



Analisis Kerentanan Gedung Menara FMIPA UNM Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor Dengan Metode FSR (*Floor Spectra Ratio*)

Sulistiawaty*, Riska Yuliana, Agus Susanto

Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Makassar
Jalan Daeng Tata, Parang Tambung Kota Makassar 90224, Sulawesi Selatan, Indonesia

*E-mail korespondensi: sulistiawaty@unm.ac.id

Article Info:

Received: 18-11-2023

Revised: 15-01-2024

Accepted: 05-06-2024

Keywords:

Microtremor, Floor Spectral Ratio (FSR), Natural Frequency, Amplification, Building Vulnerability.



Abstract

Research has been conducted on vulnerability analysis of Gedung Menara FMIPA UNM based on microtremor measurements using the FSR (*Floor Spectra Ratio*) method. The purpose of this study was to analyze the data from microtremor measurements using the FSR (*Floor Spectra Ratio*) method so that natural frequency, amplification, and vulnerability values of Gedung Menara FMIPA UNM were obtained. The measurements were made using a set of portable measuring instruments TDL 303 S Seismograph to record vibrations. Measurements were made at 37 points in the building and 3 points in the area around the building. Recording data is processed using Geopsy with FSR method. The results of the study obtained the natural frequency of the Gedung Menara FMIPA UNM for each component was 1.3047 Hz to 2.3823 Hz in the NS component and 1.0556 Hz to 2.4355 Hz in the EW component. The amplification of the Gedung Menara FMIPA UNM for each component is 306.8593 to 2850.7233 in NS components and 360.975 to 4783.54 in EW components. The vulnerability value of the Gedung Menara FMIPA UNM for each component is $0,128 \times 10^4$ to $2,792 \times 10^4$ in NS component and $0,05 \times 10^4$ to $9,91 \times 10^4$ in EW component. The 12th floor is the part with the highest building vulnerability.

PENDAHULUAN

Bangunan merupakan salah satu tempat yang banyak aktivitas dijalankan di dalamnya. Namun tidak sedikit bangunan yang mengalami kerusakan akibat getaran kecil. Salah satu parameter menyebabkan kerusakan struktur yang signifikan adalah karakteristik dinamis dan kinerja seismik dari bangunan seperti frekuensi natural, rasio redaman dan indeks kerentanan bangunan [1]. Kondisi kerentanan tersebut dapat diatasi dengan melakukan dua alternatif tindakan. Pertama dengan memperkuat struktur pada bangunan sesuai dengan standar kekuatan struktur bangunan tahan gempa. Hal ini dapat dilakukan pada kondisi pembangunan gedung baru atau dalam proses pembangunan. Sementara alternatif tindakan kedua adalah dengan perencanaan mitigasi bencana yang aman dan efektif [2].

Gedung Menara FMIPA Universitas Negeri Makassar merupakan gedung bertingkat yang terletak di Jalan Daeng Tata Kecamatan Tamalate Kota Makassar. Secara astronomi, gedung ini terletak pada koordinat $5^{\circ}11'10,858''$ LS dan $119^{\circ}25'46,623''$ BT. Pada suatu bangunan, mengetahui kerentanannya merupakan salah satu upaya mitigasi bencana [3].

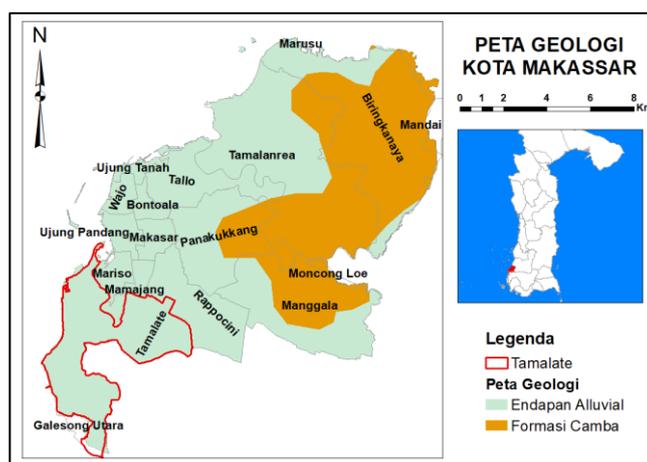
Kerentanan bangunan dapat diketahui dengan melakukan pengukuran mikrotremor. Berdasarkan data pengukuran mikrotremor dapat diperoleh frekuensi natural dan amplifikasi yang kemudian dari dua variabel tersebut diperoleh indeks kerentanan bangunannya.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan maka penelitian dilakukan untuk mengetahui kerentanan suatu bangunan. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis data hasil pengukuran mikrotremor dengan metode FSR (*Floor Spectra Ratio*) sehingga diperoleh nilai frekuensi natural, amplifikasi, dan nilai kerentanan bangunan Gedung Menara FMIPA UNM.

TINJAUAN PUSTAKA

Kondisi Wilayah Penelitian

Kota Makassar terletak di pesisir pantai barat dari Sulawesi Selatan. Secara Astronomis, Kota Makassar terletak pada koordinat antara $119^{\circ}18' 27,97''$ sampai $119^{\circ}32'31,03''$ BT dan $5^{\circ}30'8''$ sampai $5^{\circ} 14'49''$ LS. Secara geologis, Kota Makassar terbentuk dari letusan gunung api dan endapan sedimen sungai Jeneberang dan sungai Tallo [4].



Gambar 1. Peta Geologi Kota Makassar [4]

Secara umum, Kota Makassar terdiri dari dua batuan yaitu Endapan Alluvial dan Formasi Camba sebagaimana yang tampak pada Gambar 1. Berdasarkan peta tersebut, di Kecamatan Tamalate didominasi oleh Endapan Alluvial. Endapan Alluvial terdiri atas kerikil, pasir, lempung, lumpur, dan batu gamping koral. Formasi Camba terdiri atas batuan sedimen laut berselingan dengan batuan gunung api, batu pasir tufa [5]. Gedung Menara FMIPA UNM merupakan salah satu bangunan bertingkat yang berdiri di Kecamatan Tamalate. Gedung ini terdiri dari 12 lantai dengan fungsi masing – masing.

Mikrotremor

Mikrotremor adalah getaran kecil yang konstan di permukaan bumi [6]. Getaran tersebut disebabkan oleh berbagai sumber di antaranya aktivitas mesin industri, angin yang berhembus, efek angin pada pohon atau bangunan, mobil kendaraan lainnya, langkah kaki manusia, maupun getaran vulkanik [1]. Kondisi geografis berpengaruh pada perubahan karakteristik rekaman getaran (seismogram) dari mikrotremor. Seismogram di dataran aluvial lunak memiliki amplitudo lebih tinggi dengan durasi lebih panjang. Sementara seismogram di batuan dasar amplitudonya sangat rendah dengan durasi pendek [7].

Pengukuran mikrotremor berkaitan dengan analisis Fourier yang merupakan metode untuk mengubah bentuk gelombang seismik menjadi gelombang harmonik sinusoidal dengan frekuensi yang berbeda. Transformasi Fourier pada dasarnya bertujuan untuk mengubah gelombang seismik dari domain waktu menjadi domain frekuensi [8].

Pada suatu struktur bangunan terdapat karakteristik bangunan yaitu massa, kekakuan, dan redaman. Massa pada bangunan bertingkat merupakan massa untuk masing-masing lantainya. Massa memiliki kaitan dengan kekakuan bangunan yang disebut dengan karakteristik diri (*eigenproblem*). Frekuensi sebanding dengan kekakuan suatu bangunan dan berbanding terbalik dengan massa bangunan tersebut. Sehingga bangunan dengan massa yang besar dan

tingkat kekakuan yang kecil memiliki frekuensi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan bangunan yang bermassa lebih ringan dan tingkat kekakuan yang tinggi [9].

Kerentanan bangunan dengan pengukuran mikrotremor erat kaitannya dengan frekuensi natural. Frekuensi natural adalah nilai frekuensi yang sering muncul pada suatu wilayah pengukuran. Berdasarkan nilai frekuensi natural, suatu wilayah dapat diketahui karakteristik lapisan tanah ataupun batuanannya [10]. Berikut ini merupakan klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai frekuensi natural pada tanah.

Tabel 1. Klasifikasi Jenis Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Natural [11]

Klasifikasi Tanah	Frekuensi Natural (Hz)	Klasifikasi
Jenis I	6,667-20	Batuan tersier atau lebih tua, terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> , dll.
Jenis II	4-6,667	Batuan alluvial dengan ketebalan 5 m. terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll
Jenis III	2,5-4	Batuan alluvial dengan ketebalan >5 m. terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , (adanya formasi yang belum diketahui).
Jenis IV	<2,5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi, delta, <i>top soil</i> , lumpur, tanah lunak, humus, dan lainnya yang tergolong dalam tanah yang lembek dengan kedalaman 30 m atau lebih.

Frekuensi natural pada bangunan merupakan jumlah getaran yang terjadi pada bangunan tersebut dalam setiap detiknya. Nilai frekuensi natural bangunan bergantung pada tinggi bangunan itu sendiri. Semakin tinggi suatu bangunan maka bangunan akan bergetar semakin lambat yang berarti bahwa frekuensi naturalnya semakin rendah. Sebaliknya, semakin rendah suatu bangunan maka nilai frekuensi naturalnya semakin tinggi. Jika nilai frekuensi natural pada bangunan sama dengan nilai frekuensi natural pada tanah maka akan terjadi resonansi yang mengakibatkan kerusakan pada bangunan [8].

Indeks resonansi bangunan dapat membantu dalam mengkategorikan tingkat kemungkinan bangunan mengalami resonansi. Indeks resonansi bangunan sangat dipengaruhi oleh selisih nilai antara frekuensi natural pada tanah dan frekuensi natural pada bangunan. Frekuensi natural bangunan yang semakin mendekati nilai frekuensi natural pada tanah berdampak pada semakin kecilnya indeks resonansi bangunan yang berarti bahwa tingkat kerentanan bangunan terhadap tanah semakin tinggi [12]. Penentuan indeks resonansi bangunan dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$R = \left| \frac{f_b - f_t}{f_t} \right| \times 100\% \quad (1)$$

R merupakan indeks resonansi bangunan, f_b mewakili frekuensi natural pada bangunan, dan f_t mewakili frekuensi natural pada tanah.

Amplifikasi diartikan sebagai perbesaran gelombang seismik yang disebabkan oleh adanya perbedaan antar lapisan yang signifikan. Amplifikasi berarti bahwa gelombang seismik ketika menjalar melalui suatu medium ke medium yang lebih lunak akan mengalami perbesaran. Perbedaan medium yang semakin besar juga mengakibatkan perbesaran gelombang seismiknya akan semakin besar pula [13]. Hal ini yang dapat menyebabkan semakin besarnya tingkat potensi risiko bencana gempa bumi. Pada gedung bertingkat, besarnya amplifikasi akan sebanding dengan tinggi gedung [14].

Indeks Kerentanan Bangunan

Indeks kerentanan bangunan merupakan suatu variabel yang mengindikasikan tingkat kerentanan suatu bangunan terhadap deformasi saat terjadi gempa bumi. Nilai indeks kerentanan bangunan berbanding terbalik dengan frekuensi natural bangunan. Besarnya nilai kerentanan bangunan dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2) berikut [15].

$$K_b = \frac{10000A}{h(2\pi f)^2} \quad (2)$$

Metode Floor Spectra Ratio (FSR)

Floor Spectra Ratio (FSR) merupakan metode dalam pengukuran mikrotremor berupa fungsi transfer dari tiap lantai antara spektral bangunan dan spektral tanah [14]. Metode Floor Spectra Ratio (FSR) merupakan metode standar untuk evaluasi kekuatan bangunan yang disebabkan getaran seismik dan karakteristik pembangunan dapat dilakukan dengan pencatatan rekaman mikrotremor [16]. Hasil yang diperoleh berupa pengukuran spektrum getaran yang diukur di dalam suatu gedung dibagi dengan spektrum getaran yang ada di sekitar gedung tersebut [17]. Metode FSR berfokus pada spektrum getaran horizontal yaitu pada komponen utara-selatan (NS) dan barat-timur (EW). Bentuk gedung bertingkat seperti menara rentan roboh ketika dikenai getaran khususnya getaran dengan orientasi horizontal [18].

METODE PENELITIAN

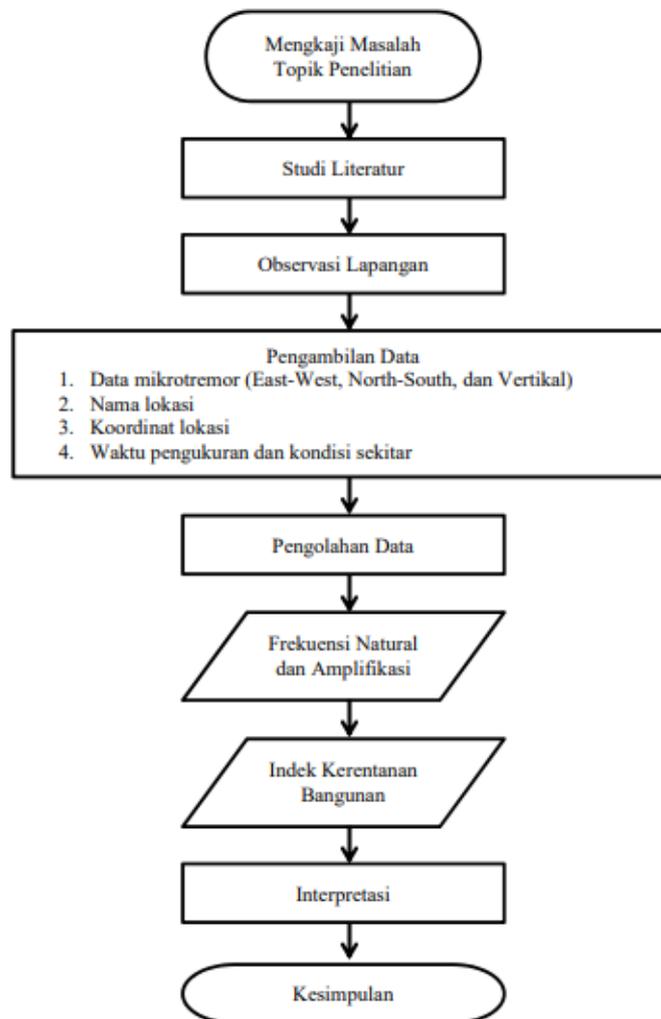
Penelitian dimulai dari pengkajian masalah topik penelitian dan melakukan studi literatur. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif. Penelitian ini dilakukan selama 6 bulan terhitung Januari sampai dengan Juni 2023. Pengukuran mikrotremor dilakukan di Gedung Menara FMIPA UNM dan sekitarnya, Jalan Daeng Tata Kecamatan Tamalate Kota Makassar. Secara astronomi, gedung ini terletak pada koordinat $5^{\circ}11'10,858''$ LS dan $119^{\circ}25'46,623''$ BT. Penelitian ini berupa pengukuran mikrotremor dengan metode *Floor Spectra Ratio* (FSR) yang dilaksanakan selama 4 hari. Penelitian ini dilakukan pada setiap lantai bangunan dengan jumlah lantai yakni 13 lantai. Setiap lantai pada bangunan dilakukan pengukuran pada 3 titik kecuali pada lantai 12 yang hanya dilakukan pengukuran pada satu titik. Selain itu, juga dilakukan pengukuran pada tanah sekitar bangunan sebanyak 3 titik. Total titik pengukuran yaitu 40 titik.



Gambar 2. Titik Penelitian (a) di tanah sekitar gedung dan (b) pada gedung

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dimulai dengan studi literatur. Perlengkapan yang akan digunakan dipersiapkan, diantaranya seismometer, digitizer, GPS antenna, laptop, handphone, dan alat tulis. Seismometer diletakkan di atas permukaan yang keras dan datar. Pada gedung, seismometer diletakkan pada titik yang telah ditentukan sedangkan pengukuran pada area gedung diletakkan di atas tanah. Posisi seismometer diatur agar

menghadap ke barat geografis dengan menggunakan kompas. Kemudian semua perangkat dikoneksikan satu sama lain dan dilakukan aktivitas leveling. Digitizer kemudian diaktifkan yang menandakan perekaman sinyal mulai dilakukan. Sinyal yang terekam dapat dilihat melalui laptop dengan menggunakan *software* Mono ST. Setelah perekaman selesai, data hasil pengukuran dalam format *trace* selanjutnya dikonversi menjadi format *miniseed* (MSD) menggunakan *software* DataPro. Rekaman dalam tiga komponen yang terdiri dari dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal. Spektrum rekaman dalam domain waktu ditransformasi menjadi domain frekuensi dengan filter *smoothing* Konno Ohmachi dengan koefisien *bandwidth* 40 detik dengan tipe jendela Cosine [1]. Kemudian dilakukan seleksi sinyal dengan membuang sinyal yang memiliki *noise* yang besar. Dari hasil tersebut diperoleh nilai Frekuensi natural dan amplifikasi untuk masing-masing komponen. Dari data tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan indeks kerentanan gedung. Metode penelitian disajikan dalam bagan pada Gambar 3.

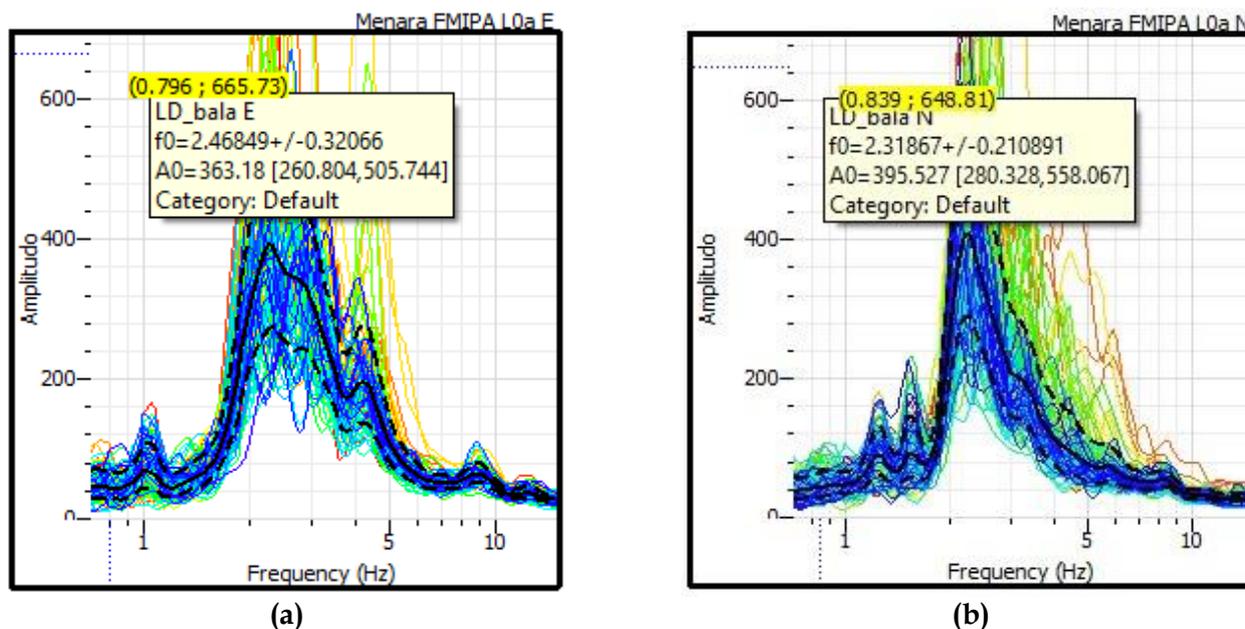


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Pengukuran mikrotremor secara umum dilakukan di dua area yaitu pada gedung dan pada tanah sekitar gedung. Setiap data pengukuran diolah dengan metode FSR untuk memperoleh nilai frekuensi natural dan amplifikasi. Gambar 4 merupakan hasil pengolahan data menggunakan Geopsy yang menampilkan frekuensi natural (f_0) dan amplifikasi (A_0) untuk masing-masing komponen di salah satu titik pengukuran.



Gambar 4. Grafik Hasil Pengolahan Data Mikrotremor pada Titik Pengukuran L0a (a) komponen EW (b) komponen NS

Nilai frekuensi natural dan amplifikasi untuk setiap titik pengukuran di area sekitar Gedung Menara FMIPA UNM disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Frekuensi Natural dan Amplifikasi Tanah sekitar Gedung Menara FMIPA UNM untuk setiap Komponen

Titik Pengukuran	F_0 (Hz) Komponen NS	F_0 (Hz) Komponen EW	A Komponen NS	A Komponen EW
T1 (119,429592° BT dan - 5,186253° LS)	2,5224	3,20667	523,401	475,597
T2 (119,42955° BT dan - 5,185898° LS)	2,46069	2,99123	303,44	411,475
T3 (119,428995° BT dan - 5,186047° LS)	2,68784	2,79241	337,656	351,661

Pengukuran mikrotremor pada tanah area sekitar gedung Menara FMIPA UNM dilakukan pada tiga titik. Titik pertama (T1) terletak di sebelah kiri Gedung, titik kedua (T2) berada di area belakang gedung, dan titik ketiga (T3) berada pada sebelah kanan gedung sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2 (a). Frekuensi natural yang diperoleh yaitu dalam rentang 2,46069 Hz hingga 3,20667 Hz. Berdasarkan klasifikasi material pada Tabel 1 dengan mengacu pada frekuensi natural maka material pada sekitar Gedung Menara FMIPA UNM tergolong ke dalam jenis alluvial dengan ketebalan >5 m. Ketebalan sedimen permukaan ini masuk dalam kategori tebal. Hal ini sesuai dengan peta geologi Kota Makassar yang menunjukkan daerah penelitian tersusun atas material jenis alluvial.

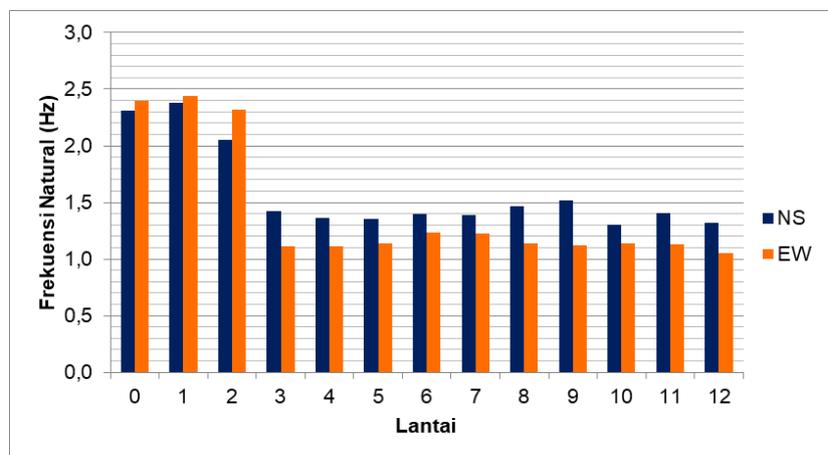
Frekuensi Natural dan Indeks Resonansi Bangunan

Frekuensi natural adalah nilai frekuensi yang sering muncul pada suatu wilayah pengukuran. Frekuensi natural tanah dan frekuensi natural bangunan dapat memberikan informasi terkait indeks resonansi bangunan. Nilai frekuensi natural yang terukur dan indeks resonansi bangunan pada Gedung Menara FMIPA UNM disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Frekuensi Natural Bangunan dan Indeks Resonansi Bangunan Gedung Menara FMIPA UNM

Lantai	Komponen NS			Komponen EW		
	F ₀ (Hz)	R (%)	Keterangan	F ₀ (Hz)	R (%)	Keterangan
0	2,314	5,971	Tinggi	2,400	19,763	Sedang
1	2,382	3,185	Tinggi	2,436	18,578	Sedang
2	2,048	16,755	Sedang	2,319	22,465	Sedang
3	1,423	42,182	Rendah	1,114	62,772	Rendah
4	1,363	44,595	Rendah	1,115	62,715	Rendah
5	1,354	44,980	Rendah	1,140	61,903	Rendah
6	1,394	43,349	Rendah	1,233	58,782	Rendah
7	1,384	43,741	Rendah	1,226	59,029	Rendah
8	1,468	40,337	Rendah	1,137	61,997	Rendah
9	1,514	38,453	Rendah	1,122	62,483	Rendah
10	1,305	46,980	Rendah	1,140	61,885	Rendah
11	1,423	42,750	Rendah	1,124	62,265	Rendah
12	1,321	46,299	Rendah	1,056	64,711	Rendah

Berdasarkan data hasil pengukuran pada gedung menara FMIPA UNM terukur frekuensi natural dalam interval 1,056 Hz sampai 3,473 Hz. Frekuensi terendah pada komponen NS yaitu 1,305 Hz pada lantai 10 dan frekuensi tertinggi yaitu 2,382 Hz pada lantai 1. Frekuensi terendah pada komponen EW yaitu 1,056 Hz pada lantai 12 dan frekuensi tertinggi yaitu 2,436 Hz pada lantai 1. Pada metode yang digunakan diperoleh nilai frekuensi natural pada komponen NS dan EW. Data frekuensi natural untuk setiap komponen disajikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.

**Gambar 5. Grafik Frekuensi Natural Pada Setiap Lantai untuk masing-masing Komponen**

Frekuensi natural pada Gedung Menara FMIPA UNM secara umum terbagi antara dua kelompok besar yakni untuk tiga lantai pertama dan 10 lantai setelahnya. Kelompok pertama berada pada interval 2,319 Hz hingga 2,435 Hz. Untuk kelompok kedua yaitu berada pada interval 1,056 Hz hingga 1,233 Hz. Frekuensi natural tertinggi terukur pada lantai 1 yaitu sebesar 2,38 Hz untuk komponen NS dan 2,436 Hz untuk komponen EW. Pada kelompok pertama, komponen EW lebih besar dibandingkan dengan komponen NS. Sedangkan, pada kelompok kedua komponen NS lebih besar dibandingkan dengan komponen EW.

Indeks resonansi bangunan pada Gedung Menara FMIPA UNM tergolong dalam tiga kategori yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Kategori tinggi ditemukan pada *basement* dan lantai 1 untuk komponen NS sekitar 3,185% dan 5,971%. Kategori sedang ditemukan pada lantai 2 untuk komponen NS dengan indeks resonansi bangunan sekitar 16,755%. *Basement* hingga lantai 2 pada komponen EW juga termasuk dalam kategori sedang. Kategori rendah mendominasi indeks kerentanan bangunan pada gedung tersebut.

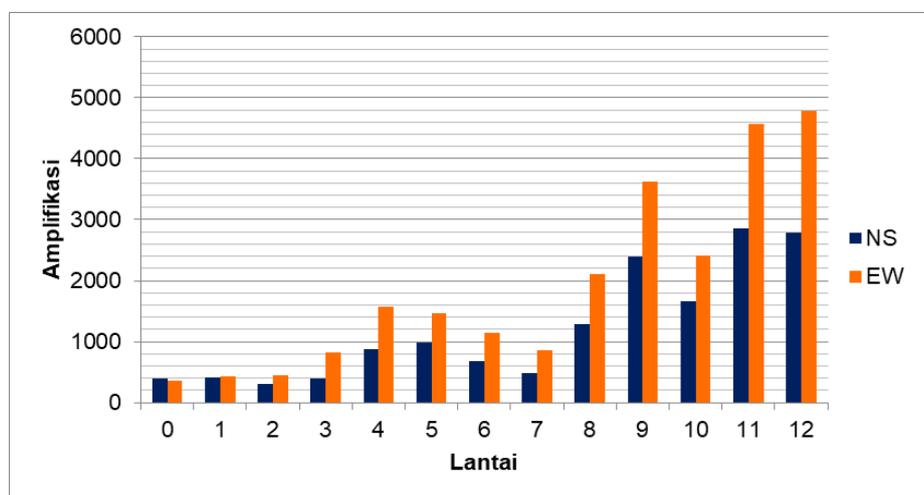
Amplifikasi dan Indeks Kerentanan Bangunan

Amplifikasi merupakan perbesaran amplitudo gelombang yang terekam. Pengukuran mikrotremor pada Gedung menara FMIPA UNM diperoleh data amplifikasi untuk setiap lantai pada masing-masing komponen. Frekuensi natural dan amplifikasi digunakan untuk menganalisis indeks kerentanan bangunan yang hasilnya disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Indeks Kerentanan Bangunan yang diperoleh dari data Frekuensi Natural dan Amplifikasi untuk setiap Komponen

Lantai	Komponen NS			Komponen EW		
	F ₀ (Hz)	A	K	F ₀ (Hz)	A	K
1	2,382	407,901	4,798	2,436	432,202	7,187
2	2,048	306,859	1,604	2,319	440,584	2,655
3	1,423	402,287	2,906	1,114	814,954	14,199
4	1,363	875,472	5,165	1,115	1575,606	20,528
5	1,354	974,276	4,663	1,140	1455,967	14,535
6	1,394	676,337	2,544	1,233	1136,803	8,079
7	1,384	477,716	1,556	1,226	853,956	5,244
8	1,468	1290,960	3,261	1,137	2098,927	13,068
9	1,514	2393,733	5,023	1,122	3631,960	20,510
10	1,305	1658,457	4,202	1,140	2416,290	11,846
11	1,423	2850,723	5,612	1,124	4576,797	20,738
12	1,321	2787,950	5,701	1,056	4783,540	22,651

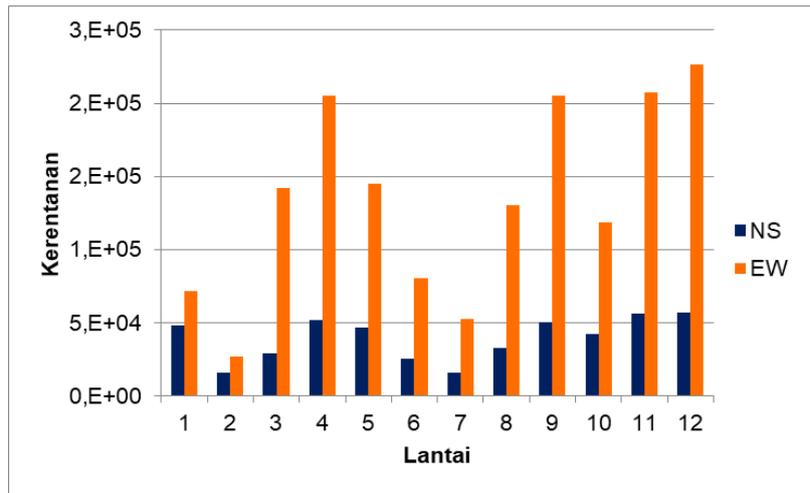
Amplifikasi Gedung Menara FMIPA UNM yang terukur tampak bervariasi. Data yang diperoleh berada pada interval 300 hingga 4783,54. Data amplifikasi untuk setiap komponen disajikan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Amplifikasi pada Setiap Lantai untuk masing-masing Komponen

Amplifikasi pada Gedung Menara FMIPA UNM tampak bervariasi. Amplifikasi tertinggi pada komponen NS terukur pada lantai 11 yaitu sekitar 2850,7 sedangkan untuk komponen EW terukur pada lantai 12 yaitu sekitar 4783,5. Amplifikasi terendah pada komponen NS terukur pada lantai 2 yaitu sekitar 306,86 sedangkan untuk komponen EW terukur pada *basement* yaitu sekitar 360, 975. Selain daripada *basement*, dua belas lantai lainnya memiliki amplifikasi yang lebih tinggi untuk komponen EW dibandingkan dengan komponen NS.

Kerentanan Gedung Menara FMIPA tampak fluktuatif. Pada komponen NS nilai kerentanan bangunan berada pada kisaran $1,556 \times 10^4$ hingga $22,651 \times 10^4$. Gambar 7 menunjukkan bahwa komponen EW memiliki indeks kerentanan bangunan yang lebih tinggi dibandingkan dengan komponen NS.



Gambar 7. Indeks Kerentanan Gedung Menara FMIPA pada setiap Lantai untuk masing-masing Komponen

Pembahasan

Frekuensi natural pada tanah yang diperoleh yaitu dalam rentang 2,46 Hz hingga 3,21 Hz. Berdasarkan klasifikasi material pada Tabel 1 [11] maka material pada sekitar Gedung Menara FMIPA UNM tergolong ke dalam jenis III dengan interval frekuensi natural 2,5-4 Hz berupa alluvial dengan ketebalan >5 m. Hal ini sesuai dengan peta geologi Kota Makassar yang menunjukkan daerah penelitian tersusun atas material jenis alluvial.

Frekuensi natural bangunan untuk setiap komponen menunjukkan pada tiga lantai pertama dihitung mulai dari basement hingga lantai 2 berada pada rentang 2,048 Hz hingga 2,382 Hz untuk komponen NS dan 2,319 Hz hingga 2,4355 Hz untuk komponen EW. Tampak bahwa frekuensi natural pada komponen EW lebih besar dibandingkan dengan frekuensi natural pada komponen NS. Hal ini diduga karena kondisi lokasi bangunan yang di sebelah barat gedung terdapat gedung FD dan gedung Jurusan Geografi serta di sebelah timur terdapat gedung FA dan FC. Sedangkan di sebelah utara gedung terdapat gedung FE dan FF. Aktivitas getaran dari gedung pada komponen EW lebih banyak jika dibandingkan dengan komponen NS. Frekuensi natural pada lantai 3 hingga lantai 12 lebih kecil jika dibandingkan dengan frekuensi natural tingkatan di bawahnya. Semakin tinggi tingkatan bangunan diperoleh nilai frekuensi natural yang semakin kecil. Hal ini sejalan dengan apa yang diformulasikan terkait hubungan antara frekuensi natural dengan tinggi bangunan yaitu berbanding terbalik [19]. Frekuensi natural pada lantai 3 hingga lantai 12 justru komponen NS yang lebih besar dibandingkan dengan komponen EW. Hal ini juga diduga dipengaruhi oleh letak gedung yang di sekitarnya terdapat aktivitas getaran dari gedung lain. Ditinjau dari semakin tingginya gedung, justru pada tingkatan tinggi, frekuensi natural bangunan semakin rendah. Hal ini sesuai dengan yang diungkapkan oleh [20] mengenai struktur bangunan yang semakin tinggi mempengaruhi frekuensi natural bangunan yang justru semakin rendah.

Frekuensi natural Gedung Menara FMIPA UNM yang terukur pada setiap lantai dirata-ratakan sehingga diperoleh data frekuensi natural bangunan. Nilai frekuensi natural bangunan untuk komponen NS yaitu 1,5908 Hz dan untuk komponen EW yaitu 1,4281 Hz. Sehingga, periode bangunannya itu 0,6286 s untuk komponen NS dan 0,7002 s untuk komponen EW. Frekuensi natural pada bangunan dan frekuensi natural pada tanah dapat dianalisis untuk mengetahui indeks resonansi bangunan sehingga dapat dilakukan pengelompokan tingkat kerentanan bangunan. Semakin kecil selisih antara kedua frekuensi tersebut maka indeks resonansi bangunan semakin kecil pula. Pada basement hingga lantai 2 memiliki indeks resonansi bangunan yang tergolong tinggi hingga sedang. Lantai 3 hingga 12 menunjukkan indeks resonansi bangunan yang berada dalam kategori yang rendah.

Amplifikasi tinggi cenderung berada pada lantai bangunan yang tinggi sedangkan amplifikasi rendah cenderung ditemukan pada lantai bagian dasar. Tinggi gedung akan linear dengan besarnya amplifikasi pada gedung tersebut. Secara umum amplifikasi pada komponen EW lebih besar dibandingkan dengan amplifikasi pada komponen NS. Hal ini mengindikasikan bahwa Gedung Menara FMIPA UNM akan lebih merespon getaran yang berasal dari arah utara-selatan dibandingkan dari arah timur-barat [21]. Amplifikasi pada lantai 10 menunjukkan besaran yang lebih kecil dibandingkan dengan lantai sebelumnya. Hal ini diduga karena kondisi pengukuran yang dilakukan pada saat sepi. Telah ditemukan bahwa pengukuran dalam kondisi sepi dan ramai akan mempengaruhi amplifikasi bangunan. Pengukuran pada kondisi sepi kemudian ramai berakibat pada peningkatan amplifikasi. Kondisi ramai pada pengukuran merupakan aktivitas mahasiswa yang juga berdampak pada aktivitas lift yang bekerja. Ketika dikaitkan dengan nilai frekuensi natural pada lantai tersebut yang cenderung sama dengan beberapa lantai bagian atas menunjukkan bahwa aktivitas yang ramai ini tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap perubahan nilai frekuensi natural [22].

Data kerentanan bangunan dipengaruhi oleh amplifikasi, frekuensi natural pada tanah dan juga pada bangunan, serta tinggi bangunan itu sendiri. Berdasarkan hasil yang diperoleh, menunjukkan kerentanan gedung untuk setiap lantai beragam. Rata-rata kerentanan untuk masing-masing komponen yaitu $3,920 \times 10^4$ untuk komponen NS dan $13,437 \times 10^4$ untuk komponen EW. Persamaan yang digunakan dalam menentukan indeks kerentanan bangunan menunjukkan bahwa indeks kerentanan bangunan sebanding dengan amplifikasi namun berbanding terbalik dengan frekuensinya. Sehingga semakin besar amplifikasi pada suatu bangunan maka semakin besar pula indeks kerentanan bangunannya [15].

Indeks kerentanan bangunan menunjukkan seberapa rentang suatu bangunan mengalami deformasi ketika mendapatkan gangguan dari luar [1]. Indeks kerentanan bangunan terbesar ditemukan pada lantai 12. Hal ini mengindikasikan bahwa ketika Gedung Menara FMIPA UNM mendapatkan gangguan dari luar misalnya gempa bumi maka lantai 12 berpotensi mengalami kerusakan terparah. Jika ditinjau dari indeks resonansi bangunan, lantai 1 memiliki indeks resonansi yang paling rendah yang berarti bahwa kerentanan bangunan terhadap tanah yang paling tinggi yaitu di lantai 1. Hal ini dikarenakan selisih antara frekuensi pada tanah dan pada bangunan di lantai 1 sangat kecil yang memiliki potensi terbesar untuk terjadi resonansi pada bangunan. Hal ini sesuai yang disampaikan oleh [12] bahwa indeks resonansi bangunan sangat dipengaruhi oleh selisih nilai antara frekuensi natural pada tanah dan frekuensi natural pada bangunan. Frekuensi natural bangunan yang semakin mendekati nilai frekuensi natural pada tanah berdampak pada semakin kecilnya indeks resonansi bangunan yang berarti bahwa tingkat kerentanan bangunan terhadap tanah semakin tinggi. Sebaliknya, selisih frekuensi natural bangunan dengan frekuensi natural pada tanah yang semakin besar berdampak pada semakin besarnya pula indeks resonansi bangunan yang berarti bahwa tingkat kerentanan bangunan terhadap tanah semakin kecil.

KESIMPULAN

Frekuensi natural Gedung Menara FMIPA UNM untuk masing masing komponen yaitu 1,3047 Hz hingga 2,3823 Hz pada komponen NS dan 1,0556 Hz hingga 2,4355 Hz pada komponen EW. Frekuensi natural tertinggi terdapat pada lantai 1 dan frekuensi natural terendah terdapat pada lantai 12. Amplifikasi Gedung Menara FMIPA UNM untuk masing masing komponen yaitu 306,8593 hingga 2850,7233 pada komponen NS dan 360,975 hingga 4783,54 pada komponen EW. Amplifikasi tertinggi ditemukan pada lantai 12 yaitu sebesar 4783,54 dan amplifikasi terendah terdapat di lantai 2 yaitu sebesar 306,859. Nilai kerentanan Gedung Menara FMIPA UNM untuk masing-masing komponen yaitu $0,128 \times 10^4$ hingga $2,792 \times 10^4$ pada komponen NS dan $0,05 \times 10^4$ hingga $9,91 \times 10^4$ pada komponen EW. Ketika terjadi guncangan besar maka lantai 12 yang berpotensi mengalami kerusakan terparah karena memiliki indeks kerentanan bangunan terbesar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis R.Y. mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua, Direktorat Pendidikan Tinggi Universitas Negeri Makassar, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui Beasiswa Unggulan Masyarakat Berprestasi tahun 2019-2023. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada berbagai pihak di antaranya kepada Dosen Pembimbing yaitu Ibu Sulistiaawaty, S.Si., M.Si., M.T. dan Bapak Agus Susanto, S.Si., M.T., Ph.D. yang telah memberikan bimbingan hingga selesai studi, Kepala Balai Besar Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Wilayah IV Makassar yang telah memfasilitasi perangkat pengukuran, serta teman-teman yang senantiasa membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sungkono, D. D Warnana, Triwulan, dan W. Utama, "Evaluation of Buildings Strength from Microtremor Analyses," *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 11, no. 05, hlm. 108-114, 2011.
- [2] D. Widyawarman, R. Subangun, dan R. W. Prabowo, "Analisis Mikrotremor untuk Pemetaan Jalur Evakuasi Gedung Universitas PGRI Yogyakarta," *J. MIPA Dan Pembelajarannya*, vol. 2, no. 3, hlm. 223-231, 2022, doi: 10.17977/um067v2i3p223-231.
- [3] Sulistiaawaty, Zulfikar, J. W. Irfandy, V. A. Tiwow, dan P. Palloan, "Analisis Mikrozonasi Seismik pada Kecamatan Galesong Kabupaten Takalar Sulawesi Selatan," *J. Sainsmat*, vol. 6, no. 1, hlm. 28-38, 2017.
- [4] BAPPEDA Kota Makassar, "Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Tahun 2021-2026 Kota Makassar." [Daring]. Tersedia pada: <https://bappeda.makassarkota.go.id/>
- [5] P. Raharjo, M. D. Saputra, G. Latuputty, N. Y. Geurhaneu, dan D. Ilahude, "KETEBALAN ENDAPAN SEDIMEN PASIR LAUT BERDASARKAN DATA SEISMIK DANGKAL SALURAN TUNGGAL DI PERAIRAN TAKALAR, SELAT MAKASSAR," *J. Geol. Kelaut.*, vol. 17, no. 1, Jul 2019, doi: 10.32693/jgk.17.1.2019.593.
- [6] H. Okada, *The Microtremor Survey Method*. Society of Exploration Geophysicists, 2004.
- [7] V. Arintalofa, G. Yulianto, dan U. Harmoko, "Analisa Mikrotremor Menggunakan Metode HVSR untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai V_p ," *J. Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 1, no. 2, hlm. 54-61, Jul 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.9276.
- [8] R. Prastowo dan U. N. Prabowo, "EVALUASI KERENTANAN GEDUNG REKTORAT STTNAS TERHADAP GEMPA BUMI BERDASARKAN ANALISIS MIKROTREMOR," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 9, no. 1, hlm. 83, Agu 2017, doi: 10.28989/angkasa.v9i1.113.
- [9] Almufid, "Almufid. (2015). Analisis Beban Gempa terhadap Kekuatan Struktur Bangunan Multi Degree of Freedom. DINAMIKA, 17-26.," *DINAMIKA*, vol. 1, no. 1, hlm. 17-26, 2015.
- [10] M. Demulawa dan I. Daruwati, "ANALISIS FREKUENSI NATURAL DAN POTENSI AMPLIFIKASI MENGGUNAKAN METODE HVSR (Studi Kasus: Kampus 4 Universitas Negeri Gorontalo)," *EDU Res.*, vol. 10, no. 1, hlm. 59-63, 2021.
- [11] K. Kanai, *Seisology in Engineering*. Japan: Tokyo University, 1998.
- [12] I. Ifantyana dan A. Rudyanto, "PENENTUAN KARAKTERISTIK RESONANSI BANGUNAN DI SEKOLAH TINGGI METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA," *J. Meteorol. Klimatol. Dan Geofis.*, vol. 4, no. 1, hlm. 1-6, 2017.

- [13] S. S. Arifin, B. S. Mulyatno, dan R. Setianegara, "PENENTUAN ZONA RAWAN GUNCANGAN BENCANA GEMPA BUMI BERDASARKAN ANALISIS NILAI AMPLIFIKASI HVSR MIKROTREMOR DAN ANALISIS PERIODE DOMINAN DAERAH LIWA DAN SEKITARNYA," *J. Geofis. Eksploasi*, vol. 2, no. 1, hlm. 30-40, 2014.
- [14] V. W. Ayi dan S. Bahri, "Analisis Mikrotremor untuk Evaluasi Kekuatan Bangunan Studi Kasus Gedung Perpustakaan ITS," *J. SAINS DAN SENI ITS*, vol. 1, no. 1, hlm. 52-56, 2012.
- [15] T. Sato, Y. Nakamura, dan J. Saita, "Tsumoto, S., Yutaka, N., & Jun, S. (2008). The Change of Dynamic Characteristics using Microtremor. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.," *14 Th World Conf. Earthq. Eng.*, 2008.
- [16] A. Gosar, "Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 10, no. 4, hlm. 761-772, Apr 2010, doi: 10.5194/nhess-10-761-2010.
- [17] M. Herak, "Overview of recent ambient noise measurements in Croatia in free-field and in buildings," *GEOFIZIKA*, vol. 28, no. 1, hlm. 21-40, 2011.
- [18] R. Riantana, D. Darsono, dan A. Triyono, "Penentuan Nilai Frekuensi Natural Bangunan UPT Perpustakaan UNS dengan Sensor Accelerometer pada Handphone Android," *J. Fis. Dan Apl.*, vol. 13, no. 3, hlm. 97, Okt 2017, doi: 10.12962/j24604682.v13i3.2838.
- [19] J. S. Rossmann, C. L. Dym, dan L. Bassman, *Rossmann, J. S., Dym, C. L., & Bassman, L. (2015). Introduction to Engineering Mechanics, second edition. Florida, United State: CRC Press., Second. Florida, United State: CRC Press, 2015.*
- [20] R. Faizah, "Pengaruh Frekuensi Gempa terhadap Respon Bangunan Bertingkat," *Semin. Nas. Tek. Sipil V*, hlm. 59-66, 2015.
- [21] I. Ilham, "Vulnerability Analysis of Rectorate Building of UIN Mataram against Earthquakes Based on Microtremor Data," *Berk. SAINSTEK*, vol. 11, no. 1, hlm. 1, Mar 2023, doi: 10.19184/bst.v11i1.34115.
- [22] W. Lumbanraja dan H. Noperi, "Metode HVSR Untuk Uji Respon Bangunan Terhadap Gempa: Studi Kasus Stadion Maguwoharjo Yogyakarta," hlm. 7-18, 2017.