

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keamanan bendungan dapat dipantau dengan menganalisis perubahan kondisi dinamisnya. Ketika suatu bendungan mengalami kerusakan, beberapa parameter dinamisnya, seperti frekuensi alami, amplitudo getaran, atau mode getaran, akan mengalami perubahan (Sarah et al., 2019). Pemantauan jangka panjang terhadap keamanan bendungan bertujuan untuk memperoleh informasi terkini mengenai kemampuan struktur dalam mempertahankan fungsinya, mengingat adanya proses penuaan serta akumulasi kerusakan akibat faktor lingkungan operasional (Farrar & Worden, 2007). Keamanan bendungan merupakan aspek krusial dalam mencegah potensi kegagalan struktur yang dapat berdampak pada lingkungan dan keselamatan manusia. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam pemantauan keamanan bendungan adalah metode Structural Health Monitoring (SHM), yang memungkinkan deteksi dini terhadap potensi kerusakan melalui berbagai teknik evaluasi.

Pada SHM, terdapat beberapa metode untuk mendeteksi kerusakan struktural (Structural Damage Detection). Metode yang umum digunakan meliputi: 1. Non-destructive Testing Methods (NDT) 2. Vibration-based Damage Detection Methods, 3. Consideration of Uncertainties (Dasanayaka and Matsuda 2022). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Non-destructive Testing Methods, yang berlandaskan pada prinsip bahwa kerusakan pada struktur akan mengubah karakteristik getarannya. Metode ini mengukur kuantitas getaran, seperti response time-histories dan karakteristik getaran global, yang bergantung pada sifat fisik struktur (massa, redaman, batas kondisi, dan kekakuan). Berdasarkan parameter dinamis yang digunakan, metode ini dapat dikategorikan dalam domain waktu, frekuensi, atau waktu-frekuensi.

Salah satu bendungan yang menjadi infrastruktur vital di Provinsi Sulawesi Selatan adalah Bendungan Bili-Bili, yang dibangun pada 6 Juli 1999. Bendungan Bili-Bili merupakan bendungan terbesar di Provinsi Sulawesi Selatan, terletak sekitar 30 km di sebelah timur Kota Makassar, tepatnya di Dusun Bili-Bili, Desa Romangloe, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa. Bendungan Bili-Bili memiliki fungsi penting dalam pengelolaan sumber daya air. Namun, berdasarkan pernyataan M. Takeshi Watanabe, Team Leader Yachiyo Engineering Co., jika tidak ada penanganan yang serius, diprediksi pada tahun 2048, efektivitas Bendungan Bili-Bili akan menurun hingga 45% (Budiman & Haerudin, 2012). Penurunan ini disebabkan oleh fenomena penuaan struktur yang memengaruhi keamanan bendungan. Proses penuaan struktur, seperti penurunan kekuatan beton, retakan, degradasi sistem penyegelan, dan pelapukan pondasi yang mempengaruhi cutoff, drainase, atau material, menyebabkan perubahan kekakuan bendungan. Perubahan ini tercermin dalam sifat dinamisnya, seperti getaran alami, yang bergantung pada kekakuan dan massa struktur (diasumsikan konstan. Oleh karena itu, pengukuran sifat getaran alami menjadi pendekatan awal yang penting untuk menilai kondisi struktur bendungan. (Muzadeh, & Miyajima, 2014).



mengenai kerentanan pada bendungan telah diteliti oleh Koen (2016), menggunakan data rekaman mikrotremor. Teknik Horizontal Ratio (HVSr) dalam metode mikrotremor mampu mengestimasi secara langsung tanpa informasi kecepatan gelombang geser di bawah permukaan (Wurdiana Shinta, 2021). Teknik ini penting untuk analisis kondisi struktural tanpa memerlukan data geoteknik

yang sering kali sulit diperoleh dalam pengukuran lapangan. Penelitian yang dilakukan oleh Farrar dan Worden (2007) menunjukkan bahwa pengukuran sifat dinamis struktur dapat memberikan gambaran mendalam terkait perubahan kondisi struktural akibat akumulasi kerusakan. Studi ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Syah (2017) dan (Rasyid et al. 2024) mengaplikasikan metode seismik untuk menilai kerentanan gempa pada bangunan di wilayah rawan gempa lainnya, seperti di bendungan. Hal ini penting untuk mitigasi risiko kegagalan bendungan, terutama pada bendungan besar seperti Bendungan Bili-Bili yang rentan terhadap faktor lingkungan dan aktivitas seismik.

Kemampuan untuk memprediksi perilaku struktur selama kejadian seismik dan menentukan metode perkuatan yang tepat sangat bergantung pada pemahaman karakteristik dinamis struktur, termasuk natural period. Pemahaman ini penting dalam pengelolaan risiko kerusakan dan mitigasi bencana, khususnya pada infrastruktur vital seperti bendungan. Berdasarkan penelitian terdahulu, metode analisis dinamika struktur telah banyak diterapkan untuk mengevaluasi performa struktur selama kejadian seismik. Ohta et al. (2000) menunjukkan efektivitas penggunaan data mikrotremor untuk memantau perubahan kekakuan struktur akibat penuaan atau kerusakan. Selain itu, penelitian ini menekankan bahwa efektivitas pemantauan dapat ditingkatkan dengan menggabungkan metode analisis numerik dan pengukuran langsung di lapangan. Misalnya, studi oleh Adhikari et al. (2018) memanfaatkan simulasi numerik berbasis perangkat lunak ETABS untuk memodelkan respons struktur terhadap beban dinamis, yang hasilnya divalidasi dengan data pengukuran lapangan. Sementara itu, analisis dinamik struktur dilakukan untuk mengevaluasi respons bangunan terhadap berbagai beban seismik (Dewi, Jaya, and Syahland 2022) dan (Amina et al. 2015)

Penelitian sebelumnya sebagian besar fokus pada evaluasi seismik atau perilaku dinamik secara terpisah, tanpa membahas keduanya secara bersamaan pada infrastruktur bendungan besar seperti Bendungan Bili-bili. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan dua pendekatan utama: 1) Simulasi Etabs, Simulasi ini bertujuan untuk memahami karakteristik dinamis struktur melalui analisis numerik. Dengan model ETABS, parameter seperti kekakuan, frekuensi natural, dan respons struktur dapat dianalisis untuk menggambarkan kondisi aktual bendungan. Selain itu, simulasi ini memberikan gambaran tentang respons struktur terhadap beban dinamis, sehingga memudahkan identifikasi Metode ini digunakan untuk mengukur sifat dinamis struktur secara langsung di lapangan. Data mikrotremor, seperti respons frekuensi dan amplitudo, memberikan informasi empiris yang mendukung hasil simulasi ETABS. 2). Metode survei mikrotremor digunakan untuk menganalisis spektrum seismik guna mengidentifikasi frekuensi dominan tanah yang dapat mempengaruhi respons struktur bangunan terhadap gempa. Teknik ini juga menawarkan keunggulan dalam analisis struktur yang memiliki keterbatasan akses terhadap data geoteknik atau kondisi bawah permukaan. Penggabungan kedua pendekatan ini memberikan informasi yang komprehensif mengenai kondisi dinamis Bendungan Bili-Bili, serta mendukung langkah-langkah mitigasi risiko kerusakan.



vei mikrotremor digunakan untuk menilai kekakuan dan stabilitas n karakteristik getaran alami. Namun, aspek hidrolik, seperti tinggi ime air di waduk, belum dikaji secara mendalam, meskipun mengaruhi beban hidrostatik bendungan. Penelitian Gallipoli et ukkan bahwa perubahan frekuensi resonansi yang terdeteksi r dapat mengindikasikan perubahan stabilitas struktur. Dari data

mikrotremor, kita dapat menganalisis arah gerakan struktur berdasarkan analisis partikel motion, yang memberikan gambaran tentang pola pergerakan gelombang dalam suatu sistem dan hubungannya dengan karakteristik dinamis struktur. Partikel motion dapat digunakan untuk memahami bagaimana suatu struktur merespons getaran dan bagaimana gelombang merambat melalui berbagai medium. Dalam konteks bendungan, partikel motion berpotensi memberikan informasi mengenai interaksi antara struktur dengan lingkungannya, termasuk kemungkinan pengaruh dari keberadaan air di waduk.

Dengan mempertimbangkan pentingnya pemantauan keamanan bendungan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi struktural Bendungan Bili-Bili di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, menggunakan metode survei mikrotremor dan simulasi numerik berbasis ETABS. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran lebih akurat tentang dampak seismik terhadap struktur bendungan, sehingga dapat berkontribusi dalam upaya mitigasi risiko serta mendukung perencanaan pengelolaan bendungan yang lebih optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian ini, maka diperoleh beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik mikrotremor dalam mengidentifikasi keamanan bendungan bendungan Bili-bili Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan?
2. Bagaimana hubungan antara mode shape, partisipasi massa, dan frekuensi dominan dalam mengidentifikasi potensi risiko resonansi pada struktur bendungan?
3. Bagaimana variasi mode shapes bendungan Bili-Bili Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Berdasarkan tiga rumusan masalah yang sudah ditetapkan, masing-masing rumusan masalah memiliki tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian. Tujuan penelitian yang ingin dicapai dari rumusan masalah yang sudah ditetapkan adalah:

1. Menganalisis karakteristik mikrotremor dalam mengidentifikasi keamanan bendungan bendungan
2. Mengidentifikasi hubungan antara mode shape, partisipasi massa, dan frekuensi dominan dalam struktur Bendungan Bili-Bili Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan
3. Menganalisis Mode Shape bendungan Bili-Bili Kabupaten Gowa Sulawesi Selatan dengan menggunakan metode mikrotremor.

1.3.2 manfaat

Dari penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Pemerintah



- 1. mendapatkan informasi kondisi struktur bendungan bili-bili dari an natural periode berdasarkan desain struktur (teoritis) dan 1 mikrotremor (observasi).

- 2. pengetahuan dan wawasan tentang evaluasi keamanan dengan menggunakan metode microtremor, Penelitian ini n tentang dasar teori, prosedur pengukuran, dan metode analisis

data mikrotremor untuk evaluasi keamanan bendungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan dan wawasan bagi para peneliti dan praktisi yang terkait dengan evaluasi keamanan bendungan.

- b. Menambah referensi penelitian tentang evaluasi keamanan bendungan dengan menggunakan metode mikrotremor, Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti lain yang ingin melakukan penelitian tentang evaluasi keamanan bendungan dengan menggunakan metode mikrotremor.
3. Manfaat Masyarakat
 - a. Meningkatkan keamanan dan keselamatan masyarakat dari dampak banjir dan kehilangan pasokan air.
 - b. Membantu menjaga kualitas air yang digunakan untuk keperluan irigasi, air minum, dan industry.

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi oleh :

1. Data yang digunakan adalah data rekaman mikrotremor didaerah bendungan bendungan bili-bili.
2. Pengolahan data mikrotremor dilakukan metode Horizontal to Vertical Spectrum Ration (HVSr) dan simulasi numerik berbasis perangkat lunak ETABS
3. Mengidentifikasi karakteristik vibrasi pada bendungan bili-bili
4. Analisis resonansi hanya mencakup interaksi antara frekuensi natural bendungan dan dominan frekuensi tanah di area sekitar

1.5 Tinjauan Pustaka

1.5.1 Bendungan

Bendungan atau dam adalah konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air menjadi waduk, danau, atau tempat rekreasi dan membaginya ke saluran saluran pembagi. (Yanel 2023). Bendungan juga digunakan untuk mengalirkan air ke sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air. Kebanyakan dam juga memiliki bagian yang disebut pintu air untuk membuang air yang tidak diinginkan secara bertahap atau berkelanjutan. Bendung (weir) dan bendungan (dam) adalah dua bangunan yang berbeda. Bendung menurut Direktorat SDA Kementerian PUPR adalah struktur bendungan berkepal rendah (lowhead dam), yang berfungsi untuk menaikkan muka air, biasanya terdapat di sungai. Air sungai yang permukaannya dinaikkan akan melimpas melalui puncak / mercu bendung (overflow). Bendung dapat digunakan sebagai pengukur kecepatan aliran air di saluran / sungai dan bisa juga sebagai penggerak pengilingan tradisional di negara-negara Eropa. Di negara dengan sungai yang cukup besar dan deras alirannya, serangkaian bendung dapat dioperasikan membentuk suatu sistem transportasi air. Di Indonesia, bendung dapat digunakan untuk irigasi bila misalnya muka air sungai lebih rendah dari muka tanah yang akan diairi

Manfaat bendungan ada beragam. Salah satu manfaat bendungan bagi manusia ialah untuk irigasi. Selain itu, masih ada manfaat bendungan lainnya yaitu t listrik tenaga air, untuk menstabilkan aliran air atau irigasi, untuk an untuk bangunan pengalihan. Usaha untuk mengatur keluar dan bendungan disebut manajemen air (water management). Hal ini gaturan air untuk kebutuhan manusia dapat dilakukan dengan



1.5.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat melalui medium bumi. Perambatan gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas batuan. Salah satu contoh dari gelombang seismik adalah gempa. Menurut (Nurdiyanto, Widiastuti, & Yulianto, 2011). gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat ke seluruh bagian bumi akibat adanya suatu lapisan batuan yang patah atau adanya suatu ledakan, seperti adanya pergerakan lempeng, letusan gunung merapi, runtuhnya bangunan, dan lain-lain. Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena medium yang dilaluinya adalah bumi yang bersifat elastik. Oleh karena itu, sifat penjalaran gelombang seismik bergantung pada elastisitas batuan medium yang dilewatinya. Teori lempeng tektonik telah menjelaskan bagaimana pergerakan dari lempeng bumi. Pergerakan lempeng bumi menyebabkan batuan terdeformasi atau berubah bentuk dan ukuran karena adanya pergerakan antar lempeng. Deformasi akibat pergerakan lempeng ini berupa tegangan (stress) dan regangan (strain).

Sumber gelombang seismik ada dua, yaitu: alami dan buatan. Sumber alami terjadi karena adanya gempa tektonik, gempa vulkanik, dan reruntuhan atau longsor, sedangkan sumber buatan terjadi karena adanya gangguan yang disengaja (Juanita, D. 2011). Secara garis besar gelombang seismik dibagi menjadi gelombang badan (Body Wave) dan gelombang permukaan (Surface Wave).

1.5.3 Tipe Gelombang Seismik

Gelombang seismik yang terdiri dari energi elastik bergerak menjauh dari sumber dengan kecepatan yang bergantung pada modulus elastisitas dan kepadatan media yang dilalui (Adamo et al., 2020). Gelombang seismik merambat melalui seluruh tubuh planet sebagai gelombang badan dan merambat di permukaan sebagai gelombang permukaan (Kyaw et al. 2015).

1.5.3.1 Gelombang Badan

Reynolds (2011) menyebutkan bahwa terdapat dua jenis gelombang badan yang dapat merambat melalui media elastis, yaitu gelombang P (primer) dan gelombang S (sekunder). Menurut (Wiemer, 2018) gelombang primer dan gelombang sekunder dapat dituliskan secara matematis sebagai :

$$V_p = \left[\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$V_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (2)$$

V_p = Kecepatan gelombang primer dalam m/s.

V_s = Kecepatan gelombang geser dalam m/s.

K = modulus kekakuan volumetrik (N/m^2)

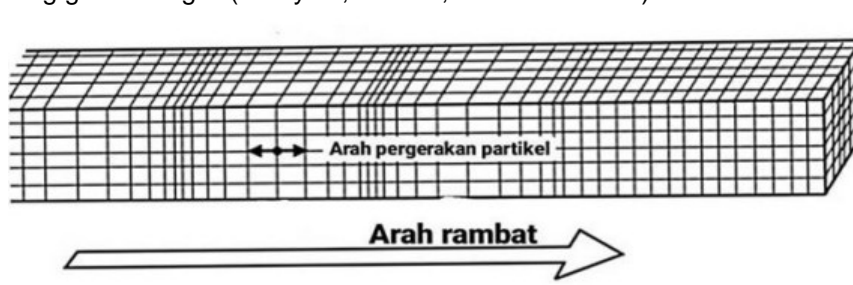
μ = modulus geser (N/m^2)

ρ = massa jenis bahan (kg/m^3)



akan gelombang yang memiliki peran penting dalam seismologi yang ini juga dikenal sebagai gelombang longitudinal, primer, dan gelombang kompresi (Reynolds, 2011). Gelombang ini yang longitudinal dengan arah perambatan bolak-balik seperti yang

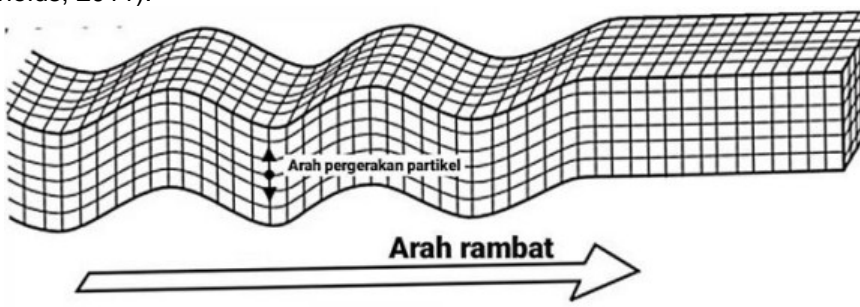
terlihat pada Gambar 1. Gelombang P memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gelombang S sehingga memiliki waktu tiba lebih dulu dibanding gelombang S (Wahyuni, Ahmad, and Astuti 2017)



Gambar 1. Pergerakan partikel gelombang P (Reynolds, 2011)

B. Gelombang S

Gelombang S didefinisikan sebagai gelombang transversal yang arah gerakannya tegak lurus terhadap arah rambatnya, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Gelombang S tidak dapat merambat melalui fluida, sehingga tidak dapat merambat pada inti luar Bumi (Wahyuni et al., 2017). Kyaw et al. (2015) menyebutkan bahwa gelombang sekunder bergerak dengan menggeser partikel medium yang dilalui, dan karena gerakannya berupa perpindahan vertikal dan horizontal, gelombang ini memiliki potensi untuk merusak bangunan. Gelombang S juga dikenal sebagai gelombang geser dan equivoluminal (Rosyidi & Md. Yusoff, 2018). Ketika gerakan partikel terbatas pada satu bidang, gelombang S dikatakan terpolarisasi bidang (Reynolds, 2011).



Gambar 2. Pergerakan partikel gelombang S (Reynolds, 2011)

1.5.3.2 Gelombang Permukaan

Gelombang yang tidak merambat ke bawah permukaan dikenal sebagai gelombang permukaan, yang terdiri dari gelombang Rayleigh dan gelombang Love (Reynolds, 2011). Uniek Kartika (2007) mengemukakan bahwa gelombang-gelombang ini hanya merambat pada beberapa lapisan bumi, sehingga pada survei seismik dalam, gelombang ini tidak digunakan.

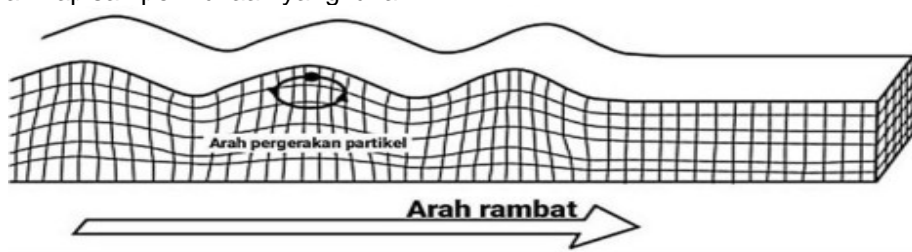


Rayleigh

Rayleigh merupakan gelombang dengan partikel-partikelnya yang bergerak elips terhadap arah rambatnya dan memiliki pola gerakan amplitudo permukaan vertikal yang bergerak tegak lurus terhadap arah rambatnya (Rosyidi, 2011) seperti yang terlihat pada Gambar 3. Reynolds

(2011) mengemukakan bahwa gelombang Rayleigh merambat di sepanjang permukaan bumi dengan amplitudo yang berkurang secara eksponensial dan hanya dapat merambat melalui medium padat.

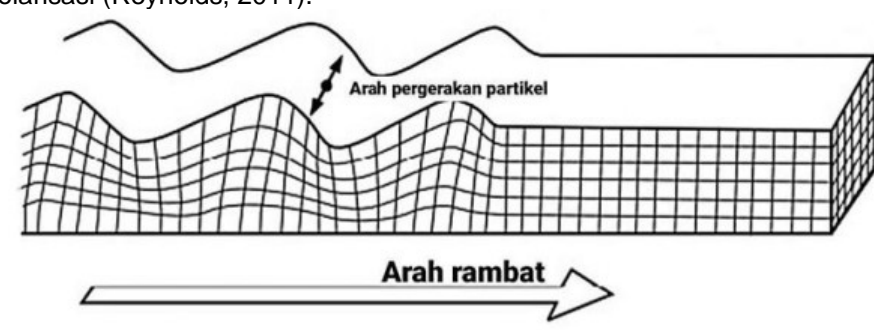
(Nakamura 2008) mengemukakan bahwa efek bencana gempabumi terutama disebabkan oleh gelombang badan, namun jika gelombang Rayleigh menyebabkan kerusakan, maka kerusakan tersebut tergolong ringan. Oleh karena itu perlu dipahami mengenai fenomena energi gelombang badan yang terperangkap dalam lapisan permukaan yang lunak.



Gambar 3. Pergerakan partikel gelombang Rayleigh (Reynolds, 2011)

B. Gelombang Love

Menurut Rosyidi (2013), gelombang Love hanya merambat di bagian permukaan saja dan kecepatannya sangat lambat apabila dibandingkan dengan gelombang S dan gelombang P. Gelombang Love hanya terjadi dimana medium dengan kecepatan gelombang S yang rendah menutupi lapisan dengan kecepatan gelombang S yang lebih tinggi. Seperti yang terlihat pada Gambar 4 gelombang ini memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambat gelombang tetapi sejajar dengan permukaan. Dengan demikian, gelombang ini disebut sebagai gelombang geser terpolarisasi (Reynolds, 2011).



Gambar 4. Pergerakan partikel gelombang Love (Reynolds, 2011)

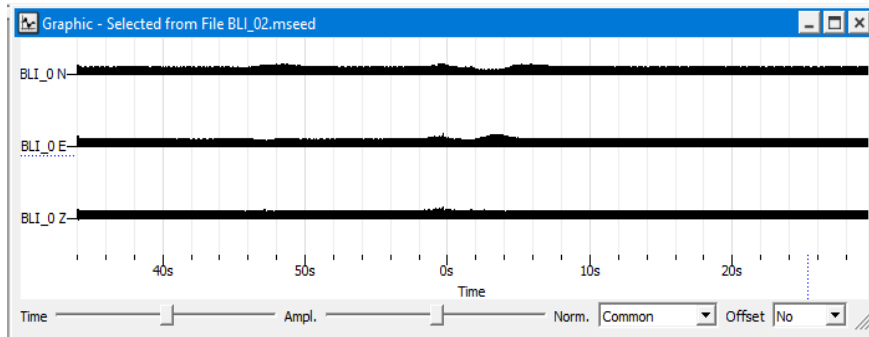
1.5.4 mikrotremor

Mikrotremor adalah getaran alami (ambient noise) yang berasal dari tanah dengan nilai amplitudo yang sangat kecil tertentu yang dapat menjelaskan keadaan geologi dekat permukaan. Ambient noise dapat berasal dari peristiwa alam maupun kegiatan gerakan angin, gelombang laut, getaran alamiah dari tanah, lalu mesin-mesin pabrik (Nandi Haerudin, Alami, & Rustadi, 2019). Dapat diartikan sebagai getaran harmonik tanah yang terjadi secara gempabumi yang terjebak dilapisan sedimen permukaan dan terpantulkan oleh permukaan bawah dengan frekuensi yang tetap (Arifin et al. 2014).

Analisis mikrotremor memperoleh hasil berupa grafik yang memuat amplitudo, waktu, dan domain frekuensi dalam menganalisa getaran



dilakukan perubahan data domain waktu ke dalam bentuk data domain frekuensi. Domain waktu diperoleh dari hasil pengukuran mikrotremor yang dilaksanakan pada setiap lantai bangunan menggunakan mikrotremor dengan hasil bacaan berupa tiga jenis arah gelombang seismik yaitu satu vertikal arah Z dan dua horizontal arah X dan Y (Mustika, Putra, and Fitria 2022). Berdasarkan SESAME (2004) durasi pengukuran dilakukan 20 menit setiap titik. Fo minimum yang diharapkan 0,5 HZ.



Gambar 5. Pembacaan sinyal mikrotremor (Alihudien, 2014)

Pada gambar 5 merupakan pembacaan sinyal mikrotremor dengan tiga komponen data seismik N: Garis pertama merepresentasikan komponen arah North-South (Utara-Selatan). Data ini menggambarkan amplitudo gelombang mikrotremor yang diukur dalam arah horizontal pada sumbu Utara-Selatan. E: Garis kedua mewakili komponen arah East-West (Timur-Barat). Ini adalah komponen horizontal lain yang mencatat gerakan gelombang mikrotremor pada sumbu Timur-Barat. Z: Garis ketiga adalah komponen vertikal (Z), yang mencatat gerakan gelombang mikrotremor ke atas dan ke bawah. Komponen ini penting untuk menganalisis karakteristik gelombang, seperti dominasi mode gelombang tertentu. Ketiga komponen ini digunakan untuk analisis mikrotremor, misalnya dalam pemrosesan HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*).

1.5.5 HVSR (Horizontal To Vertical Spectral Rasio)

HVSR adalah sebuah metode yang diperkenalkan oleh Nakamura berdasarkan pengamatannya terhadap gelombang geser akibat gempa. Hasil pengamatan tersebut menunjukkan bahwa gerakan tanah di permukaan akibat gempa dan akibat getaran ambient disebabkan oleh gelombang Rayleigh. Pada saat yang bersamaan, penelitian tersebut juga menunjukkan adanya kesesuaian antara nilai faktor amplifikasi yang dihasilkan dengan data pengamatan gelombang gempa dan gelombang ambient (Nakamura, 1989).

Metode HVSR adalah metode yang dilakukan dengan membandingkan spektrum komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari suatu gelombang mikrotremor. Perbandingan H/V pada mikrotremor adalah perbandingan kedua komponen yang secara teoritis menghasilkan suatu nilai (Arifin et al. 2014)



$$SR = \frac{\sqrt{H_{Tegak\ Lurus} + H_{Sejajar}}}{V(UD)} \quad (3)$$

n amplitudo komponen horizontal dengan arah utara - selatan
 n amplitudo komponen horizontal dengan arah timur - barat
 n amplitudo komponen vertikal dengan arah atas bawah

1.5.6 Frekuensi Dominan

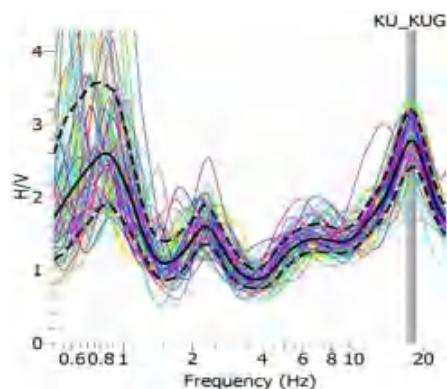
Haerudin dkk., (2019) menyebutkan bahwa nilai frekuensi dominan dapat menunjukkan jenis dan katakteristik batuan di suatu wilayah dan berkaitan dengan kedalaman bidang pantul atau batas antar sedimen dengan batuan keras bagi gelombang di bawah permukaan. Semakin kecil frekuensi yang dibentuk maka semakin tebal sedimen atau semakin dalam bidang pantul gelombang tersebut.

Jika tanah atau batuan di suatu frekuensi yang sama atau mendekati nilai frekuensi natural di daerah tersebut, maka akan terjadi resonansi antara tanah dan bangunan dengan gelombang seismik gempa bumi yang dapat mengakibatkan amplifikasi (penguatan) gelombang gempa yang mana akan meningkatkan resiko kerusakan akibat gempabumi (Haerudin, dkk., 2019). (Kawase et al. 2019) melakukan uji simulasi menggunakan 6 model struktur geologi sederhana dengan kombinasi variasi kontras kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan soil. Hasil simulasi tersebut menunjukkan nilai puncak frekuensi berubah terhadap variasi kondisi geologi (Arifin et al. 2014)

Dari nilai frekuensi dominan yang terukur dipermukaan, dapat diketahui karakteristik batuan dibawah permukaan. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 1

Tabel 1. tentang klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan (Kanai, 1983).

Klasifikasi Tanah		Frekuensi dominan (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Tipe	Jenis			
Tipe IV	Jenis I	6,66-20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> , dll.	Ketebalan sedimen permukaan sangat tipis, didominasi oleh batuan keras.
	Jenis II	4,00-6,66	Batuan <i>alluvial</i> , dengan ketebalan 5cm. Terdiri dari <i>sandgravel, sand hard clay, loom</i> , dll.	Ketebalan sedimen permukaan termasuk dalam kategori menengah, 5-10 meter.
Tipe III	Jenis III	2,50-4,00	Batuan <i>alluvial</i> , dengan ketebalan >5m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll.	Ketebalan sedimen permukaan termasuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30 meter.
Tipe II	Jenis IV	< 2,50	Batuan alluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, top <i>soil</i> , lumpur, dll dengan ketebalan 30m atau lebih.	Ketebalan sedimen permukaan sangat tebal.



H/VSR dengan nilai frekuensi dominan tanah ditunjukkan pada 20 Hz. (Koen Dian Pancawati 2016)



1.5.7 Amplifikasi

Menurut (Balbino 2016), amplifikasi adalah perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan antar lapisan, dimana gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika merambat dari suatu medium ke medium lain yang lebih lunak. Semakin besar perbedaan tersebut, maka perbesaran yang dialami gelombang tersebut juga akan semakin besar. Amplifikasi terjadi saat gempa menjalar ke permukaan sebelum gelombang sampai pada permukaan (Adhitya Surya Manggala and Arief Alihudien 2015) Menurut Nakamura (2000), semakin besar kontras parameter perambatan gelombang pada lapisan tersebut, maka nilai amplifikasinya akan semakin tinggi. Nilai penguatan gelombang ini juga dapat mengalami peningkatan apabila lapisan tanah atau batuan yang dilalui mengalami deformasi (pelapukan, pelipatan, dan sesar) karena adanya perubahan sifat batuan. Menurut Iswanto et al., (2019) Nilai indeks kerentanan seismik berkaitan secara langsung dengan kondisi geomorfologis dan berbanding lurus dengan tingkat resiko kerusakan terhadap gempabumi.

1.5.8 Natural Periode Dan Mode Shape

A. Natural Period

Natural period adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu sistem struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran bebas setelah diberi gangguan eksternal. Menurut Chopra (2012), "Natural period merupakan salah satu parameter dinamis utama yang mencerminkan karakteristik kekakuan dan massa sistem struktur. Perubahan pada salah satu parameter ini akan berdampak langsung pada nilai natural period." Besarnya natural period dihitung menggunakan rumus:

$$T = \frac{1}{f_0} \quad (4)$$

di mana T adalah natural period, dan f_0 adalah frekuensi alami sistem (Dominant Frequency). Sistem struktur dengan natural period yang mendekati frekuensi eksitasi eksternal, seperti gempa bumi, berisiko mengalami resonansi yang dapat memperbesar respons dinamisnya (Clough & Penzien, 2003).

B. Mode Shape

Mode shape osilasi yang terkait dengan periode alami bangunan adalah bentuk bangunan yang mengalami deformasi saat diguncang pada periode alami. Setiap simpul bebas untuk bertranslasi dalam ketiga arah Cartesian dan berputar di sekitar tiga sumbu Cartesian (Kadam and Sharma 2022). Oleh karena itu, sebuah bangunan memiliki mode shape sebanyak jumlah periode alami. Untuk sebuah bangunan, ada jumlah periode alami yang tak terbatas. Mode shape berhubungan dengan pola goyangan yang terjadi. Mode shape dengan periode yang paling panjang disebut juga mode shape pertama (Hadinata, Nurlina, and Simatupang 2017). Dalam pemodelan matematika bangunan, biasanya bangunan didiskritisasi menjadi sejumlah elemen. Bangunan biasa memiliki bentuk mode murni ini. Setiap simpul bebas untuk bertranslasi dalam ketiga arah Cartesian dan berputar di sekitar tiga sumbu Cartesian. Bangunan tidak beraturan (yaitu, bangunan yang memiliki turan, distribusi massa dan kekakuan yang tidak seragam dalam ruang ketinggian) memiliki bentuk mode yang merupakan campuran murni ini.



1.5.9 Penelitian terdahulu

Penelitian terdahulu yang terkait dijadikan referensi didalam penelitian ini. Kami merangkum secara singkat sejumlah penelitian yang secara tidak langsung terkait dengan penelitian ini.

Tabel 2. Penelitian terdahulu.

Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil & Temuan
Amina et al. (2015)	Fluid–Structure Interaction of Brezina Arch Dam: 3D Modal Analysis	FEM (Finite Element Method), Added Mass, Lagrangian Approach	Air menurunkan frekuensi alami bendungan, sedangkan massa tanah dasar meningkatkannya. Frekuensi modal menurun seiring naiknya ketinggian air, kecuali pada 10 m yang menunjukkan interaksi kuat dengan struktur.
Rasyid et al. (2024)	Site Classification Based on Shear Wave Velocity Inversion in The Jlantah Dam Construction Project using HVSR Analysis	Mikrotremor & HVSR	Nilai Vs berkisar antara 110,5 – 400 m/s, mengklasifikasikan tanah dari lunak hingga keras. Hasil inversi memiliki tingkat kecocokan 91,42% dengan data N-SPT.
Kawase et al. (2019)	Evaluation of Site Effects Using HVSR Microtremor Measurements in Vishakhapatnam (India)	HVSR Mikrotremor	Wilayah dengan frekuensi dominan tinggi (>4 Hz) memiliki tanah berbatu, sedangkan frekuensi rendah (<2 Hz) menunjukkan tanah lunak yang lebih rentan terhadap amplifikasi seismik.
Asi Simarmata et	Spatial Analysis of Vibration Frequency Distribution of Jatibarang Dam Using RaspberryShake 4D	HVSR & RaspberryShake 4D	Rentang frekuensi dominan 0,571 Hz - 0,912 Hz menunjukkan kondisi stabil bendungan. Sensor seismik berbasis IoT efektif untuk pemantauan real-time.



Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil & Temuan
Koen Dian Pancawati, Supriyadi, Khumaedi (2016)	Identifikasi Kerentanan Dinding Bendungan dengan Menggunakan Metode Mikroseismik (Studi Kasus Bendungan Jatibarang, Semarang)	Metode mikroseismik dengan teknik HVSr (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio). - Pengukuran di 8 titik di Bendungan Jatibarang. - Durasi perekaman 30 menit menggunakan seismometer vibralog tipe MAE. Data diproses menggunakan Geopsy dan dimodelkan dengan Surfer	<ul style="list-style-type: none"> - Titik B1 & A3: Frekuensi natural dan percepatan getaran tanah maksimum tinggi, tetapi indeks kerentanan seismik rendah Risiko kerawanan rendah. - Titik B4 & A6: Nilai sedang dengan kemungkinan rekahan atau penurunan tanah Risiko kerawanan sedang. - Titik B2, B3, A4 & A5: Indeks kerentanan seismik dan ground shear strain tinggi Risiko kerawanan tinggi. - Daerah dengan ground shear strain tinggi lebih rentan mengalami deformasi dan likuifaksi jika terjadi gempa bumi.



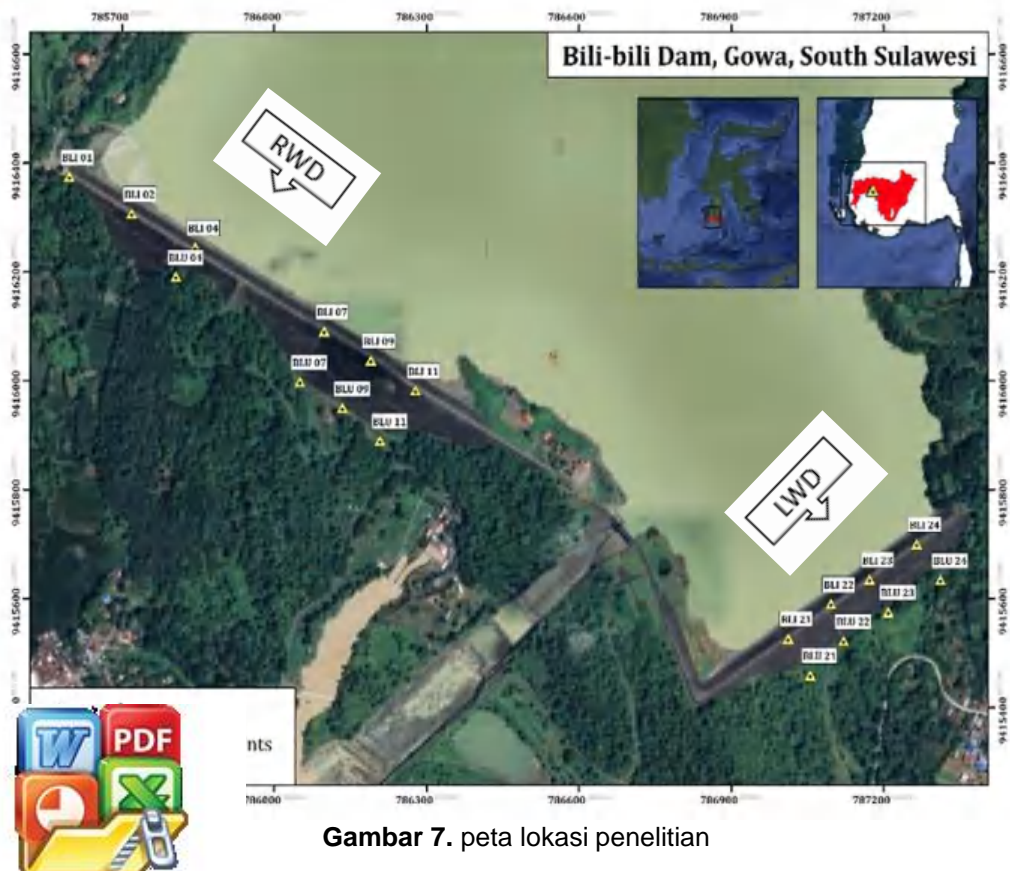
BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Bendungan Bili-Bili, bendungan terbesar di Provinsi Sulawesi Selatan, yang terletak sekitar ± 30 km di sebelah timur Kota Makassar, tepatnya di Dusun Bili-Bili, Desa Romangloe, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa. Pengukuran mikrotremor dilakukan pada tanggal 17 Oktober 2024 (musim kemarau) di 18 titik pengukuran yang tersebar di area Bendungan Bili-Bili dengan jarak antar titik 100 hingga 200 meter. Lokasi penelitian dalam studi ini dapat dilihat pada Gambar 7, yang menunjukkan distribusi titik-titik pengukuran mikrotremor. Koordinat dari titik-titik tersebut tertera pada Tabel 4

Tabel 3 Parameter Geometris Low Water Level dan Reservoir Water Depth.

Parameter Geometris	Lwd (sayap kiri)	Rwd(sayap kanan)
Tinggi	42 m	52 m
Panjang	642 m	412 m
Lebar Puncak	10 m	10 m
Elevasi Puncak	106,00 m	106,00 m
Volume Timbunan	1.470.000 m ³	1.060.000 m ³



Gambar 7. peta lokasi penelitian

Tabel 4 Titik Kordinat pengukuran

Titik	Lintang	Bujur
AT 1	-5,274498	119,576396
AT 2	-5,275046	119,577148
AT 3	-5,275907	119,578805
BW 3	-5,276391	119,578659
AT 4	-5,277235	119,581150
BW 4	-5,278125	119,580749
AT 5	-5,277680	119,581974
BW 5	-5,278547	119,581509
AT 6	-5,279099	119,582209
BW 6	-5,278129	119,582816
AT 7	-5,282259	119,589306
BW 7	-5,282259	119,589306
AT 8	-5,281240	119,590872
BW 8	-5,282276	119,590461
AT 9	-5,281240	119,590872
BW 9	-5,281754	119,591205
AT 10	-5,280749	119,591644
BW 10	-5,281169	119,592010

2.2 Alat Dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

Tabel 5. Alat Dan Bahan

No.	Alat dan Bahan	Kegunaan
1.	1 set alat seismometer IGU-BD3C-5	Menangkap 3 komponen gelombang mikrotremor :North-South, East-West, dan Up-down.
2.	GPS	Menentukan dan mengetahui koordinat titik-titik pengukuran di lapangan.
3.	Magnet	Sebagai catu daya untuk menghidupkan/mematikan alat
4.	Kabel penghubung	Menghubungkan laptop ke digitizer.
5.	Digitizer	Mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital.
6.	Logsheet/buku	Lembar data pengamatan pada saat survey lapangan.
7.	Software Ms. Excell	Menghitung nilai indeks kerentanan seismik.
8.	Software Geopsy, Cygwin dan Matlab	Mengolah data mikrotremor dengan metode HVSr.
9.	Software Arcgis 10.3	Membuat/memetakan desain survey



penelitian

an data pada penelitian ini, data yang telah dikumpulkan baik lapangan atau kajian Pustaka, yang dimana Data seismik yang ngan yang berupa sinyal seismik yang di pindahkan ke komputer

dalam bentuk data numerik, kemudian diolah dengan beberapa software sehingga menghasilkan nilai frekuensi dan amplitudo.

Penelitian ini akan menggunakan metode mikrotremor untuk mengukur amplitudo dan frekuensi gelombang mikro di permukaan bendungan. Analisis data mikrotremor metode HVSR dilakukan dengan menggunakan bantuan software Geopsy, Microsoft Excel, Cygwin dan Matlab.



Gambar 8 alat seismometer IGU-BD3C-5

2.3.1 Prosedur Penelitian Dilapangan

A. Prosedur pengukuran data mikrotremor di lapangan dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Menentukan lokasi titik pengukuran. Kondisi lingkungan dipertimbangkan untuk meminimalisir gangguan noise yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
2. Meletakkan seismometer di atas tanah yang keras dan datar. Apabila kondisi tanah tidak cukup datar, dilakukan penggalian hingga tanah dianggap cukup datar. Setelah itu, sensor diseimbangkan dengan memutar sekrup pada bagian bawah perangkat hingga gelembung (bubble) berada tepat di tengah-tengah indikator keseimbangan. Selain itu, seismometer tidak diletakkan dengan orientasi arah kompas utara-selatan (NS) maupun timur-barat (EW). seismometer diorientasikan dengan arah tegak lurus dan sejajar dengan struktur bendungan
3. Mengaktifkan digitizer dengan cara mendekatkan magnet pada tombol aktivasi, apabila lampu hijau menyala proses perekaman dapat dimulai
4. Pengukuran dilakukan selama kurang lebih 20 menit

Pengukuran data mikrotremor dilakukan sesuai kaidah pengukuran mikrotremor yang dikeluarkan oleh SESAME 2004). Kaidah tersebut digunakan untuk meminimalkan kesalahan dari hasil analisis, sehingga didapatkan nilai frekuensi dan amplifikasi yang mendekati sebenarnya. Persyaratan teknis survey mikrotremor yang dikeluarkan SESAME European Commission Research Project dapat dilihat pada tabel 6



Tabel 6. Persyaratan teknis survey mikrotremor di lapangan (SESAME, 2004)

Jenis Parameter	Saran yang dianjurkan	
	f_0 minimum yang diharapkan (Hz)	Durasi pencatatan minimum (menit)
Durasi pencatatan	0,2	30
	0,5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
Parameter Pencatatan	<ul style="list-style-type: none"> ✦ Atur level seismograf (<i>levelling</i>) seperti yang telah disarankan. ✦ Tetapkan level <i>gain</i> semaksimal mungkin tanpa saturasi (jenuh) sinyal. 	
<i>Coupling soil sensor alami (insitu)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✦ Atur sensor langsung pada permukaan tanah ✦ Hindari menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan. 	
<i>Coupling soil sensor buatan/artificial</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✦ Hindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa ✦ Pada kemiringan yang curam dimana sulit mendapatkan level sensor yang baik, pasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir. 	

B. Prosedur penelitian pengolahan natural period berdasarkan informasi desain bangunan bendungan untuk pemantauan keamanan struktur bendungan dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Megumpulan model desain 3D, parameter struktural (dimensi, material, kondisi geoteknik), dan data seismik historis untuk mendukung analisis.
2. Menghitung frekuensi alami struktur dihitung menggunakan hubungan matematis $f_0 = \frac{1}{T}$ dan mode shape, identifikasi partisipasi massa
3. Menghitung periode alami berdasarkan frekuensi dominan $T = \frac{1}{f}$ dimana T adalah periode alami dan f adalah frekuensi alami
4. Menganalisis perubahan natural period. Perubahan natural period dapat mengindikasikan adanya kerusakan pada struktur bendungan. Analisis perubahan natural period dapat dilakukan dengan membandingkan natural period yang dihitung berdasarkan informasi desain bangunan bendungan dengan natural period



**olahan Data
in Software Excel**

File mikrotremor berupa file dengan format standar seperti miniseed memiliki dua komponen north-south (N), east-west (E), dan Up-Down (Z). Untuk masing-masing komponen tersebut dilakukan proses downsampling atau decimation untuk

mengurangi ukuran data tanpa kehilangan informasi frekuensi rendah data mentah pengukuran microtremor dapat dilihat pada lampiran 1.

2. Data yang diperoleh dilakukan remov trend proses ini untuk menghapus drift atau bias DC pada sinyal yang dapat mengganggu analisis dan memastikan sinyal memiliki nilai rata-rata mendekati nol. Lalu dilakukan filter (hinh-pas) pada 0,02 HZ. sinyal dibawah frekuensi ini akan mengalami redaman yang signifikan. Setelah melakulan remov tren dan filter lalu export data menjadi ascii multi columes (no header). Membuka file hasil ekspor dengan notepad++ maka akan terlihat nilai masing-masing tiap komponen (UD, Tegak Lurus, Sejajar). dan menyalin data ke excel untuk menghitung frekuensi menggunakan persamaan 5 dan simpan file dalam format csv untuk digunakan dalam proses berikutnya.

$$\Delta T = \frac{1}{\text{Frekuensi Sampling}} \quad 5$$

ΔT = Merupakan interval waktu antar sampel, biasanya dalam satuan detik (s). Ini adalah durasi waktu antara dua titik data yang berurutan dalam sinyal. Frekuensi sampling = Merupakan kecepatan pengambilan sampel per detik, biasanya dalam satuan Hz. Frekuensi sampling menggambarkan seberapa sering sinyal diukur dalam satu detik.

B. Cygwin

1. Proses dilakukan dengan menggunakan Cygwin, dimulai dengan masuk ke direktori penyimpanan file menggunakan perintah: `cd/cygdrive/drive/folder`. Setelah itu, jalankan perintah berikut untuk mengompilasi skrip Fortran: `$ gfortran convert_format_microtremor.f -o convert_format_microtremor`. Penyesuaian skrip : sebelum menjalankan skrip, sesuaikan jumlah baris data pada baris ke-9 skrip untuk memastikan skrip sesuai dengan kebutuhan. Tujuan skrip mengonversi data time series ke frekuensi domain dan menghasilkan file dengan format acc
2. Setelah menjalankan skrip dengan perintah `./convert_format_microtremor < AT.csv`. muncul file output dengan nama test.acc. kemudian nama file tersebut dengan menyesuaikan data yang digunakan dengan perintah `$ mv test.acc file.acc` hal ini diperlukan agar file yang telah ada tidak menimpah file yang memiliki nama yang sama. Data yang diperoleh pada kolom 1-2 (Δf_{awal} - Δf_{akhir}) dan kolom 3 (amx) lalu kolom 4 (numb data) lalu kolom 5 (imx). Selanjutnya menjalankan skrip "spec-auto-8192-01-plus-waveform.f" pada skrip ini berfungsi untuk melakukan analisis spektrum data untuk mendapatkan kurva HVSR.
3. Dalam skrip menyesuaikan rentang minimum dan maksimum frekuensi, dan taper yang digunakan adalah parzen window, smooting yang digunakan band 0,1 (dapat disesuaikan, tetapi mempengaruhi kualitas data) namun berdasarkan teori Teorema Nyquist bahwa nilai spektrum adalah setengah dari nilai data). Sehingga nilai spektrum yang dapat digunakan menyesuaikan digunakan. Lalu pada baris 78 dapat dilakukan perubahan window menyesuaikan data yang digunakan skrip ini menyesuaikan jumlah windodata dan dapat diubah data setelah memasukan perintah tersebut maka akan an extension skrip yang berupa file exe. Kemudian skrip dengan `./spec-auto-8192-01-plus-waveform` dan mengarahkan file input dikonversi "file acc". Maka akan diperoleh output file fsp dan acc



5. Setelah di lakukan running pada skrip menggunakan perintah Cygwin sehingga diperoleh dapat dilihat pada lampiran 10. Pada hasil run skrip produk file fsp pada berisi data berupa HVSR serta Amplitude Rata-rata dan Amplitude Tiap Komponen, Serta Nilai Frekuensi. Sedangkan pada kolom 1 (File Name) dan kolom 2 (nsp), kolom 3 (nst), kolom 4 (ndat), serta kolom 5 (band), lalu kolom 6 (toffs), dan kolom 7 (toffl). Sedangkan baris 2 berisi keterangan Freq (Hz), UD, NS, EW, HO, HV. Catatan = TOFFS & TOFFL are minimum and maximum period. Sedangkan pada skrip file acc berisi time frequency data. Berturut-turut pada baris 1, pada kolom 1 (time series), kolom 2 (Komponen UD), kolom 3 (Komponen NS), kolom 4 (komponen EW) dapat dilihat pada lampiran 11.
6. Kemudian data hasil running skrip berupa fsp dan acc dapat ditampilkan dengan menggunakan skrip berikut. "plot_waveform.m" Pada skrip ini dapat menampilkan data dalam bentuk waveform data. Output pada skrip ini berubah time spektrum tiap window. Untuk skrip plot waveform tidak perlu dilakukan perubahan pada skrip. Setelah running plot waveform maka akan diperoleh model time spektrum data tiap window. Pada skrip plot_fsp_3comp_data_8192_01.m untuk menampilkan spektrum HVSR dan Fourier Amplitude, penyesuaian skrip pada baris 53-54 untuk menyesuaikan batas atas dan bawah frekuensi (sumbu x) dan batas atas dan bawah amplitude data (sumbu y). hasil running skrip yang diperoleh berupa HVSR untuk tiap window dan fourier amplitude.
7. Lalu dilakukan pemilihan window dengan mempertimbangkan stabilitas kurva, minimasi noise, kejelasan peak spektrum, dan konsistensi antar window. Setelah memilih window yang tepat, proses penggabungan dilakukan melalui Cygwin untuk menghasilkan kurva HVSR yang representative. Setelah memilih window yang tepat, penggabungan dilakukan melalui Cygwin dengan perintah `ls *.fsp > fspfile` Perintah ini membuat shortcut yang menghubungkan seluruh file dengan format .fsp.
8. window yang dianggap sesuai akan dikalkulasi untuk mendapatkan nilai rata-rata kurva HVSR, lalu melakukan kompilasi skrip Fortran dengan perintah: `gfortran ave-spectrum_std_log_equal_length.f -o ave-spectrum_std_log_equal_length`. Tujuan untuk mengubah skrip menjadi file .exe. lalu menjalankan skrip yang telah dikompilasi `./ave-spectrum_std_log_equal_length < fspfile` proses ini menghasilkan rata-rata kurva HVSR berdasarkan window yang telah dipilih.
9. Tambahkan keterangan penentuan f_0
 Frekuensi dominan (f_0) dalam analisis HVSR ditentukan dengan mengidentifikasi puncak tertinggi pada kurva rasio spektral antara komponen horizontal dan vertikal gelombang seismik. Dalam grafik HVSR yang ditampilkan, sumbu horizontal merepresentasikan frekuensi dalam satuan Hertz (Hz) dengan skala logaritmik, sementara sumbu vertikal menunjukkan nilai amplitudo rasio HV. Penentuan frekuensi dominan dilakukan dengan titik di mana terjadi lonjakan amplitudo yang paling signifikan an dengan nilai di sekitarnya. Puncak ini mengindikasikan kuensi alami dari tanah atau struktur bawah permukaan di lokasi 1. Frekuensi dominan yang diperoleh dapat digunakan untuk retasikan karakteristik geoteknik, seperti ketebalan lapisan au potensi resonansi tanah terhadap guncangan seismik. Dalam SR, puncak yang tajam dan jelas menandakan frekuensi dominan



yang valid, sesuai dengan metode Nakamura. Oleh karena itu, setelah menemukan titik tertinggi dalam kurva HVSR, nilai frekuensi pada sumbu horizontal yang bersesuaian dengan puncak tersebut dianggap sebagai frekuensi dominan (f_0).

C. Spectral Rasio

1. Pada pengolahan spectral ratio, skrip file yang digunakan berupa file dengan format .fsp, yang berisi data dari komponen UD (Up-Down), EW (East-West), dan NS (North-South). Pengolahan ini dilakukan dengan merasio-kan komponen UD, EW, dan NS dari pengukuran di bagian atas bendungan (AT) terhadap pengukuran di bagian bawah bendungan (BW).
2. Rasio dihitung pada window data yang sama untuk menjaga konsistensi. Proses ini dilakukan menggunakan software Excel, di mana setiap langkah perhitungan, seperti rasio komponen dan penggabungan data berdasarkan komponen, dilakukan secara manual atau dengan rumus Excel. Hasil akhirnya adalah kurva rata-rata untuk setiap komponen, yang disusun dari data yang telah diolah gambar pengolahan data dapat dilihat pada lampiran

D. Particle Motion

Untuk pengolahan data *particle motion*, komponen yang digunakan adalah komponen tegak lurus dan komponen sejajar. Data pada window (jendela) yang dianggap sesuai akan digabungkan untuk masing-masing komponen. Pengolahan awal dilakukan menggunakan software Microsoft Excel. Setelah itu, file disimpan dalam format **CSV** agar dapat digunakan dalam proses *running* pada software **Spyder**. Langkah-langkah dalam Spyder dimulai dengan menentukan direktori penyimpanan file menggunakan perintah: " r:/user/nama penggunaan/dokumen data csv.

E. ETABS

Dalam proses pemodelan struktur dan analisis modal menggunakan perangkat lunak seperti ETABS atau SAP2000, langkah pertama adalah pengolahan data awal, yang mencakup data geometris dan data dinamis. Data geometris meliputi tinggi total struktur, panjang dan lebar bangunan, jumlah lantai, serta dimensi elemen struktural seperti balok, kolom, dan dinding geser. Informasi ini diperoleh dari tabel parameter geometris dan digunakan untuk membangun model struktur. Selain itu, data dinamis juga perlu disiapkan, termasuk massa struktur yang diperoleh dari berat sendiri dan beban tambahan, kekakuan elemen struktural yang bergantung pada modulus elastisitas dan momen inersia, serta frekuensi alami yang ditentukan berdasarkan rasio antara kekakuan dan massa.

Tahap selanjutnya adalah pemodelan struktur, di mana model 3D dibangun menggunakan perangkat lunak analisis struktur berdasarkan data geometris yang telah dikumpulkan. Dalam tahap ini, elemen-elemen struktural seperti balok, kolom, dan dinding geser dimasukkan sesuai dengan dimensi dan materialnya. Setelah itu, kondisi batas atau tumpuan didefinisikan untuk menentukan interaksi struktur dengan tanah atau elemen lain, yang bisa berupa tumpuan tetap, sendi, atau pegas. Selain itu, beban dinamik yang relevan juga diterapkan pada struktur, seperti beban gempa, beban dari getaran lingkungan.



selesai, dilakukan analisis modal untuk menentukan karakteristik analisis ini bertujuan untuk mendapatkan frekuensi alami struktur, ta partisipasi massa modal. Mode shapes menunjukkan pola pada setiap mode getar, yang divisualisasikan dalam bentuk dalam perangkat lunak. Hasil dari analisis modal ini digunakan

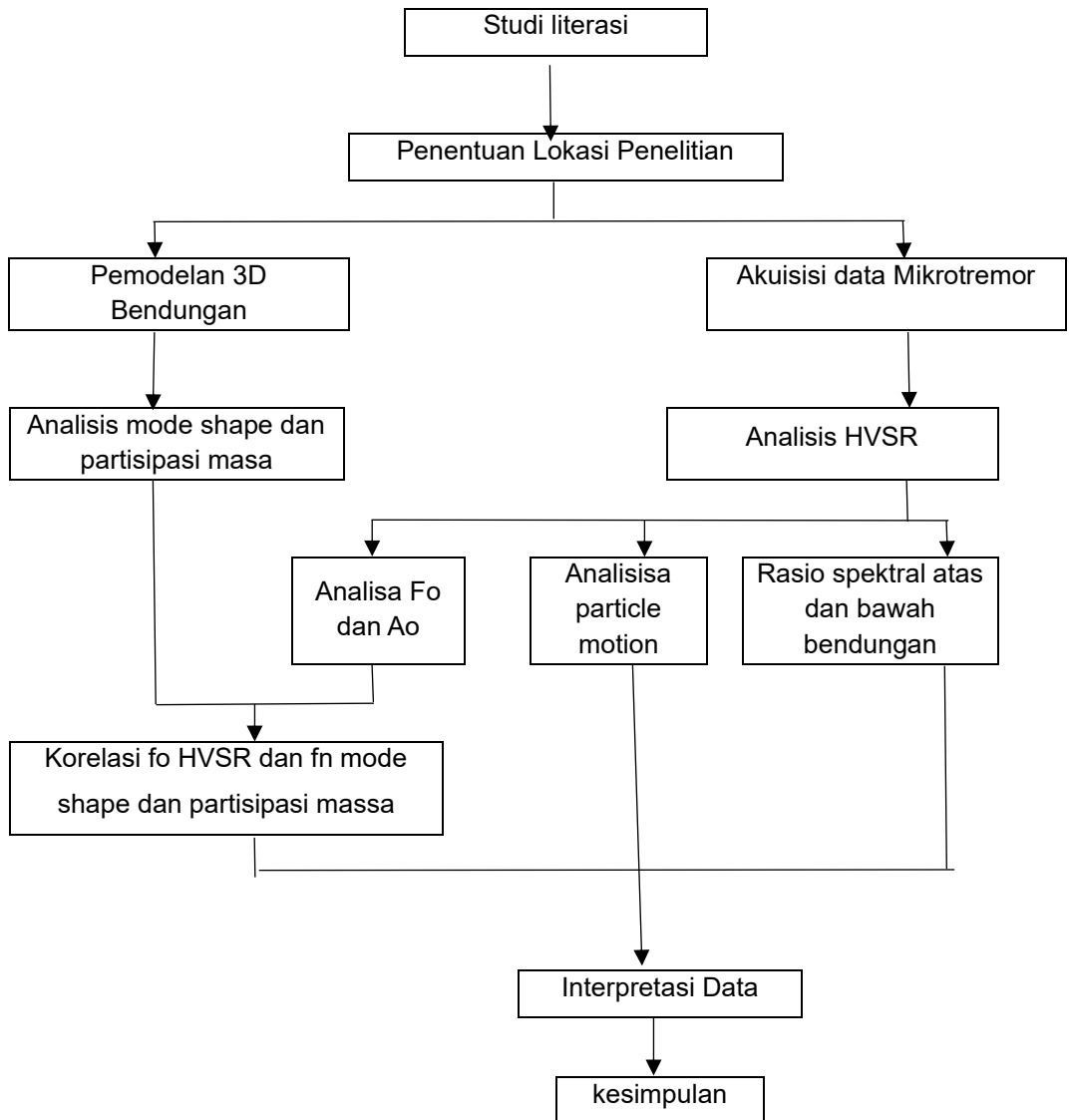
untuk mengevaluasi bagaimana struktur merespons beban dinamis dan memastikan bahwa desainnya memenuhi standar keamanan serta kenyamanan..

Tabel 7. Parameter Geometri dan Dinamis Bendungan Bili-Bili

Data Geometri	Nilai	Data Dinamis	Nilai
Panjang bendungan utama:	750 m	Debit rencana pelimpah	2.200 m ³ /detik
Tinggi bendungan utama	73 m	Debit rencana untuk intake	45 m ³ /detik
Panjang bendungan sayap kanan	412 m	Inflow discharge	3.100 m ³ /detik
Tinggi bendungan sayap kanan	52 m	Kapasitas pengendalian banjir	41 juta m ³
Panjang bendungan sayap kiri:	646 m	Kapasitas untuk irigasi	270 juta m ³
Elevasi puncak:	106 m	Kapasitas untuk air perkotaan	35 juta m ³
Elevasi muka air normal:	99,5 m	Kapasitas untuk listrik	20 Mega Watt
Elevasi mercu pelimpah	91,5 m	Tampung total	375 juta m ³
Elevasi dasar waduk	48 m	Tampung efektif	345 juta m ³
Tinggi bendungan sayap kiri:	42 m	Tampung sedimen	29 juta m ³
Elevasi puncak:	106 m	Bendungan Bili-bili didesain dengan tipe Rockfill dam dengan inti di tengah (center core Rockfill dam) dan memiliki kedalaman efektif 36,6 m dengan luas genangan 18,5 km ² .	
Elevasi muka air normal	99,5 m		
Elevasi mercu pelimpah	91,5 m		



2.5 Alur Penelitian



Gambar 8. Alur Penelitian

