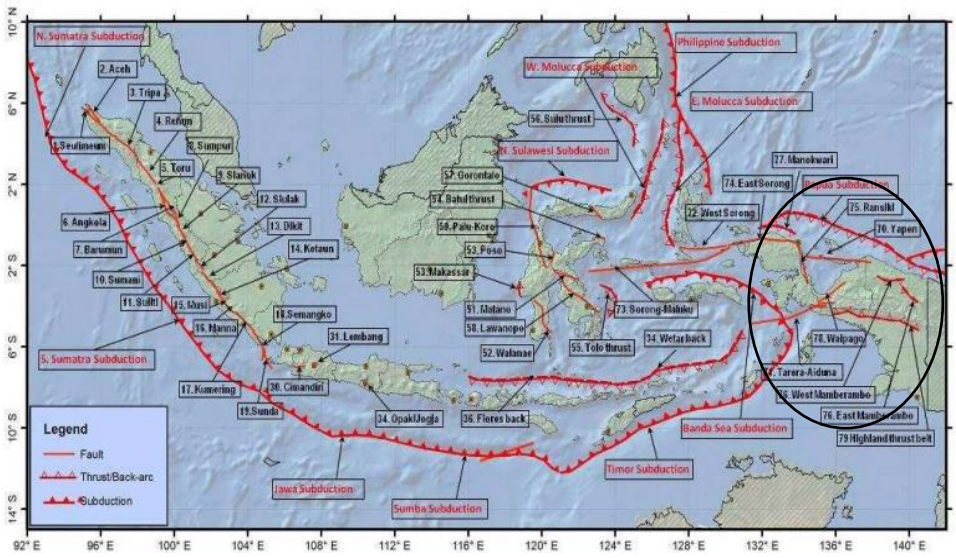
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tektonik Pulau Papua dan Kota Jayapura

Puntudewo, dkk (1994) mengungkapkan bahwa Wilayah Papua terletak pada pertemuan tiga lempeng kerak bumi yaitu lempeng Pasifik (lempeng Caroline) yang bergerak dari utara relatif ke arah barat menyusup di bawah lempeng Hindia-Australia, dimana lempeng Hindia-Australia menyusup di bawah lempeng Eurasia di sebelah barat Papua. Dow, dkk (1985) mengungkapkan bahwa saat ini letak tektonik dari pulau Papua terletak pada sisi utara bagian tepi lempeng Australia yang sedang berkembang karena adanya pertemuan antara pergerakan lempeng Australia yang menuju ke arah utara dengan lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat. Zona sesar yang mempengaruhi aktivitas tektonik di Kota Jayapura adalah yang dikenal sebagai Zona sesar Mamberamo yang memiliki ciri-ciri berupa garis lurus di daerah Sungai Mamberamo (Dow dan Sukamto, 1984).



Gambar 2.1 Peta tektonik Indonesia (Irsyam, 2010).

Wilayah Kota Jayapura memiliki kerawanan gempa karena terpengaruh oleh sistem tatanan tektonik regional yang rumit di wilayah Provinsi Papua. Kompleksitas tatanan tektonik tersebut menghasilkan patahan, lipatan, dan pegunungan yang sering kali menjadi penyebab terjadinya gempabumi di wilayah tersebut (Mantiri, 2016).

2.2 Gempabumi

Gempabumi adalah getaran atau goncangan yang terjadi karena adanya aktivitas tektonik, vulkanik maupun buatan manusia. Getaran atau goncangan yang terjadi saat gempabumi merupakan hasil dari pelepasan energi yang tiba-tiba terjadi di bagian kerak bumi. Energi ini dapat bersumber dari berbagai faktor seperti pergerakan kerak bumi, letusan gunung api, runtuhnya rongga batuan karst atau bahkan ledakan buatan manusia. Besarnya getaran dan goncangan yang dihasilkan dari gempabumi juga bervariasi, mulai dari yang dahsyat hingga tidak terasa sama sekali oleh manusia dan hanya terdeteksi oleh seimometer. Getaran yang dihasilkan dari gempabumi juga dapat merusak infrastruktur yang dibangun oleh manusia. Tingkat kerusakan bergantung pada kekuatan goncangan dari gempabumi yang terjadi (Haerudin, dkk., 2019).

Menurut Shedlock dan Pakiser (2014), pada awalnya lapisan bumi bisa melengkung dan ketika tekanannya melebihi kekuatan batuan, lapisan tersebut akan pecah dan bergerak ke posisi baru. Saat terjadi pemecahan tersebut, gelombang seismik akan tercipta dan bergerak keluar dari sumber gempa. Gelombang ini akan bergerak dengan kecepatan yang berbeda-beda tergantung pada material yang dilaluinya. Gempabumi disebabkan oleh patahan yaitu retakan pada kerak bumi yang terdapat pada dua bagian kerak bumi yang saling menumbuk ataupun menghujam satu sama lain. Pendekatan teori tektonik lempeng dapat memberikan penjelasan detail mengenai kejadian gempabumi.

Indonesia berada pada pertemuan empat lempeng tektonik mengakibatkan sebagian besar wilayah Indonesia menjadi area yang sering terjadi gempabumi. Hal ini juga terjadi di kawasan Papua dan sekitarnya. Adanya interaksi lempeng-lempeng yang bersifat tidak menentu mengakibatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang memiliki tingkat kerawanan gempabumi yang tinggi (Daristasari, 2018). Gempabumi yang terjadi Indonesia merupakan fenomena alam yang sudah sering terjadi akibat pengaruh dari letak geografis negara Indonesia (Daristasari, 2018). Gempabumi tektonik sering terjadi di Indonesia dan beberapa di antaranya menyebabkan kerusakan, kehilangan harta benda, dan jiwa manusia. Fenomena ini terjadi karena Indonesia adalah wilayah yang memiliki tatanan tektonik yang rumit dan aktif dengan frekuensi tinggi di dunia, termasuk Provinsi Papua khususnya

pada Kota Jayapura yang dipengaruhi oleh interaksi 2 lempeng tektonik yaitu lempeng Pasifik dan lempeng Hindia-Australia. Interaksi kedua lempeng ini memicu frekuensi gempabumi yang tinggi di Wilayah Provinsi Papua (Sabtaji, 2020). Berdasarkan kondisi tektonik di Indonesia khususnya di Wilayah Provinsi Papua, terdapat adanya sesar-sesar yang berada di wilayah Provinsi Papua, maka dapat dikatakan bahwa Provinsi Papua memiliki potensi tingkat bahaya gempabumi yang tinggi baik disebabkan oleh aktivitas subduksi maupun aktivitas patahan atau sesar. Kondisi ini menyebabkan wilayah Jayapura rawan dan telah dilanda oleh gempabumi dengan skala magnitude yang relatif besar (Mantiri, 2016).

2.3 Respon Bangunan Terhadap Gempabumi

Gempabumi dapat menyebabkan kerusakan bangunan dan infrastruktur. Tingkat kerusakan suatu bangunan yang diakibatkan oleh gempabumi bergantung pada kekuatan gempa, struktur bangunan tersebut dan kondisi geologi di daerah bangunan tersebut. Prastowo dan Prabowo (2017) menyatakan bahwa respon bangunan atas adanya getaran pada dasar tanah sangat bergantung pada frekuensi alami bangunan (*natural frequency*) yang merupakan jumlah getaran yang terjadi pada bangunan tiap detik. Kekuatan bangunan dan infrastruktur lainnya akan terlihat bila terdapat kejadian tak terduga seperti badai atau gempabumi (Mantiri, 2016).

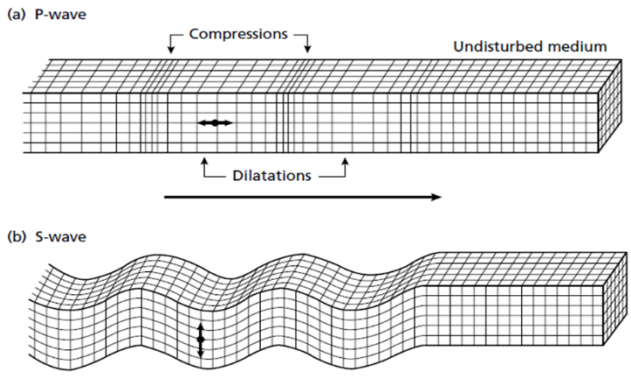
Menurut Larasati, dkk (2022) salah satu faktor penting untuk memperkirakan dampak lokal dari gempabumi adalah dengan menentukan besar energi yang berkurang ketika sebelum terjadi gangguan dan hubungan antara frekuensi natural suatu bangunan dengan frekuensi natural lapisan tanah di sekitar bangunan tersebut. Berdasarkan hubungan parameter tersebut dapat diketahui kurva nilai indeks resonansi bangunan dan kurva nilai indeks kerentanan bangunan yang kemudian dapat diperkirakan estimasi kerentanannya.

2.4 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang elastik yang menjalar ke seluruh bagian dalam bumi dan melalui permukaan bumi akibat adanya lapisan batuan yang patah secara tiba-tiba atau adanya ledakan. Gelombang utama Gempabumi terdiri dari dua tipe yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan merupakan gelombang yang energinya ditransfer melalui

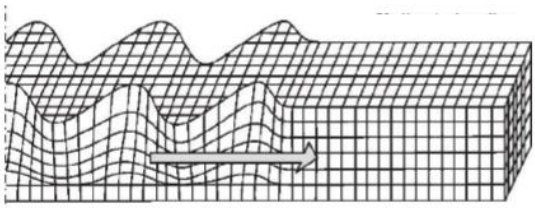
medium di dalam bumi, sedangkan gelombang permukaan merupakan gelombang yang transfer energinya terjadi pada permukaan bebas, gelombang permukaan yang mana transfer energi terjadi akibat *free surface* dan menjalar dalam bentuk *ground roll*. Gelombang seismik merambat dalam lapisan bumi sesuai dengan prinsip yang berlaku pada perambatan gelombang cahaya: pembiasan dengan koefisien bias, pemantulan dengan koefisien pantul, hukum-hukum Fermat, Huygens, Snellius, dan lain lain.

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya keseluruh bagian di dalam bumi. Gelombang badan dapat menjalar melalui bagian dalam permukaan bumi dan bisa disebut free wave karena dapat menjalar ke segala arah di dalam bumi. Gelombang badan terdiri dari gelombang primer dan gelombang sekunder. Gelombang Primer (P – Wave). Gelombang P adalah gelombang badan atau gelombang yang menjalar dalam tubuh bumi yang mempunyai kecepatan yang paling tinggi (Widodo, 2012). Gelombang P disebut dengan gelombang kompresi/gelombang longitudinal. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain, dapat merambat melalui medium padat, cair dan gas. Gelombang S merupakan serangkaian gerak partikel dibawah permukaan dengan arah geraknya tegak lurus dengan arah penjalaran gelombang. Gelombang S tidak dapat melewati medium fluida karena medium tersebut memiliki elastis yang kecil sehingga dalam waktu singkat akan berubah dalam bentuk semua. Gelombang S disebut juga gelombang *shear*/gelombang transversal. Gelombang ini memiliki cepat rambat yang lebih lambat bila dibandingkan dengan gelombang P dan hanya dapat merambat pada medium padat saja. Gelombang S tegak lurus terhadap arah rambatnya.



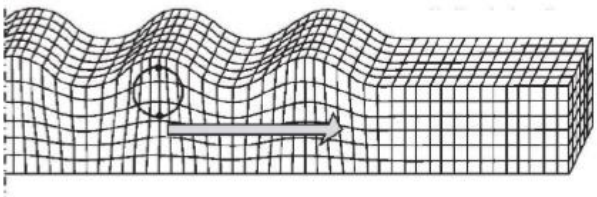
Gambar 2.2 Gelombang badan : a) Perambatan Gelombang P dan b) Perambatan Gelombang S (Kearey, dkk, 2002).

Gelombang permukaan merupakan gelombang yang zona rambatannya berada di kerak bumi. Gelombang ini memiliki frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan gelombang badan sehingga gelombang permukaan lebih berpotensi menimbulkan kerusakan pada bangunan. Gelombang permukaan dibedakan menjadi dua, yaitu : Gelombang Love. Gelombang Love adalah gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal yang merupakan gelombang S horizontal yang penjalarannya paralel dengan permukaannya. Gelombang Love merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal yang merupakan gelombang S horizontal yang penjalarannya paralel dengan permukaannya (Gadallah and Fisher, 2009).



Gambar 2.3 Gelombang Love (Elnashai dan Di Sarno, 2008)

Gelombang Rayleigh. Gelombang Rayleigh adalah gelombang yang menjalar di permukaan bumi dengan pergerakan partikelnya menyerupai elips. Karena menjalar di permukaan, amplitudo gelombang Rayleigh akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Di dalam rekaman seismik, gelombang Rayleigh dicirikan dengan amplitude besar dan frekuensi rendah (Elnashai dan Di Sarno, 2008). Gelombang Reyleigh merupakan gelombang permukaan yang Orbit gerakannya elips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjalarannya. Gelombang jenis ini adalah gelombang permukaan yang terjadi akibat adanya interferensi antara gelombang tekan dengan gelombang geser secara konstruktif.



Gambar 2.4 Gelombang Rayleigh (Elnashai dan Di Sarno, 2008)

2.5 Kerentanan Seismik Bangunan

Kerentanan seismik pada tanah menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi pada saat terjadi gempabumi. Sementara

kerentanan seismik pada bangunan adalah gambaran seberapa rentan struktur suatu bangunan mengalami kerusakan akibat perambatan gelombang seismik melalui gempabumi. Menurut Coburn dan Spence (2002), yang menjadi penyebab utama kerusakan bangunan saat terjadi gempabumi adalah getaran pada tanah dasar bangunan. Respon bangunan atas adanya getaran pada dasar tanah sangat bergantung pada frekuensi alami bangunan (*natural frequency*) yang merupakan jumlah getaran yang terjadi pada bangunan tiap detik. Jika frekuensi getaran tanah dasar bangunan lebih kecil daripada frekuensi natural bangunan maka bangunan dinyatakan aman dari kerusakan akibat deformasi. Peningkatan frekuensi getaran tanah akan meningkatkan deformasi bangunan dan jika frekuensi getaran tanah sama dengan frekuensi natural bangunan maka akan terjadi efek resonansi dan deformasi akan mencapai puncaknya (Prastowo dan Prabowo, 2017).

2.6 Mikrotremor

Menurut Okada (2003), Mikroseisme atau mikrotremor adalah getaran permukaan bumi yang terjadi secara konstan pada frekuensi seismik meskipun tanpa adanya gempabumi. Mikrotremor dianggap sebuah sinyal yang disebabkan oleh aktivitas sehari-hari manusia seperti pergerakan mesin di pabrik, mobil dan orang yang berjalan kaki, selain itu juga mikrotremor dipengaruhi oleh alam seperti aliran sungai, hujan, angin, tekanan atmofer, gelombang laut dan lain sebagainya. Mikrotremor mempunyai frekuensi yang lebih tinggi daripada gempabumi. Mikrotremor mempunyai periode yang kurang dari 0,1 detik, dengan kisaran umum antara 0,05-2 detik. Dalam mikrotremor dengan periode panjang dapat mencapai 5 detik, dan amplitudonya berkisar antara 0,1-2,0 mikron (Haerudin, dkk., 2019).

Nakamura (1989) mengungkapkan bahwa mikrotremor dapat memberikan informasi yang lebih detail mengenai profil kecepatan gelombang geser. Okada (2003) mengungkapkan bahwa identifikasi sumber-sumber mikrotremor dapat dilakukan pada permukaan bumi atau dasar laut, sehingga gelombang permukaan dianggap sebagai unsur utama mikrotremor karena melebihi gelombang tubuh.

Menurut Haerudin, dkk (2019) kajian mikrotremor banyak menjadi pilihan untuk menaksir dampak kerusakan dari bencana gempabumi. Kajian ini diketahui sangat andal dan akurat dalam memperhitungkan risiko akibat aktivitas seismik pada kondisi geologi setempat. Salah satu kajian yang dapat dilakukan adalah untuk

menentukan kerentanan suatu bangunan terhadap aktivitas gempabumi.

2.7 Analisis Mikrotremor

Analisis mikrotremor dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter seperti frekuensi natural, amplifikasi dan resonansi. Pada analisis tersebut digunakan berbagai analisis seperti *Fast Fourier Transform* untuk mengubah data mikrotremor dalam domain waktu menjadi domain frekuensi, analisis HVSR pada tanah, analisis FSR dan analisis RDM untuk menentukan kerentanan suatu bangunan. Pengukuran mikrotremor dapat dilakukan dengan menggunakan seismograf, dimana metode ini bergantung pada rekaman dari *ambient noise* untuk memperoleh parameter dinamika yang karakteristik seperti rasio redaman dan frekuensi natural (Nakamura, 2000).

Analisis mikrotremor merupakan teknik yang dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik bangunan tanpa harus merusak bangunan tersebut. Teknik ini melibatkan perekaman getaran kecil pada setiap lantai bangunan menggunakan suara latar alami. Dengan cara ini, mikrotremor dapat memberikan informasi tentang parameter dinamis bangunan, seperti rasio damping dan frekuensi alami, serta fungsi perpindahan bangunan, termasuk amplifikasi dan frekuensi bangunan (Riyadhi, dkk., 2017).

2.7.1 Transformasi Fourier

Data yang direkam oleh seismograf masih berada dalam domain waktu. Untuk menganalisis data, diperlukan suatu proses yang dilakukan untuk mengubah data ke dalam domain frekuensi. Oleh karena itu, dilakukan transformasi Fourier untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi (Suheri, 2009). Riyadhi, dkk (2017) menyatakan bahwa metode Analisis Fourier digunakan untuk memecah sebuah gelombang seismik menjadi beberapa gelombang harmonis sinusoidal dengan frekuensi yang berbeda-beda. Oleh karena itu, terdapat kemungkinan suatu gelombang seismik dapat dibentuk dengan menggabungkan beberapa gelombang sinusoidal yang memiliki frekuensi tunggal. Transformasi fourier digunakan untuk merepresentasikan fungsi waktu transien ke domain frekuensi seperti pada persamaan berikut :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\ (t)\ e^{-i\omega t}\ dt \qquad (2.1)$$

dengan $f(t)$ adalah transformasi dari $F(\omega)$ yang masih berada dalam kawasan waktu.

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan pengembangan dari transformasi Fourier dalam komputasi digital yang memungkinkan perhitungannya dilakukan dengan cepat. Salah satu algoritma FFT yang populer adalah algoritma Cooley dan Tukey. Prinsip yang digunakan dalam algoritma Cooley-Tukey adalah membagi transformasi Fourier digital menjadi bagian-bagian yang lebih kecil (Suheri, 2009).

2.7.2 Metode *Horizontal To Vertical Ratio* (HVSR)

Dalam analisis mikrotremor ada metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) dimana metode tersebut cukup efektif, hemat biaya serta tidak merusak lingkungan, sehingga dapat digunakan pada wilayah perumahan (Haerudin, dkk., 2019). Dalam seismik pasif, metode HVSR dengan tiga komponen biasa digunakan, dan Nakamura (2000) mengungkapkan bahwa analisis mikrotremor dengan menggunakan metode HVSR dapat memberikan informasi tentang frekuensi alami dan ketebalan sedimen.

Metode HVSR atau *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* adalah sebuah teknik analisis yang digunakan untuk membandingkan spektrum dari komponen horizontal dan komponen vertikal dari gelombang mikrotremor. Menurut Nakamura (1989), perbandingan spektrum H/V sangat terkait dengan *transfer site* untuk gelombang S. Perbandingan H/V yang terjadi pada mikrotremor adalah hasil dari perbandingan kedua komponen tersebut. Dengan teknik ini, periode dominan dari suatu lokasi dapat ditentukan dengan memperkirakan periode puncak perbandingan H/V mikrotremor. Menurut Nakamura (2000) dengan menggunakan metode ini dapat secara efektif menentukan frekuensi resonansi dasar dari lapisan sedimen, dengan perhitungan amplifikasi yang lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan perbandingan antara lapisan sedimen dan batuan. Menurut Nakamura (1989) ada keterkaitan yang erat antara perbandingan spektrum H/V dan fungsi transfer situs. T_H dan T_V merupakan faktor penguatan (amplifikasi) dari komponen horizontal dan vertikal pada permukaan tanah yang bertemu dengan batuan dasar di daerah cekungan. Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap

vertikal (HVSR). Persamaan yang digunakan sebagai berikut :

$$S_M(\omega) = \frac{\sqrt{(H_{SN}(\omega))^2 + (H_{WE}(\omega))^2}}{V_S(\omega)} \quad (2.2)$$

dengan

$S_M(\omega)$ = HVSR (*Horizontal to Spectral Vertical Ratio*)

$H_{SN}(\omega)$ = Nilai amplitudo spectrum frekuensi komponen Utara Selatan

$H_{WE}(\omega)$ = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen Barat-Timur

Vs (ω) = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen vertikal

Haerudin, dkk (2019) mengungkapkan bahwa dengan menggunakan teknik HVSR, informasi yang bermanfaat terkait efek lokal dapat diperoleh dengan cepat. Hal ini dapat dikaitkan dengan parameter HVSR yang memiliki amplifikasi yang tinggi dan frekuensi dominan yang rendah. Sebagai hasilnya, teknik ini dianggap akurat dan stabil dalam memperkirakan frekuensi, redaman, dan indeks kerentanan pada getaran bangunan dengan eksitasi amplitudo kecil. Pengukuran HVSR pada bangunan berkaitan dengan kemampuan dan kestabilan bangunan, seperti yang dibuktikan oleh penelitian Nakamura, dkk. (2000) dan Gosar (2010).

Dalam analisis HVSR sedimen bisa saja terkena pengaruh respons bangunan, yang dapat menyebabkan ada kesalahan dalam mengidentifikasi resonansi. Oleh karena itu, untuk melihat perubahan waktu dari frekuensi resonansi dasar, digunakanlah teknik *Horizontal To Vertical Spectral Ratio* (HVSR) secara temporal (Haerudin, dkk., 2019). Dalam analisis HVSR untuk pengukuran data sedimen, diperlukan untuk memenuhi kriteria yang direkomendasikan oleh SESAME (2004). Kriteria ini mencakup hubungan antara puncak frekuensi dengan panjang jendela, jumlah siklus signifikan, dan standar deviasi puncak amplitudo. Selanjutnya, puncak juga harus dibersihkan berdasarkan hubungannya dengan level kurva HVSR standar deviasi puncak frekuensi dan amplitudonya. Jika semua kriteria tersebut terpenuhi, puncak frekuensi dapat dianggap sebagai frekuensi alami dari sedimen yang memiliki kontras impedansi kuat pertama.

2.7.3 Metode *Floor Spectral Ratio* (FSR)

Metode FSR atau *Floor Spectral Ratio* merupakan suatu teknik yang direkomendasikan oleh Gosar, dkk (2010) untuk mengidentifikasi frekuensi natural atau resonansi dari sebuah bangunan yang dapat menggambarkan

karakteristik bangunan terhadap gempabumi. Cara ini dilakukan dengan merubah data rekaman mikrotremor menjadi data frekuensi untuk setiap komponen pengukuran mikrotremor (NS dan EW) dalam kawasan waktu. Dari data spektrum setiap komponen, dapat ditemukan frekuensi alami bangunan yang akan menyebabkan bangunan beresonansi. Fungsi transfer dari struktur telah diperkirakan oleh rasio spektral struktur dan spektral tanah atau spektral bidang bebas, ini disebut *floor spectral ratio* (FSR) (Wulandari dan Bahri, 2012).

Wulandari dan Bahri (2012) menyatakan bahwa FSR merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara spektrum bangunan dan spektrum tanah melalui fungsi transfer dari setiap lantai. Fungsi transfer struktur bangunan ditentukan melalui perbandingan spektrum struktur dan spektrum tanah atau spektrum bidang bebas. Setelah melakukan pengukuran mikrotremor, data yang diperoleh selanjutnya diolah melalui analisis spektrum pada masing-masing komponen horizontal. Dari data tersebut, frekuensi alami struktur bangunan diperkirakan dari puncak FSR tertinggi dan kemudian dihubungkan dengan hasil analisis spektrum untuk mendapatkan nilai frekuensi alami yang sebenarnya.

$$\text{FSR}(\omega)\ \text{n, n-1} = \sqrt{\frac{(H_{EW}2\ (\omega)_{\ lantai\ n} + H_{NS}2\ (\omega)_{\ lantai\ n})}{(H_{EW}2\ (\omega)_{\ lantai\ n-1} + H_{NS}2\ (\omega)_{\ lantai\ n-1})}} \qquad (2.3)$$

dengan

FSR(ω) n, n-1 = Nilai FSR indeks lantai ke-n dibandingkan lantai n-1.

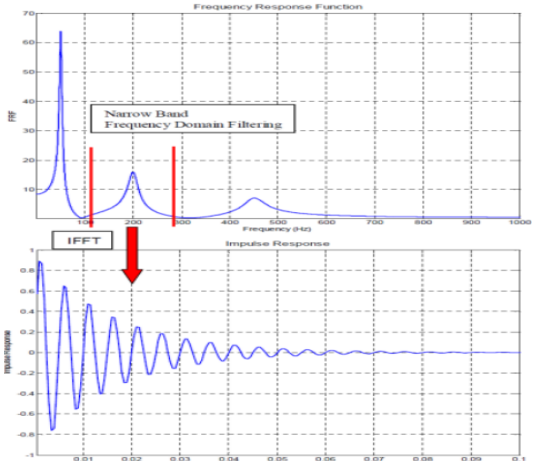
H_{EW} (ω) = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen Timur-Barat.

H_{NS} (ω) = Nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen Utara-Selatan.

2.7.4 Metode *Random Decrement Method* (RDM)

Metode RDM merupakan teknik yang umum digunakan dalam survei geoteknik dan geofisika untuk mengidentifikasi karakteristik dinamis suatu bangunan dan menemukan kerusakan pada saat terjadi gempa. Konsep RDM menurut Wulandari dan Bahri (2012) adalah melibatkan respons dinamis dari suatu sistem terhadap kejadian acak yang dipakai untuk membatalkan komponen acak sehingga didapatkan kurva getaran bebas yang akurat dari pengukuran damping dan frekuensi alami. **Gambar 2.5** menampilkan gambaran grafis dari RDM, yang menunjukkan tahapan untuk mendapatkan *random decrement*. Pada

level amplitudo tertentu dan durasi tetap, rata-rata *randomec* dapat dicapai. Komponen acak kemudian akan difilter. Representasi domain frekuensi akan menunjukkan puncak dominan dari sistem.



Gambar 2.5 Skematis *Random Decrement Method*. (Wulandari dan Bahri, 2012).

Wulandari dan Bahri (2012) mengungkapkan bahwa analisis RDM yang digunakan untuk menghitung rasio redaman dari suatu bangunan dilakukan dengan band pass filtering dan evaluasi frekuensi natural dari spektrum fourier terlebih dahulu. RDM biasa disebut sebagai metode transformasi series waktu pengurangan energi dari getaran bebas struktur bangunan. Menurut Tunggal (2014), prinsip dari metode *Random Decrement* (RDM) adalah mengambil respons suatu sistem dengan frekuensi acak, memfilternya menjadi eksitasi acak, kemudian menentukan nilai rasio peredaman bangunan menggunakan proses *bandpass filter* saat mengevaluasi frekuensi alami dari spektrum fourier. Untuk menganalisis bangunan, proses ini menggunakan RDM untuk ekstraksi frekuensi natural dan rasio redaman, serta FSR di setiap komponen horisontal untuk menghitung indeks kelemahan bangunan (Sungkono, dkk., 2011).

2.8 Amplifikasi

Amplifikasi terjadi ketika gelombang seismik mengalami perbesaran karena adanya perbedaan signifikan antara lapisan di bawah permukaan, sehingga saat merambat pada medium yang lebih lunak daripada medium sebelumnya, gelombang akan mengalami perbesaran (Haerudin, dkk., 2019). Nakamura (1989) juga menyatakan bahwa faktor penguatan tanah terkait dengan perbandingan kontras impedansi dari lapisan permukaan dan lapisan yang lebih dalam. Jika

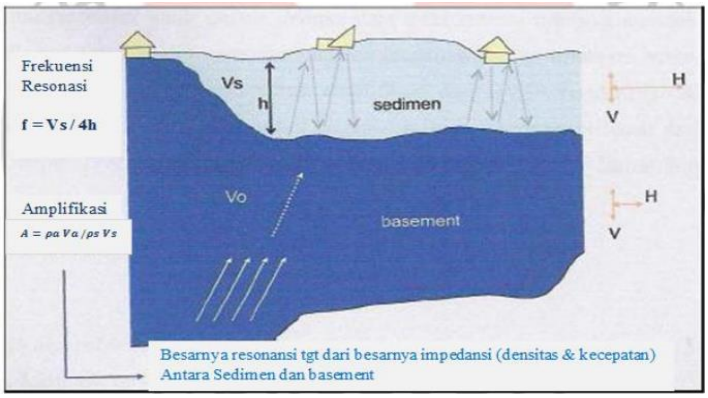
perbandingan kontras impedansi kedua lapisan tinggi, maka nilai penguatan akan tinggi, dan sebaliknya.

Dalam menentukan nilai amplifikasi, Nakamura (2008) menyatakan bahwa faktor yang mempengaruhi adalah sumber getaran meskipun sangat kecil. Untuk mengetahui frekuensi alami, dapat dilihat dari puncak HVSR dan nilai amplifikasi ditentukan oleh puncak tersebut. Haerudin, dkk (2019) menyatakan bahwa amplifikasi dapat meningkat ketika batuan mengalami perubahan bentuk seperti pelipatan, pelapukan, atau pergeseran yang merubah karakteristik fisika dari batuan. Pada batuan yang sama, nilai amplifikasi dapat bervariasi tergantung pada tingkat deformasi dan pelapukan pada tubuh batuan tersebut.

Tabel 2.1 Nilai faktor amplifikasi (Setiawan, 2009).

Zona	Klasifikasi	Nilai faktor amplifikasi
1	Rendah	$A < 3$
2	Sedang	$3 \leq A < 6$
3	Tinggi	$6 \leq A < 9$
4	Sangat Tinggi	$A \geq 9$

Menurut Cipta dan Athanasius (2009) konsep dasar fenomena amplifikasi gelombang seismik yaitu batuan sedimen yang terletak di atas basement dengan celah kecepatan dan kerapatan pada lapisan sedimen (Vs), kecepatan pada lapisan basement (Vo) yang lebih dominan **(Gambar 2.6)**. Sebagian besar frekuensi resonansi ditentukan oleh sifat fisik kecepatan gelombang S (Vs) dan ketebalan (h) lapisan sedimen.



Gambar 2.6. Konsep dasar amplifikasi gelombang seismik (Cipta dan Athanasius, 2009).

2.9 Frekuensi Natural Bangunan

Untuk memperkirakan kerentanan bangunan terhadap gempabumi, frekuensi natural diaplikasikan dengan cara mengukur resonansi antara frekuensi natural bangunan dengan frekuensi natural tanah. Selain itu, penggunaan frekuensi natural bangunan juga membantu menentukan efek lokal yang terdapat di lingkungan sekitarnya. Frekuensi natural bangunan merupakan frekuensi alami pada saat bangunan tersebut terganggu dan akan menjadi acuan untuk mengetahui apakah suatu bangunan mengalami resonansi. (Gosar, dkk., 2010).

Nilai frekuensi natural bangunan akan berbeda beda karena bergantung pada tinggi bangunan. Bangunan yang tinggi akan bergetar lebih lambat dibandingkan bangunan yang rendah. Jika frekuensi natural tanah pada dasar bangunan lebih kecil daripada frekuensi natural bangunan maka suatu bangunan dapat dikatakan aman dari kerusakan akibat deformasi (Prastowo dan Prabowo, 2017).

Agar tidak terjadi resonansi antara bangunan dan tanah, frekuensi natural bangunan harus melebihi frekuensi natural tanah. Jika frekuensi natural bangunan sama atau lebih kecil dari frekuensi natural tanah, maka bangunan akan beresonansi dengan tanah. Begitu terjadi, apabila bangunan tak dapat meredam resonansi, maka secara perlahan-lahan struktur bangunan akan mengalami pelemahan. Frekuensi natural dan rasio redaman dapat dihitung secara bersamaan dengan metode daya *spectral random decreament* atau analisis non parametrik (Sungkono, dkk., 2011).

2.10 Rasio Redaman (*Damping Ratio*)

Redaman pada suatu struktur yang bergetar menyatakan adannya fenomena pelepasan energi atau kehilangan energi dari getaran bebas suatu struktur akibat gesekan sehingga berkurang amplitudo. Menurut Sungkono, dkk (2011) dalam struktur suatu bangunan yang berosilasi, rasio redaman umumnya berkisar antara 1 dan 10%. Untuk struktur bangunan yang lebih ramping, nilai rasio redaman akan lebih rendah. Ketika redaman lebih tinggi umumnya tidak dapat dideteksi dalam rekaman karena energi yang terlalu rendah. Rasio redaman didapatkan dengan melakukan analisis RDM yang dapat digunakan untuk menentukan potensi kerusakan suatu bangunan yang disebabkan oleh gempabumi.

Sungkono, dkk (2011) menjelaskan bahwa rasio redaman adalah suatu faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu sistem dalam menyerap energi atau

meredam osilasi dari material redaman atau radiasi. Biasanya, rasio redaman digunakan untuk menggambarkan tingkat redaman dari struktur bangunan. Dengan menggunakan rasio redaman, kemampuan bangunan dalam menghilangkan energi getaran dapat dihitung. Meskipun getaran gempa sangat kuat, tingkat amplitudo suatu bangunan bergantung pada massa dan kekakuan strukturnya. Oleh karena itu, rasio redaman menjadi aspek penting dalam desain bangunan yang tahan gempa dan mampu mengurangi getaran.

2.11 Resonansi

Efek resonansi menurut Prastowo dan Prabowo (2017) adalah efek penguatan amplitudo gelombang saat terdapat gaya paksa (gempabumi) dengan frekuensi yang mendekati frekuensi natural bangunan yang akan membuat sistem akan berosilasi dengan amplitudo yang jauh lebih besar daripada amplitudo gaya paksa. Jika frekuensi bangunan dan frekuensi tanah memiliki nilai yang hampir sama, maka akan terjadi resonansi yang meningkatkan intensitas kerusakan akibat getaran gempa. Resonansi terjadi apabila nilai frekuensi natural tanah sama dengan atau mendekati nilai frekuensi natural bangunan yang akan menyebabkan bangunan mudah bergetar hingga menyebabkan kerusakan, sedangkan jika frekuensi tanah lebih kecil dari frekuensi bangunan maka bangunan akan kuat atau kokoh (Gosar, 2007). Untuk menentukan nilai indeks resonansi, dapat menggunakan persamaan berikut ini.

$$R = \frac{f_0 b - f_0 t}{f_0 t} \; x \; 100\% \qquad (2.4)$$

di mana R merupakan resonansi, $f_0 b$ adalah frekuensi alami bangunan, dan $f_0 t$ adalah frekuensi alami tanah. Nilai indeks resonansi yang didapatkan kemudian digunakan untuk menentukan tingkat kemungkinan bangunan mengalami resonansi saat terjadi gempa berdasarkan klasifikasi dari Gosar, dkk (2010). Klasifikasi tersebut adalah sebagai berikut : (1) Resonansi bangunan rendah ($R > 25\%$), (2) Resonansi bangunan sedang ($15\% < R < 25\%$), (3) Resonansi bangunan tinggi ($R < 15\%$).

2.12 Frekuensi Natural Tanah

Frekuensi natural struktur adalah frekuensi dari struktur yang secara alami cenderung untuk bergetar jika struktur ini terkena gangguan. Nilai frekuensi natural ini dapat digunakan sebagai pedoman apakah suatu struktur mengalami resonansi

atau tidak. Frekuensi alami adalah frekuensi osilasi yang cenderung dimiliki suatu sistem saat sistem tersebut dibiarkan bergetar tanpa damping (peredam) (Larasati, 2022). Nilai frekuensi natural suatu daerah dipengaruhi oleh ketebalan lapisan lapuk (h) dan kecepatan rata- rata bawah permukaan (Vs). Untuk mendapatkan nilai frekuensi alami digunakan Persamaan (2.5) sebagai berikut :

$$f = \frac{Vs}{4h} \tag{2.5}$$

Selain itu, dalam menentukan ketebalan sedimen suatu daerah ditentukan berdasarkan tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi nilai frekuensi alami tanah Oleh Kanai (Dikutip dari Buletin Meteorologi dan Geofisika No.4, 1998).

Klasifikasi tanah		Frekuensi alami (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Tipe	Jenis			
Tipe IV	Jenis I	6,667 – 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan Hard sandy, gravel, dll.	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras.< 5m.
Tipe III	Jenis II	10 – 4	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5m. Terdiri dari dari sandy-gravel, sandy hard clay, loam, dll.	Ketebalan sedimen Permukaannya masuk dalam kategori menengah 5 – 10 meter.
Tipe II	Jenis III	2,5 – 4	Batuan alluvial, dengan ketebalan lebih besar dari 5m. Terdiri dari sandy-gravel, sandy hard clay, loam, dll.	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 – 30 meter.
Tipe I	Jenis IV	< 2,5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll. Dengan kedalaman 30m atau lebih	Ketebalan Sedimen Permukaannya sangatlah tebal > 30m.

Frekuensi natural tanah dapat digunakan untuk merencanakan pembangunan dan diharapkan dapat mengurangi resiko bahaya gempabumi yang akan mungkin terjadi pada masa yang akan datang (SESAME, 2004).

2.13 Indeks Kerentanan Bangunan

Nakamura (2000) dan Nakamura, dkk (2009) mengidentifikasi bangunan yang rusak dengan memanfaatkan indeks kerentanan bangunan yang ditentukan berdasarkan parameter fungsi transfer. Nakamura, dkk (2009) membuktikan bahwa semakin tinggi indeks kerentanan, semakin besar pula kerentanan suatu bangunan akibat getaran gempabumi. Indeks kerentanan dapat mengetahui nilai kerusakan bangunan pada saat terjadinya gempa. Jika bangunan memiliki indeks kerentanan yang tinggi maka bangunan tersebut mudah mengalami kerusakan atau lemah, sedangkan bangunan yang memiliki nilai indeks kerentanan yang rendah maka bangunan tersebut dapat dikatakan kuat (Nashir dan Bahri, 2013). Sungkono, dkk (2011) menyebutkan bahwa untuk menghitung indeks kerentanan bangunan, dilakukan perhitungan amplitudo fungsi transfer dari struktur *floor spectral ratio* dan kekuatan bangunan. Sato dkk., (2008) menyatakan bahwa indeks kerentanan dapat ditentukan dari proses deformasi struktur yang terhubung dengan pergerakan seismik dari permukaan tanah ke struktur. Teknik ini memungkinkan kita untuk menentukan nilai indeks kerentanan dengan rumus berikut:

$$Kb = \frac{A}{(2\pi f)^2 \, x \, H} \, x \, 10.000 \qquad (2.6)$$

di mana Kb adalah nilai rata-rata struktur, A adalah amplitudo, f adalah frekuensi natural, H adalah ketinggian bangunan, dan 10^{-6} atau 10.000 adalah efek noise.

Umumnya, untuk memperkirakan kerentanan bangunan itu mengalami runtuh pada nilai indeks kerentanan di atas 200 cm/s^2. Sehingga jika nilai indeks kerentanan di bawah 200 cm/s^2 bangunan aman terhadap kerusakan (Hadianfard, dkk., 2017).