

## Analisis Rekaman Getaran *Time-Domain* Menggunakan *Digital Accelerometer 3-Axis* Dengan Studi Kasus Beban Impak Pada Beton Bertulang

Dimas Pustaka Dibiantara<sup>1,\*</sup>, Akhmad Yusuf Zuhdy<sup>1</sup>, Sukobar<sup>1</sup>, Triaswati<sup>1</sup>, Rizki Robbi R.A<sup>1</sup>, Ragil P<sup>1</sup>, Dovi Pratama Dion<sup>1</sup>, Cindy Rizqi Amelia<sup>1</sup>.

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

Email: [dpdibiantara@its.ac.id](mailto:dpdibiantara@its.ac.id)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	28 Maret 2022	<i>Identification of building damage is necessary for maintaining the building structure's strength. A method to direct damage to reduce the effect on a structure's strength as early as possible is needed to estimate the process of reducing the power of the design. Identification of non-destructive damage is extensive research and is still developing, one of which is the discussion of natural frequency analysis parameters. The review was carried out by making 10 points on the concrete slab with the location of the accelerometer device placement points that can affect the natural frequency results in the structure. Based on the analysis results in this study, the value of the natural frequency closest to the accelerometer detection device has the most significant value. The point most comparable to the accelerometer is used as a prediction where we can find out how much damage and where the injury occurred on the plate. However, several points did not get the most significant value in this study. Further research will be done to improve the outcome of the identification.</i>
Diperbaiki	20 Desember 2022	
Disetujui	20 Desember 2022	

*Keywords: natural frequency, damage identification, reinforced concrete, vibration-based method.*

Kata kunci: natural frekuensi, identifikasi kerusakan, elemen beton bertulang, metode vibration

### 1. Pendahuluan

Ketahanan bangunan dipengaruhi oleh kekuatan struktur bangunan, dimana penilaian ketahanan bangunan dapat dianalisis dengan identifikasi dan deteksi terhadap struktur yang ditinjau. Berkurangnya ketahanan struktur disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya yaitu kesalahan dalam melakukan perencanaan bangunan, kurangnya kontrol kualitas, suhu yang sering berubah-ubah, dan karena beban yang sering berulang [1]. Kerusakan tersebut dapat terjadi kapanpun walaupun masa layan rencananya terpenuhi. Kondisi ini sangat berbahaya bagi orang banyak karena pada umumnya bangunan merupakan prasarana umum.

Mengacu pada kondisi eksisting bangunan perlu dilakukan identifikasi sedini mungkin mengenai adanya kerusakan pada bangunan. Diketuainya kerusakan yang terjadi

pada bangunan dapat mengantisipasi keruntuhan struktur yang dapat menyebabkan korban jiwa dan mengeluarkan biaya perbaikan. Salah satu penyebab kegagalan struktur bangunan akibat gempa dapat disebabkan oleh frekuensi natural dari bangunan yang lebih kecil dibanding dengan frekuensi tanah, sehingga ketika bangunan mengalami resonansi strukturnya tidak mampu meredamkan frekuensi yang diberikan oleh tanah [2].

Untuk memperkirakan proses pengurangan kekuatan struktur perlu dicari suatu metode deteksi kerusakan agar pengaruh pengurangan kekuatan struktur dapat diketahui sedini mungkin. Identifikasi terhadap kerusakan yang terjadi pada elemen bangunan perlu dilakukan dengan melihat penyebab yang berbeda. Mengingat kerusakan struktur seringkali tidak kasat mata maka pengujian terhadap bangunan

harus dilakukan secara berkala dan beberapa tipe struktur tidak mengijinkan penilaian kerusakan dengan pengujian destruktif, karena berkaitan dengan fungsi dan kelanjutan penggunaan, sehingga pengujian kerusakan non destruktif merupakan solusi untuk teknik identifikasi yang terbaik.

Identifikasi kerusakan non-destruktif merupakan penelitian yang sangat luas dan masih terus berkembang, salah satunya pada pembahasan parameter modal. Dalam hal analisis parameter modal, teknik yang digunakan yaitu teknik analisis frekuensi natural, teknik analisis ragam bentuk, dll. Beberapa peneliti menggunakan analisis frekuensi natural untuk mendeteksi dan menentukan lokasi kerusakan [3][4][5]. Teknik analisis frekuensi merupakan analisis yang termudah karena dapat menentukan satu sensor pada beberapa lokasi di waktu yang bersamaan. Teknik ini tidak sensitif terhadap kerusakan kecil melainkan hanya menunjukkan kerusakan sampai tingkat sedang [6].

Kondisi bangunan yang beragam juga akan berpengaruh terhadap hasil dalam pengujian frekuensi normal. Berbeda hal dengan metode ragam bentuk yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengujian frekuensi normal. Pengujian ragam bentuk memberi kerusakan/retak pada elemen bangunan dilokasi tertentu dan diketahui bahwa hasil metode ini cukup baik untuk digunakan pada data simulasi [7].

Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan investigasi terhadap hasil pada pengujian frekuensi natural dan membuktikan keefektifan alat accelometer menjadi pendeteksi perubahan getaran di beberapa titik yang berbeda.

## 2. Metode

Tahapan penelitian untuk monitoring kerusakan beton betulang dengan menggunakan natural frekuensi sebagai dasar penilaian, secara garis besar melalui tiga tahapan yaitu tahap persiapan, analisis, dan penyimpulan serta pemberian saran.

Pada tahap persiapan, peneliti melakukan pendekatan menggunakan metode natural frekuensi. Metode natural frekuensi memiliki kelebihan berupa kemudahan dalam pengukuran serta pengambilan data, namun masih terbatas pada kuantifikasi kerusakan struktur pada skala kecil hingga menengah. Keterbatasan tersebut dapat diatasi menggunakan metode ragam bentuk yang lebih sensitif terhadap kerusakan lokal.

Dalam menerapkan metode natural frekuensi perlu memperhatikan beberapa faktor dalam pengujian getaran. Di antaranya perlu memperhatikan lokasi pengukuran, lokasi terbaik untuk melakukan pengukuran merupakan lokasi dengan jumlah vector ragam bentuk terbesar [4]. Jumlah

variasi frekuensi yang memadai untuk menentukan lokasi kerusakan, dampak lingkungan, konsistensi dan keandalan dalam pengujian juga merupakan faktor-faktor yang perlu diperhatikan untuk pengujian getaran yang menggunakan metode natural frekuensi.

Tahapan analisis dilakukan dengan pengambilan data natural frekuensi pada satu sampel benda uji yang berupa pelat dengan ukuran 0,5 m x 1 m dan ketebalan 8 cm. Teknik pengambilan data natural frekuensi dilakukan dengan menggunakan alat akselerometer sebagai pendeteksi getaran pada koordinat bacaan/node dan *raspberry pi* sebagai apparatus perekam data. Pengambilan data dilakukan pada kurun waktu tertentu yang cukup singkat, untuk selanjutnya data tersebut dikonversi menjadi frekuensi menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT). Analisa data menggunakan metode FFT ini mengubah data getaran dari hasil bacaan akselerometer dalam domain waktu diubah ke dalam domain frekuensi [8] melalui persamaan 1.

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

dimana  $X(f)$  merupakan fungsi sinyal dalam domain frekuensi,  $x(t)$  merupakan fungsi sinyal dalam domain waktu,  $e^{-j2\pi ft}$  merupakan fungsi kernel, dan  $f$  adalah frekuensi.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### A. Analisis sederhana monitoring natural frekuensi.

Analisis penelitian ini membandingkan perhitungan teoritis dan hasil pembacaan alat accelometer, hal ini bertujuan untuk membuktikan keakuratan sebuah alat untuk membaca sebuah getaran pada kondisi bangunan tertentu.

Berdasarkan hasil penelitian pengolahan data secara manual, dengan data perencanaan sebagai berikut.

$$\begin{array}{ll} b & = 60 \text{ mm} & L & = 1 \text{ m} \\ l & = 500 \text{ mm} & l_1 & = 500 \text{ mm} \\ f_c' & = 20 \text{ Mpa} & \gamma & = 24 \text{ Kn/m}^3 \end{array}$$

Penentuan nilai modulus elastisitas plat beton ini menggunakan persamaan 2.

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \sqrt{f_c'} \\ &= 4700 \sqrt{20 \text{ Mpa}} \\ &= 21019,039 \text{ Mpa} \end{aligned} \quad (2)$$

Untuk mengetahui nilai frekuensi yang terjadi dalam penelitian ini dihitung dengan persamaan 3.

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \frac{1}{12} \cdot l_1 \cdot b^3 \\ &= \frac{1}{12} \cdot 500 \cdot 60^3 \\ &= 9 \times 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} db &= 6 \text{ mm} \\ q &= \gamma \cdot b \cdot l1 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &= 24 \cdot 0,06 \cdot 0,5 \\ &= 0,72 \text{ kN/m} \\ W &= q \cdot L \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} &= 0,72 \cdot 1 \\ &= 73,4196 \text{ kgf} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} As &= 0,25 \cdot \pi \cdot db^2 \\ &= 28,2743 \text{ mm}^2 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} w &= Vol. \cdot 7850 \\ &= 21,7662 \text{ N} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \Delta q &= \frac{5}{384} \cdot q \cdot \frac{L^4}{EC \cdot I_{xx}} \\ &= 0,0496 \text{ mm} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{1}{48} \cdot F \cdot \frac{L}{EC \cdot I_{xx}} \\ &= 0,052 \text{ mm} \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{\Delta q \cdot 48 \cdot Ec \cdot I_{xx}}{L^3} + w \\ &= 471,7662 \text{ N} \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} m &= \frac{F}{g} \\ &= 48,1394 \text{ kg} \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} K &= \frac{F}{\Delta f} \\ &= 9080,2248 \text{ kN/m} \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{K}{m}} \\ &= 434,3081 \text{ Hz} \end{aligned} \tag{13}$$

Setelah menghitung runtutan diatas mencari besar penurunan nilai frekuensi natural dengan menggunakan persamaan 16.

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \\ &= 69,1223 \text{ Hz} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= 0,05 \cdot F \\ &= 3,4561 \text{ Hz} \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{f} \\ &= 0,0145 \text{ s} \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{g} \cdot q \cdot L^2 \cdot A \\ &= 360 \text{ N} \end{aligned} \tag{17}$$

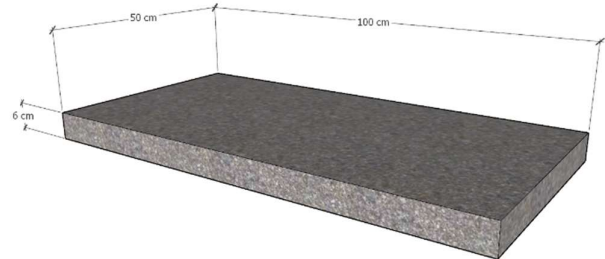
Frekuensi yang di hasilkan dalam analisis diatas mendapatkan sebesar 69,1223 Hz. Nilai natural frekuensi dipengaruhi oleh beberapa keadaan. Semakin besar kerusakan, maka penurunan nilai frekuensi natural semakin besar [9].

**B. Pembacaan alat Monitoring Natural Frequencies**

Berdasarkan data yang diketahui untuk perencanaan pelat, maka nilai frekuensi dari hasil perhitungan manual tersebut dapat dibandingkan dengan frekuensi hasil bacaan

akselerometer yang akumulasi perhitungannya menggunakan metode frekuensi alami.

Pada pengujian pelat beton menggunakan metode natural frequencies yang telah dilakukan pada 10 titik pengujian yang berbeda terlihat pada **Gambar 1**.

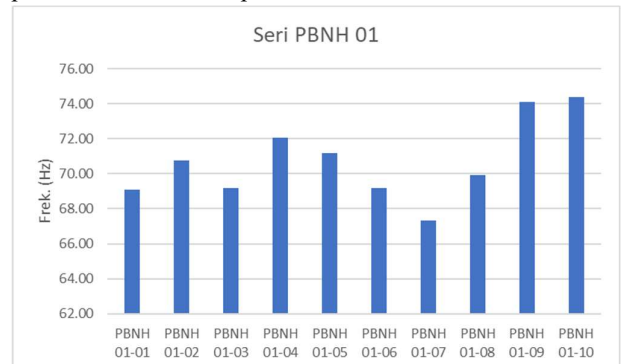


**Gambar 1.** Pelat Beton Utuh (PBNH)

Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai getaran pada setiap titik dengan bacaan/rekaman pada setiap titik. Nilai yang didapatkan dalam alat akselerometer sebagai berikut.

**Kondisi 1:**

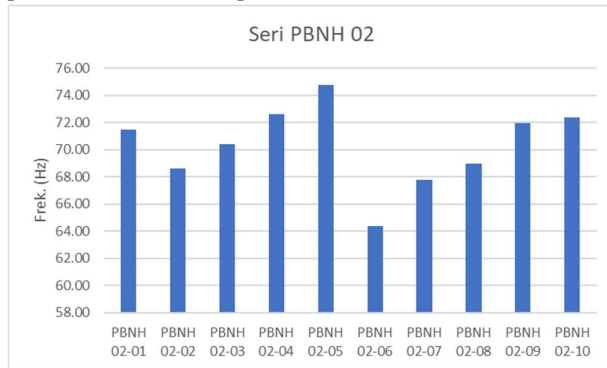
Pada kondisi 1, akselerometer diletakkan pada titik pertama (Node 01) dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 10 yaitu 74.4061 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 7 yaitu 67.3276 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 1 terlihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 01 (Seri PBNH 01).

**Kondisi 2:**

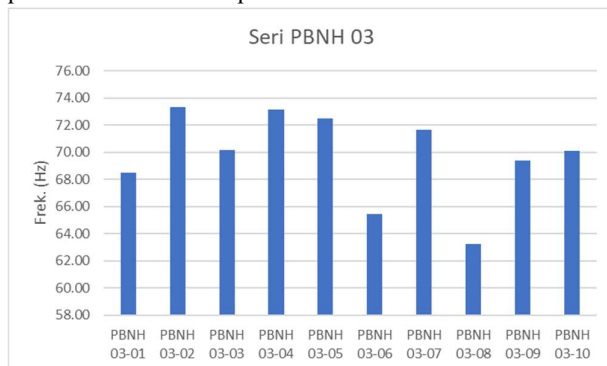
Pada kondisi 2, akselerometer diletakkan pada titik ke-dua (Node 02) dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 5 yaitu 74.7711 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 6 yaitu 64.3814 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 2 terlihat pada **Gambar 3**.



**Gambar 3.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 02 (Seri PBNH 02).

**Kondisi 3:**

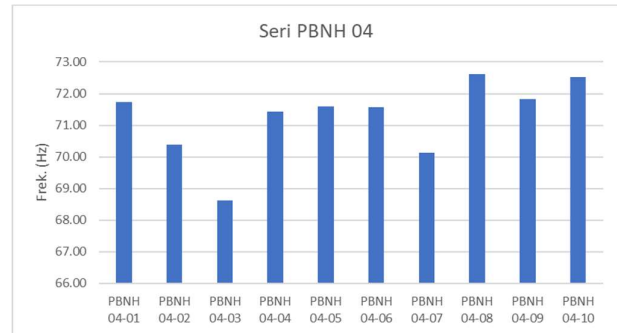
Pada kondisi 3 ini akselerometer diletakkan pada titik ke-3 (Node 03) dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 2 yaitu 73.3084 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 8 yaitu 63.2351 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 3 terlihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 03 (Seri PBNH 03).

**Kondisi 4:**

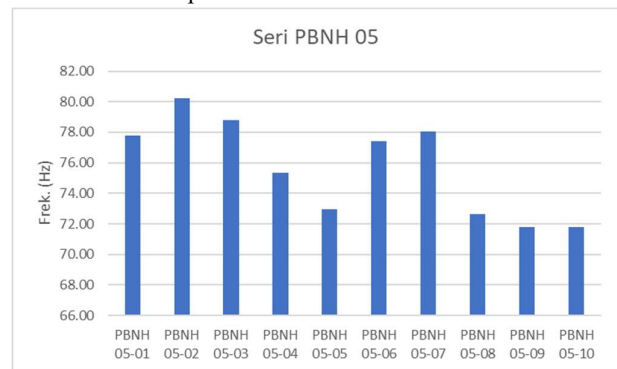
Pada kondisi 4, akselerometer diletakkan pada titik ke-empat (Node 04) dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 10 yaitu 72.5321 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 3 yaitu 68.6216 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 4 terlihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 04 (Seri PBNH 04).

**Kondisi 5:**

Pada kondisi 5 ini akselerometer diletakkan pada titik ke-lima dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 2 yaitu 80.2311 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 10 yaitu 71.7927 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 5 terlihat pada **Gambar 6**.



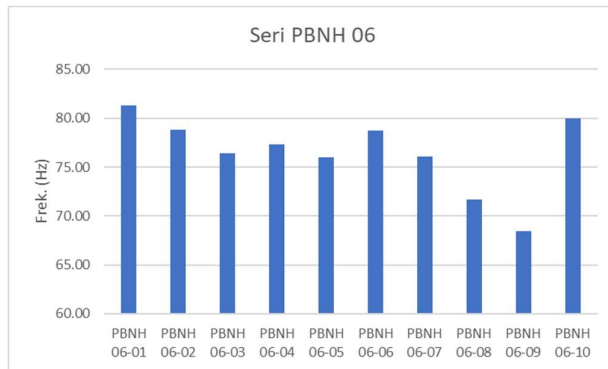
**Gambar 6.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 05 (Seri PBNH 05).

**Kondisi 6:**

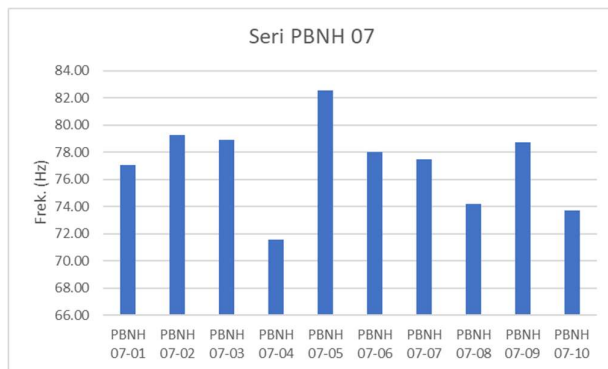
Pada kondisi 6 ini akselerometer diletakkan pada titik ke-enam (Node 06) dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 1 yaitu 81.2711 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 9 yaitu 68.4287 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 6 terlihat pada **Gambar 7**.

**Kondisi 7:**

Pada kondisi 7 ini akselerometer diletakkan pada titik ketujuh dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 5 yaitu 82.5752 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 4 yaitu 71.5944 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 7 terlihat pada **Gambar 8**.



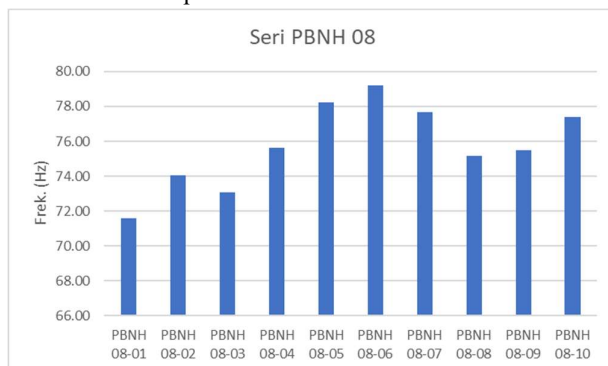
**Gambar 7.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 06 (Seri PBNH 06).



**Gambar 8.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 07 (Seri PBNH 07).

**Kondisi 8:**

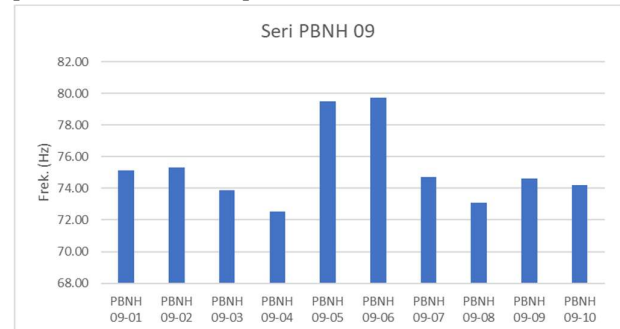
Pada kondisi 8 ini akselerometer diletakkan pada titik kedelapan dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 6 yaitu 79.1849 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 1 yaitu 71.5914 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 8 terlihat pada **Gambar 9**.



**Gambar 9.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 08 (Seri PBNH 08).

**Kondisi 9:**

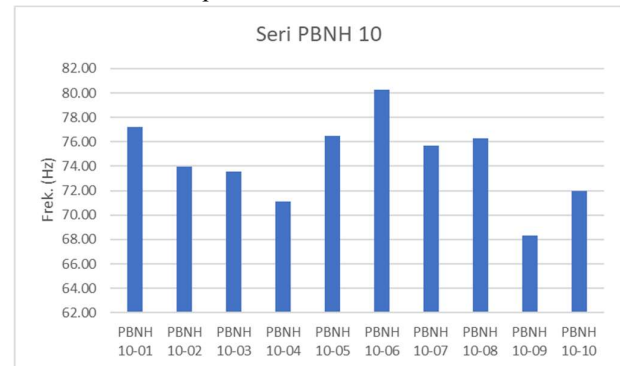
Pada kondisi 9 ini akselerometer diletakkan pada titik kesembilan dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 6 yaitu 79.7158 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 4 yaitu 72.5201 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 9 terlihat pada **Gambar 10**.



**Gambar 10.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 09 (Seri PBNH 09).

**Kondisi 10:**

Pada kondisi 10 ini akselerometer diletakkan pada titik kesepuluh dengan hasil nilai getaran yang terbesar berada pada ketukan di titik 6 yaitu 80.2761 Hz dan nilai getaran terkecil terdapat di titik 9 yaitu 68.3177 Hz. Hasil pengujian pada kondisi 10 terlihat pada **Gambar 11**.



**Gambar 11.** Diagram Nilai Frekuensi Natural untuk penempatan akselerometer di Node 10 (Seri PBNH 10).

**D. Hasil nilai frekuensi natural akibat beban impact**

Berdasarkan hasil pengujian seharusnya didapatkan bahwa lokasi / titik yang diketuk dan sekitar titik tersebut memiliki nilai delta frekuensi yang lebih besar dibandingkan titik yang lain, karena ketukan tersebut mengakibatkan kecepatan rambat getaran pada sekitar area tersebut meningkat sehingga memunculkan adanya retakan pada pelat beton di sekitar area tersebut. Nilai cepat rambat getaran sebanding dengan nilai frekuensi yang dihasilkan, yang menyebabkan nilai delta frekuensi juga seharusnya meningkat pada area tersebut. Ditunjukkan juga pada kondisi

4 dan Gambar 5 menunjukkan pada titik terdekat yaitu titik 3 tidak mendapatkan nilai terbesar. Maka dari pada itu pada penelitian ini, masih terdapat adanya kesalahan pada beberapa titik ketukan yang mungkin terjadi karena kondisi perletakan pada saat prosedur pelaksanaan penelitian yang mengakibatkan beberapa data penelitian yang diperoleh tidak sesuai dengan perkiraan.

**Tabel 1** mendeskripsikan selisih antara rerata hasil bacaan akselerometer dan selisihnya dengan perhitungan matematis teoritis untuk tiap-tiap titik mulai dari Node 01 sampai Node 10. Terlihat bahwa selisih pada node-node awal lebih baik jika dibandingkan dengan selisih pada node-node akhir. Rerata frekuensi untuk posisi akselerometer pada Node-03 menunjukkan nilai yang hampir sama (69.74 Hz) dengan perhitungan teoritis (69.12 Hz), sedangkan rerata frekuensi untuk posisi akselerometer di Node-07 menunjukkan selisih yang paling besar (8.0 %). Kesalahan tersebut muncul akibat prosedur penentuan perletakan yang kurang rigid dan rata pada salah satu titik, sehingga muncul nilai frekuensi yang lebih besar/kecil.

**Tabel 1.** Rerata frekuensi dan selisihnya dengan analisis teoritis.

Seri	Average Freq. (Hz)	Selisih
PBNH 01	70.716	1.6%
PBNH 02	70.323	1.2%
PBNH 03	69.742	0.6%
PBNH 04	71.243	2.1%
PBNH 05	75.680	6.6%
PBNH 06	76.469	7.4%
PBNH 07	77.162	8.0%
PBNH 08	75.749	6.6%
PBNH 09	75.269	6.2%
PBNH 10	74.488	5.4%

Nilai frekuensi natural akibat perubahan lokasi getaran mempengaruhi besarnya kerusakan yang terjadi pada plat. Hasil dari nilai parameter frekuensi natural akibat perubahan lokasi kerusakan dapat dilihat pada pengujian Kondisi 3 dan Gambar 4 menunjukkan nilai terbesar yang keluar pada alat accelometer terletak pada titik terdekatnya yaitu titik 2 dan titik 4. Kondisi ini menunjukkan pada setiap parameter lokasi kerusakan mengalami penurunan yang cukup stabil ketika menjauhi pemasangan alat accelometer.

#### 4. Simpulan

Pada analisis pembahasan penelitian dengan metode *Natural Frequencies*, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan latar belakang penelitian dan literatur yang dilakukan, terdapat perbedaan hasil yang didapatkan dengan landasan teori yang ada. Analisis metode *Natural Frequencies* secara manual menunjukkan nilai 69,1223 Hz, perhitungan secara manual ini hanya menghitung pada satu titik pada 1 sampel pelat beton.
2. Hasil analisa nilai frekuensi yang dihasilkan dari bacaan alat akselerometer memunculkan ketidakakuratan pada beberapa titik/lokasi pengujian. Pembacaan nilai getaran yang terdekat dengan alat seharusnya memiliki nilai yang besar namun dalam beberapa sampel pelat beton nilai getaran yang terdekat menghasilkan nilai yang relatif lebih kecil dibandingkan titik-titik lain.
3. Dari hasil penelitian ini didapatkan nilai frekuensi dari hasil bacaan alat akselerometer yang menggunakan metode natural frekuensi untuk pendekatan perhitungannya juga harus diperhatikan dan dibandingkan dengan perhitungan manual sebagai pengecekan keakuratannya. Selisih terkecil antara kedua analisis tersebut adalah 0.6% dan yang terbesar sampai 8%.

#### Daftar Pustaka

- [1] W. F. Darmawan, R. Suryanita, and Z. Djauhari, "Evaluasi Kesehatan Struktur Bangunan berdasarkan Respon Dinamik Berbasis Data Akselerometer," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 23, no. 2, p. 142, 2017, doi: 10.14710/mkts.v23i2.16101.
- [2] T. N. Setia, M. Afifudin, and Y. Idris, "Identifikasi Frekuensi Natural dan Damping Ratio dengan Menggunakan Mikrotremor Gedung Evakuasi Bencana Desa Ulee Lheue dan Desa Lambung," *J. Civ. Eng. Student*, vol. 1, no. 3, pp. 162–168, 2019, [Online]. Available: [http://etd.unsyiah.ac.id/index.php?p=show\\_detail&id=51099](http://etd.unsyiah.ac.id/index.php?p=show_detail&id=51099).
- [3] J.-T. Kim and N. Stubbs, "Model-Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy in Plate Girder," *J. Struct. Eng.*, vol. 121, no. 10, pp. 1409–1417, 1995, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:10(1409).
- [4] A. Ismail, A. Zubaydi, B. Piscesa, R. C. Ariesta, and Tuswan, "Vibration-based damage identification for ship sandwich plate using finite element method," *Open Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 744–752, 2020, doi: 10.1515/eng-2020-0086.
- [5] T. Tuswan, A. Zubaydi, B. Piscesa, A. Ismail, and M. F. Ilham, "Free vibration analysis of interfacial debonded sandwich of ferry Ro-Ro's stern ramp door," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 27, no. August, pp. 22–29, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.07.004.
- [6] C. R. Farrar and D. A. Jauregui, "Comparative study



- of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, no. 5, pp. 720–731, 1998, doi: 10.1088/0964-1726/7/5/014.
- [7] W.-X. Ren and G. De Roeck, “Structural Damage Identification using Modal Data. II: Test Verification,” *J. Struct. Eng.*, vol. 128, no. 1, pp. 96–104, 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:1(96).
- [8] R. Riantana, D. Darsono, and A. Triyono, “Penentuan Nilai Frekuensi Natural Bangunan UPT Perpustakaan UNS dengan Sensor Accelerometer pada Handphone Android,” *J. Fis. dan Apl.*, vol. 13, no. 3, p. 97, 2017, doi: 10.12962/j24604682.v13i3.2838.
- [9] M. Z. Al-Syachri, A. Zubaydi, A. Ismail, R. C. Ariesta, and Tuswan, “Identifikasi Kerusakan Berbasis Getaran,” *J. Tek. ITS Vol. X, No. Y, ISSN 2337-3539 (2301-9271 Print)*, vol. X, 2019.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**