

Pemeriksaan Getaran Struktur dan Rekomendasi Perkuatan untuk Peningkatan Kapasitas Beban dan Pengurangan Getaran

Heri Khoeri^{1,2}, dan Sofia W Alisjahbana³

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510

Email korespondensi: [hkhkoeri@hesa.co.id](mailto:hkhoeri@hesa.co.id)

²PT. Hesa Laras Cemerlang, Jl. Condet Raya No. 27, Pasar Rebo, Jakarta, 13760

³Prodi Teknik Sipil, Universitas Bakrie, Jl. H. R. Rasuna Said No.2, Jakarta, 12940

ABSTRAK

Suatu gedung yang masih difungsikan harus memenuhi kriteria kelaikan fungsi bangunan baik dari aspek keamanan, kenyamanan, dan pemenuhan standar peraturan yang berlaku sehingga dapat melayani kebutuhan sesuai dengan fungsinya. Adanya perubahan fungsi ruang pada gedung Bank Swasta di Kota Tegal dari ruang kantor menjadi ruang arsip yang dilakukan tanpa mempertimbangkan kekuatan struktur mempengaruhi kinerja struktur tersebut, indikasinya terlihat lendutan pada balok, retakan pada pelat dan getaran yang mengganggu kenyamanan pengguna bangunan. SNI 2847 2019 mensyaratkan lendutan ijin pada pelat beton, SNI 1729 2002 mensyaratkan lendutan ijin balok baja, sementara KMNLH No.49 Tahun 1996 dan ISO 2631-2 1989 mensyaratkan getaran yang tidak merusak bangunan, mengganggu kenyamanan dan kesehatan manusia. Dari hasil uji getar diketahui bahwa getaran pada kondisi operasional melebihi batas yang diijinkan untuk bangunan kantor. Begitu pun dari hasil analisis kondisi eksisting struktur menunjukkan lendutan yang terjadi melampaui batas ijinnya. Untuk mengurangi lendutan dan menambah kekakuan struktur direkomendasikan perkuatan dengan penambahan balok anak dan *overlay* pelat setebal 6 cm. Sebelum dilakukan analisis perkuatan, frekuensi alami struktur eksisting hasil analisis diverifikasi dengan frekuensi hasil uji getar. Modifikasi pada model struktur dilakukan pada kekakuan elemen dan asumsi tumpuan. Setelah model mendekati kondisi lapangan, dilakukan analisis dan desain perkuatan. Secara analitis perkuatan yang direkomendasikan menaikkan frekuensi dari 4.879 Hz menjadi 8.298 Hz, mengurangi percepatan, kecepatan dan lendutan puncak 80.86%, dan mengurangi lendutan maksimal 66.07% dari kondisi awalnya, sehingga puncak getaran dalam kondisi operasional dan lendutan maksimal memenuhi kriteria yang diijinkan untuk ruang arsip.

Kata kunci: percepatan, kecepatan, lendutan, getaran, frekuensi

ABSTRACT

A building that is still in use must meet the criteria for the suitability of the building function, including aspects of safety, comfort, and compliance with applicable regulations, so that it can serve its purpose effectively. Changes in the spatial function of a Private Bank building in the city of Tegal, from an office space to an archive space, were made without considering the structural strength, affecting the performance of the structure. Indications include deflection in beams, cracks in slabs, and vibrations that disturb the comfort of building users. SNI 2847:2019 requires allowable deflection in concrete slabs, SNI 1729:2002 specifies allowable deflection in steel beams, while KMNLH No.49 of 1996 and ISO 2631-2:1989 specify vibrations that do not damage buildings, disturb comfort, and affect human health. Vibration test results show that vibrations under operational conditions exceed the allowable limits for office buildings. Similarly, analysis of the existing structural conditions indicates that deflections exceed allowable limits. To reduce deflections and increase structural rigidity, reinforcements

is recommended by adding secondary beams between existing beams and overlaying the floor slab with a thickness of 6 cm. Before performing the reinforcement analysis, the frequency of the existing structure obtained from the analysis is verified by the frequency from the vibration test. Modifications to the model are made to the stiffness of elements and support assumptions. After the structural model approximates field conditions, reinforcement analysis and design are conducted. Analytically, the recommended reinforcement increases the natural frequency from 4.879 Hz to 8.298 Hz, reduces acceleration, velocity, and vibration deflection by 80.86% and decreases maximum deflection by 66.07% from their initial conditions. As a result, peak vibrations under operational conditions and maximum deflections meet the allowable criteria for archive spaces.

Keywords: acceleration, velocity, deflection, vibration, frequency.

1. PENDAHULUAN

Suatu gedung yang masih difungsikan harus memenuhi kriteria kelaikan fungsi baik dari keamanan, kenyamanan, dan pemenuhan peraturan sehingga dapat melayani kebutuhan sesuai fungsinya.

Adanya perubahan fungsi ruang pada gedung Bank Swasta di Kota Tegal yaitu dari ruang kantor 250 kg/m² menjadi ruang arsip 600 kg/m² [7] yang dilakukan tanpa mempertimbangkan kekuatan struktur mempengaruhi kinerjanya, dengan indikasi terlihat lendutan pada balok, retakan pada pelat dan getaran yang mengganggu kenyamanan.

Dalam standar peraturan ditentukan batasan lendutan ijin pada pelat beton dan balok baja, persyaratan getaran yang tidak mengganggu kenyamanan [4], tidak mengganggu kesehatan manusia dan tidak berpotensi pada merusak bangunan [6].

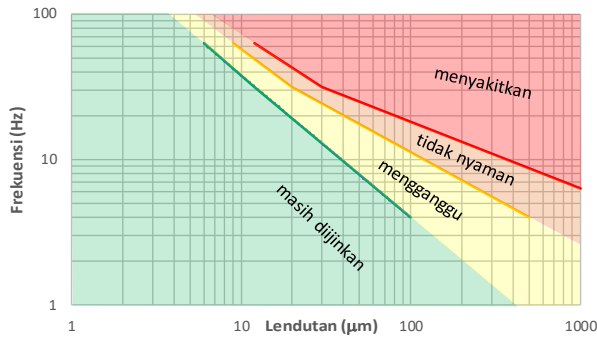
Penelitian dilakukan untuk mengetahui pemenuhan batas lendutan pelat beton, balok baja, dan persyaratan getaran, juga rekomendasi untuk peningkatan performa dan mengurangi getaran pada lantai.

Baku tingkat getaran

Balok-balok penumpu lantai harus diperiksa untuk memastikan getaran yang diakibatkan pejalan kaki tidak berakibat buruk pada kemampuan-layan struktur. Jika struktur harus menerima getaran, maka harus dilakukan upaya mencegah ketidaknyamanan, kerusakan struktur, atau gangguan terhadap fungsinya [9].

Tabel 1. Baku Getaran untuk Kenyamanan dan Kesehatan [6]

Frek. (Hz)	Nilai Tingkat Getaran, dalam mikron (10 ⁻⁶ m)			
	Tidak Mengganggu	Mengganggu	Tidak Nyaman	Menyakitkan
4	< 100	10 0 - 500	50 100 0 - 0	> 1000
5	< 80	80 - 350	35 100 0 - 0	> 1000
6.3	< 70	70 - 275	27 100 5 - 0	> 1000
8	< 50	50 - 160	16 0 - 500	> 500
10	< 37	37 - 120	12 0 - 300	> 300
12.5	< 32	32 - 90	90 - 220	> 220
16	< 25	25 - 60	60 - 120	> 120
20	< 20	20 - 40	40 - 85	> 85
25	< 17	7 - 30	30 - 50	> 50
31.5	< 12	2 - 20	20 - 30	> 30
40	< 9	9 - 15	15 - 20	> 20
50	< 8	8 - 12	12 - 15	> 15
63	< 6	6 - 9	9 - 12	> 12



Gambar 1. Baku Tingkat Getaran Mekanik untuk Kenyamanan dan Kesehatan [6]

Tabel 2. Baku Tingkat Getaran Mekanik Berdasarkan Dampak Kerusakan [6]

Frek (Hz)	Batas Gerakan Peak (mm/detik)			
	Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
4	< 2	10 - 50	50 - 100	> 1000
5	< 7.5	35 - 80	35 - 100	> 1000
6	< 70	27 - 70	27 - 100	> 1000
8	< 50	16 - 50	16 - 500	> 500
10	< 37	12 - 37	12 - 300	> 300
12	< 32	32 - 90	90 - 220	> 220
16	< 25	25 - 60	60 - 120	> 120
20	< 20	20 - 40	40 - 85	> 85
25	< 17	7 - 30	30 - 50	> 50
31	< 12	2 - 20	20 - 30	> 30
40	< 9	9 - 15	15 - 20	> 20
50	< 8	8 - 12	12 - 15	> 15

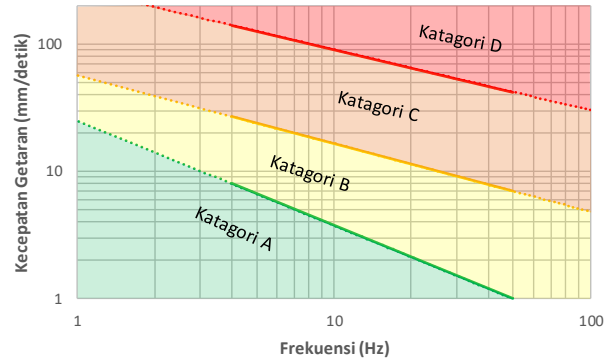
Keterangan:

Kategori A: Tidak menimbulkan kerusakan

Kategori B: Kemungkinan keretakan plesteran (retak/ terlepas plesteran pada dinding pemikul beban pada kasus khusus)

Kategori C: Kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban

Kategori D: Rusak dinding pemikul beban

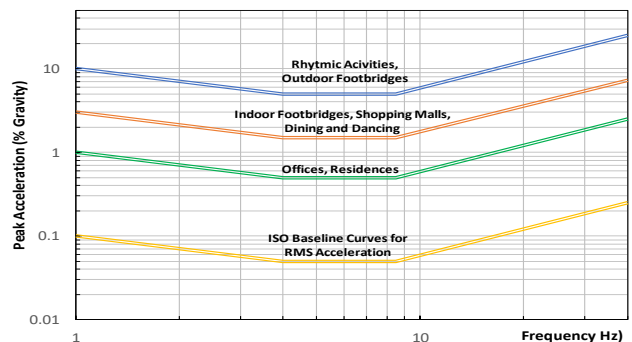


Gambar 2. Baku Getaran Berdasarkan Dampak Kerusakan [6]

Selain masalah kenyamanan dan kesehatan pengguna, kerusakan bangunan pun dapat timbul akibat getaran. Hubungan batasan kecepatan getaran, frekuensi dan dampak kerusakan seperti pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Baku tingkat getaran mekanik dan getaran kejut adalah batas maksimal yang diperbolehkan timbul dari kegiatan di atas struktur sehingga tidak menimbulkan gangguan terhadap kenyamanan dan kesehatan serta keutuhan bangunan [6].

Rekomendasi ISO 2631-2 untuk frekuensi dan puncak percepatan yang memenuhi kenyamanan berdasarkan aktivitas manusia seperti pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Rekomendasi Frekuensi Getar dan Puncak Percepatan untuk Kenyamanan Berdasarkan Aktivitas Manusia [4]

Batasan lendutan

Untuk pelat lantai beton yang mungkin akan rusak jika terkena lendutan besar, total lendutan yang diijinkan setelah pemasangan elemen nonstruktural adalah $L/480$ [5], dengan L adalah bentang pelat lantai yang ditinjau. Total lendutan yang dimaksud adalah jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban tetap ditambah lendutan seketika akibat penambahan beban hidup. Kesesuaian antara struktur, fungsi bangunan, sifat pembebanan, serta elemen-elemen yang didukung oleh struktur tersebut harus dipertimbangkan dalam penentuan batas lendutan untuk kemampuan layan.

Untuk komponen struktur balok pemikul dinding atau finishing yang getas, dengan beban tidak terfaktor, batas lendutan maksimumnya adalah $L/360$ [9].

FFT (Fast Fourier Transform) dalam Transformasi Data Percepatan

FFT adalah operasi untuk mentransformasi data percepatan dalam domain waktu menjadi domain frekuensi secara numerik. FFT membagi data dalam frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks. Transformasi Fourier untuk pengolahan data percepatan dapat didefinisikan dengan rumus:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Dengan $S(f)$ = data dalam domain frekuensi, $a(t)$ = data dalam domain waktu, $e^{-j2\pi ft}$ = fungsi kernel, f = frekuensi, t = waktu.

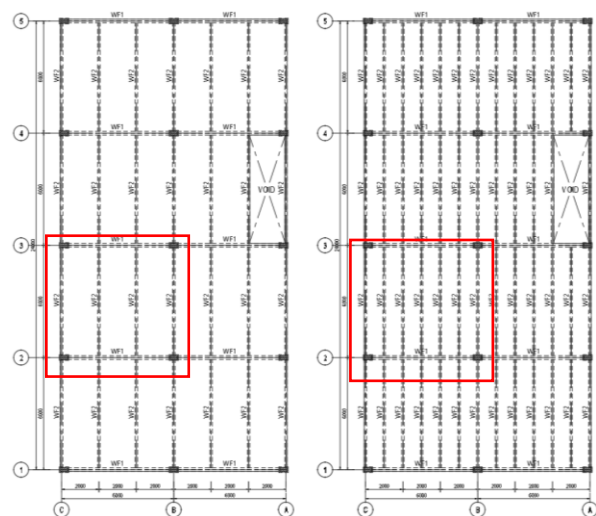
Estimasi kecepatan dan lendutan dari data percepatan

Respon kecepatan getar diperoleh dengan integrasi numerik percepatan terhadap waktu. Selanjutnya lendutan diperoleh dengan mengintegrasikannya sekali lagi. Namun dalam banyak kasus mengubah sinyal percepatan menjadi kecepatan dan perpindahan melalui integrasi tidak selalu memberikan solusi yang andal karena kondisi awal yang tidak diketahui dan *noise* yang tidak dapat dihindari. Selain itu,

proses koreksi yang diterapkan pada perkiraan lendutan dari percepatan kemungkinan menghilangkan beberapa informasi penting, yang menyebabkan hilangnya beberapa data lendutan, umumnya komponen frekuensi rendah gerakan struktur [3].

Filtering umumnya digunakan untuk menghilangkan komponen frekuensi tinggi (*low-pass filter*) atau komponen frekuensi rendah (*high-pass filter*). *Filtering* telah banyak digunakan baik yang dikombinasi dengan koreksi *baseline* atau hanya *filtering* saja dan memberikan peningkatan dalam akurasi perkiraan lendutan [5]. Dengan *FIR Equiripple Highpass Filter*, yang dioptimasi pada panjang filter yang dilakukan pada dua tahap integrasi *simpson 3/8* menghasilkan nilai lendutan dinamik $97.62\% \pm 1.43\%$ data LVDT [2].

2. METODE PENELITIAN



Gambar 4. Modul Pelat yang Ditinjau Dengan Denah Balok Sebelum Perkuatan (Kiri) dan Setelah Perkuatan (Kanan)

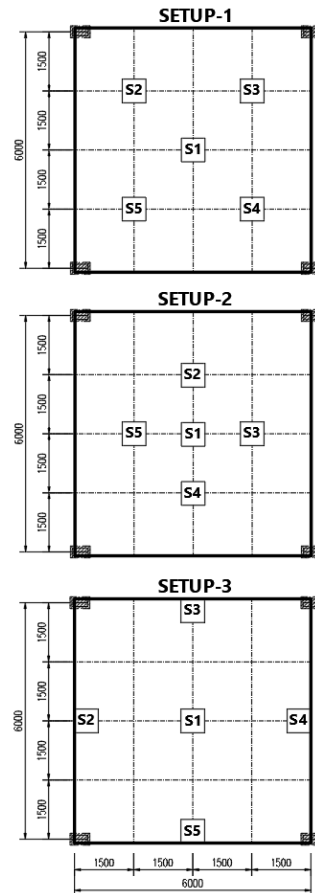
Penelitian dilakukan untuk mengetahui pemenuhan batasan lendutan pada pelat beton dan balok baja mengacu SNI 1729-2002, dan persyaratan getaran mengacu Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.49 Tahun 1996 dan ISO 2631-2 1989, sekaligus memberikan rekomendasi

perkuatan untuk meningkatkan performa pelat dan mengurangi getaran.

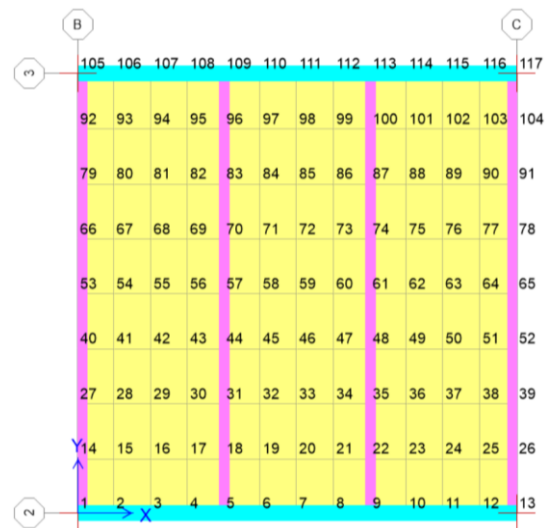
Tahapan Penelitian yang akan dilakukan:

- a. Pengukuran getaran pada pelat lantai
Pengukuran dilakukan pada kondisi operasional, dengan lokasi sensor seperti Gambar 5, dan direkam saat ada aktivitas. Sensor direkam bersamaan, selanjutnya 4 sensor dipindah dan 1 sensor sebagai *benchmark* (S-1) dan seterusnya.
- b. Pemrosesan data
Percepatan diolah untuk mendapatkan fungsi respons frekuensi (*FRF*), *filtering Highpass 2Hz Butterworth orde-5*. Dari integrasi percepatan diperoleh kecepatan, integrasi berikutnya didapat lendutan dengan SIGVIEW 5.3.2.0 STANDARD.

- c. Analisis struktur kondisi awal sebelum perkuatan
Analisis struktur dilakukan pada pelat dan balok yang diasumsikan bertumpuan sendi (Gambar 6) dengan SAP2000 *Version 22.0.0*, balok induk as-2 dan 3 terkekang pada arah-y. Mutu material dari hasil uji dan dimensi dari pengukuran, dengan beban hidup 600 kg/m² dan beban mati adalah berat sendiri ditambah 100 kg/m².



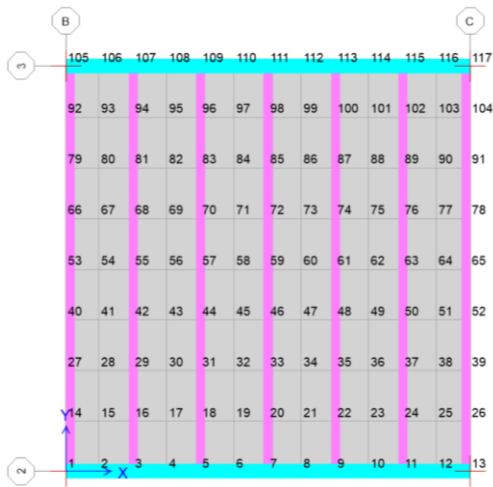
Gambar 5. Skema Penempatan Accelerometer



Gambar 6. Pemodelan Geometri Struktur Sebelum Perkuatan dan Penomoran *Joint*

- d. Validasi frekuensi hasil analisis dengan hasil uji
Frekuensi mode-1 hasil analisis divalidasi dengan hasil uji, jika berbeda

parameter kekakuan dan tumpuan dimodifikasi.



Gambar 7. Pemodelan Geometri Struktur Setelah Perkuatan dan Penomoran Joint

e. Analisis perkuatan struktur

Sebelum aplikasi perkuatan, dilakukan analisis untuk mengetahui performa struktur setelah aplikasi perkuatan dengan SAP2000 Version 22.0.0.

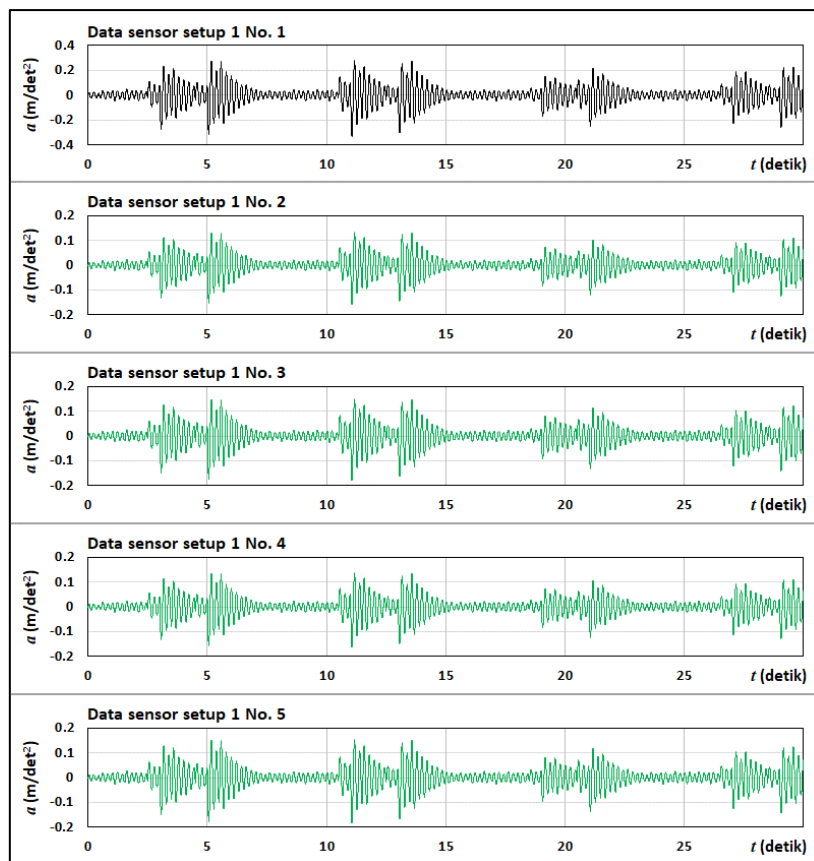
f. Analisis estimasi getaran saat perkuatan diaplikasikan

Analisis dilakukan untuk memeriksa pemenuhan kriteria secara analitik saat rekomendasi perkuatan diaplikasikan.

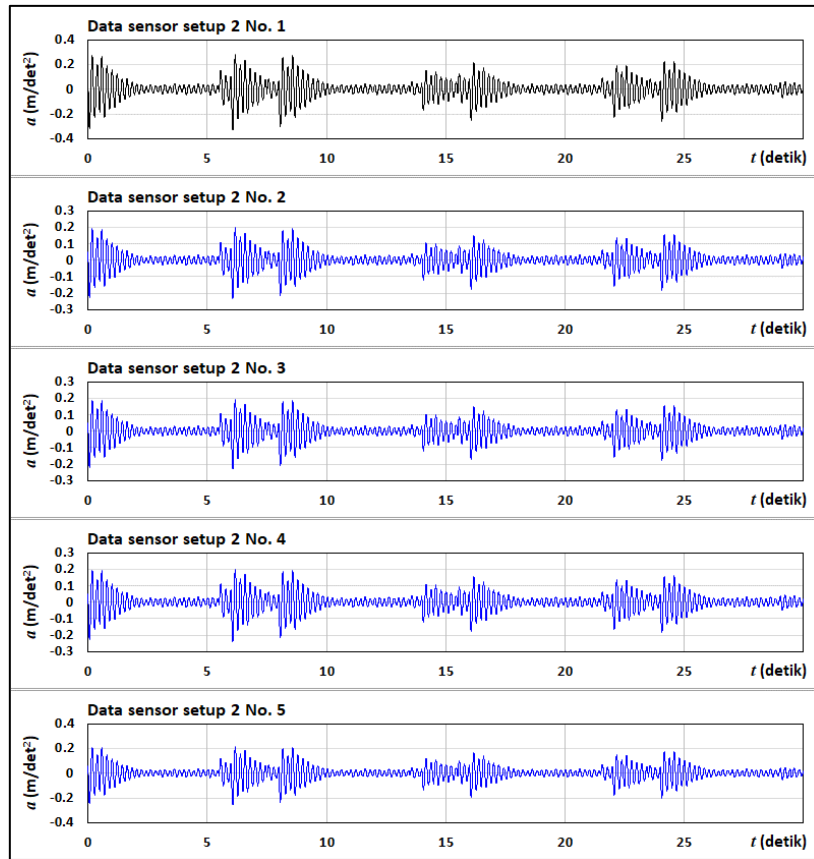
3. HASIL PENELITIAN

Rekaman data percepatan

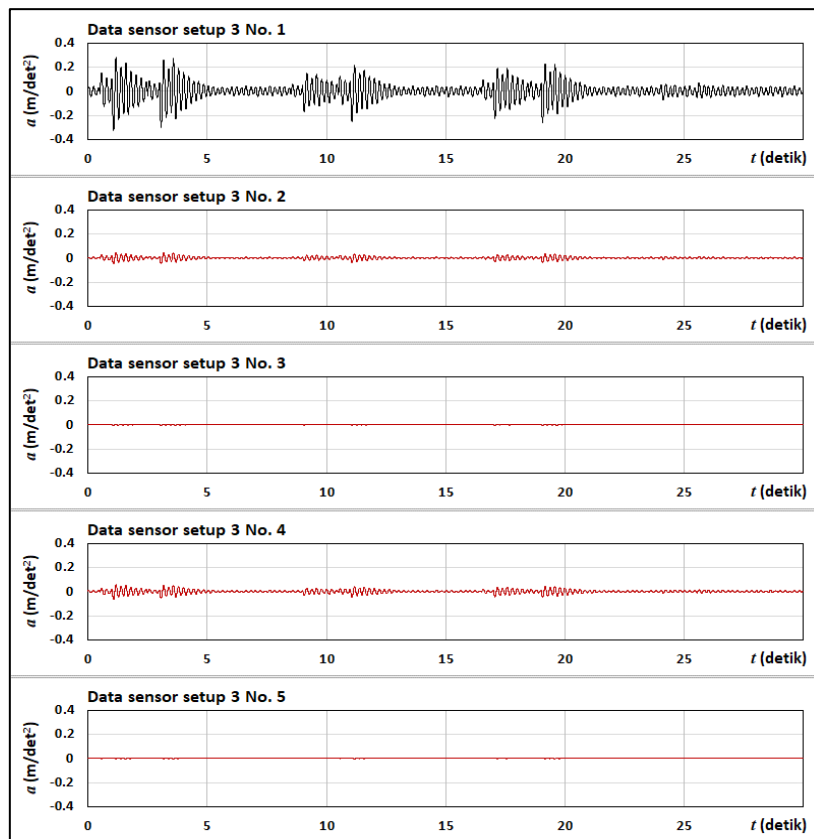
Data percepatan pada tiap *setup* alat berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 8. Data Accelerometer Setup-1

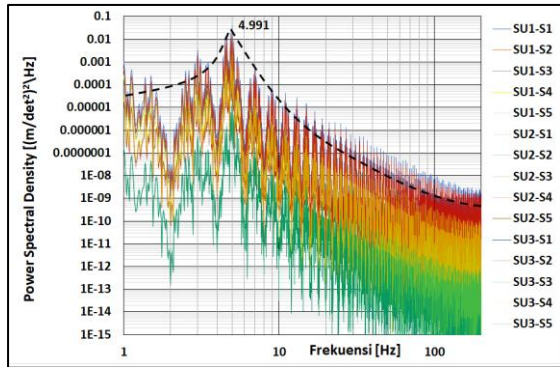


Gambar 9. Data Accelerometer Setup-2



Gambar 10. Data Accelerometer Setup-3

Sinyal percepatan dalam domain waktu ditransformasi ke domain frekuensi dengan *FFT*. *Power spectral density* dalam $(m/det^2)^2/Hz$ seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. *Power Spectral Density*

Puncak percepatan (*peak acceleration*) dalam %gravitasi dan frekuensi alami hasil tiap sensor ditunjukkan pada Tabel 3.

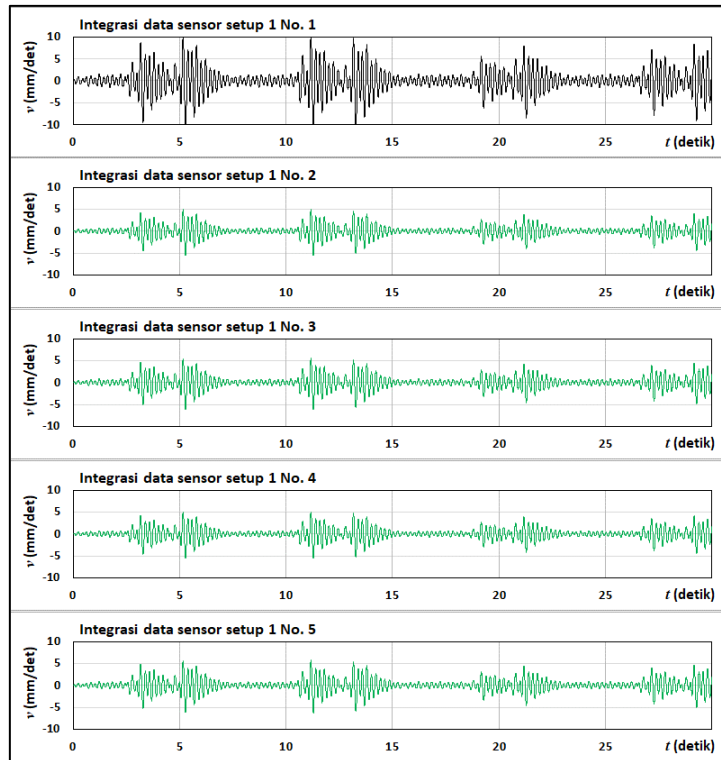
Tabel 3. Percepatan Puncak dan Frekuensi Alami Sebelum Perkuatan

No set up	No sensor	Percepatan Puncak (m/det ²)			Percepatan Puncak (%gravitasi)	frekuensi (hz)
		max	min	max		
1	1	0.281	-0.330	0.330	3.366	4.991
1	2	0.135	-0.158	0.158	1.615	4.862
1	3	0.151	-0.178	0.178	1.810	4.822
1	4	0.137	-0.162	0.162	1.649	4.896
1	5	0.155	-0.182	0.182	1.855	4.802
2	1	0.281	-0.330	0.330	3.366	4.867

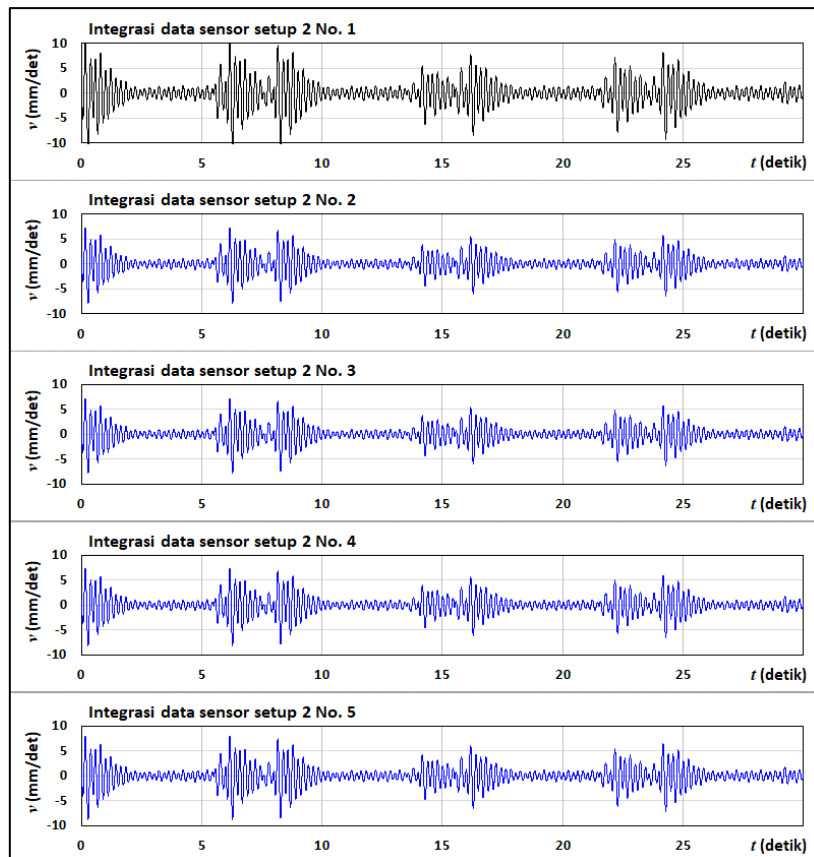
No set up	No sensor	Percepatan Puncak (m/det ²)			Percepatan Puncak (%gravitasi)	frekuensi (hz)
		max	min	max		
2	2	0.197	-0.231	0.231	2.360	4.901
2	3	0.194	-0.229	0.229	2.331	4.797
2	4	0.201	-0.236	0.236	2.409	4.966
2	5	0.217	-0.255	0.255	2.604	4.986
3	1	0.281	-0.330	0.330	3.366	4.822
3	2	0.044	-0.051	0.051	0.524	4.802
3	3	0.005	-0.005	0.005	0.055	4.877
3	4	0.056	-0.065	0.065	0.665	4.926
3	5	0.005	-0.005	0.005	0.054	4.877

Data Tabel 3 yang diplot ke Gambar 3 menunjukkan getaran yang terjadi tidak melebihi batas untuk kantor (Gambar 28).

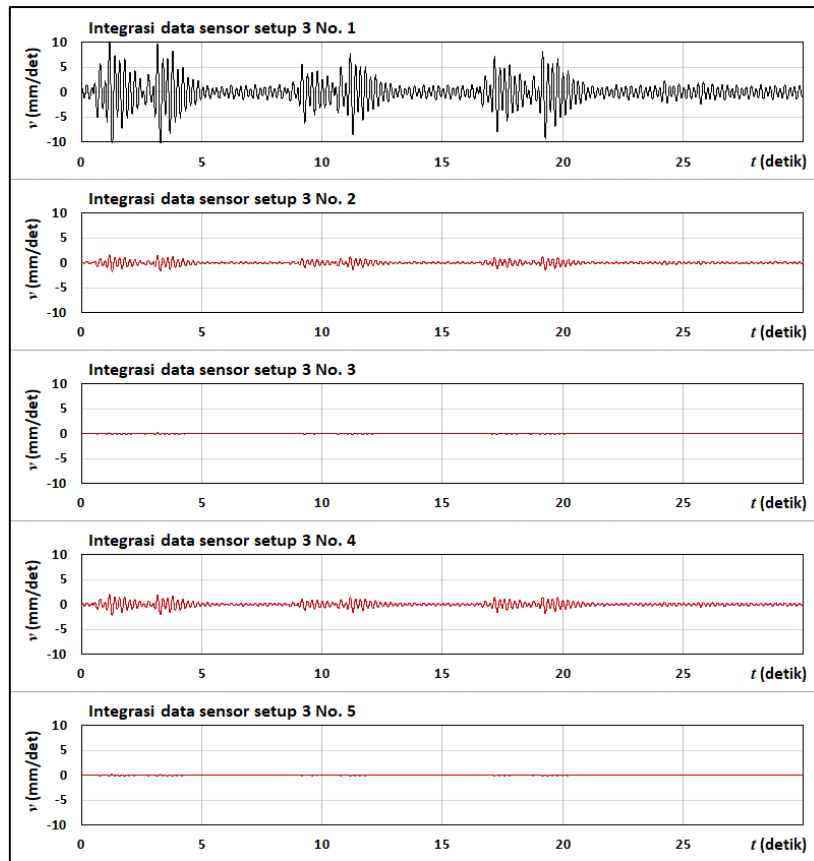
Filtering dan integrasi data percepatan
Kecepatan diperoleh dari *Filtering* data percepatan dari *noise* frekuensi <2 Hz menggunakan *IIR butterworth* orde-5, kemudian diintegrasikan. Hasilnya seperti Gambar 12, Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 12. Kecepatan Getar Dari Integrasi Numerik Data *Accelerometer* Setup-1



Gambar 13. Kecepatan Getar Dari Integrasi Numerik Data *Accelerometer* Setup-2



Gambar 14. Kecepatan Getar dari Integrasi Numerik Data *Accelerometer* *Setup-3*

Kecepatan puncak (*peak velocity*) dalam mm/detik dan frekuensi alami hasil tiap sensor ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kecepatan Puncak dan Frekuensi Alami Sebelum Perkuatan

No setu p	No senso r	Kecepatan Puncak (mm/det)			frekuensi (hz)
		max	min	abs max	
1	1	10.36 7	- 11.330	11.33 0	4.991
1	2	4.975	-5.443	5.443	4.862
1	3	5.575	-6.100	6.100	4.822
1	4	5.077	-5.544	5.544	4.896
1	5	5.711	-6.234	6.234	4.802
2	1	10.36 7	- 11.330	11.33 0	4.867
2	2	7.269	-7.952	7.952	4.901
2	3	7.180	-7.847	7.847	4.797
2	4	7.418	-8.099	8.099	4.966

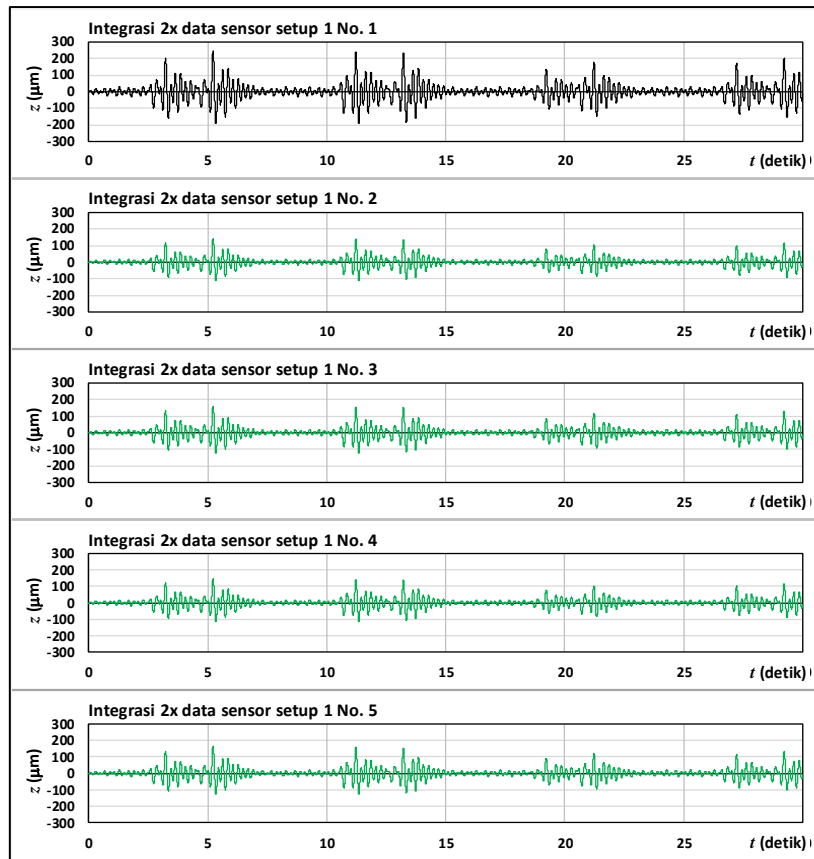
No setu p	No senso r	Kecepatan Puncak (mm/det)			frekuensi (hz)
		max	min	abs max	
2	5	8.019	-8.763	8.763	4.986
3	1	10.36 7	- 11.330	11.33 0	4.822
3	2	1.613	-1.763	1.763	4.802
3	3	0.168	-0.171	0.171	4.877
3	4	2.052	-2.222	2.222	4.926
3	5	0.172	-0.166	0.172	4.877

Data Tabel 4 selanjutnya diplotkan ke dalam grafik pada Gambar 2 untuk melihat katagori dampak getaran terhadap potensi kerusakan bangunan yang dapat dilihat pada Gambar 29, dimana hasilnya kecepatan getar yang terjadi Sebagian masuk dalam katagori A yaitu tidak menimbulkan kerusakan dan Sebagian lagi masuk dalam katagori B yaitu kemungkinan berdampak pada timbulnya

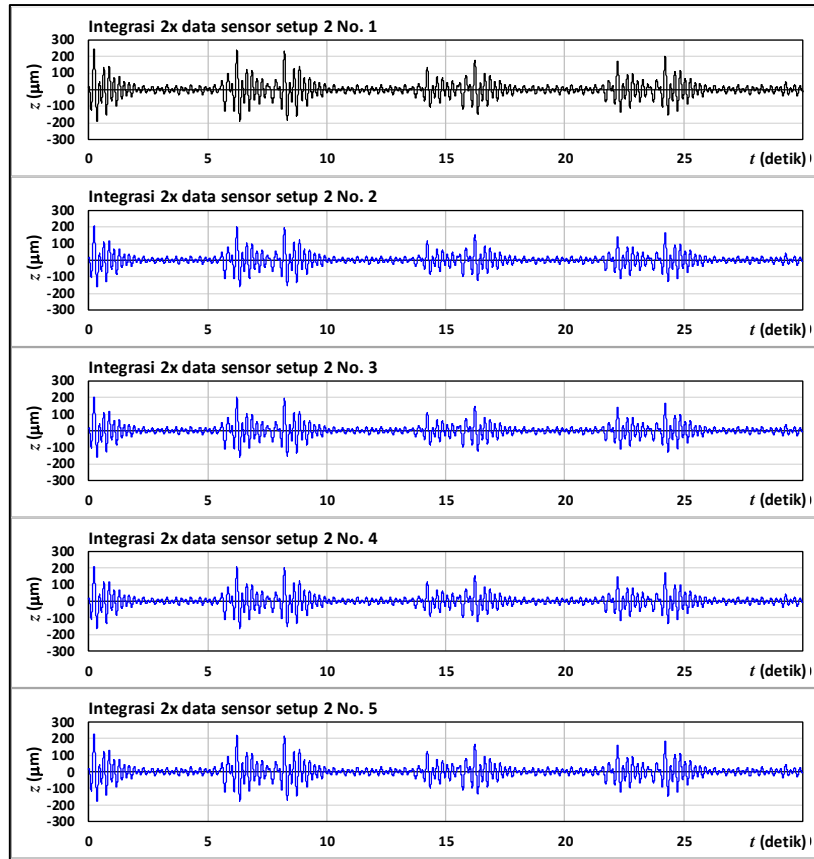
keretakan plesteran dan terlepasnya plesteran pada dinding. Kondisi ini dalam kenyataannya memang sudah terlihat secara visual di lapangan.

Untuk mendapatkan lendutan, dilakukan integrasi data kecepatan, atau integrasi 2x

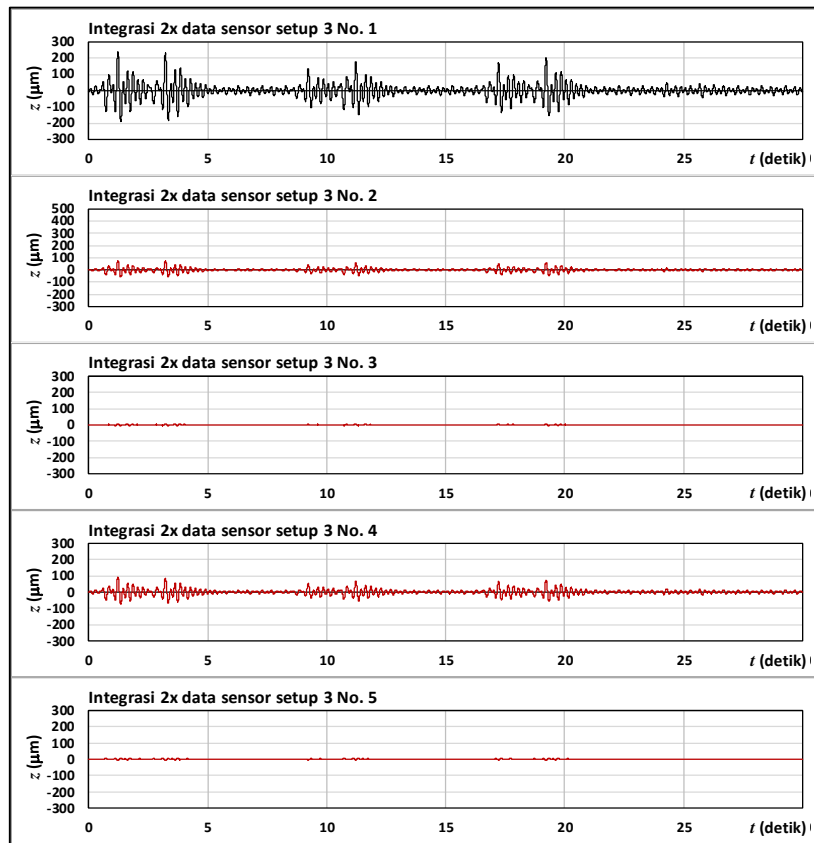
data percepatan yang sudah difilter dari frekuensi $< 2\text{Hz}$. Hasil integrasi seperti pada Gambar 15, Gambar 16, dan Gambar 17. Puncak lendutan dan frekuensi tiap sensor ditabulasi ke dalam Tabel 5.



Gambar 15. Lendutan Dinamik Dari 2x Integrasi Numerik Data Accelerometer Setup-1



Gambar 16. Lendutan Dinamik Dari 2x Integrasi Numerik Data *Accelerometer* Setup-2



Gambar 17. Lendutan Dinamik Dari 2x Integrasi Numerik Data *Accelerometer* Setup-3

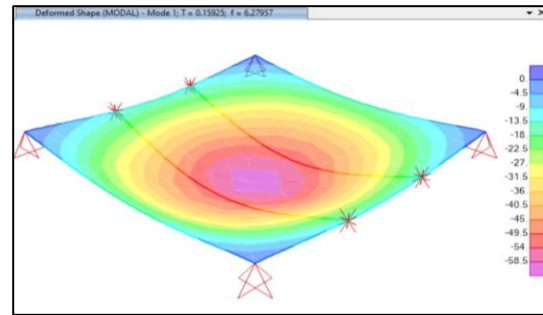
Untuk pengecekan pemenuhan batas minimal kenyamanan pengguna, data Tabel 5 diplotkan ke grafik Gambar 1 yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 30, dimana menunjukkan lendutan dinamik yang terjadi pada frekuensi dominan struktur bangunan kategorinya sebagian getaran tersebut berdampak dapat mengganggu kenyamanan pengguna bangunan. Pada kenyataannya getarannya memang terasa pada saat ada orang berjalan, tanpa menggunakan bantuan sensor sekalipun.

Tabel 5. Lendutan Puncak dan Frekuensi Alami Sebelum Perkuatan

No setu p	No senso r	Lendutan Puncak (mm)			frekuensi (hz)
		max	min	abs max	
1	1	243.0	-	243.0	4.991
		7	193.03	7	
		139.9	-	139.9	
		8	111.41	8	
		156.8	-	156.8	
1	3	142.7	-	142.7	4.822
		9	113.22	9	
		160.5	-	160.5	
		7	127.25	7	
2	1	243.0	-	243.0	4.867
		7	193.03	7	
		204.5	-	204.5	
		7	162.76	7	
		201.8	-	201.8	
2	3	9	160.39	9	4.797
		208.6	-	208.6	
		6	165.40	6	
2	4	225.5	-	225.5	4.966
		2	179.11	2	
		243.0	-	243.0	
3	1	7	193.03	7	4.822
		75.63	-60.05	75.63	
		7.12	-5.18	7.12	
		93.04	-74.29	93.04	
		5.27	-7.28	7.28	

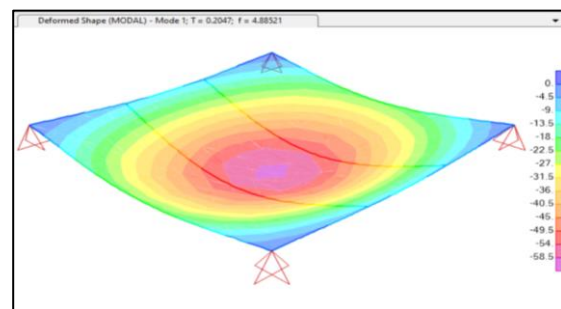
Analisis struktur kondisi eksisting

Hasil analisis struktur dengan modelisasi seperti Gambar 6. Pemodelan Geometri Struktur Sebelum Perkuatan dan Penomoran Joint Gambar 6 menghasilkan frekuensi alami mode-1 struktur 6.278Hz.



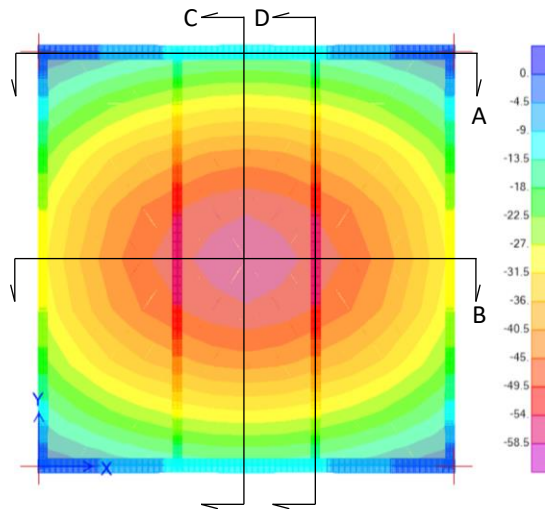
Gambar 18. Frekuensi Alami dan Mode Shape-1 Hasil Analisis SAP2000

Frekuensi alami yang dihasilkan berbeda dengan hasil uji getar 4.879 Hz yang menunjukkan bahwa kekakuan struktur dalam pemodelan harus dikurangi, agar model struktur yang dibuat dapat lebih merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Modifikasi dilakukan pada model struktur dengan mengurangi kekakuan pada balok induk, balok anak dan pelat lantai. Faktor modifikasi penampang diterapkan pada balok induk 0.4, pada balok anak 0.25 dan pada pelat 0.25. Selain itu asumsi sendi arah y pada balok 1/4 dan 3/4 balok induk dihilangkan. Setelah dilakukan analisis ulang diperoleh frekuensi alami 4.880 Hz, yang mendekati hasil uji getar.



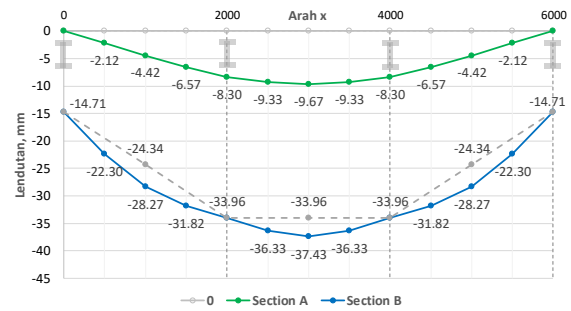
Gambar 19. Frekuensi Alami dan Mode Shape-1 Hasil Analisis SAP2000 dengan Modifikasi pada Tumpuan dan Inersia Elemen

Analisis selanjutnya menggunakan model yang sudah disesuaikan dengan hasil uji getar, dimana diperoleh kurva lendutan dengan beban layan sebagai berikut:

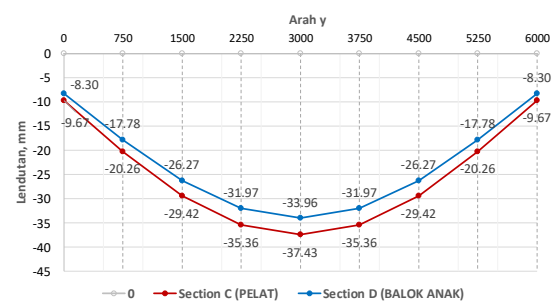


Gambar 20. Lendutan pada Kondisi Layan Hasil Analisis SAP2000

Dari analisis SAP2000 untuk pengecekan lendutan kondisi layan (lihat Gambar 21 dan Gambar 22), (1) lendutan balok induk maksimum 6.67 mm pada tengah bentang < lendutan ijin ($L/480 = 12.5$ mm); (2) Perpindahan *joint* di bentang tengah balok anak 33.96 mm yang menumpu pada balok induk yang melendut 8.3 mm sehingga dapat dinyatakan bahwa lendutan balok anak maksimum 25.66 mm > lendutan ijin ($L/480 = 12.5$ mm); (3) Perpindahan *joint* di bentang tengah pelat 37.43 mm, dimana pelat menumpu balok anak yang melendut 33.96 mm sehingga dapat dinyatakan bahwa lendutan pelat maksimum dalam bentang pendek 3.46 mm < lendutan ijin ($L/480 = 4.17$ mm), namun bagaimanapun pelat melendut cukup besar dalam arah memanjang 37.43 mm – lendutan balok induk 8.3 mm = 29.13 mm yang mengakibatkan keretakan pada pelat;



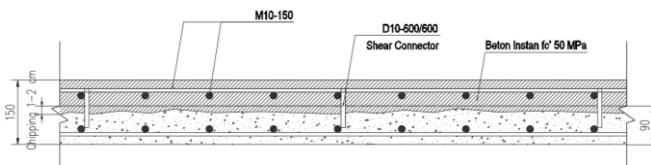
Gambar 21. Lendutan Analitik Section-A dan B



Gambar 22. Lendutan Analitik section-C dan D

Perkuatan yang diusulkan untuk memperbaiki kondisi tersebut adalah (1) upaya untuk mengurangi lendutan pada balok anak dengan memberikan tambahan balok di sela-sela balok eksisting (Gambar 4 kanan), sehingga beban yang diterima oleh balok anak eksisting terbagi ke balok anak baru. Penambahan balok anak juga diharapkan dapat menambah kekakuan struktur dan mengurangi getaran. (2) Walaupun ketebalan pelat 90 mm memenuhi persyaratan minimal ketebalan pelat yaitu $L/28$ ($2000/28 = 71.42$ mm) untuk kondisi pelat menerus pada kedua ujungnya, namun baik hasil uji dan analisis menunjukkan bahwa struktur perlu ditambah kekakuannya, sehingga diusulkan dilakukan penebalan pelat menjadi 150 mm. Selain menambah ketebalan, penebalan ini diperlukan untuk memperbaiki elastisitas pelat yang jika didekati dari hasil uji tekan beton sample *core* menunjukkan mutu rata-rata $f_c' = 14.5$ MPa (K-175). Penebalan pelat dilakukan dengan terlebih dahulu mengupas seluruh lapisan permukaan yang bukan beton, *chipping* permukaan beton, jacking untuk

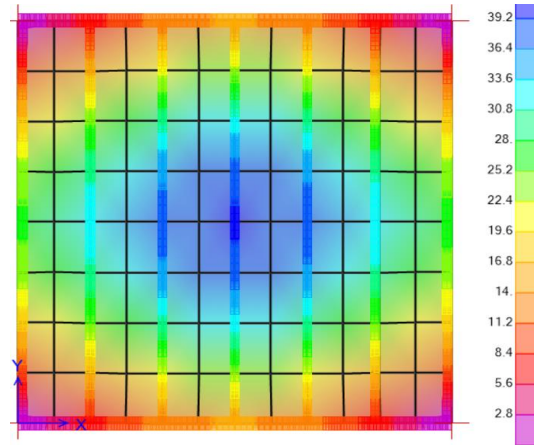
pengembalian kondisi balok dan pelat yang melendut, *injection* pada bagian pelat yang retak. Pemasangan *shear connector* pada pelat eksisting dengan modul 600 mm x 600 mm dengan *chemical*, pemasangan *wiremesh* m8 dan *overlay* menggunakan mortar grout $f_c'50$ MPa.



Gambar 23. Perkuatan Pelat

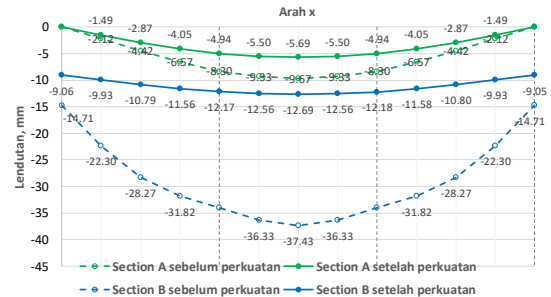
Tabel 6. Modifikasi Elemen Pelat dengan Adanya Penebalan dan Penambahan Wiremesh

Nama Material	Jarak dari center	Tebal (mm)	Tip e	Jumlah Titik Int.	Materia l	Sudut Meteri al
ConcS	0.045	0.07	She ll	2	K175	0
ConcN	0.035	0.09	She ll	2	fc'50	0
TopBar1	0.039	0.000753	She ll	1	A615Gr60	0
TopBar2	0.039	0.000753	She ll	1	A615Gr60	90
BotBar1	0.039	0.000753	She ll	1	A615Gr60	0
BotBar2	0.039	0.000753	She ll	1	A615Gr60	90

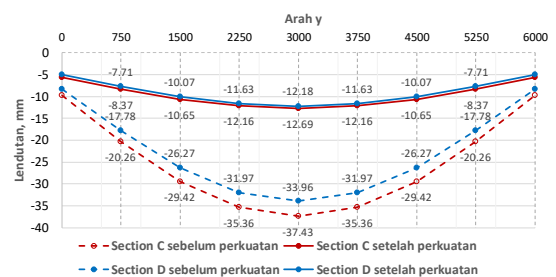


Gambar 24. Lendutan pada Kondisi Layan Hasil Analisis SAP2000 dengan Rencana Perkuatan

Hasil analisis dengan penambahan balok anak dan penebalan pelat menunjukkan lendutan maksimum pada balok induk berkurang dari 9.67 mm menjadi 5.69 mm, balok anak berkurang dari 25.66 mm menjadi 7.23 mm dan pelat diarah memanjang berkurang dari 27.77 mm menjadi 7.00 mm (Gambar 24).



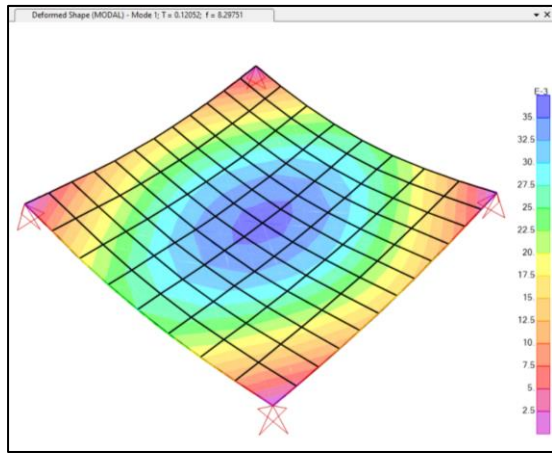
Gambar 25. Lendutan Analitik Section-A dan B pada Kondisi Layan Hasil Analisis SAP2000 Struktur dengan Rencana Perkuatan



Gambar 26. Lendutan Analitik Section-C dan D pada Kondisi Layan Hasil Analisis

SAP2000 Struktur dengan Rencana Perkuatan

Sementara frekuensi alami struktur meningkat menjadi 8.298 Hz (Gambar 27).



Gambar 27. Frekuensi dan Mode Shape-1 Hasil Analisis SAP2000 dengan Rencana Perkuatan

Untuk memperkirakan getaran yang terjadi jika perkuatan diimplementasikan, dilakukan dengan pendekatan SDOF:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

dengan f = frekuensi alami struktur (hz), m = massa struktur (kg.det²/m), k = kekakuan struktur (kg/m).

Persamaan frekuensi diatas dapat dituliskan:

$$k = 4\pi^2 f^2 m \quad (3)$$

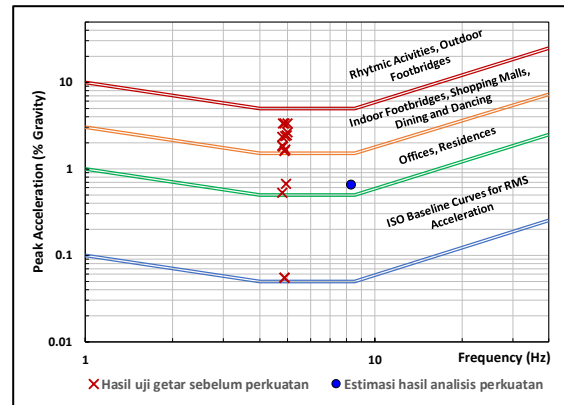
Untuk kondisi sebelum perkuatan, diketahui $m_1 = 935$ kg.det²/m dan $f_1 = 4.885$ Hz, maka kekakuan, $k_1 = 869988.79$ kg/m. Dan pada kondisi sebelum setelah $m_2 = 1671.025$ kg.det²/m, $f_2 = 8.298$ Hz, maka kekakuan $k_2 = 4546102.33$ kg/m. Rasio kekakuan struktur setelah dan sebelum perkuatan, $r_k = \frac{k_2}{k_1} = 5.225$.

Jika P adalah gaya yang bekerja pada pusat massa dan z adalah perpindahan, maka:

$$k = \frac{P}{z} \quad (4)$$

Jika kekakuan struktur bertambah, dengan beban tetap maka lendutan yang terjadi

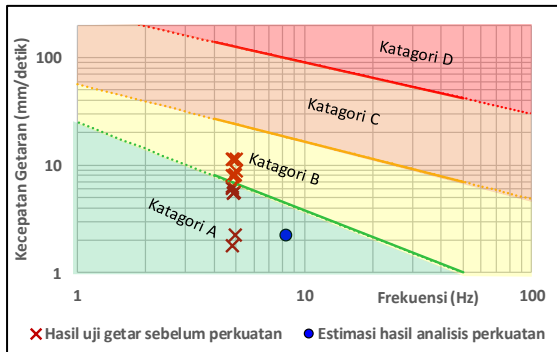
berkurang. Selanjutnya getaran puncak setelah perkuatan diprediksi dengan membagi getaran sebelum perkuatan (percepatan Tabel 3, kecepatan Tabel 4 dan lendutan Tabel 5) dengan rasio kekakuan, r_k , diperoleh nilai lendutan, kecepatan dan percepatan puncak secara berturut-turut 243.075 mm, 11.33 mm/detik dan 3.366 %.



Gambar 28. Tingkat Kenyamanan untuk Aktivitas Manusia dari Hasil Uji Kondisi Eksisting dan Estimasi Analitik Jika Diaplikasikan Perkuatan Berdasarkan Percepatan Puncak dan Frekuensi

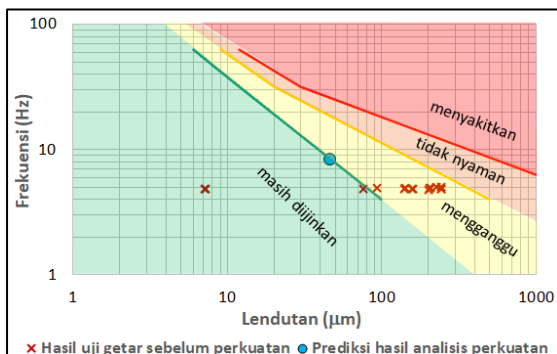
Selanjutnya estimasi nilai-nilai puncak dan frekuensi diplotkan ke dalam Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3 untuk mengetahui pemenuhan kenyamanan dan kesehatan manusia serta dampak kerusakan terhadap bangunan. Hasilnya seperti Gambar 28, Gambar 29, dan Gambar 30.

Dari Gambar 28 terlihat pada kondisi awal bangunan tidak direkomendasikan sebagai kantor. Jika usulan perkuatan diaplikasikan, maka diestamasi frekuensi alami meningkat dan percepatan puncak getaran berkurang, sehingga bangunan layak difungsikan sebagai kantor.



Gambar 29. Kecepatan Puncak dan Frekuensi Getar Terhadap Tingkat Kerusakan Bangunan dari Hasil Uji kondisi Eksisting dan Estimasi Analitik Jika Diaplikasikan Perkuatan

Gambar 29 menunjukkan pada kondisi awal bangunan masuk dalam katagori B (getaran yang terjadi dapat menyebabkan keretakan pada elemen non struktural). Jika usulan perkuatan diaplikasikan, maka diestamasi frekuensi meningkat dan kecepatan puncak berkurang, sehingga tidak berpotensi mengalami kerusakan akibat beban operasional.



Gambar 30. Lentutan Puncak dan Frekuensi Getar Terhadap Kenyamanan Manusia dari Hasil Uji Kondisi Eksisting dan Estimasi Analitik Jika Diaplikasikan Perkuatan

Dari Gambar 30 terlihat bahwa pada kondisi awal, dengan nilai lentutan dinamik puncak pada saat operasional dan frekuensi alami struktur, getaran yang terjadi masuk dalam katagori mengganggu pengguna bangunan. Jika perkuatan diaplikasikan, diestamasi frekuensi alami

meningkat dan lentutan dinamik puncak berkurang, sehingga bangunan masuk katagori diijinkan sebagai bangunan kantor.

4. KESIMPULAN

- a. Dari hasil pengujian dan analisis pelat dan balok pada satu modul kolom, menunjukkan bahwa bangunan dalam kondisi tidak laik fungsi sebagai bangunan kantor, ditinjau dari getaran pada bangunan pada kondisi operasional dan lentutan statik akibat beban layan.
- b. *Refinement* model struktur dilakukan dengan menyamakan frekuensi alami model dengan frekuensi alami hasil pengujian. Frekuensi hasil analisis 6.278 Hz lebih besar dibandingkan hasil uji 4.879 Hz. Modifikasi dilakukan pada penampang dengan faktor modifikasi pada inersia balok induk 0.4, balok anak 0.25 dan pelat 0.25, dan sendi arah y pada balok $\frac{1}{4}$ dan $\frac{3}{4}$ balok induk dihilangkan. Modifikasi ini menghasilkan frekuensi analitik 4.880 Hz yang mendekati hasil uji getar.
- c. Usulan perbaikan dengan *injection*, grouting dan patching pada bagian *defect*, *jacking* untuk menghilangkan lentutan, penambahan balok anak dan penebalan pelat secara analitik dapat menaikkan kekakuan dan frekuensi alami dari 4.879 Hz menjadi 8.298 Hz, lentutan maksimum pada balok induk berkurang 41.2% dari 9.7 mm menjadi 5.7 mm, balok anak berkurang 71.6% dari 25.7 mm menjadi 7.2 mm dan pelat di arah memanjang berkurang 74.7% dari 27.8 mm menjadi 7 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Rainieri and G. Fabbrocino, "Operational Modal Analysis: overview and applications," *Structural and Geotechnical Dynamic Lab StreGa, University of Molise, Termoli (CB), Italy*, no. Strategies for reduction of the seismic risk, pp. 29-43, 2008.

- [2] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, J. Widjajakusuma and N. , "Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar," *Konstruksia*, vol. 14, no. 2, 2023.
- [3] H. S. Lee, Y. H. Hong and H. W. Park, "Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 82, no. 4, pp. 403-434, 2010.
- [4] ISO-2631-2, "Evaluation of human exposure to whole-body vibration," in *Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 Hz-80 Hz)*., Switzerland, International Organization for Standardization, 1989.
- [5] J. Park, S. H. Sim and H. J. Jung, "Displacement Estimation Using Multimetric Data Fusion," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18(6), pp. 1675-1682, 2013.
- [6] Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49, "Baku Tingkat Getaran," in *Lampiran I Baku Tingkat Getaran Mekanik Berdasarkan Dampak Kerusakan*, Jakarta, Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 1996.
- [7] SNI-1727-2020, Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain, Jakarta: Badan Sertifikasi Nasional, 2020, pp. 26-29.
- [8] SNI-2847-2019, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan," in *Tabel 24.2.2*, Badan Sertifikasi Nasional, 2019.
- [9] SNI-03-1729-2000, "Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan gedung," Jakarta, Badan Sertifikasi Nasional, 2000.