

Pemeriksaan Pemenuhan Standar Getaran untuk Keselamatan dan Kenyamanan Masjid Apung Ziadatul Abrar dengan *Smartphone*

Heri Khoeri^{1*}, Galuh Adeputra², Zerik Sembada³

¹Universitas Muhammadiyah Jakarta, Indonesia

²PT. Hesa Laras Cemerlang

³Sinar Mas Mining

*email: heri.khoeri@umj.ac.id

Info Artikel

Dikirim: 16 November 2023

Diterima: 3 April 2024

Diterbitkan: 31 Mei 2024

Kata kunci:

Dinamik;

Frekuensi;

Getaran;

Kecepatan;

Lendutan;

Percepatan.

ABSTRAK

Masjid Ziyadatul Abrar merupakan salah satu program CSR dari PT Borneo Indobara bagi Masyarakat Tanah Bumbu, Provinsi Kalimantan Selatan, yang diharapkan menjadi daya Tarik wisata religi. Masjid dibangun di pesisir Pantai Pagatan, menjorok 110 m dari bibir pantai ke Laut Jawa, direncanakan PT. Hesa Laras Cemerlang dan dikonstruksi PT Lintech Duta Pratama. Selain pemenuhan kriteria kelaikan teknis. aspek kenyamanan juga menjadi perhatian. Pemeriksaan pemenuhan standar getaran menjadi bagian yang dilakukan untuk menjamin jamaah merasa aman dan nyaman saat beraktivitas, hal ini sejalan dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.49 Tahun 1996 dan ISO 2631-2 1989 yang mensyaratkan getaran tidak berpotensi merusak bangunan, juga tidak mengganggu kenyamanan dan kesehatan manusia. Dari hasil uji getar diketahui getaran pada kondisi operasional masih di bawah batas ijin dengan frekuensi antara 5,66-15,86 Hz, percepatan getaran puncak 0,36-1,94 %g, kecepatan getaran puncak 0,10-1,99 mm/det dan lendutan dinamik 1,22-67,37 mm.

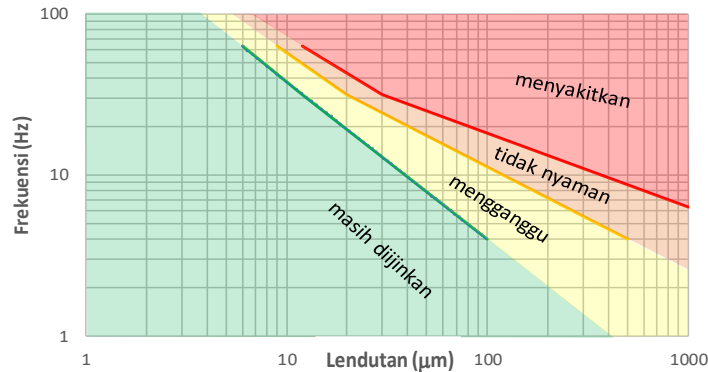
1. PENDAHULUAN

Untuk memastikan Masjid Ziyadatul Abrar (Gambar 1) aman dan nyaman bagi jamaah pada saat mulai difungsikan, mala dilakukan pemeriksaan ambang batas getaran dengan beban ambien yang merepresentasikan aktivitas saat operasionalnya. Dalam peraturan ditentukan batasan lendutan ijin pada struktur beton [1], persyaratan getaran yang tidak mengganggu kenyamanan [2], tidak berdampak dengan kesehatan manusia dan tidak berpotensi mengakibatkan kerusakan bangunan [3].



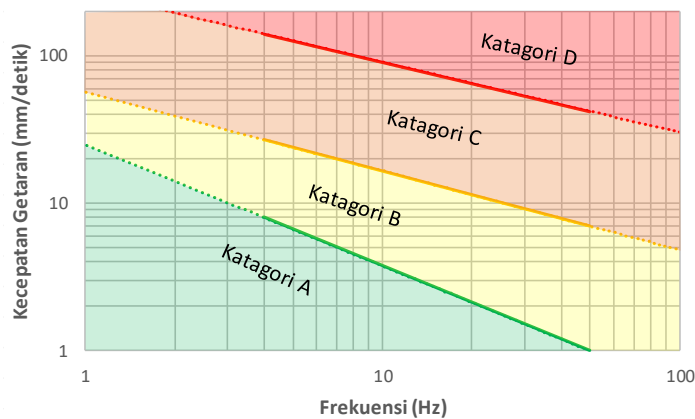
Gambar 1. Rencana Masjid Ziadatul Abrar [4] dan *progress* pembangunan per agustus 2023

Elemen struktur diperiksa untuk meyakinkan bahwa getaran pada saat masjid difungsikan masih di bawah baku tingkat getaran dan menyiapkan alternatif perbaikan jika melampaui ambang batas yang diijinkan. Baku tingkat getaran yang diperbolehkan dan tidak berpotensi menimbulkan gangguan terhadap kenyamanan dan kesehatan, seperti pada Gambar 2 [3].



Gambar 2. Baku Tingkat Getaran Mekanik untuk kenyamanan dan Kesehatan [3]

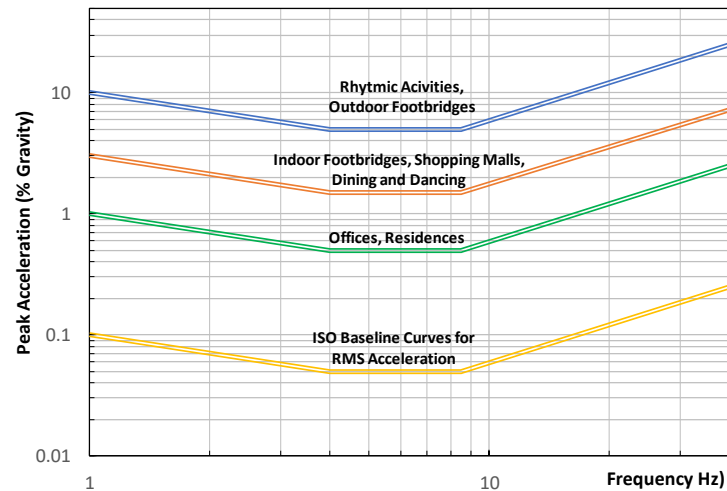
Selain masalah kenyamanan dan kesehatan pengguna, kerusakan bangunan pun dapat timbul akibat getaran. Hubungan batasan kecepatan getaran, frekuensi dan dampak kerusakan seperti pada Gambar 3:



- 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 3. Baku Tingkat Getaran Mekanik Berdasarkan Dampak Kerusakan [3]

Rekomendasi ISO 2631-2 untuk frekuensi dan puncak percepatan yang memenuhi kenyamanan berdasarkan aktivitas manusia seperti pada Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Rekomendasi frekuensi getar dan puncak percepatan untuk kenyamanan aktivitas manusia [2]

Smartphone dapat digunakan sebagai alat penilaian getaran dinamik akibat beban orang berjalan dimana dinamika akibat beban langkah manusia yang dengan sensor tradisional sulit diukur [5]. Giroskop di dalam *smartphone* mampu merekam getaran *real-time*, dengan mudah digunakan, dianalisis dan dibagikan, hal ini mengatasi kelemahan pada sensor tradisional [6]. Eksperimen dengan meja getar menunjukkan sistem pemantauan nirkabel berbasis *smartphone* cukup akurat mengidentifikasi parameter modal struktur [7].

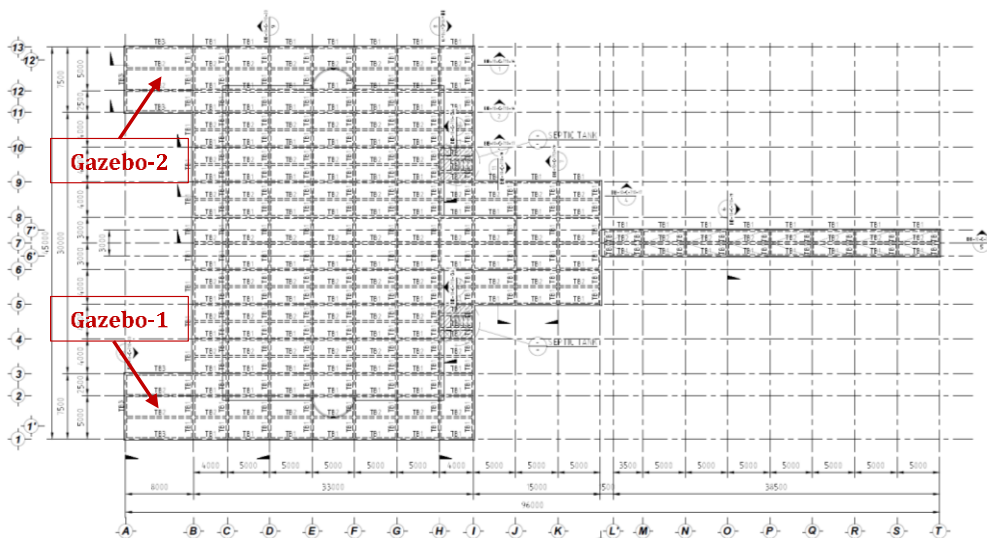
2. METODE PENELITIAN

Secara ringkas tahapan penelitian yang dilakukan:

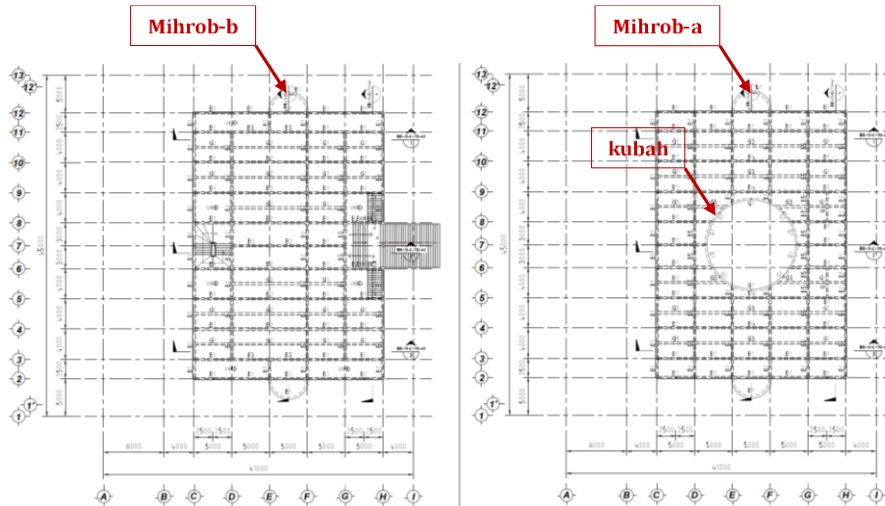
- 1) Akuisisi data getaran dengan beban operasional
- 2) Transformasi data percepatan ke domain frekuensi
- 3) Integrasi data percepatan menjadi kecepatan dan lendutan
- 4) Pengecekan pemenuhan persyaratan getaran

2.1 Akuisisi data getaran dengan beban operasional

Pengukuran getaran yang dilakukan menggunakan beban ambien, dengan menggunakan beban orang yang berjalan di atas struktur dan sekitarnya. Data getaran direkam dengan menggunakan accelerometer yang ada pada *iphone-11* dengan aplikasi *g-force*. Lokasi penempatan sensor seperti pada Gambar 6.



Gambar 5. Lokasi penempatan sensor pada lantai-1 Masjid



Gambar 6. Lokasi penempatan sensor pada lantai-2 dan atap Masjid

Pengambilan data dengan beban ambien merupakan bagian dari akuisisi data OMA (*Operational Modal Analysis*). OMA adalah metode yang digunakan untuk menguji struktur di bawah kondisi operasionalnya [8]. Ini dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti validasi dan pembaruan model elemen hingga (*FE*), *SHM* (*Structural Health Monitoring*), deteksi kerusakan [9], estimasi beban[10], dan pemantauan kondisi.[11].

Proses perekaman data dilakukan dalam waktu 120 detik, kemudian dilakukan pemotongan data pada 30 detik pertama dan 30 detik terakhir, artinya data yang dianalisis adalah dalam durasi 60 detik. Data yang diperoleh berupa data percepatan arah-x, y dan z dan resultan percepatan dalam g (gravitasi), dengan interval data 0,01 detik, atau frekuensi *sampling* 100 hz. *Screenshot* aplikasi dan contoh data yang terekam dalam format *.csv seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. g-force pada i-phone 11 dan hasil rekaman percepatan dalam format *.csv

2.2 Fast Fourier Transform (FFT) dalam Transformasi Data Percepatan

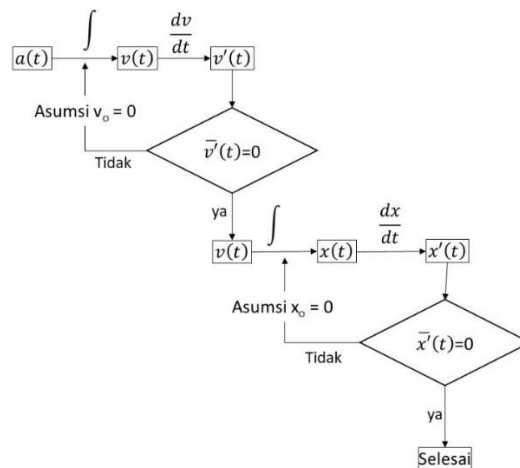
FFT merupakan teknik operasi matematika yang dapat mentransformasi data percepatan dalam domain waktu ke domain frekuensi, yang dapat didefinisikan dengan rumus:

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

Dengan $S(f)$ = sinyal dalam domain frekuensi, $a(t)$ = sinyal percepatan dalam domain waktu, $e^{-j2\pi ft}$ = fungsi kernel, f = frekuensi dan t = waktu. Algoritma memperkirakan sifat dinamis system dari representasi *state space*. Teknik *Stochastic subspace identification*, *SSI* terbukti menjadi alat sederhana yang dapat diandalkan untuk identifikasi modal, diantaranya untuk pemantauan kondisi sistem suspensi kereta api (Bogie Y25) [12], jembatan jalan raya dan kereta api [13], jembatan pedestrian [14], aplikasi industri [15], dalam pemantauan infrastruktur sipil [16] dan dalam identifikasi dinamis bangunan bersejarah [17]. David Di Ruscio and Christer Dalen [18] serta Di Natale L, dkk [19] menyajikan algoritma identifikasi *subspace*.

2.3 Estimasi Kecepatan dan Lentutan dari Data Percepatan

Respon kecepatan getar diperoleh dengan integrasi numerik percepatan terhadap waktu. Selanjutnya lentutan diperoleh dengan mengintegrasikannya sekali lagi. Untuk mendapatkan data integrasi numerik yang handal pada studi ini digunakan Pada studi ini digunakan *FIR Equiripple Highpass Filter*, yang dioptimasi pada panjang filter pada dua tahap integrasi *simpson 3/8*. *Filtering* telah banyak digunakan baik yang dikombinasi dengan koreksi *baseline* atau hanya *filtering* saja dan memberikan peningkatan dalam akurasi perkiraan lentutan. Dengan *FIR Equiripple Highpass Filter*, yang dioptimasi pada panjang filter yang dilakukan pada dua tahap integrasi *simpson 3/8* menghasilkan nilai lentutan dinamik yang mendekati aktualnya [10]. Algoritma untuk integrasi data percepatan menjadi kecepatan dan lentutan seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Alur pemrosesan data percepatan menjadi kecepatan dan lentutan

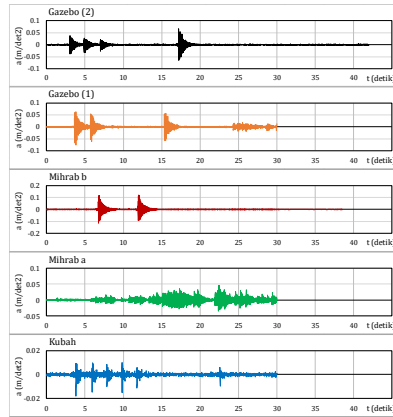
2.4 Pengecekan pemenuhan persyaratan getaran

(1) Data percepatan hasil pengukuran; (2) data kecepatan dan lentutan dinamik hasil integrasi numerik dan (3) frekuensi alami hasil dari transformasi data percepatan dalam domain waktu ke domain frekuensi selanjutnya disuperimposed ke dalam Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 untuk mengetahui pemenuhan persyaratan getaran sesuai Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.49 Tahun 1996 dan ISO 2631-2 1989.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Rekaman Data percepatan

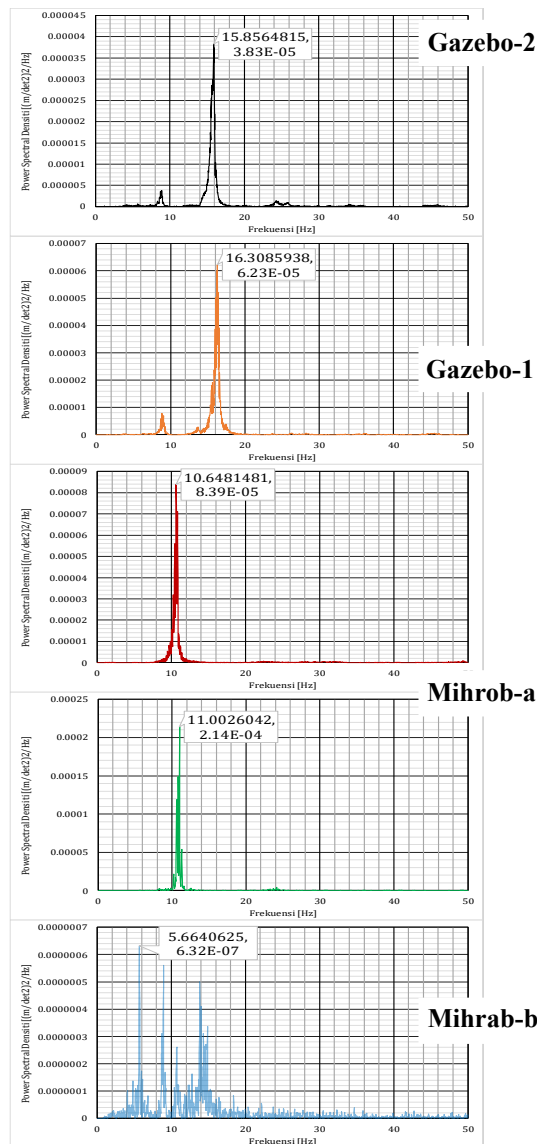
Data percepatan yang direkam menggunakan aplikasi g-force meter pada Iphone-11, seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Data percepatan hasil rekaman aplikasi g-force meter pada Iphone-11

3.2 Transformasi data percepatan dalam domain waktu ke domain frekuensi dengan *FFT*

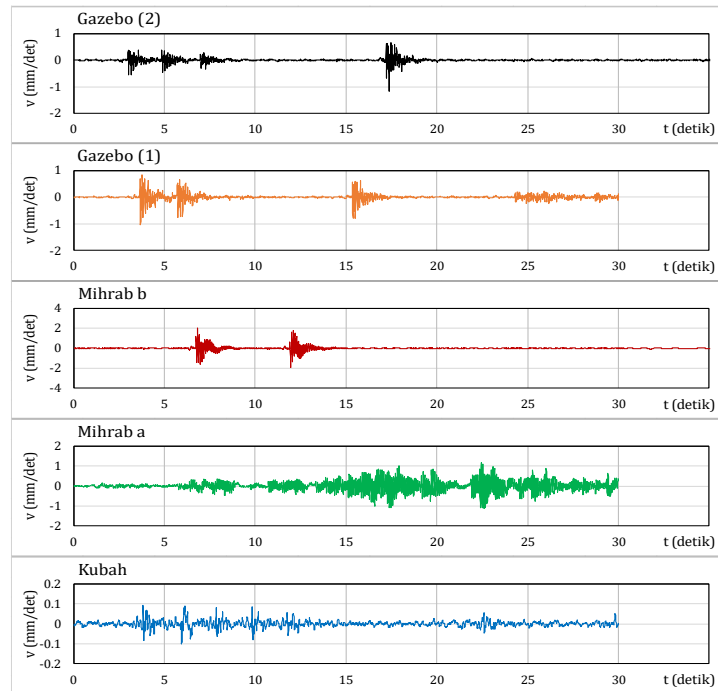
Hasil Tranformasi data percepatan dalam domain waktu ke domain frekuensi menggunakan *fast fourier transformation* seperti pada Gambar 10.



Gambar 10: Frekuensi hasil *FFT* data percepatan

3.3 Integrasi data percepatan menjadi kecepatan

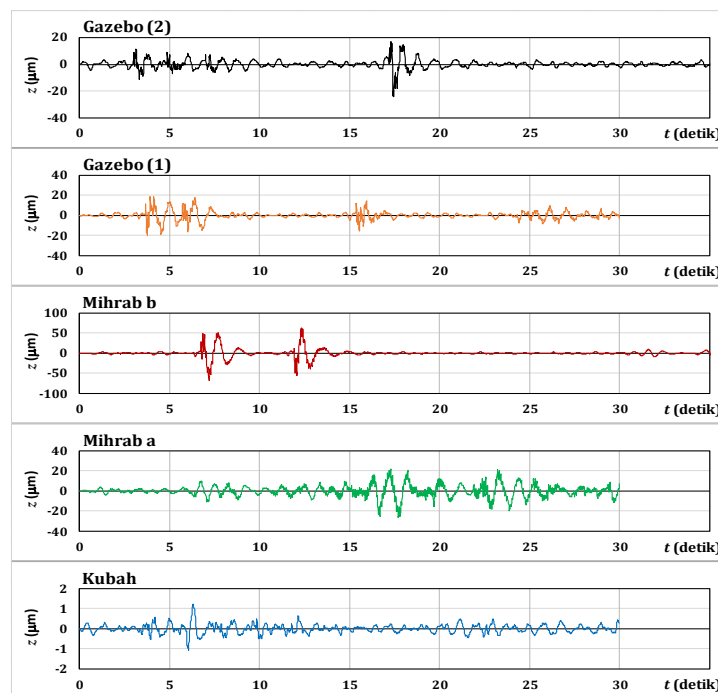
Integrasi Data Percepatan Getar yang telah *didetrending* dan *diFilter* dengan *FIR Highpass Filter* dari *noise* 1 Hz menjadi data kecepatan getar (mm/det), seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Kecepatan getar hasil integrasi data percepatan yang sudah difilter

3.4 Integrasi data kecepatan menjadi data lendutan

Integrasi 2x Data Percepatan Getar yang telah *didetrending* dan *difilter* dengan *FIR Highpass* dari *noise* 1 Hz menjadi data lendutan dinamik (mm) seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. lendutan dinamik hasil integrasi data kecepatan

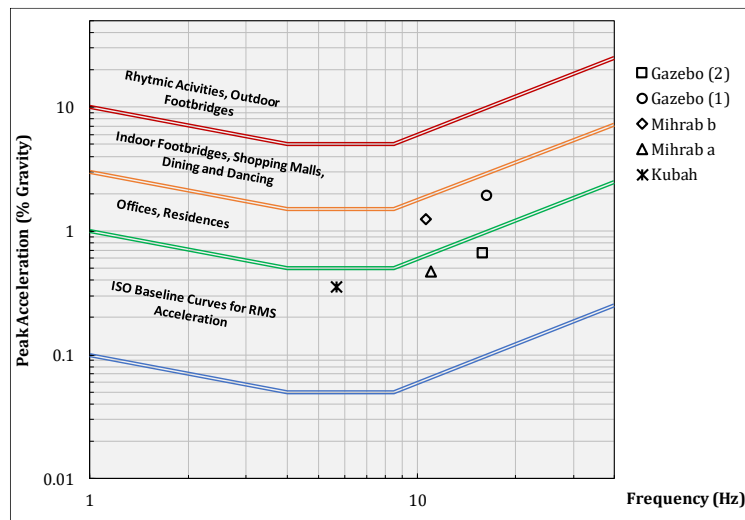
3.5 Pengecekan pemenuhan persyaratan getaran

Data percepatan puncak (dalam %gravitasi) pada masing-masing pengukuran ditabulasi dengan frekuensi alami getaran pada arah vertikal, seperti pada

Tabel 1. Frekuensi terendah adalah pada area kubah yaitu 5.664 Hz, hal ini karena diantara elemen lainnya yang diukur, jarak antara kolom ke kolom pada area kubah bentangnya paling lebar yaitu 15 m. Selanjutnya mihrab walaupun bentangnya 2,5 m namun frekuensinya (10.648Hz dan 11.003 Hz) lebih kecil dibandingkan dengan gazebo (15.856 Hz dan 16.309 Hz) yang bentangnya 8 m, karena struktur mihrab merupakan kantilever, sehingga kekakuannya tidak lebih besar dari gazebo walaupun bentangnya lebih pendek. Dari nilai frekuensi alami yang diperoleh dari beberapa elemen struktur, maka rekaman data percepatan dengan menggunakan g-force pada Iphone-11 dapat dinyatakan *realible*. Selanjutnya data yang sudah ditabulasi diplotkan ke dalam Gambar 4, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 13. Berdasarkan Gambar 13, getaran yang terjadi akibat beban operasional masih dalam batas-batas yang diizinkan untuk bangunan masjid sesuai dengan dan ISO 2631-2 1989.

Tabel 1. Frekuensi (Hz) dan Percepatan Getar Puncak (m/det²)

Lokasi	Percepatan Puncak (m/det ²)			Percepatan Puncak (%gravity)	frekuensi (hz)
	max	min	abs max		
Gazebo (2)	0.065	-0.065	0.065	0.667	15.856
Gazebo (1)	0.164	-0.191	0.191	1.945	16.309
Mihrab b	0.122	-0.115	0.122	1.244	10.648
Mihrab a	0.046	-0.035	0.046	0.472	11.003
Kubah	0.010	-0.035	0.035	0.356	5.664



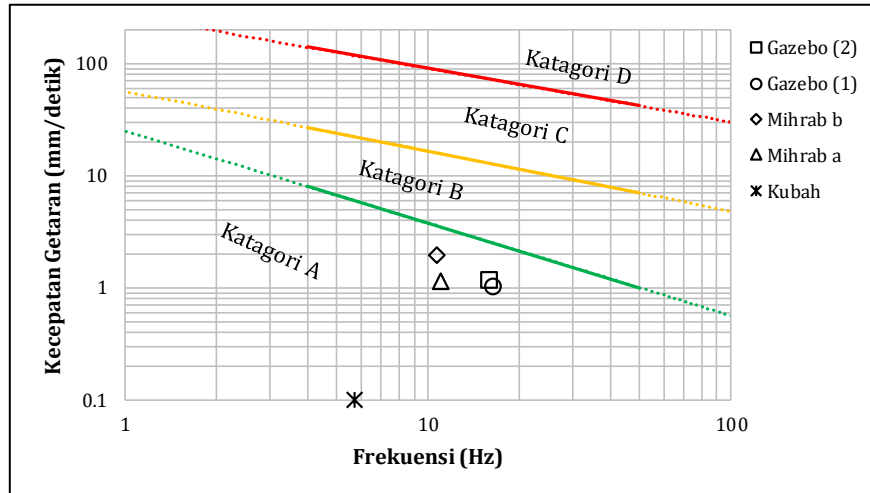
Gambar 13. Frekuensi (Hz) dan Percepatan Getar Puncak (m/det²) pada lokasi-lokasi pengukuran

Data kecepatan Gambar 11 pada masing-masing pengukuran ditabulasi dengan frekuensi alami getaran pada arah vertikal, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Frekuensi (Hz) dan kecepatan Getar Puncak (mm/det)

joint	Kecepatan Puncak (mm/det)			frekuensi (hz)
	max	min	abs max	
Gazebo (2)	0.645	-1.177	1.177	15.856
Gazebo (1)	0.835	-1.043	1.043	16.309
Mihrab b	1.987	-1.883	1.987	10.648
Mihrab a	1.159	-1.117	1.159	11.003
Kubah	0.100	-0.100	0.10	5.664

Selanjutnya data pada Tabel 2 diplotkan ke dalam Gambar 3, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 14. Hasilnya kecepatan getaran yang terjadi akibat beban operasional masuk dalam katagori A yaitu getaran yang terjadi tidak berpotensi menimbulkan kerusakan pada bangunan sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.49 Tahun 1996 dan ISO 2631-2 1989.

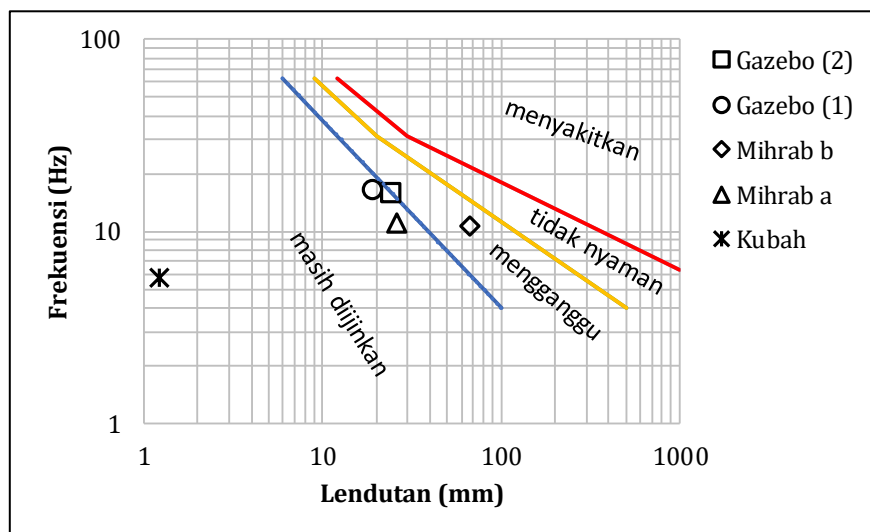


Gambar 14. Frekuensi (Hz) dan kecepatan Getar Puncak (mm/det) pada lokasi-lokasi pengukuran

Sementara untuk data lendutan dinamik, ditemukan bahwa pada lokasi mihrab b, getaran yang terjadi akibat aktivitas manusia pada area sekitar mihrab tersebut berpotensi mengganggu pengguna masjid (Gambar 15).

Tabel 3. Frekuensi (Hz) dan Lendutan Dinamik Puncak (mm)

joint	Lendutan Puncak (mm)			frekuensi (hz)
	max	min	abs max	
Gazebo (2)	16.63	-24.28	24.28	15.856
Gazebo (1)	18.92	-19.29	19.29	16.309
Mihrab b	63.18	-67.37	67.37	10.648
Mihrab a	22.09	-26.21	26.21	11.003
Kubah	1.22	-1.07	1.22	5.664



Gambar 15. Frekuensi (Hz) dan Lendutan Dinamik Puncak (mm) pada lokasi-lokasi pengukuran

Namun lokasi mihrab-b pada operasionalnya merupakan lokasi imam, sehingga tentunya aktivitas pada area tersebut akan terbatas. Disamping itu dari data hubungan percepatan puncak dengan frekuensi dan kecepatan puncak dengan frekuensi pada mihrab-b masih masuk dalam katagori aman dan nyaman untuk aktivitas manusia.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan parameter hasil uji beban dinamik berupa frekuensi alami dominan, percepatan getar, kecepatan getar dan lendutan dinamik memenuhi standar kenyamanan untuk tempat ibadah berdasarkan ISO 2631-2 1989, getaran yang terjadi saat operasional memenuhi standar kesehatan (tidak berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia) dan tidak berpotensi menyebabkan kerusakan pada masjid mengacu pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.49 Tahun 1996. Dengan parameter dinamik tersebut maka dapat dinyatakan bahwa Masjid Apung Ziadatul Abrar laik untuk difungsikan. Pengukuran getaran dengan menggunakan aplikasi *g-force* pada iphone-11, dapat diaplikasikan secara mudah dan memberikan gambaran awal untuk mendiagnoasa performa struktur dan dapat dijadikan *bench mark* untuk pengecekan getaran secara periodic berikutnya. Pada penelitian ini hanya menggunakan 1 (satu) buah *smarthphone*, walaupun bisa mendapatkan beberapa frekuensi dominan, namun untuk penggambaran *mode shape* masih terbatas pada *mode shape*-1 saja.

Untuk penelitian dengan ketelitian lebih disarankan dilakukan dengan menggunakan beberapa *smartphone* yang direkam secara bersamaan, baik dengan *EMA (Experimental Modal Analysis)* ataupun *OMA (Operational Modal Analysis)* sehingga dapat menggambarkan respon struktur secara lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Borneo Indobara yang berkontribusi penuh dalam pembangunan masjid Apung Ziadatul Abrar dan mengijinkan peneliti untuk menjadikan masjid Ziadatul Abrar menjadi obyek penelitian. Terima kasih pula kepada PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id> yang telah membantu verifikasi validitas *g-force* dalam *smartphone* dengan accelerometer yang dimiliki PT. Hesa Laras Cemerlang.

REFERENSI

- [1] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2847: 2019; Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. 2019.
- [2] International Organization for Standardization, *ISO-2631-2:1989, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 Hz–80 Hz)*.
- [3] Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Indonesia No. 49, *Baku Tingkat Getaran, Lampiran I Baku Tingkat Getaran Mekanik Berdasarkan Dampak Kerusakan*. Indonesia, 1996.
- [4] PT. Hesa Laras Cemerlang, "Detail Engineering Design Masjid Apung Borneo Indobara," 2017.
- [5] S. Ho, A. Mohtadi, K. Daud, U. Leonards, dan T. C. Handy, "Using *smartphone* accelerometry to assess the relationship between cognitive load and gait dynamics during outdoor walking," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Des 2019, doi: 10.1038/s41598-019-39718-w.
- [6] L. Wang, H. He, dan S. Li, "Structural vibration performance test based on smart phone and improved comfort evaluation method," *Measurement*, vol. 203, hlm. 111947, Nov 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111947.
- [7] D. Zhang, J. Tian, dan H. Li, "Design and Validation of Android *Smartphone* Based Wireless Structural Vibration Monitoring System," *Sensors*, vol. 20, no. 17, hlm. 4799, Agu 2020, doi: 10.3390/s20174799.
- [8] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, dan P. Nugroho, "Uji Beban Dinamik dan Analisis Modal Operasional Jembatan Baja Komposit Underpass Bekambit," *Dinamika Rekayasa*, vol. 20, no. 1, hlm. 65–75, Jan 2024, doi: 10.20884/1.dinarek.2024.20.1.20.
- [9] H. Khoeri dan S. W. Alisjahbana, "Pemeriksaan Getaran Struktur dan Rekomendasi Perkuatan untuk Peningkatan Kapasitas Beban dan Pengurangan Getaran," *Konstruksia*, vol. 15, no. 1, hlm. 79, Des

- 2023, doi: 10.24853/jk.15.1.79-96.
- [10] H. Khoeri, S. W. Alisjahbana, J. Widjajakusuma, dan N. Najid, “Estimasi Lendutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar,” *Konstruksia*, vol. 14, no. 2, hlm. 175–188, Jul 2023, doi: 10.24853/jk.14.2.175-188.
- [11] F. Bin Zahid, Z. C. Ong, dan S. Y. Khoo, “A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 8. Springer, 1 Agustus 2020. doi: 10.1007/s40430-020-02470-8.
- [12] F. Liu, J. Wang, M. Li, F. Gu, dan A. D. Ball, “Operational Modal Analysis of Y25 Bogie via Stochastic Subspace Identification for the Condition Monitoring of Primary Suspension Systems,” dalam *ICDAS: International Conference on Damage Assessment of Structures*, M. Abdel Wahab, Ed., Porto, Portugal: Springer, Jul 2020, hlm. 166–181. doi: 10.1007/978-981-13-8331-1_12.
- [13] Y. Xu, J. M. W. Brownjohn, dan D. Hester, “Enhanced sparse component analysis for operational modal identification of real-life bridge structures,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 116, hlm. 585–605, Feb 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.07.026.
- [14] A. Ali, T. Sandhu, dan M. Usman, “Ambient Vibration Testing of a Pedestrian Bridge Using Low-Cost Accelerometers for SHM Applications,” *Smart Cities*, vol. 2, no. 1, hlm. 20–30, Jan 2019, doi: 10.3390/smartcities2010002.
- [15] M. Salehi, S. M. Esfarjani, dan M. Ghorbani, “Modal Parameter Extraction of a Huge Four Stage Centrifugal Compressor Using Operational Modal Analysis Method,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 15, no. 3, hlm. 1–11, Mei 2018, doi: 10.1590/1679-78254117.
- [16] S. Gres, P. Andersen, C. Hoen, dan L. Damkilde, “Orthogonal Projection-Based Harmonic Signal Removal for Operational Modal Analysis,” 2019, hlm. 9–21. doi: 10.1007/978-3-319-74476-6_2.
- [17] E. Ercan, “Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests,” *Constr Build Mater*, vol. 164, hlm. 337–349, Mar 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.154.
- [18] C. Dalen dan D. Di Ruscio, “On subspace system identification methods,” *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, vol. 43, no. 4, hlm. 119–130, 2022, doi: 10.4173/mic.2022.4.1.
- [19] L. Di Natale, M. Zakwan, B. Svetozarevic, P. Heer, G. F. Trecate, dan C. N. Jones, “Stable Linear Subspace Identification: A Machine Learning Approach,” Nov 2023.