.762 \cdot 1,2 \cdot 0.25^2 +$$

$$2 \cdot 1,03 \cdot 9,81 \cdot 0.456 \cdot 1,2 = 11088.5 \text{ N}$$

#### - Beban Gempa

Analisa terhadap pengaruh beban gempa pada evaluasi ini menggunakan metode analisa respon spektrum yang mengacu pada SNI 2833-2016 sebagai acuan dasar perencanaan dan perancangan infrastruktur tahan gempa di Indonesia. Peta hazard gempa Indonesia yang dipakai dalam permodelan bangunan ini bersumber dari [petagempa.pusjantan.co.id](http://petagempa.pusjantan.co.id) yaitu peta percepatan puncak (PGA) dan respon spektra percepatan di batuan dasar (SB) untuk perioda pendek 0.2 detik ( $S_s$ ) dan

untuk perioda 1.0 detik (S1) dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun (periode ulang gempa 1000 tahun). Parameter desain respon spektrum gempa digunakan salah satu daerah di Provinsi Kalimantan Timur.

Penentuan kelas situs kondisi tanah dilakukan berdasarkan hasil pengujian tanah dengan bor dalam yang dilakukan di sekitar lokasi struktur *loading dock*. Hasil pengujian tanah menunjukkan bahwa kondisi tanah di sekitar struktur *loading dock* didominasi oleh lapisan lempung keras dengan nilai SPT 20 di kedalaman -13 m ke bawah serta ketebalan lapisan lempung mencapai 1.50 m di bawah *seabed*, setelah itu terdapat lapisan tanah pasir dengan SPT 30 setebal 3 m dan tanah lempung sangat keras dengan nilai SPT 25 setebal 13 m (sampai kedalaman 30.50 m). Uraian kondisi tanah diatas ditabelkan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Nilai N-SPT dan Jenis Tanah

Kedalaman (m)	N-SPT	Jenis Tanah
-13.00	20	Stiff Clay
-14.50	30	Sand
-17.50	25	Very Stiff Clay
-30.50	25	Very Stiff Clay

Berdasarkan data pada **Tabel 1**, nilai tahanan penetrasi standar rata-rata pada lapisan tanah adalah:

$$\bar{N} = \frac{\sum ti}{\sum Ni} = \frac{17,5}{0,695} = 25,17$$

Perhitungan diatas menunjukkan bahwa nilai SPT rata-rata pada data tanah > 25, sehingga berdasarkan SNI 2833-2016 Pasal 5.3.1 **Tabel 2**, tanah dikategorikan sebagai kelas situs Tanah Sedang (SD).

**Tabel 2.** Klasifikasi Kelas Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_1$ (m/s)	$\bar{N}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
A. Batuan Keras	$\bar{V}_1 \geq 1500$	N/A	N/A
B. Batuan	$750 < \bar{V}_1 \leq 1500$	N/A	N/A
C. Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak	$350 < \bar{V}_1 \leq 750$	$\bar{N} > 50$	$\bar{S}_u > 100$
D. Tanah Sedang	$175 < \bar{V}_1 \leq 350$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$50 < \bar{S}_u < 100$
E. Tanah Lunak	$\bar{V}_1 \leq 175$	$15 \leq \bar{N}$	$\bar{S}_u < 50$

Atau setiap lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut :

- Indeks plastisitas, PI > 20
- Kadar air (w) ≥ 40%, dan
- Kuat geser tak terdrainase  $\bar{S}_u < 25$  kPa

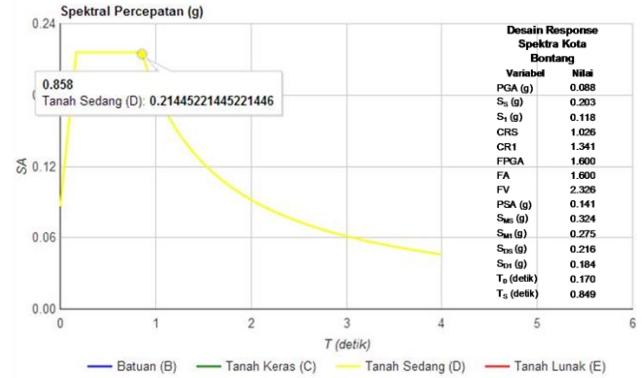
(Sumber : SNI 2833-2016)

Berdasarkan peta gempa percepatan puncak di batuan dasar untuk kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun di Kota didapatkan nilai :

PGA : 0,06  
 SS : 0,126

S1 : 0,099

Hasil perhitungan parameter spektra, dapat digambarkan dalam sebuah grafik *respons spectrum* seperti pada **Gambar 6**.



**Gambar 6.** Grafik Respons Spectrum

- Kombinasi Pembebanan

Gaya-gaya internal *ultimate* yang timbul akibat beban ultimate (Mu) diperoleh dari beberapa kombinasi pembebanan sebagai berikut.

$$U = 1,3D + 1,8L$$

$$U = 1,3D + 1,8L + 1,2WL$$

$$U = 1,3D + 1,0E + 0,3L$$

$$U = 1D + 1E + 0,5L$$

- Perhitungan Kedalaman *Point of Fixity*

Permodelan pondasi tiang pancang baja menggunakan pendekatan kedalaman titik penjepitan dibawah elevasi *seabed* atau dasar laut. Perhitungan kedalaman titik penjepitan mengacu pada *Coastal Construction Manual; FEMA P-55* [15] menggunakan persamaan berikut.

$$d = 1.8 \frac{EI^{1/5}}{nh}$$

dengan,

- d = kedalaman seabed ke titik jepit (m)
- E = Modulus elastisitas tiang baja (MPa)
- I = Inersia tiang baja (mm<sup>4</sup>)
- nh = Modulus subgrade reaction

Elevasi kedalaman titik penjepitan dari pondasi tiang pancang pada struktur *loading dock*.

- Modulus elastisitas baja = 200000 Mpa
- Outside dia. of steel pipe = 762 mm
- Thickness of steel pipe = 15,9 mm
- Momen inersia penampang =  $\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$

$$= 16549683775.08 \text{ mm}^4$$

Jenis tanah pada *seabed* di lokasi *loading dock* berupa *dark grey clayey sandy silt* dengan nilai *modulus subgrade reaction* mengacu **Tabel 3** termasuk jenis tanah *fine to silty fine sand*.

**Tabel 3.** Nilai *Modulus of Subgrade Reaction*

Soil Type	$n_h$ Modulus of Subgrade Reaction (pound/cubic inch)
Dense sandy gravel	800 to 1,400
Medium dense coarse sand	600 to 1,200
Medium sand	400 to 1,000
Fine to silty fine sand	290 to 700
Medium clay (wet)	150 to 500
Soft clay	6 to 150

(Sumber : Coastal Construction Manual; FEMA P-55)

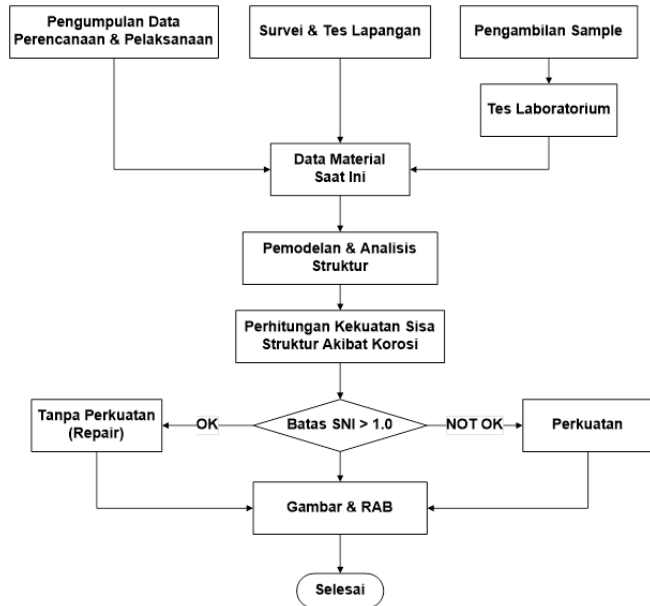
Berdasarkan pada **Tabel 3**, digunakan nilai  $n_h$  sebesar 290 pound/inch<sup>3</sup> = 0.0787197 N/mm<sup>3</sup>, sehingga kedalaman titik penjepitan diukur dari seabed adalah:

$$d = 1.8 \frac{EI^{1/5}}{n_h}$$

$$= 1.8 \frac{200000 \times 16549683775,08^{1/5}}{0.0787197} = 3,802 \text{ m}$$

Untuk pendekatan yang lebih konservatif, digunakan nilai  $d$  sebesar 4,00 m.

Tahapan evaluasi terhadap struktur *loading dock* ditunjukkan sebagaimana bagan alir pada **Gambar 7**. Batas SNI yang digunakan merupakan persyaratan dan ketentuan sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847-2013 [16], 1729-2015 [17], RSNI T-12-2004 [18] dan T-03-2005 [19].



**Gambar 7.** Bagan Alir Evaluasi Struktur *Loading Dock*

**3. Hasil dan Pembahasan**

Pada tahap perhitungan kekuatan sisa struktur akibat korosi, permodelan dan analisis struktur dilakukan berdasarkan data mutu beton dan luasan tulangan dari hasil analisa laboratorium serta hasil pengukuran ketebalan pipa

yang diperoleh dari hasil pengujian lapangan. Berdasarkan hasil pengujian dan pengukuran diperoleh data penurunan kualitas beton, luasan tulangan dan ketebalan tiang pancang saat ini akibat bertambahnya umur struktur dan korosi.

1. Pengamatan visual kondisi struktur

Pengamatan visual kondisi elemen struktur pada *loading dock* dilakukan untuk mendeteksi apabila pada elemen tersebut terdapat retak-retak yang membahayakan struktur. Hasil pengamatan visual yang sudah dilakukan menunjukkan kondisi struktur *loading dock* masih cukup baik. Kondisi *loading platform* yang meliputi *loading platform* lantai 1 sampai dengan 3, kolom dan pondasi tiang pancang masih dalam kondisi yang baik dan tidak ditemukan retak-retak yang membahayakan pada seluruh elemen struktur. Untuk *trrestle*, *berthing dolphin* dan *mooring dolphin* kondisinya sama dengan *loading platform*.

2. Pengujian kuat tekan benda uji beton *core drill*

Jumlah benda uji beton yang diambil dengan cara *core drill* pada saat pelaksanaan pengujian di lapangan sebanyak 19 buah. Pengambilan benda uji dilakukan pada setiap jenis elemen struktur yang meliputi *loading platform* lantai 1, *loading platform* lantai 2, *loading platform* lantai 3, *trrestle* dan *pile cap*. **Tabel 4** menunjukkan hasil pengujian mutu beton pada benda uji.

**Tabel 4.** Hasil pengujian benda uji beton *core drill*

Lokasi Benda Uji	Kode Benda Uji	Kuat Tekan ( $f_c'$ ) (MPa)	$f_c'$ rata – rata (MPa)
<i>Loading platform</i> lantai 1	CD 1.1	22.18	21.35
	CD 1.2	19.92	
	CD 1.3	14.55	
	CD 1.4	24.89	
	CD 1.5	17.48	
	CD 1.6	23.05	
	CD 1.7	20.83	
	CD 1.8	27.94	
<i>Loading platform</i> lantai 2	CD 2.1	21.52	18.66
	CD 2.2	13.81	
	CD 2.3	15.79	
	CD 2.4	23.51	
<i>Loading platform</i> lantai 3	CD 3.1	16.01	22.40
	CD 3.2	27.28	
	CD 3.3	23.81	
	CD 3.4	22.51	
Plat <i>trrestle</i>	CD 4.1	22.86	22.30
	CD 4.2	15.92	
<i>Pile cap</i>	CD 5.1	28.13	28.13
Kuat tekan rata - rata ( $f_{cr} = \sum f_{cr} / n$ )			21.16
Tegangan karakteristik			28.00
Kontrol $f_{c0}$ terhadap mutu rata – rata ( $f_{c0} = 0.85 f_c'$ )			21.16 < 23.80
Kontrol $f_{ci}$ terhadap mutu terendah ( $f_{ci} = 0.75 f_c'$ )			13.81 < 21.00

Dari hasil pengujian benda uji beton *core drill* diperoleh hasil pengujian silinder beton CD 2.2 mempunyai nilai kuat tekan terendah sebesar 13.87 MPa, sedangkan CD 5.1 merupakan benda uji dengan nilai kuat tekan tertinggi sebesar 28.13 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata benda uji dari elemen struktur *loading platform lantai 2* merupakan mutu yang terendah sebesar 18.66 MPa, sedangkan untuk elemen struktur pile cap merupakan yang tertinggi sebesar 28.13 MPa. Hasil uji tekan benda uji silinder beton menunjukkan bahwa kuat tekan rata-rata beton tidak memenuhi persyaratan mutu sebesar 28 MPa.

### 3. Pengujian kuat tarik baja tulangan

Pengujian kuat tarik baja tulangan bertujuan untuk mengetahui mutu baja tulangan yang terpasang pada elemen struktur *loading dock*. Benda uji baja tulangan yang diuji diambil dari benda uji *core drill* sebanyak 5 (lima) buah dan berupa tulangan ulir. Dari hasil uji tarik baja tulangan **Tabel 5**, diperoleh hasil kuat tarik terendah sebesar 461.26 MPa dan kuat Tarik tertinggi sebesar 671.07 MPa dengan kuat tarik rata-rata sebesar 548.40 MPa.

**Tabel 5.** Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan

Uraian	Kuat Tarik ( $f_y$ )
Kuat tarik baja tulangan pada struktur <i>loading platform</i> lantai 1	461.26 MPa
Kuat tarik baja tulangan pada struktur <i>loading platform</i> lantai 2	435.54 MPa
Kuat tarik baja tulangan pada struktur <i>loading platform</i> lantai 3	671.07 MPa
Kuat tarik baja tulangan pada struktur plat <i>trestle</i>	565.44 MPa
Kuat tarik baja tulangan pada struktur <i>pile cap</i>	608.69 MPa
Tegangan karakteristik	400.00 MPa
Kuat tarik rata - rata ( $f_y$ rata-rata)	548.40 MPa

### 4. Pengujian Schmidt Hammer

Pengujian *Schmidt hammer* yang bertujuan untuk mengetahui tingkat keseragaman beton dilakukan sebanyak 54 titik dengan rincian 20 titik pada *loading platform lantai 1*, 10 titik pada *loading platform lantai 2*, 10 titik pada *loading platform lantai 3*, 12 titik pada plat *trestle* dan 2 titik pada *pile cap*. Nilai tegangan yang dihasilkan dari rata-rata nilai *rebound* pengujian *Schmidt hammer* **Tabel 6**. Pengujian *Schmidt hammer* dilakukan sebanyak 10 kali pukulan pada setiap titik, selanjutnya nilai rata-rata *rebound* dari uji *Schmidt hammer* diterjemahkan ke dalam tegangan ( $f_c'$ ) berdasarkan korelasi dengan nilai kuat tekan benda uji *core drill*.

**Tabel 6.** Hasil pengujian *Schmidt hammer*

Uraian	$f_c'$ minimum (MPa)	$f_c'$ maksimum (MPa)	$f_c'$ rata - rata (MPa)
Tegangan beton pada struktur <i>loading platform</i> lantai 1	18.09	25.79	20.21
Tegangan beton pada struktur <i>loading platform</i> lantai 2	18.26	25.39	22,41
Tegangan beton pada struktur <i>loading platform</i> lantai 3	19.57	29.13	24,02
Tegangan beton pada struktur plat lantai <i>trestle</i>	18.38	28.39	20.80
Tegangan beton pada struktur <i>pile cap</i>	23.98	24.09	24.04
Tegangan karakteristik			28.00
Kontrol $f_{co}$ terhadap mutu rata - rata ( $f_{co} = 0.85 f_c'$ )			22.30 < 23.80
Kontrol $f_{ci}$ terhadap mutu terendah ( $f_{ci} = 0.75 f_c'$ )			18.09 < 21.00

Nilai rata-rata tegangan beton dibedakan menjadi 5 (lima) sesuai dengan lokasi pengujian, yaitu *loading platform* lantai 1, *loading platform* lantai 2, *loading platform* lantai 3, plat lantai *trestle* dan *pile cap*. Nilai rata-rata tegangan tekan beton maksimum diperoleh dari hasil *rebound* rata-rata pada elemen *pile cap* sebesar 24.04 MPa, sedangkan untuk nilai tegangan tekan beton minimum terdapat pada elemen *loading platform lantai 1* sebesar 20.21 MPa. Dari hasil uji *Schmidt hammer* terdapat 3 (tiga) lokasi yang nilai tegangan rata-rata nya tidak memenuhi kuat tekan yang disyaratkan yaitu 23.80 MPa, tetapi hanya 1 (satu) nilai tegangan minimum pada struktur *pile cap* yang memenuhi syarat terhadap mutu beton minimum sebesar 21.00 MPa.

### 5. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian *ultrasonic pulse velocity (UPV)* bertujuan untuk menguji tingkat kepadatan beton yang dilakukan secara *indirect*. Pelaksanaan pengujian dilakukan pengamatan sebanyak 6 nilai kecepatan pada setiap titik. Nilai kecepatan rata-rata ( $v$ ) selanjutnya dikorelasikan dengan tegangan beton dari benda uji *core drill*. Pengujian UPV dilakukan dilakukan sebanyak 54 titik dengan rincian 20 titik pada *loading platform* lantai 1, 10 titik pada *loading platform* lantai 2, 10 titik pada *loading platform* lantai 3, 12 titik pada plat lantai *trestle* dan 2 titik pada *pile cap*. Tabel 7 menunjukkan hasil pengujian UPV pada tiap-tiap elemen struktur *loading dock*. Pada tabel tersebut terlihat bahwa kepadatan beton rata-rata pada masing-masing elemen struktur masih termasuk kategori cukup.

### 6. Pengujian Rebar Locator

Pengujian *rebar locator* dilakukan untuk mengetahui jarak antar tulangan atau jumlah tulangan yang terpasang

pada masing-masing elemen struktur. **Tabel 8** menunjukkan jarak antar tulangan atau jumlah tulangan terpasang pada tiap elemen struktur yang diperoleh dari pengujian *rebar locator*. Jarak antar tulangan atau jumlah tulangan pada tiap elemen struktur tersebut selanjutnya dievaluasi menggunakan mutu material sebagaimana hasil pengujian. Hasil pengukuran ketebalan selimut beton pada masing-masing elemen beton disampaikan pada **Tabel 8**.

**Tabel 7.** Hasil pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity*

Uraian	Minimum (μ/s)	Maksimum (μ/s)	Rata – rata (μ/s)
Kecepatan rambatan pada beton <i>loading platform lantai 1</i>	1600.00 (Kurang)	4215.00 (Baik)	2186.67 (Cukup)
Kecepatan rambatan pada beton <i>loading platform lantai 2</i>	1755.00 (Kurang)	2328.33 (Cukup)	2144.67 (Cukup)
Kecepatan rambatan pada beton <i>loading platform lantai 3</i>	1836.67 (Kurang)	3226.67 (Cukup Baik)	2337.33 (Cukup)
Kecepatan rambatan pada beton plat <i>trestle</i>	1696.67 (Kurang)	3333.33 (Cukup Baik)	2222.08 (Cukup)
Kecepatan rambatan pada beton <i>pile cap</i>	2998.33 (Cukup)	3033.33 (Cukup Baik)	3015.83 (Cukup)

Klasifikasi kecepatan rambatan :  
 $V < 2130$  m/s Kurang ;  $2130$  m/s  $< V < 3060$  m/s Cukup ;  $3060$  m/s  $< V < 3670$  m/s Cukup baik ;  $3670$  m/s  $< V < 4570$  m/s Baik ;  $V > 4570$  m/s Baik sekali.

**Tabel 8.** Hasil pengujian *Rebar Locator*

Uraian	Tebal (mm)	Jarak Rata-rata Tulangan (mm)		Tebal Rata-rata Selimut Beton (mm)	
		X	Y	X	Y
Struktur Plat Beton <i>Loading Platform Lantai 1</i>	400.00	161.40	156.40	73.00	74.00
Struktur Plat Beton <i>Loading Platform Lantai 2</i>	450.00	147.60	148.60	68.20	66.50
Struktur Plat Beton <i>Loading Platform Lantai 3</i>	750.00	139.00	136.40	56.90	57.50
Struktur Plat Beton <i>Trestle</i>	200.00	131.70	145.70	59.80	59.40

Uraian	Dimensi (mm)	Tulangan Lentur (mm)		Tulangan Geser (mm)	
		Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
Struktur <i>Pile Cap Trestle</i>	1400 x 1000	7 - D22	7 - D22	D13-298	D13-290
		9 - D22	7 - D22		

Pada struktur *loading platform* lantai 1 dari sebanyak 20 titik pengujian diperoleh tebal selimut beton rata-rata 73,5 mm, struktur *loading platform* lantai 2 dari 10 titik pengujian diperoleh tebal selimut beton rata-rata 67,4 mm,

struktur *loading platform* lantai 3 dari 10 titik pengujian diperoleh tebal selimut beton rata-rata 57,2 mm, struktur plat *trestle* dari 12 titik pengujian diperoleh tebal selimut beton rata-rata 59,6 mm dan struktur *pile cap trestle* dari 2 titik pengujian diperoleh tebal selimut beton rata-rata 44,70 mm. Sesuai SNI 2843-2013 maka tebal selimut minimum untuk lingkungan air laut minimal 50 mm.

7. Korosi Pada Baja Tulangan

Laju korosi merupakan kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Pengukuran secara mikro dilakukan untuk mengetahui ketebalan korosi yang terjadi pada baja tulangan. Korosi pada baja tulangan diukur berdasarkan benda uji baja tulangan yang terambil pada saat pengambilan benda uji *core drill*. Hasil pengukuran korosi pada baja tulangan ditampilkan pada **Tabel 9**.

**Tabel 9.** Hasil Analisa Ketebalan Korosi Baja Tulangan

No	Kode Core Drill	Lokasi Benda Uji	Ketebalan Korosi (μ m)	Struktur Mikro
1	1.1	Loading Platform Lt. 1	507.45	<i>Pearlite dan ferrite</i>
2	1.8	Loading Platform Lt. 1	1310.32	<i>Pearlite dan ferrite</i>
3	2.3	Loading Platform Lt. 2	1010.34	<i>Pearlite dan ferrite</i>
4	3.2	Loading Platform Lt. 3	765.85	<i>Pearlite dan ferrite</i>
5	6.1	Trestle	1371.26	<i>Pearlite dan ferrite</i>

Perhitungan pengurangan luasan tuangan akibat korosi menggunakan model korosi seragam **Gambar 8**. Korosi seragam lebih mudah diperhitungkan dibandingkan dengan korosi setempat dan juga menghasilkan perkiraan kapasitas yang lebih aman (konservatif) [20]. Persamaan yang digunakan untuk menghitung pengurangan luasan tulangan adalah:

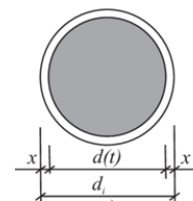
$$\varnothing_{res} = \lambda \cdot i_{corr} \cdot t_p$$

Dengan:

$\varnothing_{res}$  : diameter tulangan sesudah korosi (mm)

$\lambda$  : faktor untuk mengubah kerapatan korosi rata-rata untuk tingkat penetrasi rata-rata ( $2,3294 \cdot 10^{-2}$  mm/(μA/cm<sup>2</sup>))

$t_p$  : waktu propagasi korosi (tahun)



**Gambar 8.** Ilustrasi Perhitungan Luas Tulangan



Luasan tulangan awal sesuai dengan *as built drawing* **Tabel 10-11**.

**Tabel 10.** Luas Tulangan Awal Sesuai *As Built Drawing* Pada Loading Lantai 1 dan 2.

Lokasi Struktur	Letak dan Posisi	B (Lebar) mm	As mm <sup>2</sup>	As' mm <sup>2</sup>	
Loading Platform Lantai 1	Column Mx	Tumpuan	850	2628.21	1810.29
		Lapangan	850	1810.29	564.34
	Strip My	Tumpuan	850	2628.21	1810.29
		Lapangan	850	1810.29	564.34
	Mid Strip	Mx	1000	2212.57	885.24
		My	1000	2212.57	885.24
Loading Platform Lantai 2	Column Mx	Tumpuan	900	3662.21	2792.43
		Lapangan	900	1810.29	1408.00
	Strip My	Tumpuan	750	5448.93	2011.43
		Lapangan	750	1810.29	1408.00
	Mid Strip	Mx	1000	1005.71	1005.71
		My	1000	1340.95	1340.95

**Tabel 11.** Luas Tulangan Awal Sesuai *As Built Drawing* Pada Loading Lantai 3 dan Trestle.

Lokasi Struktur	Letak dan Posisi	B (Lebar) mm	As mm <sup>2</sup>	As' mm <sup>2</sup>	
Loading Platform Lantai 3	Column Mx	Tumpuan	900	5775.00	1701.86
		Lapangan	900	2209.82	1276.39
	Strip My	Tumpuan	750	5914.66	1701.86
		Lapangan	750	4080.80	1841.52
	Mid Strip	Mx	1000	2946.43	1701.86
		My	1000	4827.43	1701.86
Plat Lantai Trestle	Arah X Mx	Tumpuan	1000	1114.10	1114.10
		Lapangan	1000	1114.10	1114.10
	Arah Y My	Tumpuan	600	657.05	657.05
		Lapangan	600	657.05	657.05

Perhitungan  $A_{st}$  yang tersisa dalam waktu tertentu (T) untuk model *uniform pitting* menggunakan persamaan  $A_{st} = \frac{1}{4}\pi(D_0 - x)^2$ . Sisa luasan tulangan akibat korosi pada saat dilakukan evaluasi (tahun 2018) **Tabel 12**. Perhitungan sisa luasan tulangan juga mempertimbangkan kecepatan laju korosi rata-rata yang didapat dari asumsi teoritis dengan  $i_{corr}$  0,021 mm/tahun.

#### 8. Korosi Pada Tiang Pancang Baja

Perhitungan sisa kekuatan struktur pondasi tiang pancang baja *loading dock* yang telah mengalami degradasi material akibat korosi, dilakukan berdasarkan hasil pengukuran langsung (*direct method*) ketebalan di permukaan tiang pancang baja pada struktur *loading platform, walkway, trestle, berthing* dan *mooring dolphin*.

Hasil pengukuran ketebalan tiang pancang baja **Tabel 13-14**.

Hasil perhitungan laju korosi pada tiang pancang baja struktur *loading dock* yang sudah beroperasi selama 43 tahun berkisar antara 0.028 sampai dengan 0.091 mm/tahun, hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat ketahanan material tiang pancang baja termasuk dalam kategori baik dengan nilai laju korosi sebesar 0.02 - 0.10 mm/tahun.

**Tabel 12.** Perhitungan Sisa Luasan Baja Tulangan

Lokasi Struktur	Letak dan Posisi	Sisa Luasan Baja Tulangan Tahun 2018 Kondisi Rata-rata		
		Ast mm <sup>2</sup>	Prosentase (%)	
Loading Platform Lantai 1	Column Mx	Tumpuan	2251.30	85.66%
		Lapangan	1483.41	81.94%
	Strip My	Tumpuan	2251.30	85.66%
		Lapangan	1483.41	81.94%
	Mid Strip	Mx	1813.06	81.94%
		My	1813.06	81.94%
Loading Platform Lantai 2	Column Mx	Tumpuan	3155.48	86.16%
		Lapangan	1483.41	81.94%
	Strip My	Tumpuan	4681.39	85.91%
		Lapangan	1483.41	81.94%
	Mid Strip	Mx	824.12	81.94%
		My	1098.83	81.94%
Loading Platform Lantai 3	Column Mx	Tumpuan	5178.29	89.67%
		Lapangan	1949.88	88.24%
	Strip My	Tumpuan	5362.14	90.66%
		Lapangan	3638.63	89.16%
	Mid Strip	Mx	2599.84	88.24%
		My	3651.63	75.64%
Plat Lantai Trestle	Arah X Mx	Tumpuan	1114.10	88.87%
		Lapangan	1114.10	89.24%
	Arah Y My	Tumpuan	657.05	90.55%
		Lapangan	657.05	90.89%

#### 9. Analisa dan Evaluasi Struktur

Analisa struktur yang dilakukan bertujuan untuk melakukan evaluasi terhadap kondisi struktur *loading dock*. Perhitungan kekuatan penampang dilakukan berdasarkan perbandingan kekuatan material penampang dengan hasil gaya-gaya dalam dari analisa struktur. Struktur *loading dock* dimodelkan sebagai *moment resisting frame* dalam bentuk tiga dimensi dengan program bantu SAP 2000 Versi 15. Permodelan beban yang diberikan meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, beban arus, beban gelombang dan beban gempa dan beban angin.

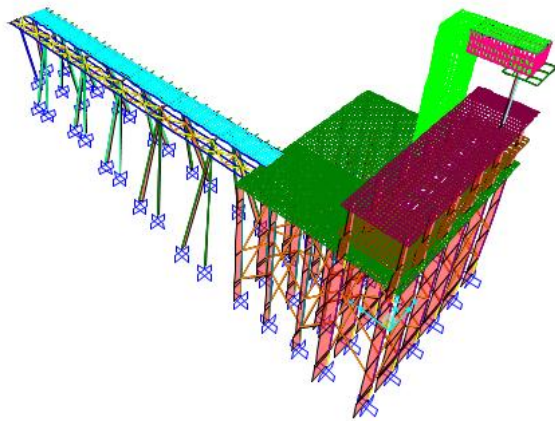
Setelah permodelan struktur *loading dock* dibuat, selanjutnya dilakukan analisis respon model struktur akibat simulasi pembebanan hingga diperoleh gaya-gaya internal (*internal forces*) berupa gaya aksial, momen lentur maupun gaya geser **Gambar 9-11**

**Tabel 13.** Hasil Pengukuran Ketebalan Tiang Pancang Baja Pada Struktur *Loading Platform* dan *Walkway*.

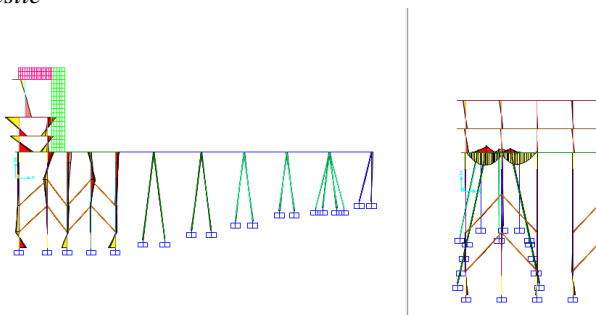
Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Ketebalan Tiang Pancang Baja (mm)		Korosi Rata-rata Per Tahun (mm/thn)		
			Awal 1975	Aktual 2018			
Loading Platform	762	1A	15.90	13.00	0.067		
		1B	15.90	12.80	0.072		
		1C	15.90	13.00	0.067		
		1D	15.90	12.50	0.079		
		1E	15.90	12.40	0.081		
		1F	15.90	12.70	0.074		
		2A	15.90	12.30	0.084		
		2B	15.90	12.90	0.070		
		2C	15.90	12.40	0.081		
		2D	15.90	12.40	0.081		
		2E	15.90	12.90	0.070		
		2F	15.90	12.60	0.077		
		3A	15.90	12.90	0.070		
		3B	15.90	12.70	0.074		
		3C	15.90	12.80	0.072		
		3D	15.90	12.80	0.072		
		Walkway	457	3E	15.90	12.50	0.079
				3F	15.90	12.50	0.079
4A	15.90			12.60	0.077		
4B	15.90			13.00	0.067		
4C	15.90			12.30	0.084		
4D	15.90			12.90	0.070		
4E	15.90			12.70	0.074		
4F	15.90			12.60	0.077		
5A	15.90			12.80	0.072		
5B	15.90			12.60	0.077		
5C	15.90			12.80	0.072		
5D	15.90			13.10	0.065		
		5E	15.90	12.70	0.074		
		5F	15.90	12.70	0.074		
		Rata-rata		12.70	0.074		
		1	15.90	14.50	0.033		
		2	15.90	14.20	0.040		
		3	15.90	14.70	0.028		
		4	15.90	14.20	0.040		
		5	15.90	14.30	0.037		
		6	15.90	14.20	0.040		
		Rata-rata		14.35	0.036		

**Tabel 14.** Hasil Pengukuran Ketebalan Tiang Pancang Baja Pada Struktur *Trestle* dan *Dolphin*.

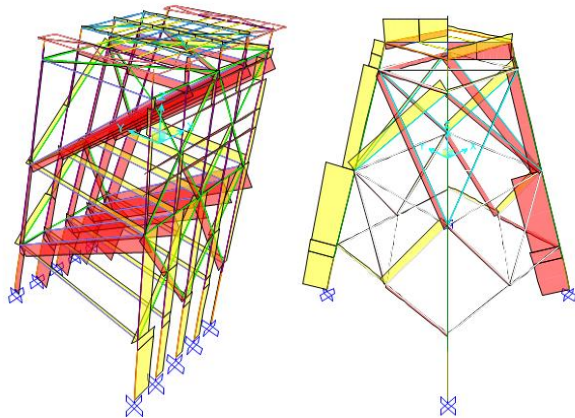
Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Ketebalan Tiang Pancang Baja (mm)		Korosi Rata-rata Per Tahun (mm/thn)		
			Awal 1975	Aktual 2018			
Trestle	508	1	15.90	13.80	0.049		
		2	15.90	13.80	0.049		
		3	15.90	14.00	0.044		
		4	15.90	14.20	0.040		
		1	15.90	12.60	0.077		
		2	15.90	11.70	0.098		
		3	15.90	12.10	0.088		
		4	15.90	12.10	0.088		
		1	15.90	13.00	0.067		
		2	15.90	12.70	0.074		
		3	15.90	12.80	0.072		
		4	15.90	12.60	0.077		
		1	15.90	13.00	0.067		
		2	15.90	13.00	0.067		
		3	15.90	12.60	0.077		
		Berthing Dolphin	762	4	15.90	12.90	0.070
1	15.90			14.40	0.035		
2	15.90			14.50	0.033		
3	15.90			14.20	0.040		
4	15.90			12.80	0.072		
1	15.90			12.50	0.079		
2	15.90			12.50	0.079		
3	15.90			12.90	0.070		
4	15.90			13.40	0.058		
				Rata-rata		13.05	0.066
				1A	15.90	12.90	0.070
				1B	15.90	13.00	0.067
				1C	15.90	12.60	0.077
				1D	15.90	12.60	0.077
				1E	15.90	12.40	0.081
				2A	15.90	12.70	0.074
		2B	15.90	12.50	0.079		
		2C	15.90	12.80	0.072		
		2D	15.90	12.00	0.091		
		2E	15.90	12.50	0.079		
		1A	15.90	12.90	0.070		
		1B	15.90	13.00	0.067		
		1C	15.90	12.60	0.077		
		Rata-rata	15.90	13.34	0.074		
		1D	15.90	12.60	0.077		
		1E	15.90	12.40	0.081		
		2A	15.90	12.70	0.074		
		2B	15.90	12.50	0.079		
		2C	15.90	12.80	0.072		
		2D	15.90	12.00	0.091		
		2E	15.90	12.50	0.079		
		Rata-rata		12.60	0.077		
Mooring Dolphin	762	1A	15.90	12.90	0.070		
		1B	15.90	13.00	0.067		
		2A	15.90	12.60	0.077		
		2B	15.90	12.60	0.077		
		Rata-rata		12.78	0.073		



**Gambar 9.** Gaya Aksial pada Struktur *Loading Platform* dan *Trestle*



**Gambar 10.** Momen Lentur dan Gaya Geser pada Struktur *Loading Platform* dan *Trestle*



**Gambar 11.** Gaya Aksial Pada Struktur *Berthing* dan *Mooring Dolphin*

Gaya-gaya internal hasil dari permodelan diatas selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada evaluasi kekuatan elemen struktur. Pada evaluasi kapasitas penampang, kondisi awal analisis kekuatan nominal penampang elemen struktur didasarkan pada mutu beton rencana, tulangan terpasang, mutu baja rencana dan dimensi tiang pancang baja sesuai gambar *as built drawing*, sedangkan pada kondisi saat dilakukan evaluasi, kekuatan nominal penampang elemen struktur

didasarkan pada hasil pengujian dan pengukuran baik yang dilakukan di lapangan maupun di laboratorium. Perhitungan lebih diutamakan pada besarnya momen nominal struktur ( $M_n$ ) dari elemen-elemen utama yang ada. Penentuan momen nominal  $M_n$  pada kondisi tersebut diatas, dilakukan berdasarkan peraturan SNI 03-2847-2013, sedangkan untuk struktur baja dilakukan berdasarkan SNI 1729-2015. Dasar penetapan kelayakan elemen struktur beton bertulang menggunakan formula sesuai SNI-03-2847 sebagai berikut:

$$\phi M_n > M_u$$

dengan,

$\phi$  : faktor reduksi penampang = 0.90

$M_n$  : kapasitas terpasang penampang (momen nominal)

$M_u$  : momen akibat beban berfaktor

$M_n$  akan berkurang dengan berjalannya korosi (fungsi waktu) sementara  $M_u$  akan tergantung pada beban yang bekerja.

Hasil perhitungan analisa penampang pada elemen struktur beton bertulang *loading platform* dan *trestle* berdasarkan mutu rencana dan hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 15**. Perhitungan momen akibat beban kerja (*service load*) merupakan *output* dari program bantu SAP2000 Versi 15.

**Tabel 15.** Momen Kapasitas Penampang dan Momen Akibat Beban Kerja Pada *Loading Platform* dan *Trestle*

Lokasi Struktur	Letak dan Posisi	Momen Kapasitas Penampang ( $M_N$ ) (ton.m)		Momen Akibat Beban Kerja (M) (ton.m)	
		1975	2018		
Loading Platform Lantai 1	Column Tumpuan	31.81	27.58	15.04	
	Strip Arah X Lapangan	22.83	18.96	8.94	
	Column Tumpuan	31.81	27.58	18.32	
	Strip Arah Y Lapangan	22.83	18.96	10.49	
	Middle Strip	Mx 27.83 23.13	23.13 10.34	8.02	
Loading Platform Lantai 2	Column Tumpuan	50.39	43.81	28.31	
	Strip Arah X Lapangan	26.37	21.92	18.82	
	Column Tumpuan	71.82	62.37	35.75	
	Strip Arah Y Lapangan	26.05	21.63	18.44	
	Middle Strip	Mx 15.54 13.00	13.00 7.37	7.37	
Loading Platform Lantai 3	Column Tumpuan	142.04	127.94	43.46	
	Strip Arah X Lapangan	56.83	50.36	28.29	
	Column Tumpuan	143.95	131.06	38.87	
	Strip Arah Y Lapangan	102.28	91.52	73.42	
	Middle Strip	Mx 75.31 66.72	66.72 61.27	61.27	
Plat Lantai Trestle	Arah X	Tumpuan	19,30	16,72	12,91
		Lapangan	14,71	12,22	9,44
	Arah Y	Tumpuan	16,16	14,01	10,53
	Lapangan	13,84	11,52	9,27	

Dari **Tabel 15** diketahui bahwa kapasitas penampang struktur bangunan atas *loading platform* berupa plat lantai tanpa balok serta *trestle* sampai dengan tahun 2018

kondisinya masih mampu memikul beban yang bekerja. Untuk rasio tegangan antara gaya dalam akibat beban kerja dengan kapasitas penampang pada struktur pondasi *loading dock* ditunjukkan pada **Tabel 16-17**.

Ukuran kinerja struktur (*structure performance*) pada struktur *loading dock* yang telah dioperasikan sejak tahun 1976 menggunakan parameter angka keamanan (*safety factor*) pada masing-masing elemen struktur. Besaran nilai *safety factor* tersebut merupakan rasio antara kapasitas momen nominal penampang struktur ( $M_n$ ) terhadap momen akibat beban kerja ( $M$ ) yang diperoleh dari hasil keluaran (*out put*) simulasi analisa struktur pada *loading platform, trestle, mooring dolphin, berthing dolphin*. Hasil perhitungan *safety factor* struktur beton bertulang *loading platform dan trestle* ditunjukkan pada **Tabel 18**, sedangkan untuk struktur baja pada pondasi *loading platform, trestle, walkway dan dolphin* ditunjukkan pada **Tabel 19-20**.

**Tabel 16.** Rasio Tegangan Pada Struktur Pondasi *Trestle*

Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Rasio Tegangan Pondasi Tiang Pancang Baja	
			Awal	Aktual
			1975	2018
Trestle	508	619	0.271	0.292
		777	0.250	0.270
		888	0.244	0.263
		890	0.270	0.289
		892	0.309	0.329
		894	0.290	0.312
		896	0.279	0.300
		898	0.302	0.321
		900	0.353	0.374
		902	0.344	0.366
		904	0.329	0.350
		906	0.347	0.366
		908	0.411	0.430
		910	0.398	0.421
		918	0.343	0.362
		920	0.348	0.367
		922	0.355	0.375
924	0.376	0.390		

**Tabel 17.** Rasio Tegangan Pada Struktur Pondasi *Loading Platform, Walkway dan Dolphin*

Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Rasio Tegangan Pondasi Tiang Pancang Baja	
			Awal	Aktual
			1975	2018
Loading Platform	762	591	0.391	0.445
		593	0.416	0.497
		596	0.507	0.602
		633	0.515	0.614
		635	0.428	0.509
		674	0.453	0.516
		676	0.345	0.393

Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Rasio Tegangan Pondasi Tiang Pancang Baja	
			Awal	Aktual
			1975	2018
Walkway	457	782	0.216	0.267
		784	0.476	0.552
		786	0.367	0.453
		788	0.367	0.454
		790	0.510	0.593
		792	0.224	0.283
		794	0.265	0.328
		796	0.449	0.518
		798	0.438	0.533
		800	0.447	0.543
		802	0.543	0.625
		804	0.345	0.415
		841	0.279	0.343
		843	0.378	0.451
		845	0.435	0.521
		847	0.343	0.417
		849	0.382	0.442
		591	0.391	0.445
		593	0.416	0.497
		596	0.507	0.602
		633	0.515	0.614
		635	0.428	0.509
		674	0.453	0.516
239	0.249	0.269		
240	0.215	0.234		
242	0.219	0.236		
243	0.254	0.273		
924	0.376	0.390		
228	0.581	0.792		
230	0.493	0.676		
232	0.664	0.869		
234	0.580	0.813		
Berthing Dolphin	762	236	0.652	0.902
		265	0.510	0.679
		267	0.410	0.532
		269	0.573	0.759
		271	0.626	0.829
Mooring Dolphin	762	273	0.750	0.926
		82	0.514	0.624
		84	0.534	0.766
		86	0.632	0.771
		88	0.454	0.630

Angka rasio lebih dari 1 menunjukkan bahwa kapasitas penampang masih lebih besar dari beban yang bekerja. Persyaratan yang harus dipenuhi sesuai ketentuan dalam SNI adalah  $\phi M_n / M_u > 1.0$ , sedangkan besarnya angka keamanan (*safety factor/SF*) didefinisikan sebagai  $SF = M_n / M > 1.0$  dengan  $M$  merupakan momen akibat beban kerja (*service load*). Sisa kekuatan pada struktur merupakan kekuatan sisa pada saat ditinjau (tahun 2018) dengan memperhitungkan adanya efek korosi. Penentuan layak atau tidaknya struktur *loading dock* bukan dari besarnya sisa kekuatan pada saat ditinjau, tetapi dilihat dari besarnya angka keamanan yang

**Tabel 18.** Angka Keamanan Pada Struktur Beton Bertulang *Loading Platform* dan *Trestle*

Lokasi Struktur	$\emptyset Mn$ (ton-m)	$Mu = M \times LF$ (ton-m)	Syarat SNI $\emptyset Mn/Mu > 1$	Angka Keamanan	
				1975	2018
Loading Platform Lantai 1 Arah X	34	20	1.70	2.46	2.06
Loading Platform Lantai 1 Arah Y	39	20	1.95	2.82	2.37
Loading Platform Lantai 2 Arah X	39	10	3.90	5.63	4.73
Loading Platform Lantai 2 Arah Y	39	10	3.90	5.63	4.73
Loading Platform Lantai 3 Arah X	63	30	2.10	3.03	2.55
Loading Platform Lantai 3 Arah Y	100	40	2.50	3.61	3.03
Plat Lantai Trestle	8.67	8.35	1.04	1.50	1.29

**Tabel 19.** Angka Keamanan Pada Struktur Baja Pondasi *Trestle*

Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Angka Keamanan ( <i>safety factor</i> )	
			Pondasi Awal 1975	Tiang Pancang Baja Aktual 2018
Trestle	508	619	3.688	3.427
		777	4.006	3.699
		888	4.104	3.803
		890	3.704	3.455
		892	3.240	3.035
		894	3.450	3.209
		896	3.580	3.337
		898	3.312	3.113
		900	2.831	2.677
		902	2.907	2.734
		904	3.037	2.858
		906	2.881	2.735
		908	2.435	2.323
		910	2.514	2.378
		918	2.913	2.764
		920	2.876	2.728
		922	2.816	2.670
	924	2.658	2.562	

Dari hasil perhitungan dan analisa struktur yang dilakukan, kombinasi beban yang menyebabkan gaya-gaya dalam (internal) paling besar adalah kombinasi beban yang mengandung beban gempa, sedangkan akibat beban gravitasi dan beban hidup gaya yang terjadi tidak sebesar beban akibat gempa. Hal ini sesuai dengan kondisi di lapangan dimana tidak ditemui retak-retak struktural akibat beban gravitasi dan beban hidup.

Hasil analisa dan evaluasi yang dilakukan pada tahun 2018 menunjukkan bahwa struktur *loading dock* yang sudah berumur 43 tahun masih layak dioperasikan sesuai dengan fungsinya berdasarkan angka keamanan (*safety factor*) pada

masing-masing infrastruktur yang ada. Adapun diperlukan penelitian lanjutan untuk memprediksi umur struktur *loading dock* sampai dengan batas yang diijinkan berdasarkan SNI.

**Tabel 20.** Angka Keamanan Pada Struktur Baja Pondasi *Loading Dock*, *Walkway* dan *Dolphin*

Lokasi Tiang Pancang Baja	Diameter Tiang Pancang Baja (mm)	Nomor Elemen Tiang Pancang Baja	Angka Keamanan ( <i>safety factor</i> )	
			Pondasi Awal 1975	Tiang Pancang Baja Aktual 2018
Loading Platform	762	591	2.558	2.248
		593	2.404	2.013
		596	1.972	1.660
		633	1.942	1.630
		635	2.336	1.966
		674	2.208	1.940
		676	2.899	2.542
		782	4.630	3.748
		784	2.101	1.812
		786	2.725	2.208
		788	2.725	2.202
		790	1.961	1.687
		792	4.464	3.534
		794	3.774	3.047
		796	2.227	1.930
		798	2.283	1.875
		800	2.237	1.841
		802	1.842	1.599
		804	2.899	2.412
		Walkway	457	841
843	2.646			2.215
845	2.299			1.919
847	2.915			2.399
849	2.618			2.260
239	4.014			3.720
240	4.645			4.265
242	4.576			4.237
243	3.938			3.663
228	1.722			1.263
230	2.028			1.479
232	1.506			1.151
Berthing Dolphin	762	234	1.723	1.229
		236	1.534	1.109
		265	1.960	1.474
		267	2.436	1.881
		269	1.746	1.317
		271	1.597	1.207
		273	1.334	1.080
		82	1.946	1.602
Mooring Dolphin	762	84	1.872	1.306
		86	1.582	1.296
		88	2.205	1.588

#### 4. Simpulan

Dari hasil analisa dan evaluasi pada masing-masing infrastruktur yang terdapat pada struktur *loading dock*, dapat disimpulkan sebagai berikut:



1. Pengamatan secara visual yang dilakukan di lapangan menunjukkan bahwa secara umum kondisi struktur beton bertulang pada *loading platform* dan *trestle* yang telah berumur 43 tahun masih dalam keadaan cukup baik. Pada permukaan sisi atas dan bawah struktur beton bertulang, tidak ditemukan kerusakan yang serius akibat korosi.
2. Pengukuran ketebalan yang dilakukan pada struktur tiang pancang baja menunjukkan telah terjadi korosi pada tiang pancang baja. Selain menggunakan sistem *impress current*, sistem proteksi terhadap korosi yang digunakan adalah dengan menggunakan penebalan tiang pancang baja (*doubling*) pada daerah *splash zone* yang mempunyai potensi korosi tinggi.
3. Hasil uji *Schmidt Hammer* setelah dikorelasikan dengan hasil kuat tekan beton *core drill* nilai kuat tekan rata-rata nya dibawah kuat tekan rencana. Nilai kuat tekan rata-rata dari uji *Schmidt Hammer* hanya sekitar 72% hingga 86% dari kuat tekan rencana sebesar 28 MPa.
4. Dari hasil uji *Ultrasonic Pulse Velocity* diketahui tingkat kepadatan beton berdasarkan BS1881-1986, 2004 dan dikorelasikan dengan hasil kuat tekan beton *core drill*. Nilai kuat tekan beton hasil uji UPV semuanya dibawah kuat tekan rencana sebesar 28 MPa atau sekitar 68% hingga 92% dari kuat tekan rencana.
5. Hasil uji *bar locator* menunjukkan bahwa tebal selimut beton pada *loading platform* lantai 3 dan *trestle* kurang dari 65 mm sebagaimana persyaratan minimal pada *as-built drawing* sebesar 65 mm, sedangkan dari pengukuran jarak tulangan diperoleh hasil yang tidak berbeda jauh dengan jarak tulangan pada *as-built drawing*.
6. Beberapa lebar retak yang terdapat pada *loading platform* dan *trestle* sudah melebihi lebar retak maksimum untuk kondisi lingkungan air laut sebesar 0.15 mm sebagaimana ditetapkan oleh ACI (American Concrete Institute) Committee 224.
7. Hasil pengujian terhadap benda uji silinder beton yang diambil dengan *core drill* pada elemen struktur *loading platform* dan *trestle* menunjukkan hasil kuat tekan rata-rata hanya 67% hingga 80% dari kuat tekan rencana sebesar 28 MPa.
8. Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan dari elemen struktur *loading platform* dan *trestle* diperoleh nilai tegangan leleh baja tulangan rata-rata sebesar 548.40 MPa atau melebihi tegangan leleh yang direncanakan sebesar 400 MPa.
9. Hasil pengukuran korosi pada baja tulangan dan tiang pancang baja yang sudah terjadi sampai dengan tahun 2018 (setelah beroperasi selama 43 tahun) menunjukkan bahwa laju korosi rata-rata per tahun yang terjadi sebesar 0.065 mm jauh dibawah laju korosi maksimal sebesar 0.300 mm per tahun.
10. Perhitungan kekuatan sisa pada tahun 2018 yang dilakukan berdasarkan mutu material aktual, menunjukkan bahwa struktur *loading platform*, *trestle*, *berthing* dan *mooring dolphin* masih mempunyai kekuatan sisa berkisar antara 84% sampai dengan 86% dari kekuatan awalnya.
11. Hasil perhitungan angka keamanan (*safety factor*) menunjukkan bahwa hingga tahun 2018 struktur beton bertulang *loading platform* dan *trestle* masih mempunyai angka keamanan 4.73 dan 1.29, sedangkan untuk angka keamanan struktur pondasi tiang pancang baja struktur *loading platform*, *trestle*, *berthing* dan *mooring dolphin*, semuanya masih diatas 1.10 yang mengindikasikan bahwa kinerja struktur yang ada masih cukup baik.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. S. Darmawan, R. Bayuaji, and N. A. Husin, *Pengaruh Korosi pada Beton Bertulang*. ITS Press, 2013.
- [2] M. G. Stewart, "Interaction Between Serviceability and Strength Reliabilities and Expected Failure Cost for A Reinforced Concrete Stochastic Deterioration Process," *ASRANet Int. Colloq.*, 2004.
- [3] M. S. Darmawan, R. Bayuaji, N. A. Husin, and R. B. Anugraha, "Case study of remaining service life assessment of a cooling water intake concrete structure in indonesia," *Adv. Civ. Eng.*, 2014.
- [4] Badan Standardisasi Nasional Indonesia, "SNI 2833-2016. Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa." BSN, Jakarta, 2016.
- [5] Badan Standardisasi Nasional Indonesia, "SNI 1725-2016. Pembebanan Untuk Jembatan." BSN, Jakarta, 2016.
- [6] I. Christiawan, A. Triwiyono, and H. Christady, "Evaluasi Kinerja Dan Perkuatan Struktur Gedung Guna Alih Fungsi Bangunan (Studi Kasus : Perubahan Fungsi Ruang Kelas Menjadi Ruang Perpustakaan Pada Lantai II Gedung G Universitas Semarang)," *Civ. Eng. Forum Tek. Sipil*, vol. 18, no. 1, p. 725-738, 2008.
- [7] N. Madutujuh, J. Prawiranegara, Ariadi, dan D. Natalius, "Audit Kekuatan Struktur dan Perkuatan Struktur Pasca Gempa Audit Kekuatan Struktur dan Perkuatan Struktur Pasca Gempa," *Semin. Hast.*, 2013.
- [8] A. N. Refani, H. Alrasyid, dan M. Irmawan, "Evaluasi Struktur Bangunan Gedung Beton Bertulang Berusia 50 Tahun Berdasarkan SNI 1726 2012 dan SNI 2847 2013," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 2, p. 17, 2015.
- [9] R. Bayuaji, M. Sigit Darmawan, N. A. Husin, R. B. Anugraha, A. Budipriyanto, and M. G. Stewart,

- “Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 84, p. 287–299, 2018.
- [10] M. S. Darmawan, *Inspeksi dan Perkuatan pada Bangunan Beton Akibat Korosi*. Surabaya: ITS Press, 2014.
- [11] ASTM C42/C42M - 13a, “Standart Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.” ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2013.
- [12] ASTM C805/C805M - 13a, “Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.” ASTM International, West Conshohocken, Pa, 2013.
- [13] ASTM C597 - 09, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.” ASTM International. West Conshohocken, Pa., 2009.
- [14] OCIDI, “Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan. Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), National Institute for Land and Infrastructure Management, Port and Airport Research Institute Transla,” 2009.
- [15] FEMA, “Coastal Construction Manual : Principles and Practices of Planning, Siting, Designing, Constructing, and Maintaining Residential Buildings in Coastal Areas, 4th Edition,” *Fema P-55*, vol. II, no. August, p. 400, 2011.
- [16] Badan Standarisasi Nasional Indonesia, “SNI-2847-2013. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *BSN*. Jakarta, 2013.
- [17] BSN, “SNI 1729: Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural Badan Standardisasi Nasional,” *Badan Standarisasi Nasional*. Jakarta, 2015.
- [18] Badan Standarisasi Nasional, “RSNI T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan.” BSN, Jakarta, 2004.
- [19] BSN, “RSNI T-03-2005. Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan.” BSN (Badan Standarisasi Nasional), Jakarta, 2005.
- [20] F. Fahirah, “Korosi pada beton bertulang dan pencegahannya,” *SMARTek*, vol. 5, no. 3, p. 190–195, 2012.

