



KAJIAN RESPON JEMBATAN DI ACEH UTARA TERHADAP GEMPA BERDASARKAN DATA MIKROTREMOR

Zaki Mutaram^a, Umar Muksin^b, Yunita Idris^c

^aMagister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

^bTsunami and Disaster Mitigation Research Center (TDMRC), Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

^cJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

*Corresponding author; email address: zakimutaram.st.unsyiah@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received 1 June 2022

Accepted 16 August 2022

Online 30 September 2022

Keywords:

Bridge

Microtremor

Natural Frequency

Resonance

ABSTRACT

The parameters of the bridge's resistance to dynamic loads, such as natural frequency and damping ratio, were determined by theoretical and experimental modal analysis. Microtremor measurements were performed on two types of bridges: steel truss bridges and reinforced concrete bridges. The goal is to establish the value of the bridge's dynamic characteristics as well as the bridge's feasibility based on SNI 2833-2008's natural vibration period limit. The natural frequency of the dynamic test is used to compare natural frequencies to theoretical frequencies to determine the condition of the integrity and level of stiffness of the structure or structural elements. The HVSF (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) approach is used to analyze microtremor data on the ground, while FSR (Floor Spectral Ratio) and RDM (Random Decrement Method) analysis is used to analyze microtremor data on bridges. According to the findings of the first case study, the natural frequency of the soil is 1.25–1.35 Hz. The steel truss bridge's natural frequency value from the FSR is 0.81–3.29 Hz, while the RDM values are 1.12–3.46 Hz, indicating that the frequency produced is less stable on the NS component. The damping ratio is 2.02–4.97% in this case. The same analysis was carried out on a different type of bridge in the second case study, with a natural ground frequency of 1.11 - 1.47 Hz. The reinforced concrete bridge's natural frequency value from the FSR is 2.21 - 3.62 Hz, and the RDM results are 2.30 - 3.62 Hz. In each component, the frequency found tends to be stable. The damping ratio result is 2.05 - 4.81%. The period of the experimental results shows identical results to the period of the theoretical calculation results, with the average experimental result period being 7.24% greater than the period of the theoretical calculation results. According to the experimental data, the bridge damping ratio is around 3.16%. This result is in accordance with the literature, which is around 2-5%.

©2022 Magister Teknik Sipil Unsyiah. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

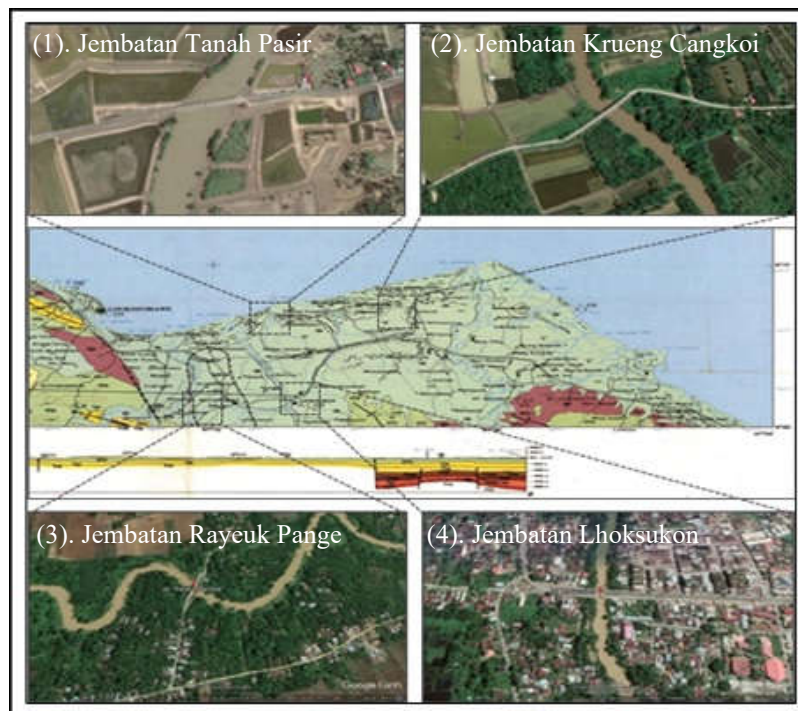
Kejadian gempa bumi dan tsunami di Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 memberikan pelajaran akan bahaya gempa bumi dan efek kerusakannya. Tsunami yang terjadi setelah gempa bumi di dasar laut (8,9 Skala Richter) menimbulkan gelombang besar setinggi 10 meter yang menghantam daratan pantai dan kota Banda Aceh, Lhokseumawe, Pulau Nias dan sekitarnya. Gelombang besar ini meluluhlantakan pemukiman penduduk, fasilitas umum, sarana-prasarana serta kerusakan lingkungan yang merupakan bencana paling besar di abad 21. Penyebab utama kerusakan jembatan saat terjadi gempa bumi adalah getaran pada tanah dasar struktur konstruksi yang menyebabkan terjadinya deformasi. Respon jembatan terhadap getaran pada dasar tanah sangat bergantung pada frekuensi alami struktur.

Kerusakan atau kegagalan pada infrastruktur jembatan akan memberikan dampak yang besar pada usaha pelaksanaan evakuasi dan penyaluran logistik pasca bencana. tercatat kerusakan-kerusakan sehingga penting untuk menganalisa performa jembatan saat dilalui oleh beban gempa, salah satunya dengan menilai respon dinamik jembatan. Penelitian ini menggunakan pengukuran mikrotremor, dari data pengukuran mikrotremor dapat diketahui sifat getaran dan lapisan dibawah permukaan tanah (Nakamura, 2000), identifikasi frekuensi natural tanah (Gosar dkk, 2010), Frekuensi Jembatan (Citak dkk, 2012), rasio resonansi (Gosar, 2010) dan rasio redaman (Cantieni, 1983).

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Geologi Wilayah Aceh Utara

Struktur geologi wilayah kabupaten Aceh Utara secara garis besar terdiri atas batuan Quarter yang cenderung di bagian pesisir (bagian utara) dan batuan tersier yang cenderung di bagian pedalaman (bagian selatan) yang terdiri dari dataran Aluvial yang terletak memanjang di belakang dataran pantai, yang selanjutnya diikuti oleh zona lipatan, dan zona vulkanik yang merupakan pengunungan (RPJM Aceh Utara 2017-2022). Secara fisiografi letak jembatan penelitian (Gambar 1) termasuk daerah dataran rendah berupa endapan Aluvium, terdiri dari endapan sungai, dan endapan pantai atau merupakan campuran.



Gambar 1. Kondisi geologi wilayah Aceh Utara

2.2 Frekuensi Natural dan Periode Getar Alami Jembatan

Frekuensi natural adalah suatu sistem struktur yang memiliki massa dan kekakuan bergerak ketika diberikan suatu eksitasi awal kemudian eksitasi tersebut dihilangkan sehingga struktur tersebut bergetar secara bebas. Frekuensi getar dipengaruhi oleh properti fisik dari struktur, yaitu massa dan kekakuan. Jumlah getaran yang dilakukan setiap detiknya disebut frekuensi f_n (*natural cyclic frequency*), dinyatakan sebagai berikut :

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} [Hz] \quad (1)$$

dimana, k = kekakuan struktur dan m = massa struktur.

Waktu yang diperlukan oleh sistem untuk menempuh satu kali getaran lengkap dari suatu getaran ketika terganggu dari posisi keseimbangan statis dan kembali ke posisi aslinya disebut periode getar alami

T_n (*natural period of vibration*) yang menggambarkan setiap getaran tergantung pada massa dan kekakuan dan berhubungan dengan frekuensi getar alami ω_n . Periode getar alami dinyatakan sebagai berikut :

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{1}{f_n} T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK}} [detik] \quad (2)$$

dimana, w = berat bangunan bawah jembatan dan bagian bangunan atas yang dipikul (kN)

2.3 Analisis Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)

Metode HVSR pertama dikenalkan oleh Nagosi dan Igarashi tahun 1971 yang kemudian dilanjutkan oleh Nakamura tahun 1989. Konsep dasar metode HVSR adalah adanya kesamaan antara rasio spektra horizontal ke vertikal dengan transfer gelombang dari batuan dasar ke permukaan (Nakamura, 1989). Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSR adalah frekuensi natural dan amplifikasi yang memberikan informasi mengenai karakteristik dinamis dan struktur lapisan tanah (Arintalofa dkk, 2020). Metode ini menggunakan perbandingan antara komponen horizontal dan komponen vertikal, dimana metode HVSR ini diasumsikan rasio spektrum horizontal dan vertikal dari getaran permukaan merupakan fungsi perpindahan. Untuk komponen horizontal dan vertikal yang akan dianalisis rasio amplitudo spektrum fourier dengan persamaan berikut (Nakamura, 2000).

$$R(T) = \frac{\sqrt{F_{NS}(T)^2 + F_{EW}(T)^2}}{F_z(T)} \quad (3)$$

Dimana $R(T)$ adalah Spektrum rasio vertikal terhadap horizontal; $F_{NS}(T)^2$ adalah Spektrum fourier di NS (horizontal); $F_{EW}(T)^2$ adalah Spektrum fourier di EW (horizontal); dan F_z adalah Spektrum fourier di Z (vertikal).

2.4 Analisis Floor Spectral Ratio (FSR)

Metode FSR adalah metode standar yang digunakan untuk menentukan frekuensi natural dan resonansi struktur yang menggambarkan karakteristik struktur terhadap gempa bumi. Hal ini dapat dilakukan dengan pencatatan data getaran mikrotremor (Gosar, 2010). Metode FSR ini merupakan metode fungsi transfer dari lantai antara spektrum struktur dan spektrum tanah. Fungsi transfer dari struktur telah diperkirakan oleh rasio spektrum struktur dan spectrum tanah atau spektrum bidang bebas. Resonansi dapat terjadi jika adanya kesamaan frekuensi natural antara geologi setempat dengan struktur (jembatan) (Gosar, 2007). Indeks resonansi menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R = \left[\frac{f_j - f_t}{f_t} \right] \times 100\% \quad (4)$$

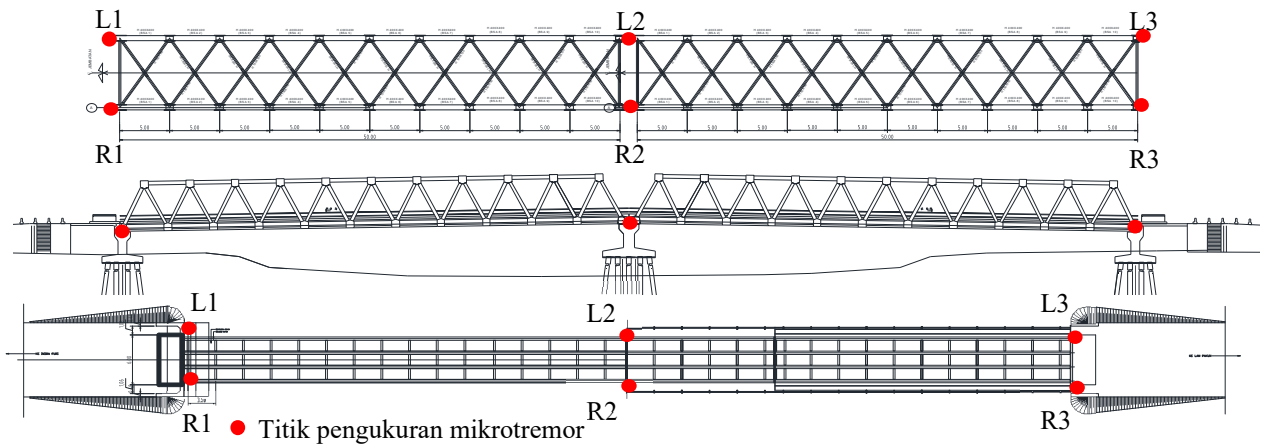
Dimana R adalah Indeks resonansi jembatan, f_j adalah frekuensi natural jembatan dan f_t adalah frekuensi natural tanah. Tingkat kerentanan jembatan beresonansi terhadap gempa terdiri dari 3 kriteria yaitu <15% (kerentanan tinggi), 15 – 25% (kerentanan sedang) dan >25% (kerentanan rendah) (Gosar, 2010).

2.5 Analisis Random Decrement Method (RDM)

Penentuan rasio redaman penting untuk menghilangkan energi gempa. Rasio redaman dievaluasi dengan menggunakan metode RDM. Metode RDM merupakan teknik yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan struktur suatu jembatan dari respons suatu gempa. Prinsip analisis RDM yaitu mengetahui damping ratio jembatan dengan proses bandpass filter dalam evaluasi frekuensi alami dari spektrum fourier (Tunggal, dkk, 2014). Dengan demikian spektrum struktur dan RDM harus dihitung secara bersamaan. Menurut Cantieni (1983) merekomendasikan nilai rasio redaman untuk tipe dan kondisi struktur baja dan Struktur beton nilai redaman berkisar antara 2 – 5%.

3. METODE PENELITIAN

Pengukuran mikrotremor dilakukan di wilayah Kabupaten Aceh Utara yang meliputi dua jenis jembatan yaitu jembatan rangka baja dan jembatan beton bertulang (Tabel 1). Data titik pengukuran mikrotremor pada jembatan diperoleh dengan menggunakan seperangkat alat sensor *Geobit Instruments* model S-20 *Near Broad Band Seismik Sensor* (Gambar 2). Tahapan awal pelaksanaan penelitian adalah pengukuran dimensi struktur jembatan termasuk didalamnya proses pengumpulan data seperti jenis struktur setiap komponen, jenis tumpuan dan jumlah/ukuran sambungan.



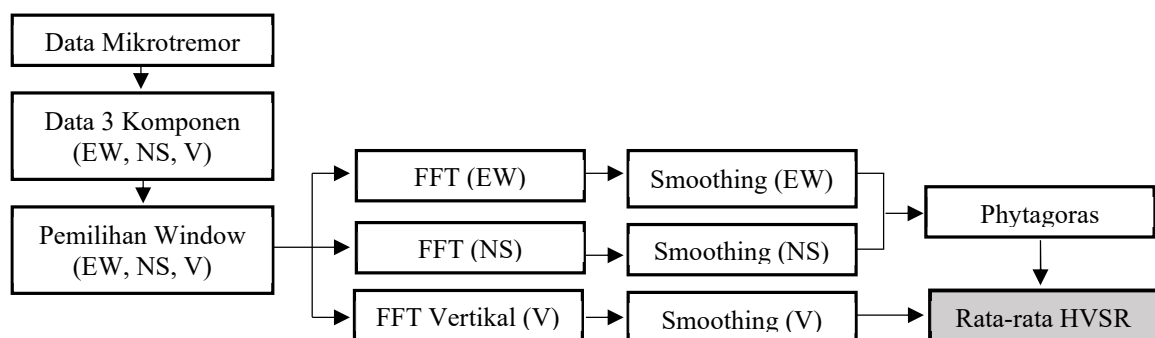
Gambar 2. Skema Pengukuran Mikrotremor

Tabel 1. Data teknis jembatan

No.	Nama Jembatan	Koordinat		P (m)	L (m)	H (m)	Jenis Jembatan
		Latitude	Longitude				
1	Jembatan Tanah Pasir	5.150122°	97.281260°	110	7	4	Rangka Baja
2	Jembatan Krueng Cangko	5.169228°	97.307267°	90	7	3	Rangka Baja
3	Jembatan Rayeuk Pange	5.021969°	97.295713°	86	8	4	Beton Bertulang
4	Jembatan Lkoksukon	5.041095°	97.319531°	96	6	7	Beton Bertulang

3.1 Pengolahan data mikrotremor pada tanah

Pengolahan data mikrotremor pada tanah menggunakan *software Geopsy* dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Pengolahan data diperoleh 3 komponen utama, yaitu 2 komponen Horizontal (*East-West* dan *North-South*) dan 1 komponen Vertikal (*Up-Down*). Pengolahan data dimulai dari pemilihan *windows* (min 10 *windows*) antara 20–40 detik non *overlapping* sesuai anjuran (SESAME, 2004) untuk menganalisis *spektrum fourier* yang awalnya dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Hasil dari proses FFT kemudian dihaluskan dengan *filter smoothing* Konno-Ohmachi (1998) dengan koefisien *bandwidth* sebesar 40 dan taper fungsi *Gaussian* 0,5 dengan *sampling* frekuensi 1 – 10 Hz (Konno dan Ohmachi, 1998). Rasio amplitudo *spektrum fourier* horizontal dan vertikal diperoleh nilai rata-rata frekuensi natural tanah (Gambar 3).



Gambar 3. Bagan alir pengolahan data HVSr

3.2 Pengolahan data mikrotremor pada jembatan

Pengolahan data menggunakan analisis spektrum pada setiap komponen horizontal. Hasil frekuensi natural jembatan yang diestimasi dari puncak FSR tertinggi dan dikorelasikan dengan frekuensi natural jembatan hasil analisis spektrum. Analisis FSR menggunakan *software geopsy*, tahapan awal adalah analisis *spektrum Fourier* yang berfungsi untuk mengubah data mikrotremor awal respon yang berupa domain waktu (*time series*) ke domain frekuensi. Dalam analisis spektrum, masing-masing panjang perekaman dipisah menjadi 20 sampai 40 sekon *non-overlapping window*. Untuk menghaluskan hasil proses FFT, digunakan *filter smoothing* kono dan Ohmachi dengan koefisien bandwidth sebesar 40. Spektrum amplitudo rata-rata untuk masing-masing komponen dihitung dari *window* yang terseleksi.

Selain menggunakan metode FSR digunakan juga metode *Random Decrement Method* (RDM) yaitu untuk mengetahui nilai damping ratio struktur. Pengolahan data RDM harus disesuaikan dengan data frekuensi natural jembatan yang diperoleh dari metode FSR. Proses RDM diproses menggunakan *software Geopsy* dengan *Bandpass Filtering* mulai dari 1 – 10 Hz dengan rentang frekuensi yang disesuaikan dengan nilai amplitudo tertinggi pada analisis FSR sebelumnya. Frekuensi yang diperoleh dari metode RDM tidak boleh berbeda 0,5 Hz dari metode FSR. Jika terdapat frekuensi dengan perbedaan sebesar 0,5 Hz maka nilai dari pengolahan data damping tidak benar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengukuran Mikrotremor pada tanah

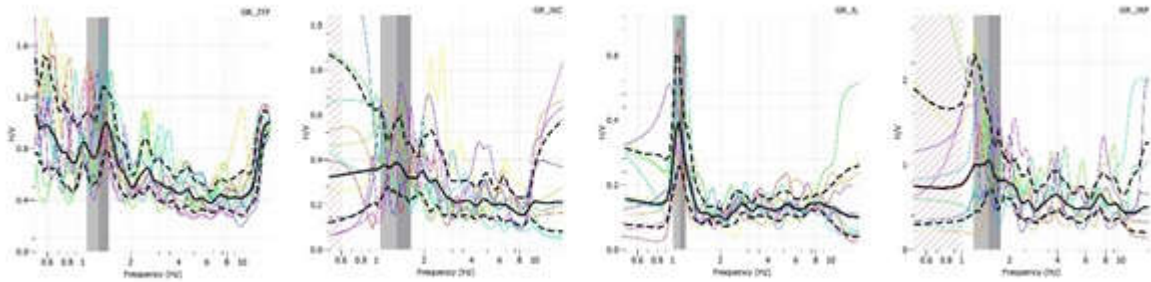
Metode HVSR menghasilkan spektrum mikrotremor dengan puncak spektrum pada frekuensi predominannya. Nilai frekuensi dominan (*fg*) dan faktor amplifikasi (*Ag*) adalah parameter yang memberikan informasi mengenai karakteristik dinamis dan struktur lapisan tanah (Nakamura, 2000). Nilai frekuensi dominan yang sangat rendah tidak hanya mengakibatkan resonansi tetapi juga meningkatkan kerentanan terhadap guncangan gempa bumi dengan periode yang panjang. Klasifikasi Kanai telah dipakai sebagai standar perencanaan bangunan dan gempa bumi. Klasifikasi tanah oleh Kanai berdasarkan nilai frekuensi dominan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural oleh Kanai (1983).

Klasifikasi tanah		Frekuensi Natural (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Type	Jenis			
Type IV	Jenis 1	6,667 - 20	Batuan tersier atau lebih tua terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaan sangat tipis, didominasi batuan keras.
Type III	Jenis 2	4,0 - 10	Batuan tersier atau lebih tua terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> , dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori menengah 5-10m.
Type II	Jenis 3	2,5 - 4	Batuan <i>alluvial</i> , dengan ketebalan lebih dari 5m terdiri dari <i>sandy gravel, sandy hard clay, loam</i> , dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30m.
Type I	Jenis 4	< 2,5	Batuan <i>alluvial</i> , yang terbentuk dari sedimentasi <i>deta, top soil</i> , lumpur, dan lainnya, kedalaman ≥ 30 m.	Ketebalan sedimen permukaan sangatlah tebal.

Tabel 3. Nilai frekuensi natural struktur jembatan pengukuran mikrotremor.

Nama Jembatan	Jembatan Tanah Pasir (a)	Jembatan Krueng Cangko (b)	Jembatan Lhoksukon (c)	Jembatan Rayeuk Pange (d)
Frekuensi Natural Tanah	1,25 Hz	1,35 Hz	1,11 Hz	1,47 Hz
Klasifikasi tanah	Jenis 4	Jenis 4	Jenis 4	Jenis 4



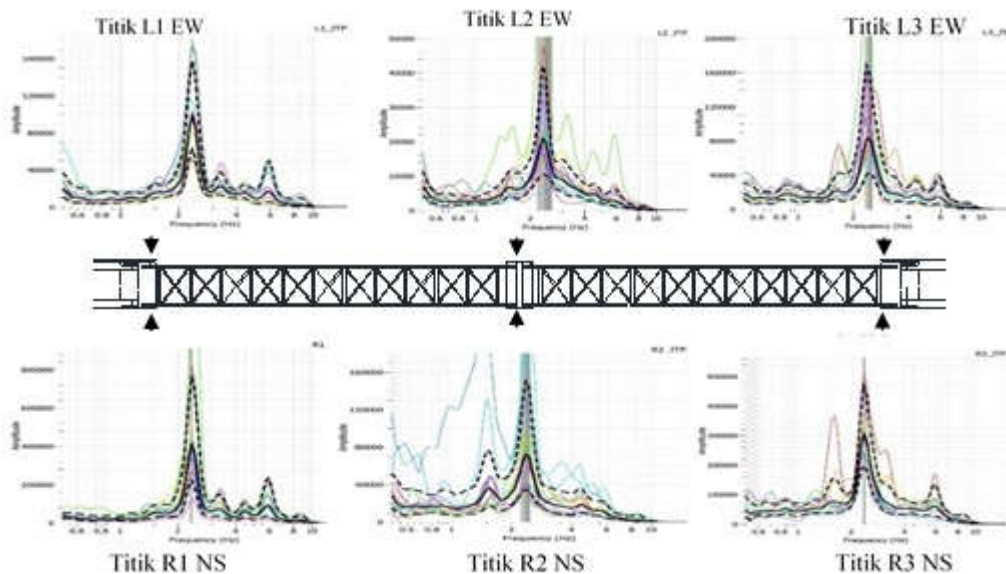
Gambar 4. Frekuensi natural tanah (f_{0t}) berdasarkan pengolahan data HVSr

Tabel 3 menunjukkan hasil nilai frekuensi natural yang diperoleh pada Jembatan Tanah Pasir sebesar 1,25 Hz, Jembatan Krueng Cangko sebesar 1,35 Hz dan Jembatan Rayeuk Pange sebesar 1,47 Hz dan Jembatan Lhoksukon sebesar 1,11 Hz. Ditinjau dari Tabel 2 nilai frekuensi natural di kawasan jembatan tersebut berada pada klasifikasi tanah tipe 1 jenis IV yaitu batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi deta, top soil, lumpur, dan lainnya, dengan kedalaman ketebalan sedimen permukaan yang sangatlah tebal. Frekuensi natural tanah (f_{0t}) berdasarkan pengolahan data HVSr dapat dilihat pada Gambar 4.

4.2 Pengukuran miktrotremor pada struktur jembatan

4.2.1 Studi kasus I : Jembatan rangka baja

Jembatan rangka baja merupakan jembatan yang terdiri dari rangkaian struktur batang-batang baja yang dihubungkan satu dengan yang lainnya. Beban dan muatan yang dipikul oleh struktur ini akan diuraikan dan disalurkan pada batang-batang baja tersebut, sebagai gaya-gaya tekan dan tarik melalui titik-titik pertemuan batang (titik buhul).



Gambar 5. Kurva frekuensi natural alami Jembatan Tanah Pasir berdasarkan metode FSR

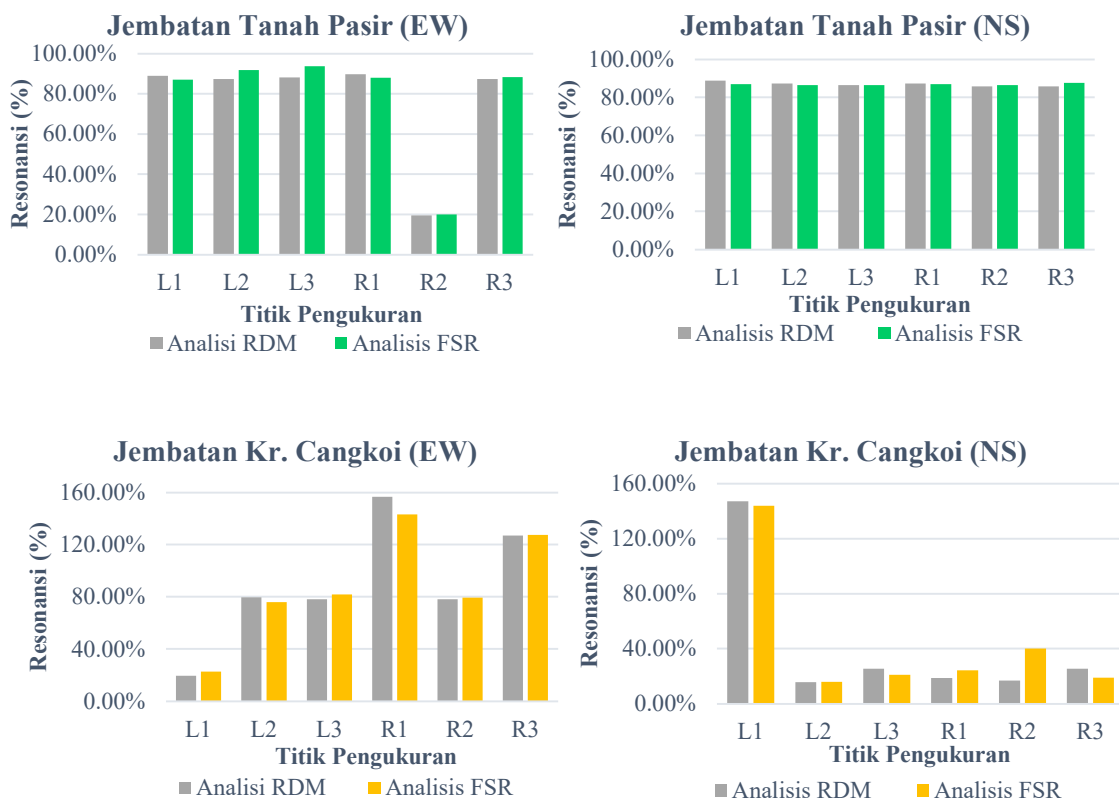
Tabel 4. Analisis Karakteristik Dinamik pada Jembatan Tanah Pasir Analisis RDM dan FSR

No.	Titik	f_0 Tanah (Hz)	RDM f_0 (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi	FSR f_0 (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi
			EW	NS	EW	NS		EW	NS	EW	NS	
1	L1	1,25	2,37	2,37	89%	89%	Rendah	2,35	2,35	87%	87%	Rendah
2	L2	1,25	2,35	2,35	87%	87%	Rendah	2,41	2,34	92%	86%	Rendah
3	L3	1,25	2,36	2,34	88%	86%	Rendah	2,43	2,34	94%	86%	Rendah
4	R1	1,25	2,38	2,35	90%	87%	Rendah	2,36	2,35	88%	87%	Rendah
5	R2	1,25	1,50	2,33	20%	86%	Sedang	1,50	2,34	20%	86%	Rendah
6	R3	1,25	2,35	2,33	87%	86%	Rendah	2,36	2,35	88%	88%	Rendah

Tabel 5. Analisis karakteristik dinamik pada Jembatan Krueng Cangko analisis RDM dan FSR

No.	Titik	f ₀ Tanah (Hz)	RDM f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi	FSR f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi
			EW	NS	EW	NS		EW	NS	EW	NS	
1	L1	1,35	1,61	3,33	19%	147%	Sedang	1,65	3,29	23%	144%	Rendah
2	L2	1,35	2,42	1,56	80%	16%	Sedang	2,37	1,56	76%	16%	Sedang
3	L3	1,35	2,40	1,69	78%	25%	Rendah	2,45	1,63	82%	21%	Sedang
4	R1	1,35	3,46	1,60	157%	19%	Sedang	3,28	1,68	143%	24%	Sedang
5	R2	1,35	2,40	1,12	78%	17%	Sedang	2,42	0,81	79%	40%	Rendah
6	R3	1,35	3,06	1,69	127%	25%	Rendah	3,07	1,60	127%	19%	Sedang

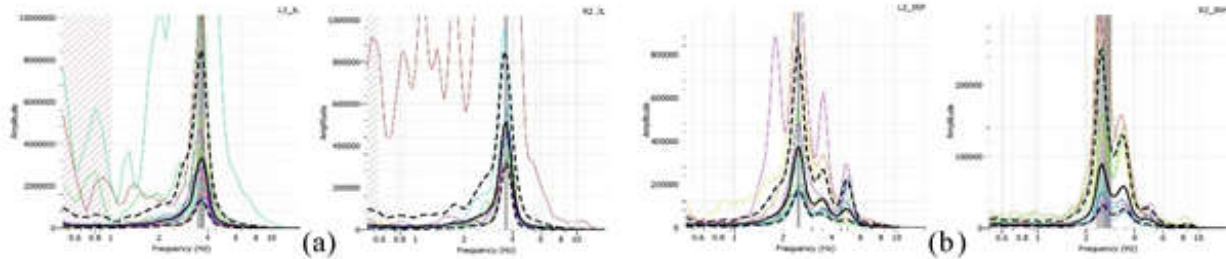
Frekuensi alami merupakan salah satu karakteristik dinamis jembatan untuk menahan beban yang berat, hal tersebut berkaitan dengan massa dan kekakuan dari struktur yang terpengaruh oleh perubahan kondisi fisik dan mekanis struktur jembatan. Kekakuan jembatan akan menurun seiring dengan masa layan jembatan atau bahkan memburuk. Gambar 5 menunjukkan bentuk kurva frekuensi natural yang diukur pada pusat tumpuan jembatan, Tabel 4 dan 5 menunjukkan nilai frekuensi jembatan untuk getaran arah EW dan arah NS yang diperoleh dengan menggunakan analisis RDM dan FSR. Berdasarkan analisis RDM Jembatan Tanah Pasir diperoleh nilai frekuensi 1,50 - 2,38 Hz dan analisis FSR diperoleh nilai frekuensi 1,5 - 2,43 Hz. Jembatan Krueng Cangko dari analisis RDM diperoleh nilai rata-rata frekuensi 1,12 – 3,46 Hz dan analisis FSR diperoleh 0,81 – 3,29 Hz, terdapat nilai frekuensi natural yang kurang stabil pada jembatan Tanah Pasir titik R2 komponen EW dan jembatan Krueng Cangko pada komponen NS titik L2, L3, R1, R2 dan R3. Seharusnya komponen EW dan NS memiliki kemiripan frekuensi pada suatu struktur jembatan. Hal yang sama diperoleh dari nilai resonansi kedua jembatan rangka baja tersebut yaitu 20 – 94 % (EW) dan 16 – 143 % (NS), persentase rasio resonansi yang didapat juga kurang stabil pada titik yang sama. Seharusnya komponen EW dan NS juga memiliki kemiripan frekuensi dan rasio resonansi yang sama pada suatu struktur jembatan (Gambar 6), ini membuktikan bahwa kedua jembatan rangka baja tersebut terjadi penurunan nilai kekakuan struktur.



Gambar 6. Grafik resonansi jembatan rangka baja arah EW dan NS

4.2.2 Studi kasus II : Jembatan beton bertulang

Jembatan beton pratekan atau yang dikenal dengan *Presressed Concrete Bridge* ini merupakan jenis jembatan dengan material konstruksi beton pratekan/prategang atau beton yang berisi kabel baja dengan tujuan untuk memberikan tegangan awal berupa tegangan tarik terhadap beton akibat sifat beton yang tidak memiliki elastisitas yang cukup kuat. Dalam hal ini, beton pratekan sebagai solusi untuk mengatasi besarnya vibrasi yang timbul pada struktur beton khususnya pada struktur dengan bentang yang besar.



Gambar 7. Kurva frekuensi alami (a) Jembatan Lhoksukon dan (b) Jembatan Rayeuk Pange

Tabel 6. Analisis karakteristik dinamik pada Jembatan Lhoksukon analisis RDM dan FSR

No.	Titik	f ₀ Tanah (Hz)	RDM f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi	FSR f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi
			EW	NS	EW	NS		EW	NS	EW	NS	
1	L1	1,11	2,86	2,83	158%	155%	Rendah	2,99	2,73	169%	146%	Rendah
2	L2	1,11	3,45	3,62	211%	226%	Rendah	3,62	3,61	226%	225%	Rendah
3	L3	1,11	2,37	2,37	114%	114%	Rendah	2,33	2,37	110%	114%	Rendah
4	R1	1,11	3,29	3,21	196%	189%	Rendah	3,24	3,24	192%	192%	Rendah
5	R2	1,11	3,48	3,41	214%	207%	Rendah	3,60	3,62	224%	226%	Rendah
6	R3	1,11	3,56	2,30	221%	107%	Rendah	3,51	2,21	216%	99%	Rendah

Tabel 7. Analisis karakteristik dinamik pada Jembatan Rayeuk Pange analisis RDM dan FSR

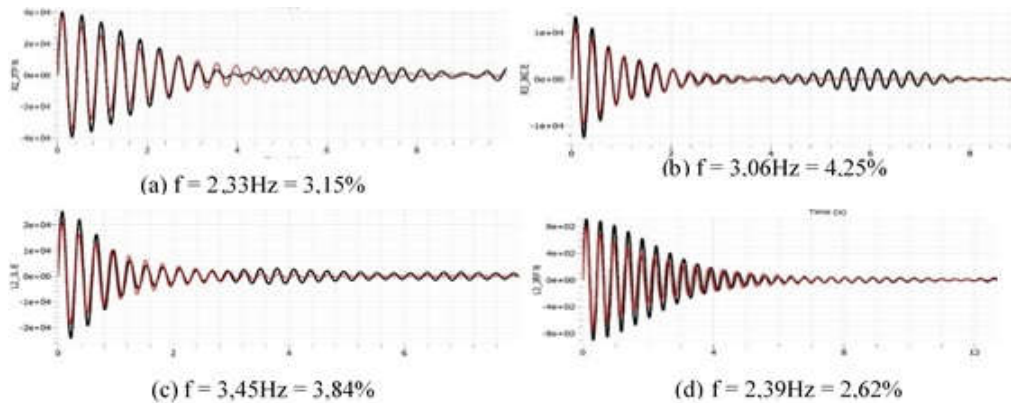
No.	Titik	f ₀ Tanah (Hz)	RDM f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi	FSR f ₀ (Hz)		Resonansi		Tingkat Resonansi
			EW	NS	EW	NS		EW	NS	EW	NS	
1	L1	1,47	2,39	2,38	63%	62%	Rendah	2,35	2,46	60%	67%	Rendah
2	L2	1,47	2,48	2,44	69%	66%	Rendah	2,46	2,47	68%	68%	Rendah
3	L3	1,47	2,31	2,39	57%	63%	Rendah	2,26	2,45	54%	67%	Rendah
4	R1	1,47	3,38	2,44	130%	66%	Rendah	3,34	2,41	127%	64%	Rendah
5	R2	1,47	2,61	2,54	78%	73%	Rendah	2,59	2,51	76%	70%	Rendah
6	R3	1,47	3,18	2,54	116%	73%	Rendah	3,17	2,59	116%	76%	Rendah

Gambar 7 adalah grafik frekuensi alami struktur jembatan, Tabel 6 dan Tabel 7 adalah hasil analisis RDM dan FSR. Nilai frekuensi yang diperoleh pada beberapa komponen mendekati standar SNI, hasil analisis pada kedua jembatan tersebut lebih stabil, ini terlihat pada semua titik pengukuran memiliki kemiripan nilai frekuensi dan nilai resonansi pada semua komponen EW dan NS. Nilai rasio resonansi rata-rata diatas 25% dengan klasifikasi rendah. Jembatan tersebut memiliki struktur yang cukup kaku dan aman dalam menahan beban dinamis dari beban gempa.

4.3 Damping Ratio

Rasio redaman struktur berdasarkan hasil pengukuran didapatkan bervariasi untuk tiap titik antara 2,02 - 4,97%. Untuk mendapatkan rasio redaman yang lebih akurat frekuensi yang diberikan pada struktur mendekati dengan frekuensi resonansinya karena respon struktur pada kondisi resonansi dikontrol oleh redaman dari sistem. Dengan kata lain semakin tinggi amplitudo osilasi dari struktur maka rasio redaman yang didapat akan lebih besar. Nilai rata – rata maka rasio redaman jembatan dari hasil pengukuran

mikrotremor berkisar 3,16% (gambar 8). Hasil ini sesuai dengan nilai rekomendasi yang dikeluarkan oleh Cantieni bahwa jembatan yang dalam hal ini merupakan struktur baja dan beton bertulang rasio redamannya berkisar antara 2 – 5 %.



Gambar 8. Damping ratio a. Jembatan Tanah Pasir; b. Jembatan Rayeuk Pange; c. Jembatan Lhoksukon; d. Jembatan Rayeuk Pange

4.4 Kelayakan Jembatan

Pengujian mikrotremor dapat dijadikan salah satu alternatif metode untuk penerimaan kelayakan struktur jembatan sebagai pendukung dalam penetapan laik fungsi jalan. Untuk memperoleh nilai frekuensi teoritis jembatan, dilakukan perhitungan struktur jembatan. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui parameter dinamik pada saat struktur menerima eksitasi getaran. Output frekuensi hasil perhitungan (teoritis) dibandingkan dengan frekuensi hasil uji mikrotremor (aktual) dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan frekuensi natural dan periode getar alami jembatan secara teoritis dan aktual

No.	Nama Jembatan	Frekuensi teoritis (Hz)	Periode getar teoritis (detik)	Rata-rata frekuensi aktual/uji (Hz)	Periode getar aktual/uji (detik)	Selisih relatif
1	Jembatan Tanah Pasir	2,13	0,47	2,29	0,44	6,84 %
2	Jembatan Krueng Cangko	2,17	0,46	2,15	0,47	-0,86 %
3	Jembatan Lhoksukon	2,51	0,40	3,09	0,32	18,66 %
4	Jembatan Rayeuk Pange	2,48	0,40	2,59	0,39	4,32 %

Secara garis besar dapat kita lihat bahwa frekuensi dan periode getar alami bernilai positif artinya hasil pengukuran lebih besar dari teoritis maka dapat dikatakan bahwa baik uji dinamik memberikan kecenderungan yang sama yaitu struktur lebih kaku daripada hasil perhitungan secara teoritis dengan rata-rata 7,24%. Hal ini menunjukkan kekakuan aktual struktur jembatan lebih tinggi dibandingkan prediksi kekakuan teoritisnya, maka jembatan dikatakan mempunyai performa yang baik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan:

1. Pada jembatan rangka baja nilai frekuensi natural tanah adalah 1,25 - 1,35 Hz dan jembatan beton bertulang nilai frekuensi natural tanah adalah 1,11 - 1,47 Hz dengan klasifikasi tanah tipe 1 jenis IV yaitu jenis batuan Alluvial.
2. Nilai frekuensi natural struktur jembatan rangka baja berdasarkan analisis FSR adalah 0,81 - 3,29 Hz dan analisis RDM 1,12 - 3,46 Hz, frekuensi yang diperoleh kurang stabil pada komponen NS, hasil rasio redaman 2,02 - 4,97%. Nilai frekuensi natural jembatan beton bertulang berdasarkan analisis FSR 2,21 - 3,62 Hz dan hasil analisis RDM 2,30 - 3,62 Hz, Frekuensi yang diperoleh cenderung stabil pada pada setiap komponen, hasil rasio redaman 2,05 - 4,81%.

3. Periode getar alami dari hasil eksperimen menunjukkan hasil yang identik dengan periode hasil perhitungan teoritis dengan rata – rata periode getar alami hasil eksperimen lebih besar 7,24% dibandingkan periode hasil perhitungan teoritis. Nilai kekakuan aktual struktur jembatan lebih tinggi dibandingkan prediksi kekakuan teoritisnya, jembatan mempunyai performa yang baik.
4. Berdasarkan hasil eksperimen rasio redaman jembatan didapat berkisar 3.16%, hasil ini sesuai dengan literatur yakni berkisar 2 – 5 %.
5. Struktur eksisting jembatan masih memenuhi standar kekakuan untuk menerima pembebanan sesuai dengan standar SNI 2833-2008.

5.2 Saran

Adapun saran yang diajukan untuk penelitian selanjutnya adalah dapat dikembangkan lebih lanjut metode baku mikrotremor untuk pengujian dinamik jembatan, agar diperoleh data yang valid dalam penentuan karakteristik dinamik dan memberikan kemudahan bagi pihak pengguna untuk langsung dapat menggunakan dan menginterpretasikan data mikrotremor tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Arintalofa, V., Yulianto, G. dan Harmoko, U. 2020. Analisa mikrotremor menggunakan metode HVSR untuk mengetahui karakteristik bawah permukaan manifestasi panas bumi Diwak dan derekan berdasarkan nilai V_p . *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(2), pp. 54-61.
- Cantieni, R. 1983. Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland. Rep, 211, *Eidgenossische Material-prufungs-und Versuchsanstalt (EMPA)*, Dübendorf, Switzerland.
- Citak, S. O., Ohori, M., & Nakamura, T. 2012. Microtremor measurements and earthquake response analysis on Urado bridge, In *The 15th World Conferences of Earthquake Engineering LISBOA*, Kochi, Japan.
- Gosar, A. 2007. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5. 6 and 2004 Mw5. 2 earthquakes. *Engineering geology*, 91(2-4), pp. 178-193.
- Gosar, A., Roser, J., Sket Motnikar, B. and Zupancic, P. 2010. Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia). *Bulletin of earthquake engineering*, 8(3), pp. 571-592.
- Gosar, A. 2010. Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors. *Natural hazards and earth system sciences*, 10(4), pp. 761-772.
- Kanai, K. 1983. *Engineering Seismology*. Tokyo: University of Tokyo Press.
- Konno, K. and Ohmachi, T. 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), pp. 228-241.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1), pp. 25-33.
- Nakamura, Y. 2000, January. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, 30 January–4 February 2000, Auckland, New Zealand.
- SESAME, W. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation. *European Commission. Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME*, D23, 12.
- Tunggal, P., Ihkyaul, M. and Aris, M. 2014, September. Earthquake microzonation and strength building evaluation at Gelora Bung Tomo stadium Surabaya using microtremor method. In *2014 International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA-14)*, pp. 14-20.