

# Evaluasi Getaran pada Struktur Pelat Lantai Eksisting untuk Fungsi Gudang Penyimpanan

Syaiful Rachman<sup>1,2</sup> dan Ronald Sukwadi<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya  
Jl. Jenderal Sudirman No. 51 Jakarta 12930

<sup>2</sup> PT. Risen Engineering Consultant

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya  
Jl. Jenderal Sudirman No. 51 Jakarta 12930

## Article Info

### Article history:

Received  
13 Desember 2024

Accepted  
20 Desember 2024

### Keywords:

assessment of existing structure, vibration, slab

## Abstract

*An assessment of the existing structure can be performed on old buildings that have issues that interfere with the safety and serviceability (human comfort) of their users. In this case, a warehouse building had a discomfort issue due to vibrations that occur from the activity of loading-unloading and moving goods. Along with other tests, vibration testing was done to find out the properties of the vibrations (acceleration and natural frequency). Then, modeling was used to figure out how uncomfortable the vibrations were based on the tolerance limits set by ASCE Steel Design Guide 11. The vibration testing results revealed that the existing slab structure's peak acceleration exceeded the tolerance limit, prompting a recommendation to enhance it by increasing the slab thickness by 3.5 cm to lower the peak acceleration. Based on the results of the modeling analysis, the improvement can reduce the peak acceleration from the existing condition of 20% g to 9.27% g, and it is sufficient to provide a higher level of comfort than before.*

## Info Artikel

### Histori Artikel:

Diterima:  
13 Desember 2024

Disetujui:  
20 Desember 2024

### Kata Kunci:

asesmen struktur eksisting, getaran, pelat lantai

## Abstrak

Pekerjaan asesmen struktur eksisting dapat dilakukan pada bangunan lama yang memiliki masalah sehingga mengganggu keamanan dan kenyamanan penggunanya. Dalam kasus ini, suatu bangunan gudang penyimpanan memiliki masalah ketidaknyamanan akibat getaran yang terjadi dari aktivitas bongkar muat dan perpindahan barang. Pengujian vibrasi dilakukan untuk memperoleh properti getaran (percepatan dan frekuensi alami) disertai pengujian pendukung lainnya, untuk kemudian dilakukan analisis pemodelan untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan akibat getaran mengacu pada batasan toleransi ASCE *Steel Design Guide 11*. Hasil pengujian vibrasi menunjukkan struktur pelat eksisting memiliki percepatan puncak di atas batasan toleransi tersebut, sehingga direkomendasikan perbaikan berupa penambahan ketebalan pelat sebesar 3,5 cm untuk mereduksi percepatan puncak. Berdasarkan hasil analisis pemodelan, perbaikan dapat mereduksi percepatan puncak dari kondisi eksisting sebesar 20%g menjadi 9,27%g dan cukup untuk memberikan tingkat kenyamanan lebih baik dari sebelumnya.

\*Corresponding author. Ronald Sukwadi

Email address: [ronald.sukwadi@atmajaya.ac.id](mailto:ronald.sukwadi@atmajaya.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Dalam bidang teknik sipil, setiap bangunan atau struktur yang didesain harus mengacu kepada pedoman atau standar perencanaan agar dapat terjamin aspek keamanan dan keselamatannya bagi bangunan dan manusia sebagai penggunaannya.. Di Indonesia, standar perencanaan struktur diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) seperti misalnya untuk struktur bangunan baja mengacu pada SNI 1729:2020 (AISC, 2023) dan untuk struktur bangunan beton mengacu pada SNI 2847:2019 (BSN, 2019). Standar yang digunakan terus berkembang mengikuti perkembangan ilmu dan hasil penelitian terkini, sehingga dalam beberapa periode tertentu, standar akan diperbarui dan *engineer* atau praktisi di bidang teknik sipil harus selalu *update* dalam menerapkan standar ke pekerjaan desainnya.

Asesmen atau evaluasi struktur eksisting merupakan pekerjaan untuk mengevaluasi dan menganalisis struktur berdasarkan data-data aktual yang diperoleh dari pengujian lapangan sehingga dapat diketahui jika terdapat poin yang tidak memenuhi standar dan memerlukan perbaikan atau perkuatan (*retrofitting*). Asesmen dapat dilakukan pada bangunan lama, yang didesain sesuai peraturan lama, untuk diketahui nilai kelayakannya dan ingin ditingkatkan agar memenuhi syarat sesuai peraturan baru dengan cara memberikan perkuatan. Dalam kasus lainnya, asesmen dapat dilakukan pada bangunan eksisting yang dirasakan mengalami kerusakan dan memberikan ketidaknyamanan atau bahaya bagi penggunaannya. Pekerjaan asesmen dan desain perkuatan hingga penerapannya pada bangunan bertujuan meningkatkan nilai tambah dalam aspek usia bangunan dan kenyamanan bagi pengguna.

Dalam kegiatan ini, suatu kasus asesmen struktur pelat lantai dilakukan pada struktur bangunan gudang penyimpanan, yang merupakan struktur rangka momen baja dengan pelat lantai beton (*floordeck*). Pada bangunan ini, aktivitas sehari-hari yang terjadi adalah bongkar muat dan pemindahan barang ukuran sedang-besar dengan troli. Berdasarkan informasi dari pengguna bangunan, diketahui terdapat keluhan bahwa getaran yang terjadi dari aktivitas pada struktur lantai ini menyebabkan ketidaknyamanan pengguna. Maka asesmen berupa evaluasi getaran atau respon dinamik pada pelat lantai dilakukan dengan pengujian vibrasi dan beberapa pengujian pendukung lainnya.

Respon dinamik dari struktur di rentang elastik ditentukan berdasarkan frekuensi natural, redaman dan pola ragam getar (*mode shape*) (BSN, 2020). Terdapat 3 jenis pengujian dinamik berdasarkan sumber bebannya, yaitu getaran ambiens (*ambient vibration*) dalam kondisi normal struktur yang bergetar tanpa beban eksitasi, getaran bebas (*free vibration*) akibat beban eksitasi berupa beban impak (misal sak semen yang dijatuhkan), dan getaran paksa (*forced vibration*) dengan sumber beban sinusoidal dari mesin eksisting atau perangkat *eccentric mass shaker* (EMS) (AISC, 2023). Dalam kasus ini, yang mana sumber getaran yang terjadi akibat aktivitas troli dalam bongkar muat dan perpindahan barang, maka aktivitas troli tersebut dijadikan sebagai sumber beban dalam pengujian vibrasi yang direkam dengan *accelerometer* sehingga dapat menggambarkan kondisi aktivitas sehari-harinya.

Tujuan dari asesmen ini adalah untuk mengetahui dan mengevaluasi pengaruh getaran dari aktivitas keseharian pada gudang tersebut dibandingkan dengan batasan kenyamanan yang mengacu pada *AISC Steel Design Guide 11 – Floor Vibrations Due to Human Activity* (Chopra, 2006; Rastandi *et al.* 2021). Tingkat kenyamanan diukur berdasarkan properti getaran yaitu percepatan puncak dan frekuensi alami dari struktur pelat lantai diperoleh dari rekaman *accelerometer* dan pengolahan dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT).

Lingkup yang dievaluasi dari struktur ini dibatasi pada struktur pelat lantai yang dianalisis secara lokal dengan beban dinamik dari aktivitas keseharian tersebut.

## 2. METODE PELAKSANAAN

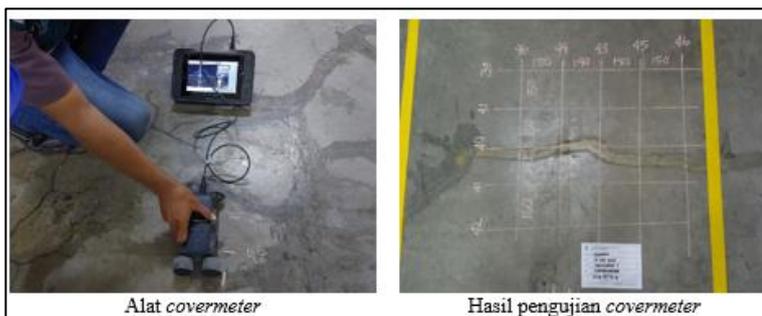
Pada pekerjaan asesmen struktur eksisting, secara umum dapat dibagi menjadi dua tahapan pekerjaan utama, yaitu (1) tahapan survey dan pengujian di lapangan; dan (2) tahapan analisis pemodelan struktur. Dalam kasus ini, pekerjaan asesmen dilakukan pada suatu bangunan gudang penyimpanan. Struktur bangunan ini merupakan struktur rangka momen baja dengan pelat lantai beton (*floordeck*) dengan ketebalan 12 cm (tebal efektif 9,5 cm). Berdasarkan informasi dari pengguna bangunan, di salah satu areanya (*mezzanine*) dirasakan ketidaknyamanan terhadap getaran ketika aktivitas bongkar muat dan perpindahan barang dengan troli dilakukan. Personil yang bertugas dalam pekerjaan ini adalah *engineer* yang bertugas untuk melakukan survey dan analisis dari dua tahapan pekerjaan di atas, dan didampingi oleh teknisi untuk mengoperasikan alat selama melakukan pengujian di lapangan.

Lingkup evaluasi dari struktur ini adalah pelat lantai yang difungsikan sebagai gudang penyimpanan terhadap pengaruh beban getaran dalam aktivitas bongkar muat barang. Beberapa pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kondisi eksisting pelat lantai, terutama pengujian vibrasi berupa pengukuran properti getaran (percepatan) menggunakan sensor *accelerometer* dengan beban atau sumber getaran aktivitas bongkar muat dan perpindahan barang dengan troli. Selain pengujian yang berupa pengukuran langsung terhadap properti getaran, pengujian lain dilakukan untuk mengevaluasi kondisi eksisting dari beton pelat lantai dan sambungan baja. Maka metode pengujian yang dilakukan tersebut terdiri dari:

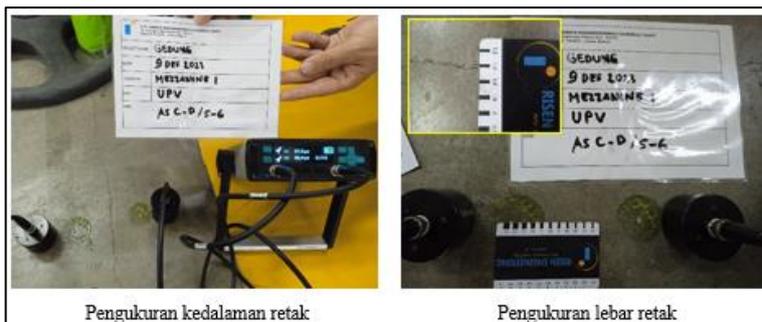
1. Pengamatan visual  
Pengamatan visual dilakukan untuk memperoleh gambaran kondisi struktur eksisting dan juga untuk melihat tanda-tanda kerusakan pada struktur misalnya keropos pada beton, karat pada tulangan yang terekspos, lendutan kasat mata, dan bentuk kerusakan lainnya.
2. Pengujian vibrasi dengan *accelerometer* (**Error! Reference source not found.**)  
Pengujian vibrasi bertujuan untuk mengetahui tingkat kenyamanan struktur bagi pengguna terhadap getaran yang terjadi pada lantai struktur. Properti getaran berupa percepatan dapat direkam dengan sensor *accelerometer* dan *datalogger*. Sumber beban getaran berupa aktivitas bongkar muat dan pergerakan barang menggunakan troli.
3. Pengujian *covermeter* (Gambar 1)  
Pengujian *covermeter* bertujuan untuk mendeteksi lokasi dan kedalaman tulangan terpasang (jarak *cover* atau selimut beton beton dari permukaan atas ke tulangan atas) pada pelat lantai.
4. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) (Gambar 2)  
Pengujian UPV digunakan untuk mengukur kedalaman retak pada pelat lantai. Lebar retak juga diukur menggunakan penggaris lebar retak.
5. Pengujian mutu beton dengan mengambil sampel beton inti (Gambar 3)  
Pengujian ini merupakan pengujian destruktif dengan mengambil sampel beton inti (*core drill*) dengan mesin bor. Sampel kemudian diuji tekan di laboratorium untuk mengetahui kuat tekan beton eksisting sehingga dapat dibandingkan dengan kuat tekan rencana.

**Gambar 1.**

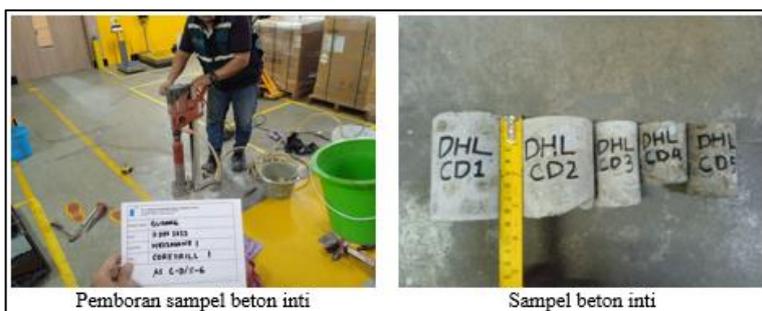
Accelerometer-datalogger dan troli dengan barang sebagai sumber beban dinamik

**Gambar 1.**

Alat covermeter dan contoh hasil pengujian covermeter

**Gambar 2.**

Pengukuran kedalaman retak dengan UPV dan pengukuran lebar retak.

**Gambar 3.**

Pengambilan sampel beton inti (*core drill*) pada pelat lantai

Untuk mengetahui seberapa besar tingkat getaran, maka pengujian vibrasi dilakukan menggunakan sensor *accelerometer* yang dapat merekam percepatan pada lantai. Pengujian

vibrasi dimulai dengan pengondisian area pengujian dengan memindahkan barang-barang sehingga area relatif kosong, kemudian sumber beban dinamik yaitu troli dengan barang dapat dimasukkan dan dilakukan bongkar muat dan pemindahan barang sehingga dapat merepresentasikan aktivitas keseharian pada gudang. Data rekaman berupa percepatan dalam domain waktu kemudian dapat ditransformasikan ke domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform* (FFT) sehingga frekuensi alami struktur dapat diperoleh.

Dari hasil survey dan pengujian lapangan yang diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis pemodelan struktur. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui frekuensi alami secara analisis dan membandingkannya dengan hasil pengujian. Analisis dilakukan berdasarkan Metode Elemen Hingga dengan pemodelan 3 dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS. Lingkup dari analisis ini hanya untuk pembebanan gravitasi dan analisis lokal pada pelat lantai *mezzanine*. Pemodelan struktur dilakukan dalam dua tahap, yaitu pada kondisi eksisting dengan ketebalan pelat lantai 12 cm dan kondisi perkuatan yang akan disampaikan kemudian.

Standar kenyamanan terhadap getaran pada struktur pelat lantai dapat mengacu pada *AISC Design Guide 11 – Floor Vibrations Due to Human Activity* (AISC, 2023) yang mana dinyatakan dalam hubungan antara percepatan puncak dan frekuensi struktur. Salah satu aspek yang mempengaruhi kenyamanan terhadap getaran adalah percepatan puncak, di mana semakin kecil percepatan maka semakin tinggi kenyamanan yang dirasakan. Sebaliknya, jika percepatan yang dirasakan terlalu besar, maka akan memberikan rasa ketidaknyamanan dan merupakan masalah yang umum ditemukan pada struktur yang mudah bergetar seperti jembatan dan pelat lantai. Hubungan antara percepatan puncak dengan frekuensi dan parameter struktur lainnya dinyatakan dalam persamaan berikut

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0.35f_n)}{\beta W} \dots\dots\dots (1)$$

dengan

- $a_p/g$  : percepatan puncak sebagai fraksi percepatan gravitasi
- $P_0$  : gaya konstan yang merepresentasikan eksitasi
- $f_n$  : frekuensi alami
- $\beta$  : rasio redaman modal
- $W$  : berat efektif

Dengan asumsi beban  $P_0$  yang sama dan redaman  $\beta$  yang sama, persamaan **Error! Reference source not found.** dapat ditulis ulang menjadi

$$a_{p2} = \left[ \frac{W_1 \exp(0.35f_{n1})}{W_2 \exp(0.35f_{n2})} \right] a_{p1} \dots\dots\dots (2)$$

Dari persamaan **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa nilai percepatan puncak berbanding terbalik dengan massa dan frekuensi alami. Maka, upaya untuk mereduksi percepatan puncak dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu (1) meningkatkan massa; (2) meningkatkan frekuensi alami atau kekakuan. Upaya perbaikan struktur pelat lantai yang dipilih dengan cara menambah lapisan beton dan penulangan di atas pelat eksisting, yang secara teoritis atau pemodelan memberikan pengaruh seperti (1) menambah massa struktur; (2) meningkatkan kekakuan ketika kedua lapisan telah bersifat monolit; (3) memperbaiki permasalahan retak dan kapasitas tulangan eksisting yang tidak memenuhi.

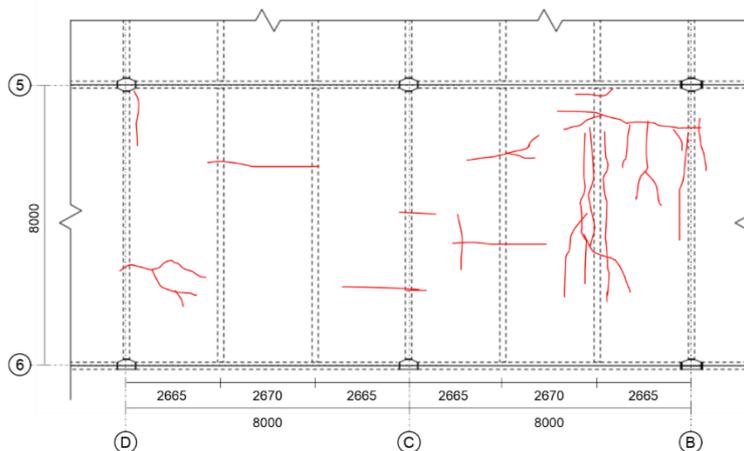
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil pengamatan visual

Area gudang yang diperiksa (*mezzanine*) merupakan tempat bongkar muat barang yang mana cukup banyak terjadi pergerakan barang-barang berdimensi besar yang dipindahkan dengan troli. Secara umum, retak ditemukan di daerah tumpuan balok seperti contoh diperlihatkan pada Gambar 4. Sketsa retak pada area as D-E-F/5-6 diperlihatkan pada Gambar 5. Adanya retak struktural pada pelat lantai mengurangi kekakuan dari struktur yang efeknya adalah struktur menjadi lebih lentur sehingga menjadi salah satu penyebab getaran terasa berlebih dan memberikan ketidaknyamanan.



**Gambar 4.**  
Retak pada area balok anak As B-C/5-6 Lt. *Mezzanine* 1



**Gambar 5.**  
Sketsa retak pada area As D-E-F/5-6 Lt. *Mezzanine* 1

#### 3.2 Hasil pengujian vibrasi

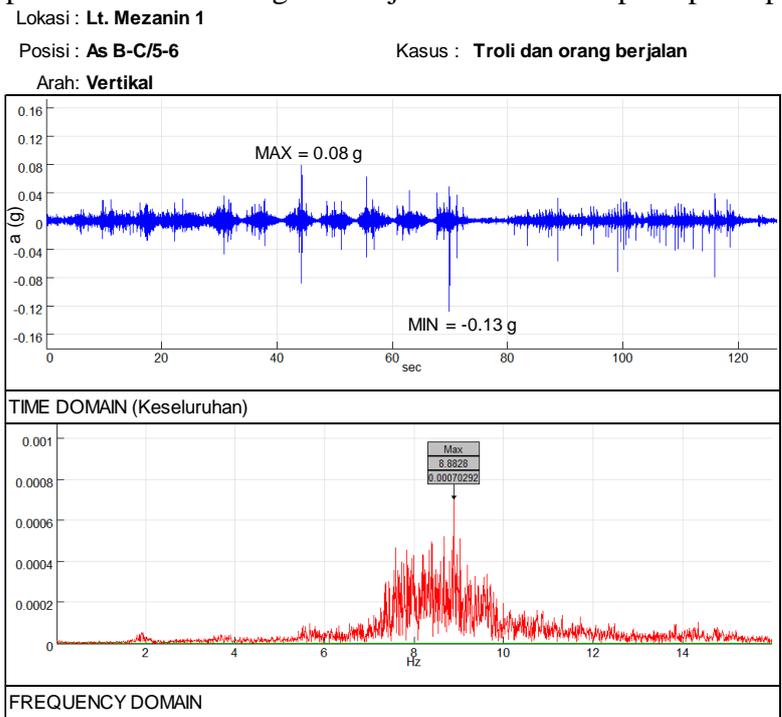
Pengujian vibrasi dilakukan dengan pengondisian area relatif kosong dari barang, kemudian sumber beban dinamik yaitu troli dengan barang digerakkan berjalan bersamaan dengan orang-orang berjalan pada area pengujian dan diselingi dengan proses bongkar muat

barang sehingga dapat merepresentasikan aktivitas sehari-hari yang terjadi pada gudang ini. Hasil dari pengujian vibrasi berupa rekaman percepatan dalam domain waktu dan dapat diperoleh nilai percepatan puncak. Kemudian data ditransformasikan ke dalam domain frekuensi sehingga dapat diperoleh frekuensi alami utama dari struktur. Contoh hasil pengujian vibrasi diperlihatkan pada Gambar 6. Rekapitulasi dari hasil pengujian vibrasi disajikan pada **Error! Reference source not found.**

**Tabel 1.**  
Frekuensi dan Percepatan Hasil Pengujian Vibrasi

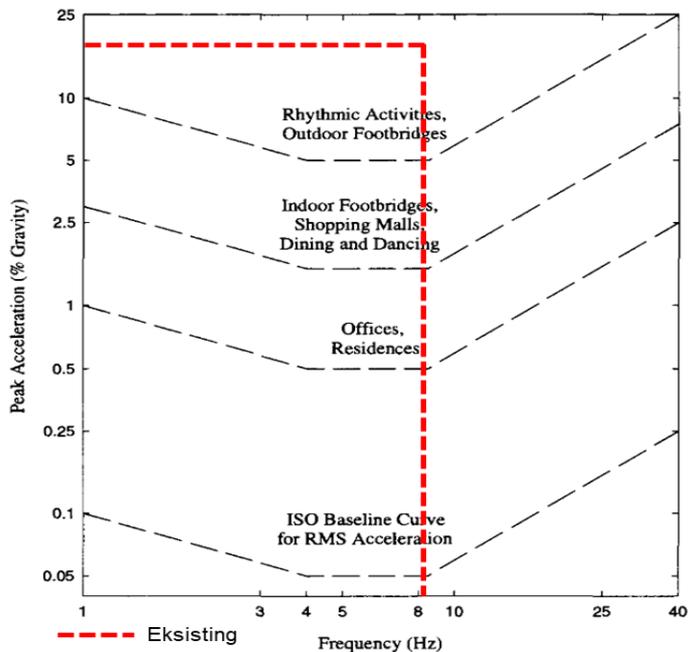
No.	Lokasi	Frekuensi (Hz)	Percepatan (g)	
			Min	Max
1	Lt. Mezzanine 1 As B-C/5-6	8,88	-0,13	0,08
2	Lt. Mezzanine 1 As C-D/5-6	7,95	-0,12	0,19
3	Lt. Mezzanine 1 As E-F/5-6	7,96	-0,2	0,14
4	Lt. Mezzanine 2 As D-E/5-6	7,75	-0,08	0,06
5	Lt. Mezzanine 2 As G-H/5-6	8,01	-0,18	0,13
Rata-rata		8,11	-0,14	0,12
Maksimum		8,88	-0,2	0,19

Berdasarkan hasil pengujian vibrasi di **Error! Reference source not found.** diperoleh frekuensi aktual rata-rata sebesar 8,11 Hz dengan percepatan absolut maksimum sebesar 0,2g (20%g). Kedua nilai tersebut diplot pada grafik batasan toleransi yang direkomendasikan untuk kenyamanan manusia (AISC, 2023) seperti diperlihatkan pada Gambar 7, di mana untuk struktur gudang ini dapat dianggap masuk dalam kategori jembatan dalam ruangan (*indoor footbridges*). Untuk kategori tersebut, pada rentang 4-8 Hz memiliki batas percepatan puncak maksimum sebesar 1,5%g. Hasil pengujian yang diperoleh sebesar 20%g berada jauh di atas batas percepatan puncak maksimum tersebut.



Frequency actual      **8.88** Hz

**Gambar 6.**  
Contoh Hasil Pengujian Vibrasi



**Gambar 7.**

Batasan toleransi yang direkomendasikan untuk kenyamanan manusia  
(Sumber: AISC *Steel Design Guide* 11, 2003)

### 3.3 Hasil pengujian *covermeter*

Dari hasil pengujian *covermeter*, diketahui jarak selimut beton bervariasi pada rentang 19-47 mm dengan rata-rata 35,6 mm, yang mana menunjukkan bahwa tulangan terpasang lebih rendah dari nilai selimut sebesar 20 mm sesuai SNI 2847:2019 (semakin besar selimut, tulangan semakin rendah dari permukaan). Kondisi seperti ini umum ditemukan karena tulangan turun ketika pengecoran pelat dilakukan. Konsekuensi dari tulangan lebih rendah ini adalah berkurangnya kapasitas lentur dan meningkatnya kemungkinan retak pada permukaan atas. Hal ini dibuktikan dari banyaknya retak pada daerah tumpuan seperti disampaikan pada hasil pengamatan visual.

### 3.4 Hasil pengujian UPV kedalaman retak

Berdasarkan hasil pengujian UPV dan pengukuran di beberapa titik acak, diketahui kedalaman retak bervariasi antara 26-113 mm dan lebar retak bervariasi antara 1,1-1,4 mm. Retak besar umumnya ditemukan pada daerah tumpuan seperti disampaikan pada hasil pengamatan visual.

### 3.5 Hasil pengujian tekan sampel inti beton

Hasil pengujian tekan pada 5 sampel beton diolah untuk mendapatkan mutu beton ekuivalen ( $f'_c$  ekuivalen) seperti yang disajikan pada 9. Dari as built drawing diketahui pelat lantai memiliki mutu desain K350 ( $f'_c = 29,05$  MPa). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai mutu beton rata-rata 22,74 MPa dan nilai  $f'_c$  ekuivalen sebesar 17,39 MPa bernilai lebih kecil dibandingkan mutu desain, namun menjadi catatan bahwa sampel beton ini diambil dari struktur yang sudah terdapat cacat retak akibat gaya dalam dan bergetar, sehingga kemungkinan kuat tekan sudah mengalami penurunan. Nilai  $f'_c$  ekuivalen 17,39 MPa tersebut digunakan dalam analisis pemodelan struktur eksisting.

NO	LOKASI	Kode Lab	$F_{core}$ (Mpa)	diameter (mm)	L (mm)	l/d	$F_{l/d}$	$F_{mc}$	$F_{dia}$	$F_d$	$f_c$ (Mpa)	average $f_c$ (Mpa)	$(f_c - ave f_c)^2$
1	Lt. Mezzanine 1 As E-F/5-6	CD1	22.02	68.8	76.8	1.1	0.91	1.00	1.03744	1.06	21.94	22.74	0.64
2	Lt. Mezzanine 1 As C-D/5-6	CD2	21.05	68.8	69.4	1.0	0.88	1.00	1.03744	1.06	20.40		5.47
3	Lt. Mezzanine 1 As B-C/5-6	CD3	22.79	43.9	50.2	1.1	0.91	1.00	1.06732	1.06	23.51		0.60
4	Lt. Mezzanine 2 As C-D/5-6	CD4	28.41	43.5	52.3	1.2	0.93	1.00	1.0678	1.06	29.75		49.16
5	Lt. Mezzanine 2 As B-C/5-6	CD5	16.59	43.9	63.9	1.5	0.96	1.00	1.06732	1.06	18.09		21.62
												$\Sigma$	77.48

$n = 5.00$	$V_{l/d} = 0.000$	$K = 1.96$	$f_{0.10} = 14.11$
$s_c = 4.40$	$V_{dia} = 0.057$	$Z = 0.67$	$f_{c'_{eq1}} = 14.05$
$s_a = 1.52$	$V_{mc} = 0.025$	$T = 0.74$	$(f_c)_{CL} = 20.96$
$s_o = 4.66$	$V_d = 0.025$	$C = 0.83$	$f_{c'_{eq2}} = 17.39$

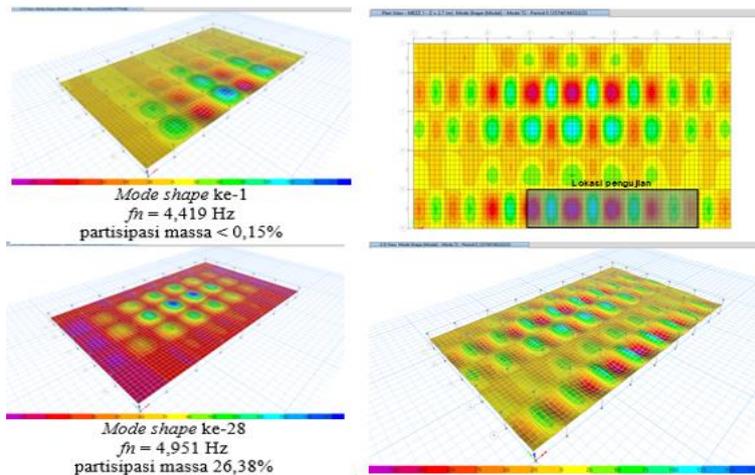
**Gambar 9.**

Penghitungan  $f'c$  ekuivalen pelat lantai dari sampel beton inti

### 3.6 Hasil analisis pemodelan struktur eksisting

Analisis pemodelan struktur dilakukan berdasarkan Metode Elemen Hingga dengan pemodelan 3 dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS. Lingkup dari analisis ini hanya untuk pembebanan gravitasi dan analisis lokal pada pelat lantai *mezzanine*. Pemodelan struktur pada kondisi eksisting dilakukan menggunakan ketebalan pelat lantai 12 cm (tebal efektif 9,5 cm) dengan mutu beton sesuai  $f'c$  ekuivalen dari hasil pengujian sebesar 17,39 MPa.

Analisis modal atau *eigenvalue* dilakukan untuk memperoleh frekuensi alami ( $fn$ ) struktur. Hasil analisis modal ini berupa daftar pola ragam getar (*mode shape*) dengan berbagai bentuk sesuai partisipasi massa vertikal. Sebagai contoh ditampilkan *mode* ke-1 sebagai *mode* utama ( $fn = 4,419$  Hz) dan *mode* ke-28 sebagai mode dengan partisipasi massa terbesar ( $fn = 4,951$  Hz). Namun pada kedua *mode* tersebut, besar frekuensi dan lokasi deformasinya tidak sesuai dengan nilai frekuensi pengujian (8,11 Hz) dan lokasi pengujian. Pemilihan *mode shape* dilakukan hingga didapatkan frekuensi dan lokasi deformasi yang sesuai dengan hasil pengujian, yaitu pada mode ke-72 ( $fn = 7,952$  Hz) seperti ditampilkan pada Gambar 10.



**Gambar 10.**

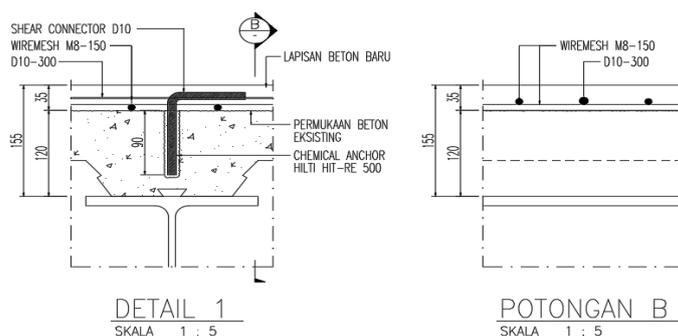
*Mode Shape* ke-72 Pemodelan Struktur Eksisting ( $fn = 7,952$  Hz)

### 3.7 Hasil analisis pemodelan struktur perbaikan

Dari hasil pengamatan visual dan pengujian yang telah disampaikan di atas, diketahui terdapat masalah pada struktur pelat lantai karena retak. Retak tersebut dapat terjadi karena posisi tulangan atas yang turun sehingga terjadi retak di daerah tumpuan sesuai dengan

temuan hasil pengamatan visual. Retak juga dapat terjadi akibat beban impact dari aktivitas bongkar muat barang yang terus berulang. Maka, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menginjeksi retak-retak tersebut dengan grouting sebelum perbaikan lebih lanjut dilakukan.

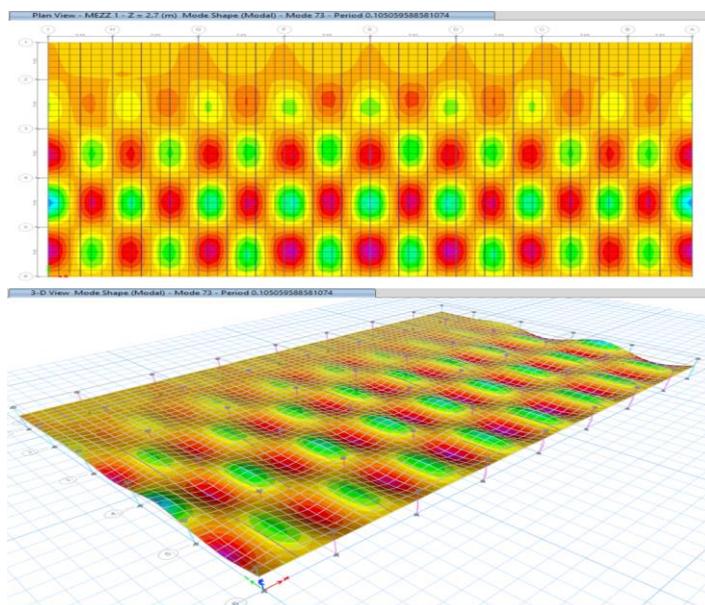
Masalah kedua yang ada terkait kenyamanan adalah percepatan puncak maksimum yang dirasakan ketika aktivitas bongkar muat barang dilakukan. Secara teoritis, upaya untuk mengurangi percepatan puncak dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu (1) meningkatkan massa; (2) meningkatkan frekuensi alami atau kekakuan. Rekomendasi perbaikan yang dipilih adalah dengan cara menambah lapisan beton dan penulangan di atas pelat eksisting sebesar 3,5 cm sehingga ketebalan total pelat menjadi 15,5 cm (tebal efektif 13 cm) seperti diperlihatkan pada Gambar . Selain dapat menambah massa struktur dan meningkatkan kekakuan struktur pelat, metode ini juga sekaligus memperbaiki permasalahan retak dan kapasitas tulangan eksisting yang tidak memenuhi dengan menambah tulangan baru.



**Gambar 11.**

Detail perbaikan dengan penambahan ketebalan pelat 3,5 cm

Berdasarkan pemodelan struktur eksisting, dilakukan modifikasi pada ketebalan pelat menjadi 15,5 cm sesuai dengan rencana perbaikan. Analisis modal kembali dilakukan untuk memperoleh perkiraan frekuensi struktur setelah perbaikan. Berdasarkan pencarian *mode shape* yang serupa dengan struktur eksisting, untuk struktur dengan perbaikan diperoleh pada mode ke-73 ( $f_n = 9,518$  Hz) seperti ditampilkan pada Gambar 1.



**Gambar 12.**

Mode Shape ke-73 Pemodelan Struktur Perbaikan ( $f_n = 9,518$  Hz)

Perkiraan percepatan puncak setelah dilakukan perbaikan dapat dihitung menggunakan persamaan (2). Dengan data perubahan frekuensi alami dan perubahan massa (penambahan ketebalan dari tebal efektif 9,5 cm ke 13 cm), percepatan puncak setelah perbaikan dapat dihitung sebagai berikut:

Diketahui kondisi eksisting:

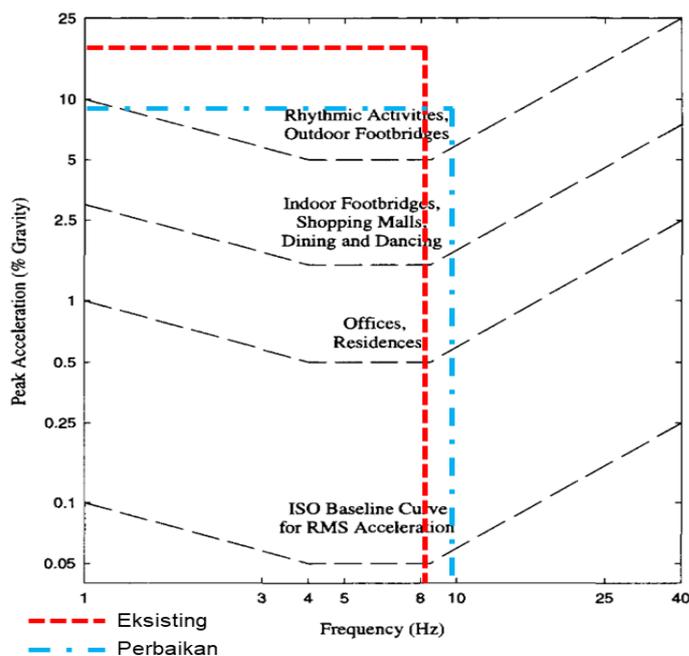
$$f_{n1} = 8,216 \text{ Hz} \quad t_{pe1} = 9,5 \text{ cm} \quad a_{p1} = 20\%g$$

Kondisi setelah penambahan ketebalan:

$$f_{n2} = 9,518 \text{ Hz} \quad t_{pe2} = 13 \text{ cm} \quad W_2 = (13/9,5)W_1 \rightarrow W_1/W_2 = 0,7308$$

$$a_{p2} = \left[ 0,7308 \frac{\exp(0,35(8,216))}{\exp(0,35(9,518))} \right] (20\%g) = 9,27\%g$$

Maka, percepatan puncak setelah dilakukan perbaikan menjadi 9,27%g.



**Gambar 13.**

Perbandingan kondisi eksisting dan perbaikan pada grafik batasan toleransi kenyamanan

Berdasarkan grafik batasan toleransi di Gambar 3, kondisi setelah perbaikan masih berada di atas batasan, namun sudah lebih mendekati ke batasan untuk kondisi jembatan luar ruangan (*outdoor footbridges*). Pada kasus ini, cukup sulit untuk memaksakan penurunan puncak percepatan lebih rendah lagi, karena jika menambah ketebalan lagi akan memiliki potensi bahaya dalam aspek kekuatannya serta perkuatan yang dibutuhkan semakin banyak dan menjadi kurang efisien. Maka, rekomendasi perbaikan dengan penambahan ketebalan pelat sebesar 3,5 cm dengan reduksi hingga menjadi sekitar 1/4 kali percepatan eksisting ini dirasa sudah cukup untuk memberikan kenyamanan lebih baik dibandingkan kondisi sebelumnya.

Sebagai konsekuensi dari bertambahnya beban pelat lantai, perlu dilakukan analisis dan pengecekan kekuatan atau kapasitas struktur eksisting mengacu pada peraturan yang berlaku saat ini, yaitu SNI 1729:2020 untuk struktur baja dan SNI 2847:2019 untuk pelat lantai beton. Dalam kasus ini, pengecekan kapasitas struktur baja memberikan hasil bahwa perlu diberikan perkuatan pada beberapa balok induk dan balok anak. Rekomendasi

perkuatan yang diberikan adalah dengan cara menambah ketebalan *flange* bawah pada profil baja.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis pemodelan, untuk meningkatkan tingkat kenyamanan terhadap getaran dapat dilakukan dengan menambah ketebalan pelat lantai untuk dapat mengurangi percepatan puncak dari getaran tersebut. Dengan penambahan ketebalan sebesar 3,5 cm, percepatan puncak eksisting sebesar 20%g dapat direduksi hingga sebesar 9,27%g. Penambahan ketebalan pelat ini juga berfungsi sebagai upaya perbaikan dari pelat eksisting yang mengalami retak dan tulangan yang turun. Kemudian akibat dari penambahan massa ini adalah struktur balok eksisting menjadi perlu diperkuat untuk memenuhi persyaratan kekuatannya, dengan cara menambah ketebalan *flange* bawah pada profil baja.

Walaupun jika mengacu pada AISC Design Guide 11 nilai percepatan puncak masih di atas batasan toleransi, reduksi hingga menjadi sekitar 1/4 kali percepatan eksisting dirasa sudah cukup untuk memberikan kenyamanan lebih baik dibandingkan kondisi sebelumnya. Mengingat juga bahwa semakin diperbesar massanya juga meningkatkan beban yang dipikul oleh struktur eksisting dan semakin berbahaya dalam aspek kekuatannya.

Dalam proses pengambilan data pengujian, analisis, hingga rekomendasi perbaikan yang disampaikan dalam paper ini mungkin masih jauh dari sempurna. Masih banyak aspek yang diharapkan dapat dikembangkan agar memberikan hasil yang lebih baik dan efisien untuk kegiatan serupa dengan memanfaatkan alat dan teknologi yang semakin berkembang.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada PT. Risen Engineering Consultant yang telah memberikan dukungan dana dan sumber data untuk penulisan paper ini.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

1. American Institute of Steel Construction (AISC). (2003). *AISC Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity*. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
2. Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD)*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
3. Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2020). *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (ANSI/AISC 360-16, IDT)*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
4. Chopra, A. K. (2006). *Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Pearson Education.
5. Rastandi, J. I., Pramesti, K., & Orientilize, M. (2021). Forced vibration test of pedestrian steel bridge using eccentric mass shaker. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 622(1), 012010.