



**ANALISIS KERENTANAN BANGUNAN DENGAN
PENGUJIAN MIKROTREMOR STUDI KASUS DI
DAERAH RAWAN PERGERAKAN TANAH**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika

oleh
Herdita Suciati Febrina
4211412009
UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2017

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi dengan judul "Analisis Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor Studi Kasus di Daerah Rawan Pergerakan Tanah" telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.

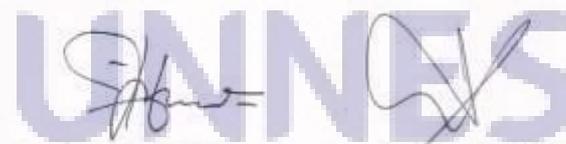
Hari : Rabu

Tanggal : 22 Februari 2017

Semarang, 22 Februari 2017

Pembimbing I

Pembimbing II

The image shows the UNNES logo watermark in the background, which consists of the letters 'UNNES' in a stylized, bold font. The 'U' and 'N' are connected, and the 'S' is also connected to the second 'N'. The logo is in a light blue or grey color.

Prof. Dr. Supriyadi, M.Si.
NIP 196505181991021001

Sugryanto, S.Pd., M.Si.
NIP 198111102003121001

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 22 Februari 2017



Herdita Suciati Febrina,

4211412009

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Analisis Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor Studi Kasus di Daerah Rawan Pergerakan Tanah

disusun oleh

Herdita Suciati Febrina
4211412009

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA Unnes pada tanggal 1 Maret 2017



Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt.

NIP.196412231988031001

Ketua Penguji

Prof. Dr. Sutikno, S.T., M.T.

NIP.197411201999031003

Anggota Penguji/
Pembimbing I

Prof. Dr. Supriyadi, M.Si.
NIP. 196505181991021001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP.196807141996031005

Anggota Penguji/
Pembimbing II

Sugiyanto, S.Pd., M.Si.
NIP. 198111102003121001

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhan-Mu lah hendaknya kamu berharap.

(Q.S. Al Insyirah: 6-8)

Banyak kegagalan dalam hidup ini dikarenakan orang-orang tidak menyadari betapa dekatnya mereka dengan keberhasilan saat mereka menyerah.

(Thomas Alva Edison)

Persembahan

Skripsi ini kupersembahkan kepada Allah,
Bapak, Ibu, Mbah, dan Adik.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim,

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor Studi Kasus di Daerah Rawan Pergerakan Tanah” dengan baik. Skripsi ini merupakan salah satu syarat wajib dalam memenuhi tugas pelaksanaan perkuliahan jenjang Sarjana (S1) di Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Zaenuri S.E., M.Si., Akt. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang;
2. Dr. Suharto Linuwih M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang;
3. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika, Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang;
4. Prof. Dr. Supriyadi M.Si. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk memberi masukan, saran, dan motivasi dalam proses penyusunan skripsi;
5. Sugiyanto, S.Pd., M.Si. selaku dosen pembimbing II yang dengan sabar membimbing, mengarahkan, memberikan saran, kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini;
6. Kepala Lembaga Penelitian Universitas 17 Agustus Semarang yang telah memberikan arahan serta izin penelitian;
7. Wakil Rektor II Universitas Katolik Soegijapranata yang telah memberikan arahan serta izin penelitian;

8. Bapak, Ibu, Mbah, dan Adik yang telah memberikan doa, motivasi, dan dukungan kepada penulis;
9. Teman-teman Fisika Unnes angkatan 2012 yang senantiasa terus memberikan bantuan, dukungan, semangat, dan motivasi hingga terselesaikannya skripsi ini;
10. Lela, Alwiyah, Dodoh, Ayu, Dian, Dwi, Asti, Miftachul, Diah, dan Edo yang senantiasa memberikan semangat, motivasi, pikiran, serta doa mereka untuk selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini;
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Semoga segala kebaikannya mendapatkan balasan dari Allah SWT;

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna karena adanya keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis sendiri. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari semua pihak senantiasa penulis harapkan. Akhir kata, penulis hanya berharap semoga karya kecil ini dapat memberikan manfaat bagi para pembacanya.

Semarang, 22 Februari 2017

UNNES Herdita Suciati Febrina
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ABSTRAK

Febrina, Herdita Suciati. 2017. *Analisis Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor Studi Kasus di Daerah Rawan Pergerakan Tanah*. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Prof. Dr. Supriyadi M.Si. dan Pembimbing Pendamping Sugiyanto, S.Pd., M.Si.

Kata Kunci: Mikrotremor, FSR, Indeks Kerentanan Bangunan

Kelurahan Bendan Duwur berada pada zona kerentanan gerakan tanah menengah yang menyebabkan gedung-gedung mengalami kerusakan. Gedung yang dilakukan pengujian mikrotremor yaitu gedung F1 Sabang, F2 Merauke Untag, serta Justinus Unika untuk mengetahui nilai frekuensi natural, nilai resonansi, dan indeks kerentanan bangunan. Pengolahan data mikrotremor bangunan dilakukan dengan metode *Floor Spectral Ratio* (FSR) menggunakan *software* Geopsy untuk menentukan nilai frekuensi natural serta amplifikasi. Adapun hasil yang diperoleh adalah nilai frekuensi natural pada gedung F1 Sabang antara 1,03-4,31 Hz untuk komponen EW dan 1,03-4,51 Hz untuk komponen NS, pada gedung F2 Merauke antara 1,02-1,67 Hz untuk komponen EW dan 1,02-1,39 Hz untuk komponen NS, sedangkan pada gedung Justinus antara 0,93-5,27 Hz untuk komponen EW dan 0,85-5,14 Hz untuk komponen NS. Nilai resonansi bangunan pada gedung F1 Sabang antara 30%-67% untuk komponen EW dan 44%-67% untuk komponen NS, pada gedung F2 Merauke antara 47%-68% untuk komponen EW dan 56%-68% untuk komponen NS, sedangkan pada gedung Justinus antara 10%-152% untuk komponen EW dan 20%-154% untuk komponen NS. Nilai indeks kerentanan bangunan pada gedung F1 Sabang antara 1,53-19,01 untuk komponen EW dan 1,56-13,49 untuk komponen NS, pada gedung F2 Merauke antara 4,17-37,13 untuk komponen EW dan 19,96-74,54 untuk komponen NS, sedangkan pada gedung Justinus antara 0,44-3,95 untuk komponen EW dan 0,59-28,16 untuk komponen NS. Berdasarkan nilai indeks kerentanan bangunan pada gedung F1 Sabang, F2 Merauke, dan Justinus lantai 2 memiliki nilai indeks kerentanan bangunan paling tinggi, sehingga lantai 2 lebih rentan mengalami kerusakan.

ABSTRACT

Febrina, Herdita Suciati. 2017. *An Analysis of Vulnerability Building Using Microtremor in Area Prone to Movement of The Ground*. Final Project. Physics Department, Mathematics and Science Faculty, Semarang State University. First Supervisor: Prof. Dr. Supriyadi M.Si. and second Advisor: Sugiyanto, S.Pd., M.Si.

Keywords: Microtremor, FSR, Building Vulnerability Index

Bendan Duwur village was located in the vulnerability of ground movement medium that cause buildings damaged. Buildings tested using microtremor were building F1 Sabang, F2 Merauke Untag, and Justinus Unika to determine value of natural frequency, value of building resonance, and building vulnerability index. We use *Floor Spectral Ratio* (FSR) method for building analysis using Geopsy to determine the value of natural frequency and amplification. The obtained results were value of natural frequencies at building F1 Sabang about 1,03-4,31 Hz on the EW component and 1,03-4,51 Hz on the NS component, at building F2 Merauke about 1,02-1,67 Hz on the EW component and 1,02-1,39 Hz on the NS component, meanwhile at building Justinus about 0,93-5,27 Hz on the EW component and 0,85-5,14 Hz on the NS component. Value of building resonance at F1 Sabang about 30%-67% on the EW component and 44%-67% on the NS component, at F2 Merauke about 47%-68% on the EW component and 56%-68% on the NS component, meanwhile at Justinus about 10%-152% on the EW component and 20%-154% on the NS component. Value of building vulnerability index at F1 Sabang about 1,53-19,01 on the EW component and 1,56-13,49 on the NS component, at F2 Merauke about 4,17-37,13 on the EW component and 19,96-74,54 on the NS component, meanwhile at Justinus about 0,44-3,95 on the EW component and 0,59-28,16 on the NS component. Based on building vulnerability index at building F1 Sabang, F2 Merauke, and Justinus, the 2nd floor has the highest value, so it more susceptible damaged.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
PERNYATAAN	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB	
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Batasan Masalah.....	7
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
1.6 Penegasan Istilah.....	8
1.7 Sistematika Penulisan Skripsi	9

II. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Kondisi Geologi	10
2.2 Tatanan Tektonik Wilayah Semarang.....	13
2.3 Gerakan Tanah	17
2.3.1. Proses Terjadinya Gerakan Tanah	18
2.3.2. Faktor Pergerakan Tanah	19
2.3.3. Jenis-Jenis Gerakan Tanah.....	21
2.4 Gelombang Seismik	25
2.4.1 Tipe-Tipe Gelombang Seismik	26
2.4.1.1 Gelombang Badan.....	26
2.4.1.2 Gelombang Permukaan	28
2.5 Mikrotremor	30
2.6 Mikrotremor pada Bangunan	32
2.7 <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr).....	33
2.8 <i>Floor Spectral Ratio</i> (FSR).....	37
2.9 Frekuensi Natural Tanah (f_t)	38
2.10 Frekuensi Natural Bangunan (f_0)	39
2.11 Amplifikasi.....	40
2.12 Resonansi	42
2.13 Indeks Kerentanan Bangunan (K_{Tj})	43
III. METODE PENELITIAN	46
3.1 Desain Penelitian.....	46

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	47
3.2.1 Waktu Penelitian	47
3.2.2 Lokasi Penelitian	47
3.3 Akuisisi Data	52
3.4 Pengolahan Data	55
3.4.1 Mikrotremor Tanah	56
3.4.2 Mikrotremor Bangunan	57
3.5 Analisis Data	60
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	61
4.1 Hasil Penelitian	61
4.2 Pembahasan	68
4.2.1 Nilai Frekuensi Natural Tanah Daerah Penelitian	68
4.2.2 Nilai Frekuensi Spektrum Bangunan	69
4.2.3 Nilai Frekuensi Natural Bangunan	70
4.2.4 Nilai Resonansi Bangunan	74
4.2.5 Nilai Indeks Kerentanan Bangunan	78
V. PENUTUP	80
5.1 Kesimpulan	80
5.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	82
Lampiran	86

DAFTAR TABEL

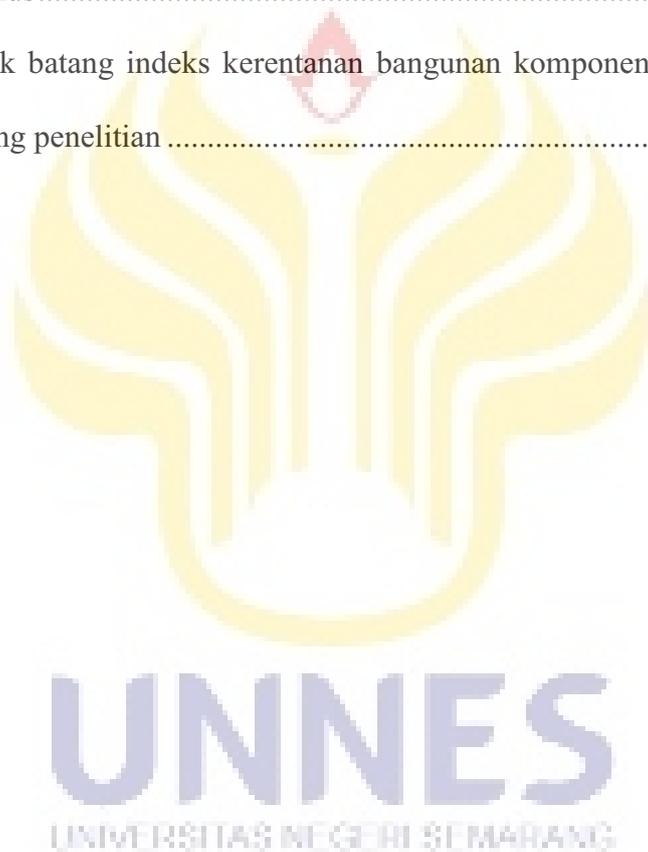
Tabel	Halaman
2.1 Kejadian gempa tektonik di sekitar Semarang pada tahun 2010-2016.....	17
2.2 Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural	38
3.1 Form data mikrotremor dengan menggunakan analisis spektrum	59
3.2 Form data mikrotremor dengan menggunakan analisis FSR	59
4.1 Hasil pengolahan data gedung F1 Sabang menggunakan analisis spektrum	64
4.2 Hasil pengolahan data gedung F1 Sabang menggunakan analisis FSR.....	64
4.3 Hasil pengolahan data gedung F2 Merauke menggunakan analisis spektrum	65
4.4 Hasil pengolahan data gedung F2 Merauke menggunakan analisis FSR ..	65
4.5 Hasil pengolahan data gedung Justinus menggunakan analisis spektrum.....	66
4.6 Hasil pengolahan data gedung Justinus menggunakan analisis FSR.....	67
4.7 Nilai indeks kerentanan bangunan per lantai gedung	68
4.8 Nilai indeks kerentanan bangunan gedung penelitian.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta seismisitas di Indonesia.....	2
1.2 Dampak pergerakan tanah pada gedung Universitas 17 Agustus (Untag) Semarang.....	4
2.1 Peta geologi Kota Semarang	11
2.2 Peta zona kerentanan gerakan tanah Kota Semarang.....	14
2.3 Proses terjadinya gerakan tanah dan komponen penyebabnya	18
2.4 Runtuhan batuan.....	22
2.5 Robohan batuan.....	23
2.6 Longsoran translasi dan longsoran rotasi.....	23
2.7 Pencaran batuan	24
2.8 Aliran bahan rombakan	24
2.9 Ilustrasi gerak gelombang primer (P).....	27
2.10 Ilustrasi gerak gelombang sekunder (S).....	28
2.11 Ilustrasi gerak gelombang Rayleigh.....	29
2.12 Ilustrasi gerak gelombang Love	30
2.13 Deskripsi komputasi metode HVSR	36
2.14 Skema model metode FSR.....	37
2.15 Konsep dasar amplifikasi gelombang seismik	42
2.16 Skema model-n lantai bangunan bertingkat dan bentuk modelnya	44
3.1 Diagram Alir Penelitian	46

3.2	Lantai Ground Gedung F1 Sabang.....	48
3.3	Lantai 1 Gedung F1 Sabang.....	48
3.4	Lantai 2 Gedung F1 Sabang.....	48
3.5	Lantai Ground Gedung F2 Merauke	49
3.6	Lantai 1 Gedung F2 Merauke	49
3.7	Lantai 2 Gedung F2 Merauke	49
3.8	Lantai Ground Gedung Justinus.....	50
3.9	Lantai 1 Gedung Justinus.....	50
3.10	Lantai 2 Gedung Justinus.....	51
3.11	Lantai 3 Gedung Justinus.....	51
3.12	Lantai 4 Gedung Justinus.....	51
3.13	Seperangkat seismometer 3 komponen (vertical, Utara-Selatan, Barat-Timur) tipe S3S merk MAE.....	52
3.14	Form data pengamatan pengukuran	55
4.1	<i>Windowing</i> titik F1 dan spektrum kurva H/V terhadap frekuensi gedung F1 Sabang.....	62
4.2	Kurva spektrum bangunan titik 2 arah EW lantai 2 gedung F1 Sabang	63
4.3	Grafik batang frekuensi natural bangunan komponen EW dan NS gedung F1 Sabang.....	71
4.4	Grafik batang frekuensi natural bangunan komponen EW dan NS gedung F2 Merauke	72
4.5	Grafik batang frekuensi natural bangunan komponen EW dan NS gedung Justinus.....	73

4.6	Grafik batang resonansi bangunan komponen EW dan NS gedung F1 Sabang	75
4.7	Grafik batang resonansi bangunan komponen EW dan NS gedung F2 Merauke.....	76
4.8	Grafik batang resonansi bangunan komponen EW dan NS gedung Justinus.....	77
4.9	Grafik batang indeks kerentanan bangunan komponen EW dan NS pada gedung penelitian	78



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Data Gedung Penelitian	86
2. Hasil Frekuensi Spektrum Bangunan (f_b) dengan Menggunakan Software Geopsy	88
3. Hasil Amplifikasi (A_{sj}) dengan Menggunakan Software Geopsy	100
4. Cara Perhitungan Data	112
5. Data Pengamatan Saat Pengukuran di Lapangan	129
6. Surat Penetapan Dosen Pembimbing Skripsi	153
7. Surat Ijin Penelitian untuk Universitas 17 Agustus Semarang	154
8. Surat Ijin Penelitian untuk Universitas Katolik Soegijapranata Semarang	155
9. Surat Ijin Penelitian dari Universitas Katolik Soegijapranata Semarang	156
10. Foto Kegiatan Pengambilan Data di Lapangan	157

BAB I

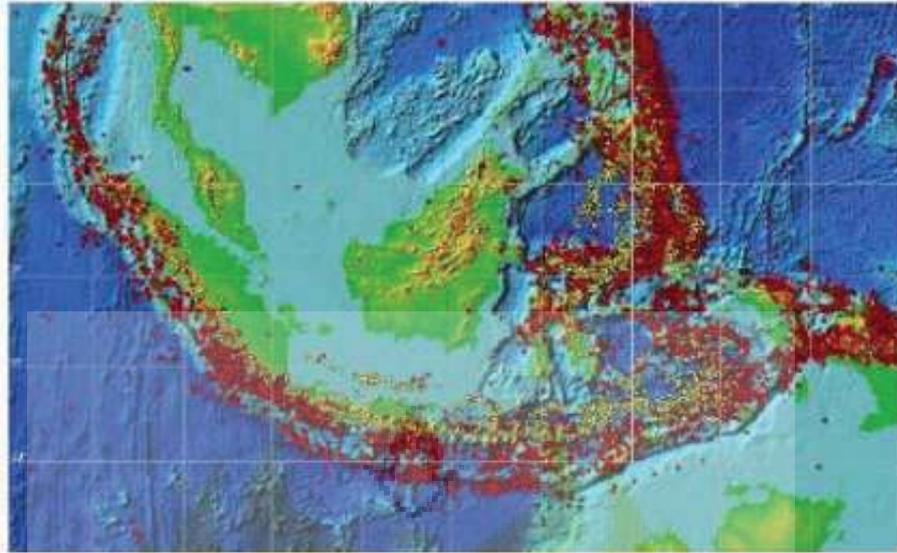
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bencana alam merupakan peristiwa yang disebabkan oleh alam yang mengakibatkan dampak besar bagi manusia. Bencana alam dapat terjadi setiap saat di permukaan bumi, antara lain berupa gempa bumi, tsunami, gunung meletus, banjir, angin topan, dan tanah longsor. Salah satu bencana alam yang tidak dapat diprediksi yaitu gempa bumi.

Gempa bumi adalah getaran asli dari dalam bumi, bersumber di dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi akibat rekahan bumi pecah dan bergeser keras (Nur, 2010). Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi.

Indonesia berada di jalur pertemuan tiga lempeng dunia yaitu lempeng Eurasia, lempeng Samudera Hindia-Australia, dan lempeng Samudera Pasifik. Interaksi lempeng-lempeng ini menyebabkan Indonesia berada pada wilayah yang rawan terhadap gempa bumi. Pulau Jawa termasuk wilayah Indonesia yang merupakan daerah rawan gempa bumi berdasarkan tataan seismotektoniknya. Pulau Jawa ini merupakan bagian dari satuan seismotektonik busur sangat aktif dan busur aktif (Soehaimi, 2008), seperti pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta seismisitas di Indonesia (USGS, 2006)

Berdasarkan data sejarah kegempaan, sekitar tahun 1800-an Semarang pernah diguncang gempa besar. Melihat sejarahnya, kekuatan gempa yang dapat dihasilkan dari patahan Semarang-Brebes bisa mencapai hingga 7 SR. Berdasarkan katalog gempa merusak Jateng bagian utara yang dikeluarkan PVMBG, dari tahun 1821 sampai 1890, wilayah-wilayah seperti Semarang, Jepara, Banyubiru, dan Ambarawa serta Pati pernah diguncang gempa berkekuatan VI-VIII skala MMI atau setara dengan 5,4 SR sampai 6,5 SR.

Berdasarkan analisis *hazard* gempa, sumber gempa yang mempunyai *hazard* terbesar untuk Kota Semarang adalah sumber gempa sesar (*fault*). Sumber gempa sesar (*fault*) terjadi akibat dari aktifitas Sesar Lasem. Sumber gempa lain yang memberikan kontribusi *hazard* yang cukup signifikan adalah sumber gempa yang belum diketahui secara jelas dengan kedalaman lebih dari 50 km (*deep background*) (Nugraha *et al.*, 2013). Aktivitas sesar di wilayah Semarang dan sekitarnya bisa berpotensi menimbulkan gempa yang merusak.

Struktur geologi yang ada di Kota Semarang terdiri atas tiga bagian yaitu struktur kekar (*joint*), patahan (*fault*), dan lipatan. Struktur geologi yang sangat terlihat di wilayah Kota Semarang berupa kelurusan-kelurusan dan kontak batuan yang tegas sehingga menunjukkan struktur sesar. Struktur patahan pada tanah mempunyai sifat erosif dan berporositas tinggi, struktur lapisan batuan yang diskontinyu (tak teratur) dan heterogen menyebabkan tanah menjadi mudah bergerak atau longsor.

Kota Semarang memiliki 16 kecamatan, salah satunya Kecamatan Gajahmungkur. Kecamatan Gajahmungkur terdiri dari beberapa kelurahan di antaranya Kelurahan Bendan Duwur. Pada daerah sekitar aliran Kali Garang terdapat patahan yaitu patahan Kali Garang yang membujur dari arah utara sampai selatan dan berbatasan dengan Bukit Gombel. Patahan ini bermula dari Ondorante yang mengarah ke arah utara hingga Bendan Duwur dan berupa patahan geser yang memotong Formasi Notopuro. Patahan ini ditandai dengan adanya zona sesar, tebing terjal di Ondorante, dan pelurusan Kali Garang serta beberapa mata air di Bendan Duwur.

Kelurahan Bendan Duwur sebagai daerah fokus penelitian berada pada formasi damar dengan komposisi batu pasir tufan, konglomerat, breksi vulkanik (Thanden *et al*, 1996). Nakamura (1989) menyatakan bahwa suatu wilayah dengan kondisi geologi berupa endapan alluvial, *tuff* dan batu pasir mempunyai potensi bahaya lebih besar terhadap efek intensitas getaran tanah akibat amplifikasi dan interaksi getaran tanah terhadap bangunan karena gempa bumi. Berdasarkan geomorfologinya, Bendan Duwur termasuk dalam satuan lahan

struktural perbukitan terjal dengan kemiringan lereng 22,5% dan beda tinggi 100-200 m (Afifah, 2011).

Salah satu dampak bencana gempa yaitu pergerakan tanah yang dapat menimbulkan kerusakan pada bangunan. Pergerakan tanah merupakan proses pergerakan material yang besar dari suatu tempat ke tempat lain yang lebih rendah akibat pengaruh gravitasi baik cepat maupun lambat. Wilayah Bendan Duwur didominasi oleh gedung-gedung bertingkat di antaranya gedung Universitas 17 Agustus (Untag) Semarang dan Universitas Katolik Soegijapranata (Unika). Secara kasat mata di daerah Bendan Duwur, khususnya Jalan Pawiyatan Luhur memiliki struktur jalan yang cenderung miring dengan kontur yang tidak rata dan selalu mengalami pergerakan. Pergerakan tanah yang terjadi pada wilayah Bendan Duwur akibat kemiringan lereng yang terjal menyebabkan gedung-gedung mengalami kerusakan karena sebagian gedung ikut mengalami pergerakan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Dampak pergerakan tanah pada gedung Universitas 17 Agustus (Untag) Semarang

Berdasarkan identifikasi struktur bawah tanah di Jalan Pawiyatan Luhur bahwa penyebab kemiringan jalan adalah adanya perbedaan massa jenis batuan sehingga membuat jalanan yang terbuat dari beton miring ke bagian yang

memiliki massa jenis yang lebih rendah (Nugraha *et al*, 2014). Jenis pergerakan tanah pada wilayah ini diduga merupakan jenis pergerakan tanah pencaran lateral (*lateral spread*). Jenis pergerakan ini terjadi pada lereng yang tersusun atas tanah lunak dan terbebani oleh massa tanah di atasnya. Pembebanan tersebut mengakibatkan lapisan tanah lunak mengalami tekanan dan mengembang ke arah lateral. Salah satu faktor yang bisa digunakan untuk memprediksi kerusakan pada bangunan akibat pergerakan tanah dengan melakukan pengukuran resonansi antara frekuensi natural bangunan.

Menurut Ridwan, sebagaimana dikutip oleh Hernanti (2014) metode mikrotremor merupakan salah satu pengujian kuantitatif non-destruktif yang dilakukan guna memeriksa kekuatan bangunan. Mikrotremor sendiri dapat diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus-menerus yang terjebak di lapisan sedimen permukaan dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap yang disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya. Metode pengujian ini adalah salah satu metode geofisika dengan memanfaatkan getaran alami yang terjadi pada tanah atau bangunan yang dapat ditangkap atau direkam dengan menggunakan alat sejenis seismograf dengan sensitivitas yang sangat tinggi.

Metode mikrotremor berkaitan erat dengan nilai frekuensi natural, amplifikasi, serta nilai resonansi. Nilai frekuensi natural menyatakan frekuensi alami yang terdapat pada suatu daerah. Hal ini menyatakan apabila terjadi gempa atau gangguan berupa getaran yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi natural, maka akan terjadi resonansi yang mengakibatkan amplifikasi

gelombang seismik di area tersebut. Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Nilai resonansi bangunan digunakan untuk menentukan tingkat kerusakan bangunan akibat gempa bumi.

Tingkat kerentanan bangunan dapat diestimasi berdasarkan nilai indeks kerentanan bangunan. Nilai indeks kerentanan bangunan mampu mengklasifikasikan kerentanan sebuah bangunan. Jika nilai indeks kerentanan bangunan tinggi maka bangunan tersebut lemah atau rentan, sedangkan nilai indeks kerentanan bangunan rendah, maka bangunan tersebut kuat (Nashir dan Bahri, 2013).

Berdasarkan fenomena di atas, maka penelitian dengan judul “Analisis Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor Studi Kasus di Daerah Rawan Pergerakan Tanah” dilakukan untuk mendapatkan gambaran tentang tingkat kerentanan suatu bangunan. Adapun analisis kerentanan bangunan dapat dilakukan melalui analisis data hasil mikrotremor pada beberapa titik di bangunan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai frekuensi natural bangunan, nilai indeks kerentanan bangunan, dan nilai resonansi bangunan gedung di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang?

2. Bagaimana tingkat kerentanan bangunan berdasarkan nilai indeks kerentanan bangunan gedung di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang?

1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup berdasarkan uraian yang telah dipaparkan pada latar belakang, maka batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Pengambilan data mikrotremor dilakukan pada gedung bertingkat di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur yaitu Gedung F1 Sabang dan Gedung F2 Merauke Universitas 17 Agustus (Untag) Semarang dan Gedung Justinus Universitas Katolik Soegijapranata (Unika).
2. Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode *Floor Spectral Ratio* (FSR) dan *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr).

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu:

1. Menentukan nilai frekuensi natural bangunan, nilai indeks kerentanan bangunan, dan nilai resonansi bangunan gedung di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang.
2. Mengetahui tingkat kerentanan bangunan berdasarkan nilai indeks kerentanan bangunan gedung di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang kerentanan bangunan gedung-gedung di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang sebagai rujukan dalam melakukan penanggulangan dan mitigasi bencana.
2. Memberikan informasi kepada pemerintah dan masyarakat terkait metode mikrotremor sebagai salah satu metode untuk mengetahui vvkerentanan bangunan gedung sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur.

1.6 Penegasan Istilah

Pada penelitian ini untuk menghindari penafsiran yang berbeda terhadap beberapa istilah yang digunakan, maka diperlukan penegasan istilah sebagai berikut:

1. Mikrotremor merupakan getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus-menerus yang terjebak di lapisan sedimen permukaan dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap yang disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya.
2. Kerentanan bangunan merupakan fungsi kinerja struktur bangunan dalam merespon gempa, yaitu semakin tinggi level kegempaannya, maka semakin berat kinerja struktur untuk mengurangi dampak kerusakannya.

3. Gerakan tanah yaitu proses pergerakan material yang besar dari suatu tempat ke tempat lain yang lebih rendah akibat pengaruh gravitasi baik cepat maupun lambat.

1.7 Sistematika Penulisan Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

1. Bagian awal skripsi berisi tentang lembar judul, persetujuan pembimbing, lembar pengesahan, lembar pernyataan, motto dan persembahan, prakata, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan lampiran.
2. Bagian isi skripsi terdiri dari:
 - Bab I Pendahuluan yang berisi tentang latar belakang pemilihan judul, rumusan masalah, tujuan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, penegasan istilah, dan sistematika penulisan skripsi.
 - Bab II Landasan Teori terdiri dari kajian mengenai landasan teori yang mendasari penelitian.
 - Bab III Metode Penelitian berisi waktu dan tempat pelaksanaan penelitian, desain penelitian, dan metode analisis serta interpretasi data, dan metode pengumpulan data.
 - Bab IV Hasil dan Pembahasan berisi tentang hasil-hasil penelitian dan pembahasannya.
 - Bab V Penutup berisi tentang kesimpulan dan saran.
3. Bagian akhir skripsi terdiri atas daftar pustaka dan lampiran.

BAB II

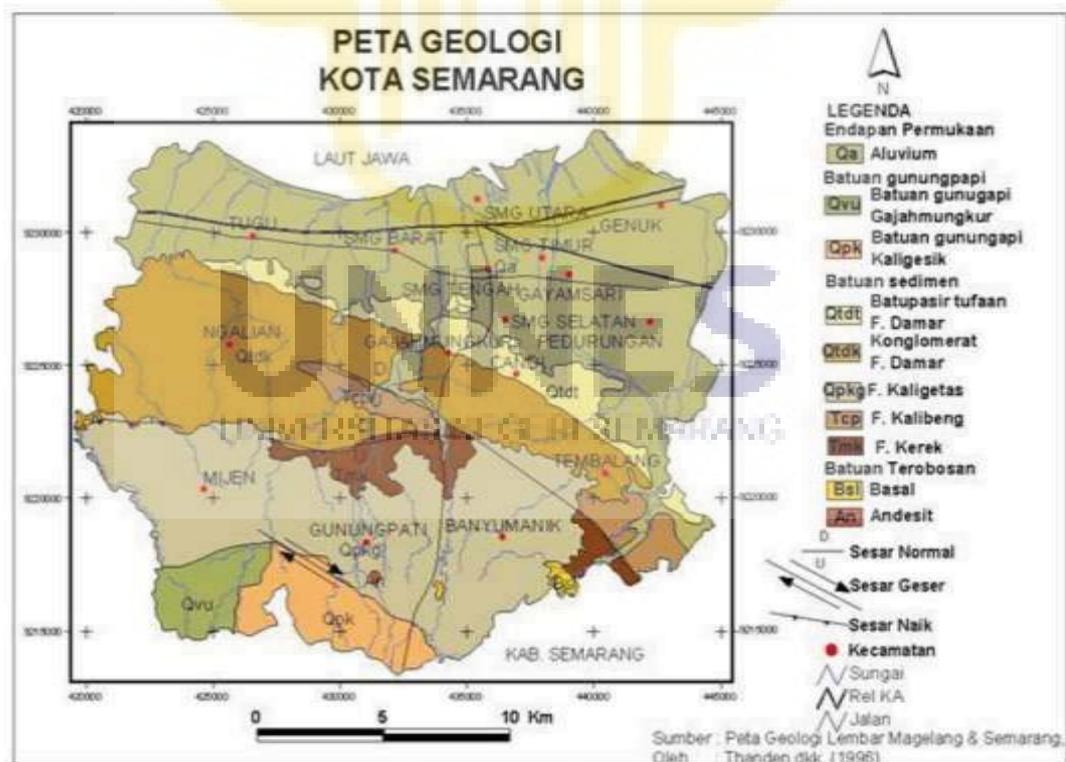
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologi

Kota Semarang secara astronomis terletak di antara garis $6^{\circ}50'$ – $7^{\circ}10'$ Lintang Selatan dan garis $109^{\circ}35'$ – $110^{\circ}50'$ Bujur Timur. Ketinggian Kota Semarang beragam yaitu antara 0,75 – 348 m. Secara topografis Kota Semarang terdiri atas daerah pantai/pesisir, dataran, dan perbukitan dengan kemiringan lahan berkisar antara 0% - 45% (Afifah, 2011).

Kondisi lereng tanah Kota Semarang dibagi menjadi 4 jenis kelerengan. Lereng I memiliki kemiringan lahan berkisar antara 0-2% yang meliputi Kecamatan Genuk, Pedurungan, Gayamsari, Semarang Timur, Semarang Utara, dan Tugu, serta sebagian wilayah Kecamatan Tembalang, Banyumanik, dan Mijen. Lereng II memiliki kemiringan lahan berkisar antara 2-5% yang meliputi Kecamatan Semarang Barat, Semarang Selatan, Candisari, Gajahmungkur, Gunungpati, dan Ngaliyan. Lereng III memiliki kemiringan lahan berkisar antara 15-40% yang meliputi wilayah di sekitar Kaligarang dan Kali Kreo (Kecamatan Gunungpati), sebagian wilayah Kecamatan Mijen (daerah Wonopulombon) dan sebagian wilayah Kecamatan Banyumanik, serta Kecamatan Candisari. Sedangkan lereng IV memiliki kemiringan lahan $>50\%$ yang meliputi sebagian wilayah Kecamatan Banyumanik (sebelah tenggara), dan sebagian wilayah Kecamatan Gunungpati, terutama di sekitar Kali Garang dan Kali Kripik (Bappeda, 2013).

Susunan stratigrafi Kota Semarang berdasarkan Peta Geologi Lembar Magelang – Semarang seperti terlihat pada Gambar 2.1 adalah sebagai berikut Aluvium (Qa), Batuan Gunungapi Gajahmungkur (Qhg), Batuan Gunungapi Kaligesik (Qpk), Formasi Jongkong (Qpj), Formasi Damar (Qtd), Formasi Kaligetas (Qpkg), Formasi Kalibeng (Tmkl), dan Formasi Kerek (Tmk). Struktur geologi yang terdapat pada dataran rendah berupa endapan aluvial sungai, endapan fasies dataran delta, dan endapan fasies pasang-surut. Endapan-endapan tersebut terdiri dari selang-seling antara lapisan pasir, pasir lanauan dan lempung lunak, dengan sisipan lensa-lensa kerikil dan pasir vulkanik. Sedangkan struktur geologi yang terdapat pada daerah perbukitan sebagian besar berupa batuan beku (Soedarsono, 2012).



Gambar 2.1 Peta geologi Kota Semarang (Thaden *et al.*, 1996)

Kota Semarang memiliki struktur geologi berupa sesar yang terdiri dari sesar normal, sesar geser, dan sesar naik. Sesar normal memiliki kecenderungan arah barat-timur, dimana sebagian sedikit cembung ke arah utara. Sesar geser memiliki arah utara-selatan sampai barat laut-tenggara. Sesar naik memiliki arah barat-timur. Sesar-sesar tersebut umumnya terjadi pada batuan Formasi Kerek, Formasi Kali Bening, dan Formasi Damar yang berumur kuartar dan tersier.

Struktur geologi yang ada di Kota Semarang terdiri atas tiga bagian yaitu struktur kekar (*joint*), patahan (*fault*), dan lipatan. Struktur patahan pada tanah mempunyai sifat erosif dan berporositas tinggi, struktur lapisan batuan yang diskontinyu (tak teratur) dan heterogen menyebabkan tanah menjadi mudah bergerak atau longsor. Pada daerah sekitar aliran Kali Garang terdapat patahan yaitu patahan Kali Garang yang membujur dari arah utara sampai selatan dan berbatasan dengan Bukit Gombel. Patahan ini bermula dari Ondorante yang mengarah ke arah utara hingga Bendan Duwur dan berupa patahan geser yang memotong Formasi Notopuro. Patahan ini ditandai dengan adanya zona sesar, tebing terjal di Ondorante, dan pelurusan Kali Garang serta beberapa mata air di Bendan Duwur. Daerah patahan lainnya adalah Meteseh, Perumahan Bukit Kencana Jaya, dengan arah patahan melintas dari utara ke selatan.

Sesuai dengan peta geologi lembar Magelang-Semarang (Thanden *et al*, 1996) bahwa Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur berada pada formasi damar dengan komposisi batu pasir tufan, konglomerat, breksi vulkanik. Batu pasir mengandung mineral mafik, feldspar, dan kuarsa. Breksi vulkanik adalah endapan dari lahar. Formasi ini sebagian nonmarin, mengandung moluska, dan sisa

vertebrata. Formasi ini tersingkap di sekitar sungai Damar dan di bagian barat laut daerah telitian.

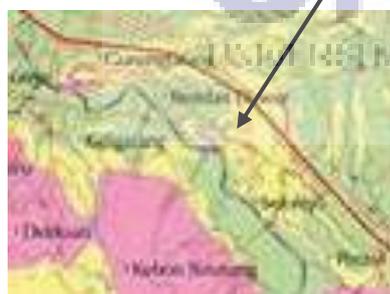
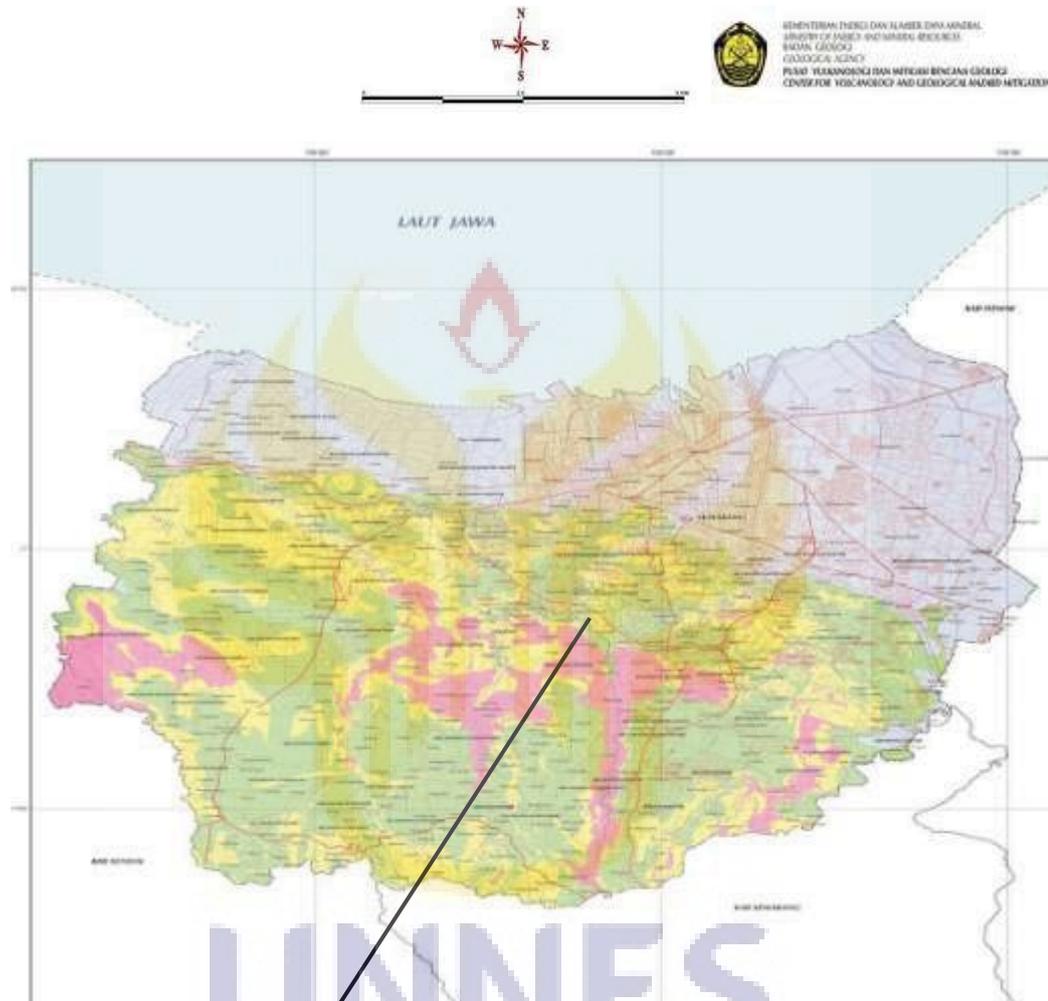
Berdasarkan peta zona kerentanan gerakan tanah Kota Semarang, Jawa Tengah, yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, Bendan Duwur berada pada zona kerentanan gerakan tanah menengah. Pada zona ini dapat terjadi gerakan tanah terutama pada daerah yang berbatasan dengan lembah sungai, gawir, tebing jalan atau jika lereng mengalami gangguan. Gerakan tanah lama dapat aktif kembali akibat curah hujan yang tinggi dan erosi kuat. Kisaran kemiringan lereng mulai dari landau (5-15%) sampai curam hingga hampir tegak ($>70\%$), tergantung pada kondisi sifat fisik dan keteknikan batuan dan tanah pelapukan pembentuk lereng. Kondisi vegetasi penutup umumnya kurang sampai sangat jarang.

2.2 Tatanan Tektonik Wilayah Semarang

Kajian seismogenetik menunjukkan Pulau Jawa berada pada satuan seismotektonik busur sangat aktif (Jawa Barat bagian barat dan Sumatera) dan satuan seismotektonik busur aktif (Jawa Barat bagian barat-Jawa Tengah-Jawa Timur). Lajur seismotektonik sesar aktif daratan Jawa berkaitan erat dengan keberadaan struktur sesar aktif, salah satunya lajur seismotektonik Kebumen-Semarang-Jepara (Soehaimi, 2008). Wilayah Semarang berada pada lajur seismotektonik sesar aktif tersebut.

PETA ZONA KERENTANAN GERAKAN TANAH KOTA SEMARANG, PROVINSI JAWA TENGAH

SUSCEPTIBILITY TO LANDSLIDE ZONE MAP OF SEMARANG CITY, CENTRAL JAVA PROVINCE



Zona Kerentanan Gerakan Tanah Menengah

Daerah yang mempunyai tingkat kerentanan menengah untuk terkena gerakan tanah. Pada zona ini dapat terjadi gerakan tanah terutama pada daerah yang berbatasan langsung dengan lembah sungai, gawir, tebing jalan, atau jika lereng mengalami gangguan. Gerakan tanah lama dapat aktif kembali akibat curah hujan yang tinggi dan erosi kuat. Kisaran kemiringan lereng mulai dari landau (5-15%) sampai curam hingga hampir tegak (>70%), tergantung pada kondisi sifat fisik, keteknikan batuan, dan tanah pelapuk pembentuk lereng. Kondisi vegetasi penutup umumnya kurang sampai sangat jarang.

Gambar 2.2 Peta zona kerentanan gerakan tanah Kota Semarang, Provinsi Jawa Tengah (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi)

Semarang juga teridentifikasi memiliki tujuh buah sesar turun, satu sesar naik, dan tiga sesar mendatar. Sesar-sesar tersebut yaitu Sesar Naik Banyumanik yang relatif berarah ke Tenggara-Barat Laut ($N110^{\circ}$ - $N290^{\circ}$ E) melintas melewati Jabungan sampai Pongangan dan Kecamatan Banyumanik hingga Kecamatan Gunungpati, Sesar Mendatar Kali Garang yang relatif berarah Utara-Selatan ($N05^{\circ}$ E- $N185^{\circ}$ E) melintas sepanjang Kali Garang, Sesar Turun Kreo, Sesar-sesar Turun Ungaran Tua, dan Sesar-sesar Turun Ungaran Muda. Menurut Simandjuntak, sebagaimana dikutip oleh Poedjoprajitno *et al.* (2008), di selatan Semarang terdapat sesar sungkup (*thrust fault*) yang menerus hingga ke Bogor di barat dan Kendeng di timur. Sesar sungkup ini dipotong oleh berbagai ukuran sesar jurus mendatar, yang berarah Barat Laut-Tenggara atau Timur Laut-Barat Daya, di antaranya Sesar Kaligarang. Dengan keberadaan sesar-sesar tersebut, besar kemungkinan wilayah Semarang bisa terjadi gempa bumi.

Gempa bumi adalah getaran tanah yang ditimbulkan oleh lewatnya gelombang seismik yang dipancarkan oleh suatu sumber energi elastik yang dilepaskan secara tiba-tiba. Pelepasan energi elastik tersebut terjadi pada saat batuan di lokasi sumber gempa tidak mampu menahan gaya yang ditimbulkan oleh gerak relatif antar blok batuan, daya tahan batuan menentukan besar kekuatan gempa. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi.

Teori yang menjelaskan tentang energi elastik yang dapat diterima adalah pergeseran sesar dan teori kekenyalan elastis (*elastic rebound theory*) yang

ditemukan oleh seorang seismolog Amerika yaitu Harry Fielding Reid (1906) (Karyadi, 2008: 19). Teori ini menjelaskan jika permukaan bidang sesar saling bergesekan, batuan akan mengalami deformasi (perubahan wujud) jika perubahan tersebut melampaui batas elastisitas atau regangannya, maka batuan akan patah (*rupture*) dan akan kembali ke bentuk asalnya (*rebound*).

Di Semarang pernah terjadi gempa besar sekitar tahun 1800-an. Melihat sejarahnya, kekuatan gempa yang dapat dihasilkan dari patahan Semarang-Brebes hingga mencapai 7 SR. Berdasarkan katalog gempa merusak Jateng bagian utara yang dikeluarkan PVMBG, dari tahun 1821-1890 wilayah-wilayah seperti Semarang, Jepara, Banyubiru, Ambarawa, dan Pati pernah diguncang gempa berkekuatan VI-VIII skala MMI atau setara dengan 5,4 SR sampai 6,5 SR. Gempa tersebut disebabkan oleh Sesar Lasem. Sesar Lasem juga pernah memicu terjadinya gempa di Kudus pada 1877, serta gempa Semarang pada 1856, 1958, 1959, dan 1966. Gempa bumi juga pernah terjadi pada 17 Februari 2014 di Desa Sumogawe, Kecamatan Getasan, Kabupaten Semarang dengan intensitas II-IV MMI akibat aktifitas sesar yang berarah Barat Laut-Tenggara di daerah tersebut.

Wilayah sekitar Semarang tercatat beberapa kali terjadi gempa tektonik dengan kekuatan sedang hingga cukup besar. Sebagian besar gempa berkekuatan 4-4,9 Skala Richter, tetapi beberapa gempa bahkan mencapai kekuatan 5 dan 6 Skala Richter. Berikut ini beberapa kejadian gempa tektonik di sekitar Semarang yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kejadian gempa tektonik di sekitar Semarang pada tahun 2010-2016

No.	Lokasi	Hiposentrum (km)	Waktu	Skala Richter	Keterangan
1	6,58LS,108,97B T	10	2/9/2010	2,4	Utara Tegal Ds. Sumogawe, Kec. Getasan
2	7,29LS,110,48B T	10	17/2/2014	2,7	Kab. Semarang
3	4,8LS,109,17BT	4	24/12/2014	6,5	Laut Selatan sebelah Barat daya Kebumen
4	6,39LS,110,91B T	14	23/10/2015	5,0	84 km Timur Laut Semarang
5	8,97LS,110,19B T	93	11/11/2015	5,6	120 km Barat daya Bantul
6	7,55LS,111,30B T	19	4/11/2016	4,9	45 km arah Utara Kota Madiun

2.3 Gerakan Tanah

Gerakan tanah merupakan salah satu jenis bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Gerakan tanah (*mass movement*) menurut Varnes (1978) adalah proses pergerakan material penyusun lereng seperti tanah, batuan, atau bahan timbunan dari suatu tempat ke tempat lain yang lebih rendah. Gerakan tanah bertindak sebagai energi yang menggerakkan tumpukan tanah/material akibat pelapukan. Gerakan tanah dapat disebabkan beberapa faktor, yaitu kelerengan yang cukup curam, terdapat bidang peluncur di bawah permukaan tanah yang kedap air, dan terdapat cukup air (dari hujan) di dalam tanah di atas lapisan kedap, sehingga tanah jenuh air (Karnawati, 2005).

2.3.1 Proses Terjadinya Gerakan Tanah

Karnawati (2005) menjelaskan bahwa pergerakan tanah pada lereng dapat terjadi akibat interaksi pengaruh beberapa kondisi yang meliputi kondisi morfologi, geologi, struktur geologi, hidrogeologi, dan tata guna lahan. Kondisi-kondisi tersebut saling berpengaruh sehingga menghasilkan suatu kondisi lereng yang rentan dan siap bergerak. Lereng yang rentan dan siap bergerak akan benar-benar mengalami pergerakan apabila ada faktor pemicu. Faktor pemicu terjadinya gerakan tanah dapat berupa hujan, getaran atau aktifitas manusia pada lereng, seperti pemotongan dan penggalian, pembebanan yang berlebihan, dan sebagainya.

Proses terjadinya gerakan tanah secara skematik dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Proses terjadinya gerakan tanah dan komponen penyebabnya (Karnawati, 2005)

Dari Gambar 2.3 menunjukkan bahwa proses terjadinya gerakan tanah melalui beberapa tahapan, yaitu tahap stabil, rentan (siap bergerak), kritis, dan benar-benar bergerak. Penyebab gerakan tanah dapat dibedakan menjadi penyebab tidak langsung dan penyebab langsung. Penyebab tidak langsung berupa faktor pengontrol yaitu faktor-faktor yang mengkondisikan suatu lereng menjadi rentan atau siap bergerak, penyebab langsung berupa faktor pemicu yaitu proses-proses yang merubah kondisi lereng dari kondisi rentan menjadi kondisi benar-benar bergerak setelah melampaui batas kritis tertentu.

2.3.2 Faktor Pergerakan Tanah

Menurut Karnawati (2005) faktor-faktor yang dapat memicu pergerakan tanah merupakan suatu fenomena dengan kondisi lereng yang berpotensi untuk bergerak, meskipun pada saat tertentu lereng tersebut masih stabil atau belum bergerak. Lereng yang berpotensi untuk bergerak dapat mengalami pergerakan tanah apabila terdapat gangguan, sehingga memicu terjadinya gerakan. Faktor-faktor pengontrol terjadinya gerakan tanah di Indonesia, sebagai berikut:

1. Kondisi Geomorfologi (Kemiringan Lereng)

Indonesia merupakan Negara dengan wilayah yang sebagian besar berupa perbukitan dan pegunungan, sehingga banyak dijumpai lahan miring. Lereng pada lahan yang miring dapat berpotensi mengalami pergerakan tanah. Semakin curam kemiringan (sudut kemiringan) suatu lereng, maka akan semakin besar gaya penggerak massa tanah/batuan penyusun lereng.

2. Kondisi Geologi

Sebagian besar wilayah Indonesia merupakan wilayah dengan kondisi geologi yang dinamis. Hal itu disebabkan oleh pergerakan lempeng Australia dan lempeng Pasifik yang menumbuk di bawah lempeng Benua Eurasia. Pergerakan lempeng-lempeng tersebut mengakibatkan adanya zona penunjaman, sehingga terjadi aktifitas gempa dan gunung api.

Getaran gempa bumi pada lereng pegunungan dapat memicu longsor, karena getaran dari gempa dapat memperbesar gaya penggerak massa tanah/batuan pada lereng dan juga mengurangi besarnya gaya penahan gerakan tanah. Adanya gunung api mengakibatkan kondisi geologi suatu lahan menjadi miring. Semakin miring suatu lahan, maka semakin besar gaya penggerak massa tanah pada lereng apabila tanah penyusun lereng merupakan tanah lepas-lepas atau yang rapuh.

3. Kondisi Tanah/Batuan Penyusun Lereng

Kondisi tanah/batuan penyusun lereng berfungsi sebagai pengontrol terjadinya gerakan tanah. Jika suatu lereng cukup curam, tetapi kondisi tanah/batuan penyusun lereng tersebut cukup kompak dan kuat, maka gerakan tanah belum tentu akan terjadi. Massa tanah/batuan yang rentan bergerak yaitu tanah-tanah residual hasil pelapukan batuan yang belum mengalami pergerakan, tanah kolovial, lapisan batu lempung sejenis smektif, dan lapisan napal. Tanah-tanah tersebut rentan bergerak, apabila kemiringan lapisan batuan searah kemiringan lereng.

4. Kondisi Iklim

Kondisi iklim di Indonesia berperan penting dalam memicu terjadinya longsor. Temperatur dan curah hujan yang tinggi akan membuat proses pelapukan batuan pada lereng, sehingga lereng akan tersusun oleh tumpukan tanah yang tebal lebih dari 10 meter. Lereng dengan tumpukan tanah yang lebih tebal relatif lebih rentan dan akan mengalami pergerakan tanah.

Curah hujan dengan intensitas menengah hingga tinggi dan berlangsung dalam waktu yang lama sangat berperan dalam memicu terjadinya gerakan tanah. Air hujan yang meresap ke dalam lereng dapat meningkatkan kejenuhan tanah, sehingga tekan air untuk merenggangkan ikatan tanah meningkat pula, serta massa tanah terangkut oleh aliran air dalam lereng.

5. Kondisi hidrologi lereng

Kondisi hidrologi dalam lereng berfungsi untuk meningkatkan tekanan hidrostatik air, sehingga kuat tanah/batuan akan sangat berkurang, dan tanah akan mengalami pergerakan. Lereng air yang tanahnya dangkal sangat berpotensi mengalami kenaikan tekanan hidrostatik, apabila air permukaan meresap ke dalam lereng. Selain itu, retakan batuan atau kekar sering pula menjadi saluran air masuk ke dalam lereng. Semakin banyak air yang masuk melewati retakan atau kekar tersebut, maka tekanan air juga semakin meningkat.

2.3.3 Jenis-Jenis Gerakan Tanah

Gerakan tanah dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan jenis gerakan dan materialnya. Varnes (1978) menjelaskan bahwa jenis pergerakan tanah berdasarkan pada material yang nampak, kecepatan perpindahan material

yang bergerak, susunan massa yang berpindah, dan jenis material serta gerakannya. Jenis gerakan tanah yang umum terjadi di alam dilihat dari tipe dan jenis materialnya antara lain sebagai berikut:

1. Runtuhan (*Falls*)

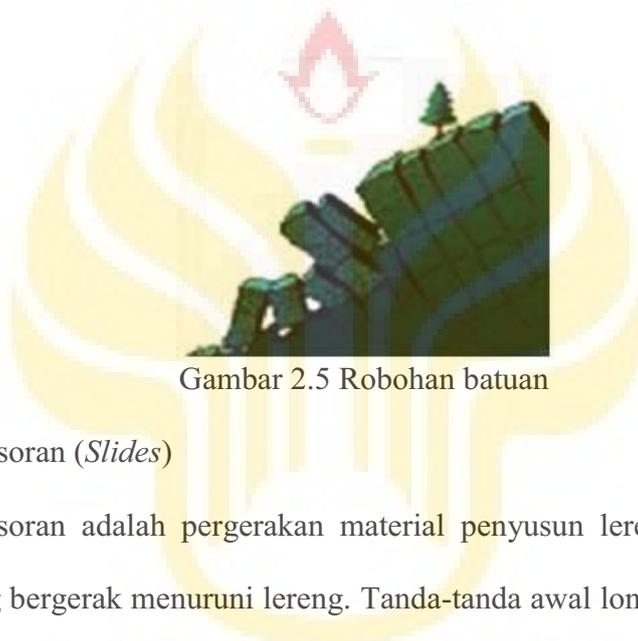
Runtuhan merupakan pergerakan tanah yang disebabkan tarikan serta diikuti dengan tipe gerakan jatuh bebas akibat gravitasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pada tipe ini, massa tanah atau batuan dari berbagai ukuran terlepas dari lereng yang curam dengan sedikit atau tanpa disertai terjadinya pergeseran antara massa yang runtuh dengan massa yang tidak runtuh. Runtuhnya massa tanah atau batuan umumnya jatuh dengan cara meluncur seperti jatuh bebas, meloncat atau menggelinding tanpa melalui bidang gelincir. Penyebab terjadinya runtuhan pada batuan adalah adanya perbedaan pelapukan, tekanan hidrostatik karena masuknya air ke dalam rekahan batuan, serta perlemahan akibat struktur geologi (sesar, perlapisan, kekar).



Gambar 2.4 Runtuhan batuan

2. Robohan (*Topples*)

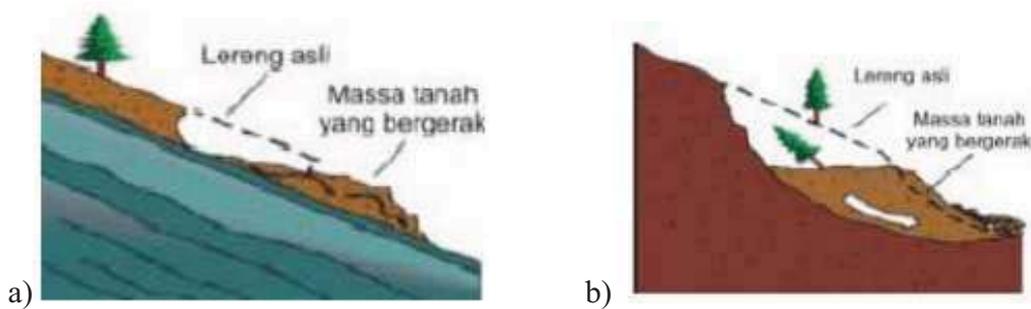
Robohan adalah pergerakan batuan dengan jenis gerakan memutar kedepan dari satu atau beberapa blok tanah/batuan terhadap titik putar. Penyebab robohan pada batuan ini biasanya disebabkan adanya tekanan air yang mengisi rekahan batuan. Robohan ini biasanya terjadi pada batuan dengan kelereng terjal sampai tegak dan tidak mempunyai bidang gelincir, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Robohan batuan

3. Longsoran (*Slides*)

Longsoran adalah pergerakan material penyusun lereng melalui bidang gelincir yang bergerak menuruni lereng. Tanda-tanda awal longsoran yaitu berupa retakan berbentuk tapal kuda pada bagian permukaan lereng yang mulai bergerak. Bidang gelincir pada longsoran dibedakan menurut bentuknya yaitu bidang yang relatif lurus (translasi) dan bidang lengkung ke atas (rotasi), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Longsoran pada bidang translasi bergerak sepanjang permukaan yang datar, sedangkan pada bidang rotasi longsoran berbentuk setengah lingkaran dan retakan-retakannya berbentuk cekung seperti sendok.



Gambar 2.6 a) Longoran translasi dan b) Longoran Rotasi

4. Pencaran Lateral (*Lateral Spread*)

Pencaran lateral adalah pergerakan material tanah atau batuan dengan cara perpindahan translasi pada bagian dengan kemiringan landai sampai datar, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Jenis pergerakan ini terjadi pada lereng yang tersusun atas tanah lunak dan terbebani oleh massa tanah di atasnya. Pembebanan tersebut mengakibatkan lapisan tanah lunak mengalami tekanan dan mengembang ke arah lateral.

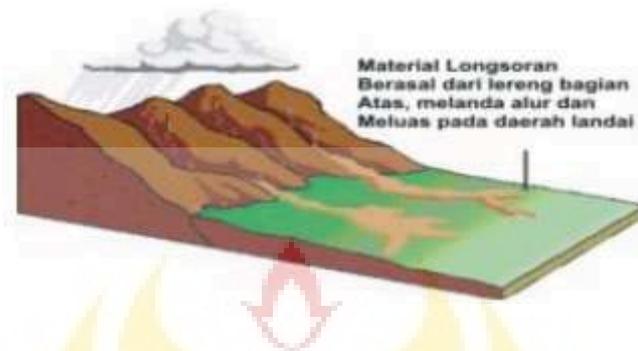


Gambar 2.7 Pencaran Batuan

5. Aliran (*Flows*)

Aliran yaitu pergerakan material berupa aliran fluida kental dengan kuat geser tanah sangat kecil atau tidak ada, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Gerakan jenis ini umumnya bergerak dalam bentuk cairan lumpur dengan pergerakan lambat atau cepat. Berdasarkan tipe materialnya dapat dibedakan menjadi aliran bahan rombakan, aliran tanah (*earth flow*) yaitu massa yang

bergerak didominasi oleh material tanah berukuran butir halus (butir lempung) dan aliran lumpur (*mud flow*) yaitu massa yang bergerak memiliki jenuh air.



Gambar 2.8 Aliran bahan rombakan

2.4 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang elastik yang dijalarakan melalui media bumi. Pembangkitan gelombang seismik dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif biasanya digunakan pada seismik eksplorasi yaitu dengan peledakan dinamit, pemukulan dengan palu, dan sebagainya. Metode pasif memanfaatkan gejala-gejala alam yang sudah ada, seperti gempa bumi, baik yang diakibatkan oleh letusan gunung berapi maupun gempa tektonik.

Pada saat terjadi gempa bumi, sejumlah besar energi dilepaskan dari sumber gempa atau fokus. Energi ini akan dipancarkan ke segala arah melalui usikan (*disturbance*) yang menjalar ke seluruh bagian bumi karena adanya sifat elastisitas material bumi. Usikan yang menjalar dalam medium elastik disebut gelombang elastik.

Penjalaran gelombang seismik menembus struktur perlapisan bumi sangat bergantung pada sifat elastisitas batu-batuan yang dilaluinya. Dasar teori untuk menjelaskan kronologis mekanisme maupun sifat fisis gelombang didasarkan pada teori deformasi dan elastisitas media yang dilalui gelombang seismik. Pendekatan teori deformasi didasarkan pada model tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*).

Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai gaya per satuan luas. Benda elastis yang mengalami stress maka akan terdeformasi atau mengalami perubahan bentuk maupun dimensi. Perubahan tersebut disebut dengan regangan atau *strain*. *Strain* adalah jumlah deformasi per satuan luas. Hukum Hooke menyatakan bahwa *stress* akan sebanding dengan *strain* pada batuan (antara gaya yang diterapkan dan besarnya deformasi).

Asumsi dasar yang digunakan sebagai acuan memandang bumi dalam menjelaskan gelombang seismik yaitu bumi dianggap sebagai media elastik sempurna yang terdiri dari berbagai lapisan dan semua lapisan bumi merupakan media homogen isotropis (Susilawati, 2008: 5-6).

2.4.1 Tipe - Tipe Gelombang Seismik

Gelombang seismik ada yang merambat melalui media perlapisan di dalam bumi disebut sebagai gelombang badan (*body wave*) dan ada juga yang merambat melalui permukaan bumi yang disebut sebagai gelombang permukaan (*surface wave*).

2.4.1.1. Gelombang Badan

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjarannya, gelombang dapat dibedakan atas gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S).

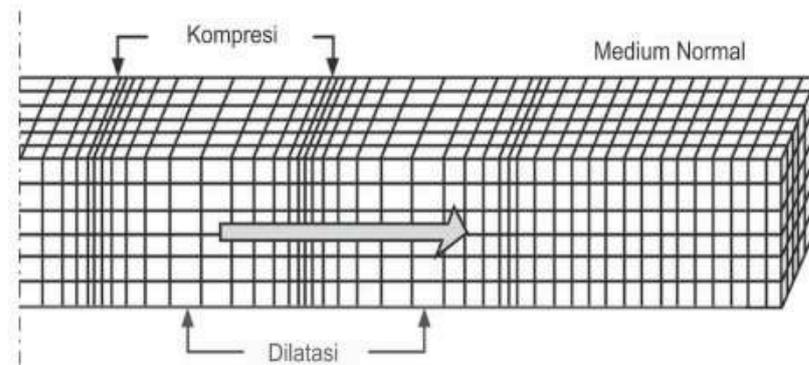
1. Gelombang Primer (P)

Gelombang primer (P) disebut dengan gelombang kompresi atau gelombang longitudinal. Gelombang primer adalah gelombang yang arah pergerakan atau getaran partikel medium searah dengan arah perambatan gelombang tersebut. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat paling besar dibandingkan dengan gelombang seismik yang lain, oleh karena itu gelombang P memiliki waktu tiba terlebih dahulu daripada gelombang S. Gelombang P dapat merambat melalui medium padat, cair, dan gas.

Persamaan besar kecepatan penjaran gelombang P dinyatakan dengan persamaan 2.1 berikut.

$$V_p = \alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

dengan V_p merupakan kecepatan penjaran gelombang P, μ merupakan modulus geser, ρ merupakan densitas material yang dilalui gelombang, dan λ merupakan konstanta Lamé. Gambar 2.9 di bawah ini menunjukkan arah gerakan partikel gelombang P searah dengan arah rambat gelombangnya.



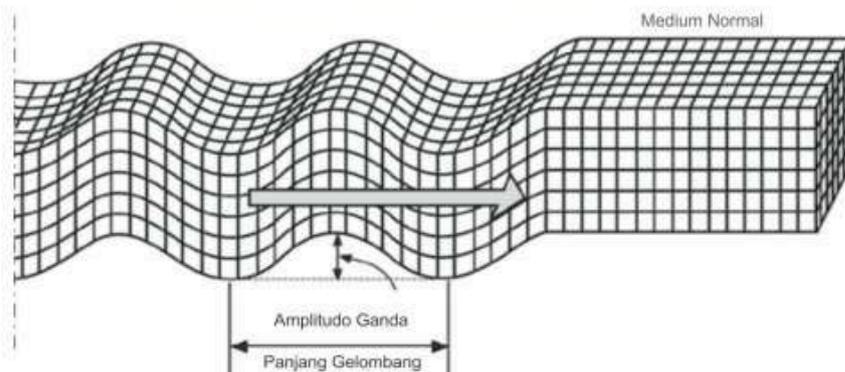
Gambar 2.9 Ilustrasi gerak gelombang primer (P) (Elnashai & Sarno, 2008)

2. Gelombang Sekunder (S)

Gelombang Sekunder (S) disebut juga gelombang *shear* atau gelombang transversal. Gelombang sekunder adalah gelombang yang arah getarannya tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang seperti terlihat pada Gambar 2.10. Gelombang ini memiliki cepat rambat yang lebih lambat bila dibandingkan dengan gelombang P dan hanya dapat merambat pada medium padat saja. Persamaan besar kecepatan gelombang S dinyatakan sebagai berikut:

$$V_s = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

dengan V_s merupakan kecepatan gelombang S.



Gambar 2.10 Ilustrasi gerak gelombang sekunder (S) (Elnashai & Sarno, 2008)

2.4.1.2 Gelombang Permukaan

Gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastik. Gelombang ini dapat menjelaskan struktur mantel atas dan permukaan kerak bumi (*crust*) (Susilawati, 2008: 19). Jenis gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang love.

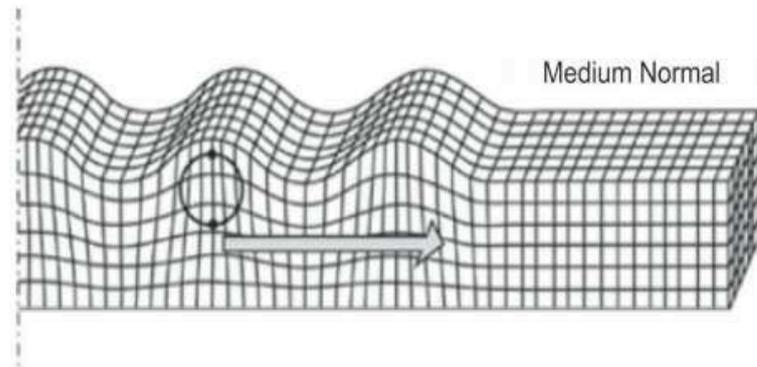
1. Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang gerakan partikel medianya merupakan kombinasi gerakan yang disebabkan oleh gelombang P dan gelombang S. Orbit gerakan partikelnya merupakan gerakan eliptik dengan sumbu mayor elips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjarannya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11. Gelombang Rayleigh dapat merambat pada permukaan bebas medium berlapis maupun homogen. Waktu perambatan gelombang Rayleigh lebih lambat daripada gelombang Love.

Besar kecepatan gelombang Rayleigh dirumuskan sebagai:

$$V_R = 0,92\sqrt{V_S} \quad (2.3)$$

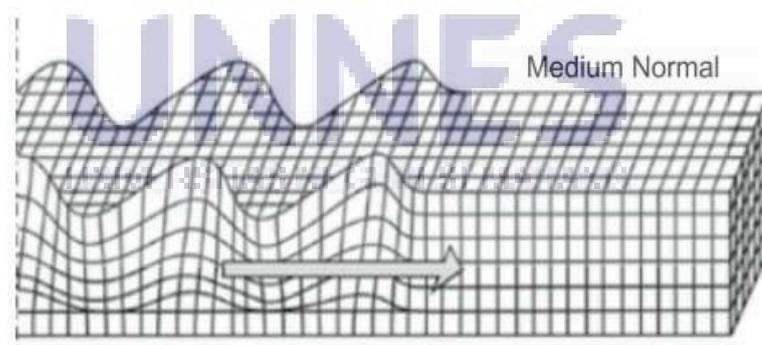
dengan V_R merupakan kecepatan gelombang Rayleigh dan V_S merupakan kecepatan gelombang S.



Gambar 2.11 Ilustrasi gerak gelombang Rayleigh (Elnashai & Sarno, 2008)

2. Gelombang Love

Gelombang love merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal, yakni merupakan gelombang S yang penjarannya paralel dengan permukaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. Kecepatan penjaran gelombang love bergantung panjang gelombangnya dan bervariasi sepanjang permukaan. Secara umum kecepatan gelombang love dinyatakan sebagai $V_R < V_Q < V_S$.



Gambar 2.12 Ilustrasi gerak gelombang Love (Elnashai & Sarno, 2008)

2.5 Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran tanah selain gempa bumi, bisa disebabkan oleh aktivitas manusia maupun aktivitas alam. Mikrotremor dapat terjadi karena getaran akibat orang yang sedang berjalan, getaran mobil, getaran mesin-mesin pabrik, gerakan angin, gelombang laut, atau getaran alamiah dari tanah. Mikrotremor adalah getaran natural tanah yang memiliki perpindahan amplitudo sekitar 0,1–1 mikron dan kecepatan 0,001-0,01 cm/s yang dapat dideteksi oleh seismograf tertentu (Mirzaoglu, 2003). Kaitannya dengan mikroseismik, mikrotremor merupakan getaran tanah yang menjalar dalam bentuk gelombang yang disebut gelombang mikroseismik.

Mikrotremor dapat diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang berada di lapisan sedimen permukaan dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap yang disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah atau kegiatan alam lainnya. Dalam kajian teknik kegempaan, litologi yang lebih lunak mempunyai resiko yang lebih tinggi bila digoncang gelombang gempa bumi dikarenakan mengalami penguatan (amplifikasi) gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak (Kanai, 1983).

Mikrotremor juga dikenal sebagai getaran alam (*ambient noise*) yang berasal dari dua sumber yaitu alam dan manusia. Nilai amplitudo *ambient noise* seismik tidak besar tetapi terjadi secara terus menerus. Sumber mikrotremor berupa alam menghasilkan nilai frekuensi rendah yaitu di bawah 1 Hz. Gelombang laut menimbulkan *ambient vibration* dengan frekuensi sekitar 0,2 Hz sedangkan interaksi antara gelombang laut dan pantai menghasilkan nilai

frekuensi sekitar 0,5 Hz. Frekuensi tinggi yaitu lebih dari 1 Hz bisa ditimbulkan oleh angin dan aliran air. Sumber utama yang menghasilkan nilai frekuensi tinggi yaitu aktifitas manusia seperti lalu lintas kendaraan, mesin, dan lainnya (Rahmatullah, 2013: 23).

Perekaman mikrotremor tidak berbeda dengan perekaman gelombang seismik pada seismometer. Alat yang digunakan pun merupakan seismometer. Untuk metode mikrotremor diperlukan seismometer yang memiliki tiga komponen untuk merekam gelombang yaitu komponen EW (*East-West*), komponen NS (*North-South*), dan komponen vertikal (*up-down*). Perekaman mikrotremor tidak membutuhkan sumber buatan atau sumber berupa gempa bumi, namun pengukuran langsung dilakukan karena yang direkam merupakan gelombang yang timbul dari alam.

Data mikrotremor dipengaruhi oleh gelombang seismik yang merambat pada batuan keras dan lapisan tanah permukaan atau lapisan sedimen. Gelombang yang ada pada mikrotremor terdiri dari gelombang badan dan gelombang Rayleigh. Gelombang Rayleigh merambat pada permukaan tanah sedangkan gelombang badan merambat pada batuan dasar.

Pengujian mikrotremor telah banyak dilakukan diantaranya untuk menentukan frekuensi natural bangunan dan menentukan rasio redamannya (Ayi dan Bahri, 2012), mengetahui kerentanan dan menentukan karakteristik dinamis bangunan (Hernanti *et al.*, 2014) (Nashir & Bahri, 2013), dan juga mengidentifikasi faktor dominan penyebab kerentanan bangunan (Zulfiar *et al.*, 2014). Metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik bangunan tanpa

merusak bangunan tersebut adalah pengujian mikrotremor yang direkam pada setiap lantai bangunan dengan menggunakan gangguan alami berupa *ambient noise*, sehingga bisa dikatakan bahwa mikrotremor didasarkan pada perekaman *ambient noise* untuk menentukan karakteristik suatu bangunan berdasarkan frekuensi natural, damping rasio, dan perpindahan amplifikasi bangunan.

2.6 Mikrotremor pada Bangunan

Pengukuran mikrotremor pada bangunan dilakukan di setiap lantai bangunan dengan alat seismometer tiga komponen yaitu dua komponen horizontal arah Utara-Selatan (North-South) dan Timur-Barat (East-West) serta satu komponen vertikal. Peralatan pengukuran dimungkinkan diletakkan di dekat pusat massa bangunan dan dekat dengan dinding bangunan tersebut. SESAME (2004) menyarankan lama pengukuran yaitu selama 10-15 menit, karena biasanya bangunan memiliki frekuensi natural rata-rata lebih dari 1 Hz dan kurang dari 8 Hz, sedangkan frekuensi di bawah 1 Hz diabaikan. Jarak pengukuran bangunan dengan struktur tanah diusahakan dekat dan pada kondisi geologi yang sama. Selama ini belum ada referensi yang menyebutkan parameter jarak minimum pengukuran antara bangunan dan tanah.

Pengolahan data yang digunakan pada pengukuran bangunan menggunakan metode FSR (Floor Spectral Ratio) yang direkomendasikan oleh Gosar (2010). Menurut Sato *et al* (2008) mengidentifikasi kerusakan bangunan menggunakan indeks kerentanan untuk mengestimasi struktur dari parameter fungsi perpindahan. Frekuensi dan rasio redaman bangunan sebelum gempa lebih

kecil daripada setelah gempa. Ini berarti menunjukkan bahwa parameter frekuensi dan rasio redaman berbanding lurus dengan kekuatan bangunan. Indeks kerentanan juga mampu menilai kerusakan bangunan pada saat gempa, yang menunjukkan bahwa kelemahan bangunan dari getaran gempa adalah langsung sebanding dengan indeks kerentanan.

2.7 *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)*

Metode HVSr pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Irigashi (1971) yang kemudian disempurnakan oleh Nakamura (1989), sehingga biasa dikenal dengan nama metode Nakamura. Metode HVSr merupakan metode yang membandingkan spektrum komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari gelombang mikrotremor. Mikrotremor terdiri dari ragam dasar gelombang Rayleigh, diduga bahwa periode puncak perbandingan H/V mikrotremor memberikan dasar dari periode gelombang S. Perbandingan H/V pada mikrotremor adalah perbandingan kedua komponen secara teoritis yang menghasilkan suatu nilai. Periode dominan suatu lokasi secara dasar dapat diperkirakan dari periode puncak perbandingan H/V mikrotremor.

Metode HVSr didasari oleh terperangkapnya getaran gelombang geser (gelombang SH) pada medium sedimen di atas bedrock. Dengan kata lain gelombang SH berperan sangat penting di dalam kurva HVSr yang direpresentasikan oleh persamaan 2.4 berikut ini:

$$f = \frac{V_s}{4h} \quad (2.4)$$

dengan f , V_s , dan h berturut-turut menunjukkan frekuensi natural, kecepatan gelombang SH, dan ketebalan sedimen. Dari persamaan 2.4, bisa disimpulkan bahwa frekuensi natural berbanding lurus terhadap kecepatan gelombang SH dan berbanding terbalik terhadap ketebalan sedimen.

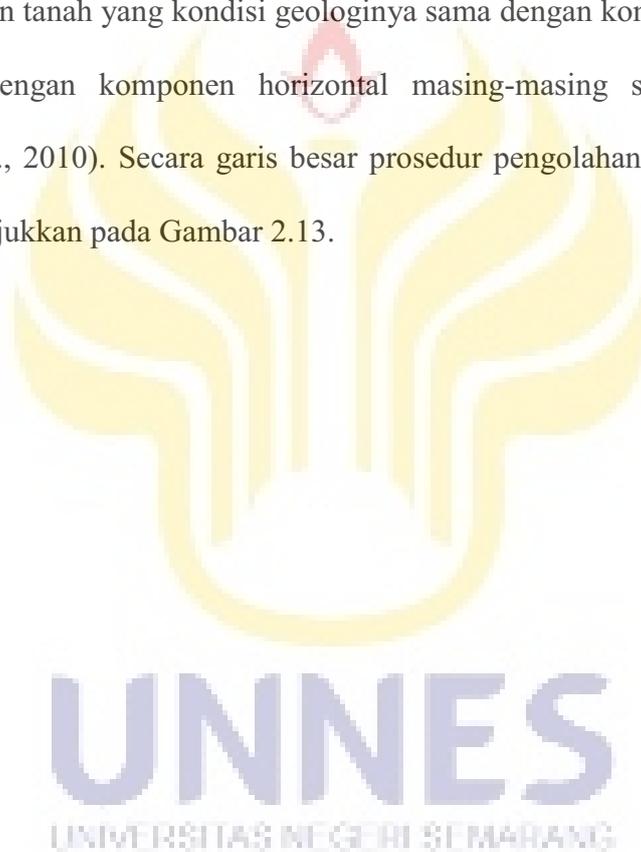
Pada analisis mikrotremor, HVSr digunakan untuk karakterisasi suatu wilayah. Dalam penggunaan metode ini, digunakan beberapa asumsi (Nakamura, 1989) bahwa:

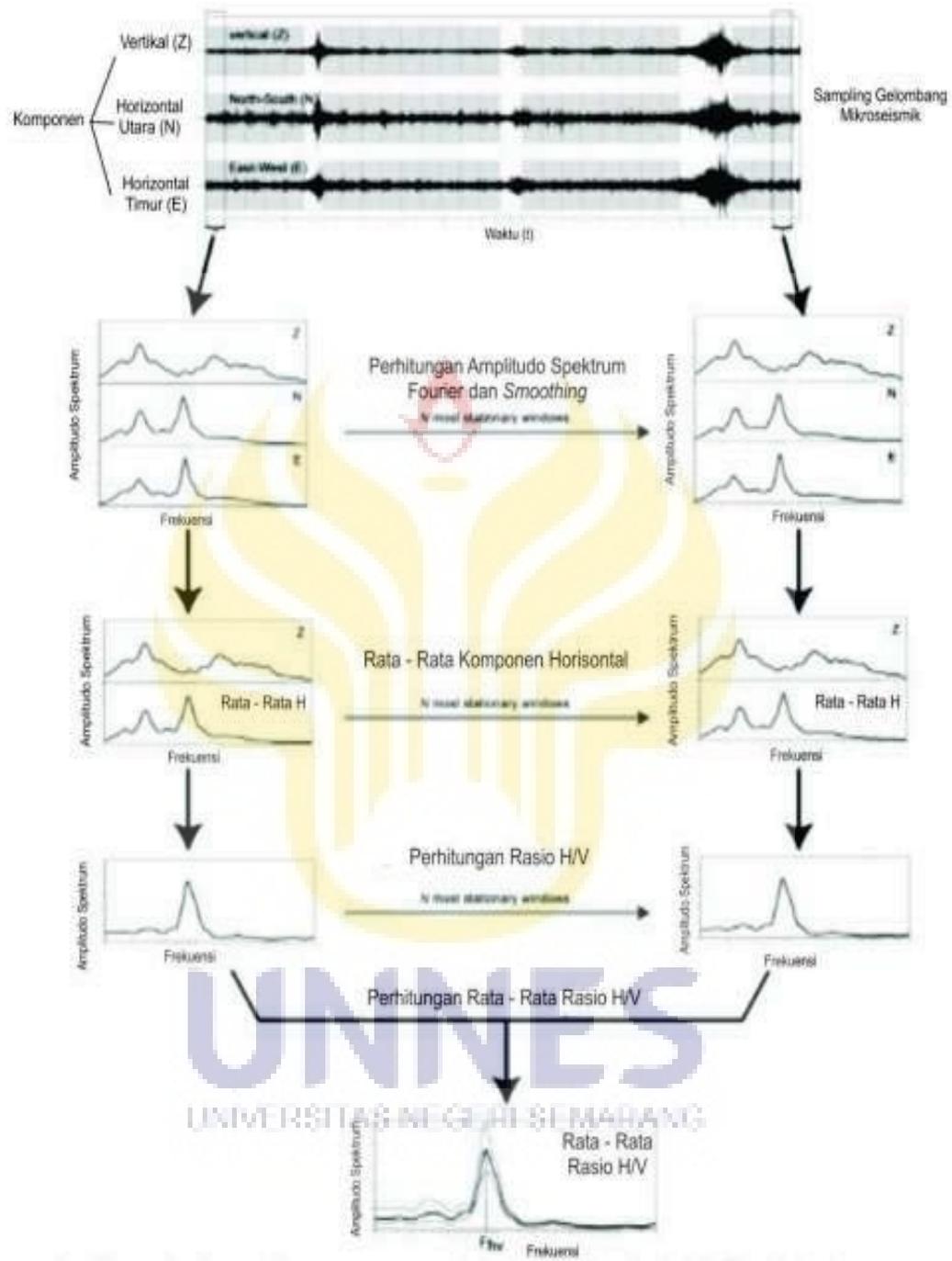
1. Mikrotremor sebagian besar terdiri dari gelombang geser.
2. Komponen vertikal gelombang tidak mengalami amplifikasi lapisan sedimen dan hanya komponen horizontal yang teramplifikasi,
3. Tidak ada amplitude yang berlaku dengan arah yang spesifik pada *bedrock* dengan getaran ke segala arah.
4. Gelombang Rayleigh diasumsikan sebagai noise mikrotremor dan diusulkan metode untuk mengeliminasi efek gelombang Rayleigh.

Metode HVSr biasanya digunakan pada seismik pasif tiga komponen yaitu dua komponen horizontal Timur-Barat (*East-West*) dan Utara-Selatan (*North-South*) dan satu komponen vertikal. Penggunaan mikrotremor sendiri telah banyak dilakukan untuk mengidentifikasi resonansi frekuensi dasar bangunan dan struktur tanah di bawahnya. Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSr ialah frekuensi natural dan amplifikasi. HVSr yang terukur pada tanah yang bertujuan untuk karakterisasi geologi setempat, frekuensi natural, dan amplifikasi berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan (Herak, 2008).

Sedangkan HVSR yang terukur pada bangunan berkaitan dengan kekuatan bangunan dan keseimbangan bangunan.

Pada analisis HVSR, sedimen mungkin terkontaminasi respon bangunan, sehingga identifikasi resonansi dimungkinkan salah. Metode ini dilakukan dengan cara membandingkan rasio selisih spektrum masing-masing komponen horizontal bangunan dan tanah yang kondisi geologinya sama dengan kondisi tanah di bawah bangunan dengan komponen horizontal masing-masing spektrum bangunan (Herak *et al.*, 2010). Secara garis besar prosedur pengolahan data menggunakan HVSR ditunjukkan pada Gambar 2.13.

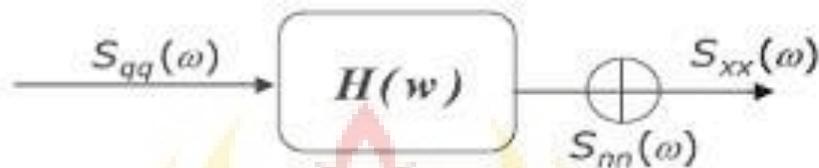




Gambar 2.13 Deskripsi Komputasi Metode HVSR (Nakamura, 1989 (Modifikasi Sunardi *et al.*, 2012))

2.8 Floor Spectral Ratio (FSR)

Metode FSR (Floor Spectral Ratio) ini digunakan untuk menganalisis dan mengetahui frekuensi natural dan amplifikasi bangunan. Konsep dari metode FSR ditunjukkan pada Gambar 2.14 sebagai berikut:



Gambar 2.14 Skema model metode FSR

dimana $H(\omega)$ adalah karakter bangunan (amplifikasi bangunan), S_{qq} respon getaran dari bangunan, dan S_{xx} respon getaran dari bangunan setelah terjadi getaran seismik. Metode FSR ini yaitu metode fungsi transfer dari tiap lantai antara spektral bangunan dan spektral tanah. Fungsi transfer dari struktur telah diperkirakan oleh rasio spektral struktur dan spektral tanah atau spektral bidang bebas, ini disebut *floor spectral ratio* (FSR). Menurut Gosar (2010) *Floor Spectral Ratio* (FSR) merupakan metode standar untuk evaluasi kekuatan bangunan yang disebabkan getaran seismik dan karakteristik pembangunan yang dapat dilakukan dengan pencatatan rekaman mikrotremor.

Menurut Nakamura, sebagaimana dikutip oleh Ayi & Bahri (2012), indeks kerentanan struktur terhadap bencana gempa dapat mengestimasi dengan menggunakan sudut drift. Hal tersebut terkait dengan percepatan gempa input dan perpindahan dari setiap lantai. Parameter ini diperkirakan dari frekuensi dasar dan amplitudo dari setiap lantai yang diperoleh fungsi transfer dari struktur.

Analisis FSR menggunakan software geopsy, tahap awalnya adalah analisis spektrum *Fourier* yang berfungsi untuk mengubah data mikrotremor awal

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.

2.9 Frekuensi Natural Tanah (f_t)

Frekuensi natural tanah adalah nilai frekuensi yang sering muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut. Nilai frekuensi natural tanah dapat menunjukkan jenis karakteristik batuan di wilayah tersebut. Lachet dan Brad (1994) melakukan uji simulasi dengan menggunakan model struktur geologi sederhana dengan kombinasi variasi kontras kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan soil. Hasil simulasi menunjukkan nilai puncak frekuensi berubah terhadap variasi kondisi geologi. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Nilai frekuensi natural tanah mempengaruhi tebal tidaknya lapisan sedimen pada suatu daerah (Shaleha *et al.*, 2016). Semakin rendah nilai frekuensi natural tanah maka lapisan sedimen di daerah tersebut semakin tebal dan semakin besar nilai frekuensi natural tanah, maka lapisan sedimennya akan semakin tipis. Hal tersebut juga dapat menunjukkan kedalaman dari batuan yang lebih keras atau bedrock (Sulistiawan *et al.*, 2016).

Tabel 2.2 Kalisifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi natural (Sumber: Arifin *et al.*, 2013).

Klasifikasi Tanah	Frekuensi Natural (Hz)	Klasifikasi Kanai	Ketebalan Sedimen Permukaan
Jenis I	6,667-20	Batuan tersier atau lebih tua yang terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dll.	Sangat tipis dan didominasi oleh batuan keras.
Jenis II	10-4	Batuan alluvial dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay</i> , dll.	Menengah (5-10 m)
Jenis III	2,5-4	Batuan alluvial dengan ketebalan >5m. Terdiri dari <i>sandy gravel, sandy hard clay</i> , dll.	Tebal (10-30 m)
Jenis IV	<2,5	Batuan alluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>topsoil</i> , lumpur, dll.	Sangat tebal (>30 m)

2.10 Frekuensi Natural Bangunan (f_0)

Nilai frekuensi natural menyatakan frekuensi alami yang terdapat di daerah tersebut. Apabila terjadi gempa atau gangguan berupa getaran yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi natural, maka akan terjadi resonansi yang mengakibatkan amplifikasi gelombang seismik di area tersebut. Nilai frekuensi yang dihasilkan dari pengujian mikrotremor yaitu antara 0,5-20 Hz dan untuk mikrotremor frekuensi kecil bisa mencapai 0,2 Hz.

Struktur bangunan yang memiliki frekuensi natural (f_0) sama dengan nilai frekuensi natural tanah (f_t) akan mengalami resonansi jika terjadi gempa bumi. Efek resonansi akan memperkuat getaran gempa bumi sehingga menyebabkan bangunan akan roboh saat terjadi getaran gempa bumi kuat. Sehingga setelah dilakukan survei mikrotremor, dianjurkan untuk membangun bangunan yang tidak

sama dengan frekuensi resonansi tanah untuk menghindari terjadinya efek resonansi saat gempa bumi terjadi.

Menurut Tuladhar et al., sebagaimana dikutip oleh Rahmatullah (2013: 32), selain bahaya resonansi getaran seismik, karakteristik f_0 sangat rendah akan rentan terhadap bahaya getaran gelombang seismik periode panjang yang dapat mengancam gedung-gedung bertingkat tinggi. Dengan mengetahui frekuensi natural dan memanfaatkannya dalam merencanakan bangunan, diharapkan akan dapat mengurangi resiko bahaya gempa bumi yang akan mungkin terjadi pada masa yang akan datang.

Nilai frekuensi natural bangunan diperoleh dengan menggunakan analisis FSR. Hasil analisis spektrum pada pengukuran lantai bangunan terhadap tanah di bawahnya digunakan untuk mencari nilai frekuensi natural bangunan. Proses perhitungan data dilakukan untuk menentukan nilai frekuensi natural bangunan dengan menggunakan rumus berikut ini:

$$f_0(FSR) = \frac{f_b^{NS}}{f_t^{NS}} \quad (2.5)$$

$$f_0(FSR) = \frac{f_b^{EW}}{f_t^{EW}} \quad (2.6)$$

Persamaan 2.5 dan 2.6 adalah persamaan analisis FSR dimana f_b adalah nilai frekuensi bangunan, f_t adalah nilai frekuensi tanah, dan NS serta EW adalah komponen masing-masing data (Prakosa *et al.*, 2014).

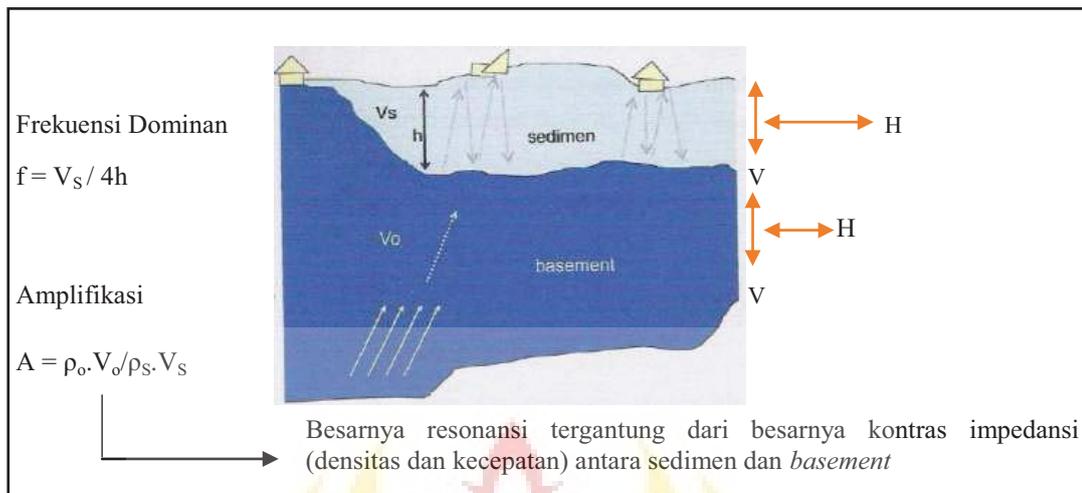
2.11 Amplifikasi

Amplifikasi suatu gelombang dapat terjadi ketika suatu benda yang memiliki frekuensi diusik oleh gelombang lain dengan frekuensi yang sama.

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Konsep dasar fenomena amplifikasi gelombang seismik oleh adanya sedimen yang berada di atas *basement* dengan perbedaan densitas dan kecepatan V_s , V_0 yang mencolok, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.

Gelombang seismik akan mengalami perbesaran, jika merambat ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awalnya. Semakin besar perbedaan itu, maka perbesaran yang dialami gelombang tersebut akan semakin besar. Nilai faktor penguatan (amplifikasi) tanah berkaitan dengan perbandingan kontras impedansi lapisan permukaan dengan lapisan di bawahnya. Bila perbandingan kontras impedansi kedua lapisan tersebut tinggi maka nilai faktor penguatan juga tinggi, begitu pula sebaliknya (Nakamura, 2000).

Faktor amplifikasi memberikan gambaran tentang perubahan (pembesaran) percepatan gerakan tanah dari batuan dasar ke permukaan. Pembesaran percepatan tanah dari batuan dasar ke permukaan disebabkan karena perbedaan kecepatan gerakan gelombang geser (V_s) di batuan dasar dan pada lapisan tanah (sedimen). Nilai V_s dari batuan dasar ke permukaan akan mengecil. Nilai V_s yang makin mengecil menyebabkan kecilnya nilai modulus geser (G_s) dan faktor redaman, sehingga percepatan tanah akan makin membesar. Semakin besar nilai faktor amplifikasi maka semakin besar pula percepatan gerakan tanah di permukaan (Partono *et al.*, 2013).



Gambar 2.15 Konsep dasar amplifikasi gelombang seismik (Cipta, 2009)

2.12 Resonansi

Apabila periode bangunan sama dengan periode getaran seismik yang sampai di permukaan, maka akan terjadi resonansi dan interferensi getaran sehingga meningkatkan intensitas kerusakan akibat getaran seismik tersebut. Berdasarkan hal tersebut maka dalam pembangunan gedung harus mempertimbangkan kemungkinan terjadinya resonansi getaran (Subardjo, 2008). Hal ini sama dengan prinsip teori yang digunakan pada suatu sistem teredam yang digerakkan oleh suatu gaya eksternal yang berubah secara sinusoidal terhadap waktu, sistem beresilasi sesuai dengan frekuensi gaya paksa. Jika frekuensi gaya paksa (frekuensi getaran seismik) sama dengan atau mendekati frekuensi alam sistem (frekuensi alami pada bangunan), maka sistem akan beresilasi dengan amplitude gaya paksa, fenomena ini disebut resonansi (Tipler, 1991).

2.13 Indeks Kerentanan Bangunan (K_{Tj})

Indeks kerentanan bangunan dapat diperkirakan dari deformasi struktur yang terkait dengan gerakan seismik dari tanah dan karakteristik dinamik dari lapisan permukaan dan struktur. Untuk memperkirakan kemungkinan kerusakan akibat gempa di masa depan, sangat penting untuk mengetahui kondisi daya tahan sekarang antara tanah dan struktur dengan benar. Titik lemah pada struktur yang rentan harus diselidiki terlebih dahulu. Gambar 2.16 menunjukkan bentuk dan karakteristik deformasi struktur lantai ke-n.

Perpindahan horisontal pada lantai ke-j δ_j dapat ditulis seperti persamaan berikut,

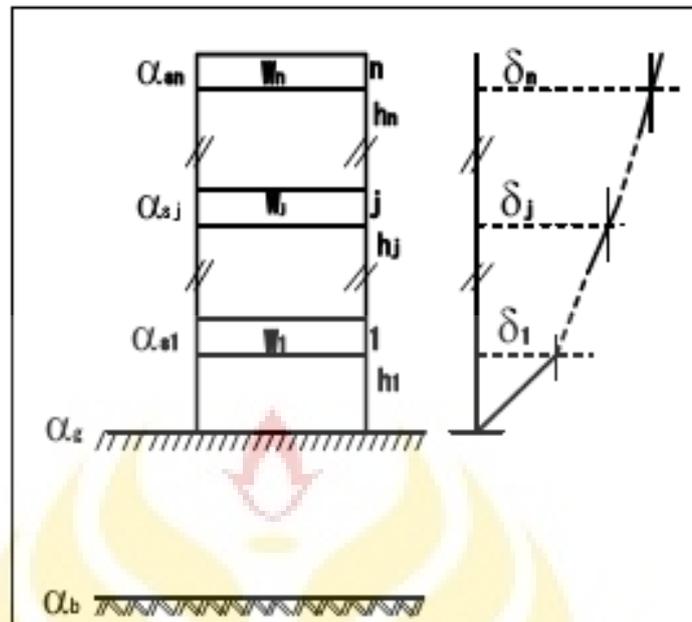
$$\delta_j = \frac{\alpha_{sj}}{(2\pi F_s)^2} \quad (2.8)$$

dimana F_0 adalah frekuensi natural struktur. Sudut drift untuk lantai ke-j ditunjukkan seperti persamaan berikut,

$$\gamma_j = \frac{\delta_j - \delta_{j-1}}{h_j} = \frac{\alpha_{sj} - \alpha_{sj-1}}{4\pi^2 F_s^2 h_j} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{sj} &= A_{sj} \cdot \alpha_g \\ &= A_{sj} \cdot A_g \cdot \alpha_b \\ &= A_{sgj} \cdot \alpha_b \end{aligned} \quad (2.10)$$

dimana A_g dan A_{sj} adalah faktor amplifikasi untuk tanah dan struktur lantai ke-j. A_{sj} berasal dari S_{jh} dan S_{gh} yang merupakan spektrum horisontal dari lantai ke-j dan lantai dasar masing-masing dan memrepresentasikan kombinasi faktor amplifikasi dari tanah dan struktur. α_b dan α_g adalah percepatan horisontal lantai bawah dan tanah.



Gambar 2.16 Skema bentuk model struktur lantai ke-n. δ_j adalah perpindahan horisontal, W adalah berat dari lantai ke-j, h_j adalah ketinggian kolom ke-j, $\alpha_b, \alpha_g, \alpha_{s,j}$ adalah percepatan horisontal dari bawah tanah, permukaan tanah dan lantai struktur ke-j (Nakamura *et al.*, 2000).

Jika satuan sudut drift γ_j adalah 10^{-6} , h_j adalah meter, dan percepatan seismik diukur dalam satuan Gal (cm/sec^2), dibandingkan dengan penyesuaian satuan, maka persamaan (2.9) dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut.

$$\gamma_j = 10^4 \cdot \frac{A_{sgj} - A_{sgj-1}}{4\pi^2 f_0^2 \cdot h_j} \cdot \alpha_b \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.11) nilai K_{Tgj} (mewakili indeks kerentanan bangunan untuk tanah dan bangunan) ditunjukkan seperti,

$$K_{Tgj} = 10^4 (A_{sgj} - A_{sgj-1}) / (4\pi^2 F_0^2 \cdot h_j) \quad (2.12)$$

satuan dari nilai K di atas menjadi $1/\text{Gal}$. Berdasarkan persamaan itu, indeks kerentanan bangunan dapat dituliskan menjadi,

$$K_{Tj} = 10^4(A_{Sj} - A_{Sj-1})/(4\pi^2 F_0^2 \cdot h_j) \quad (2.13)$$

Kecepatan maksimum dari kolom ke-j α_{baj} (dalam Gal) berasal dari persamaan (2.11) adalah

$$\alpha_{saj} = 10^4 \cdot \frac{4\pi^2 f_0^2 \cdot h_j}{A_{Sj} - A_{Sj-1}} \cdot \gamma_{aj} \quad (2.14)$$

Nilai \bar{K}_{Tj} sebagai rata-rata dari nilai K_{Tj} untuk setiap struktur diperoleh dengan menggunakan rumus 3.4 berikut.

$$\bar{K}_{Tj} = \frac{A}{(2\pi f_0)^2} \frac{10000}{H} \quad (2.15)$$

dimana H adalah ketinggian lantai atas bangunan dan A adalah amplifikasi lantai tertinggi pada bangunan (Sato *et al.*, 2000).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai frekuensi natural bangunan pada gedung yang dihasilkan melalui pengujian mikrotremor, antara lain:
 - a. pada gedung F1 Sabang Untag berkisar antara 1,03-4,31 Hz untuk komponen EW dan 1,03-4,51 Hz untuk komponen NS,
 - b. pada gedung F2 Merauke Untag berkisar antara 1,02-1,67 Hz untuk komponen EW dan 1.02-1.39 Hz untuk komponen NS, dan
 - c. pada gedung Justinus Unika berkisar antara 0,93-5,27 Hz untuk komponen EW dan 0,85-5,14 Hz untuk komponen NS.

Nilai resonansi bangunan yang dihasilkan yaitu:

- a. pada gedung F1 Sabang Untag berkisar antara 30%-67% untuk komponen EW dan 44%-67% untuk komponen NS,
- b. pada gedung F2 Merauke Untag berkisar antara 47%-68% untuk komponen EW dan 56%-67% untuk komponen NS, dan
- c. pada gedung Justinus Unika berkisar antara 14%-161% untuk komponen EW dan 20%-154% untuk komponen NS.

Nilai indeks kerentanan bangunan yang diperoleh yaitu:

- a. pada gedung F1 Sabang Untag sebesar 14,92 untuk komponen EW dan 18,66 untuk komponen NS,
 - b. pada gedung F2 Merauke Untag sebesar 27,24 untuk komponen EW dan 47,83 untuk komponen NS, dan
 - c. pada gedung Justinus Unika sebesar 3,22 untuk komponen EW dan 5,22 untuk komponen NS.
2. Berdasarkan nilai indeks kerentanan bangunan pada gedung penelitian, gedung F2 Merauke Untag mempunyai nilai indeks kerentanan bangunan paling tinggi dibanding gedung yang lain. Hal tersebut mengindikasikan bahwa gedung F2 Merauke lebih rentan mengalami kerusakan apabila terjadi getaran seismik atau pergerakan tanah dibandingkan dengan gedung F1 Sabang dan Justinus.

5.2 Saran

Perlu dilakukan penelitian mikrotremor lanjutan secara menyeluruh pada tanah dan bangunan lainnya yang berada di sekitar Jalan Pawiyatan Luhur, Bendan Duwur, Semarang.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, S. S., B. S. Mulyatno, Marjiyono, & R. Setiyanegara. 2013. Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa dan Sekitarnya. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 2(1): 30-40.
- Afifah, R. S. 2011. Pemetaan Geologi Daerah Semarang dan Sekitarnya, Kecamatan Gajahmungkur, Sampangan, Kotamadya Semarang, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah MTG*, 4(2).
- Ayi, V.W. & S. Bahri. 2012. Analisis Mikrotremor untuk Evaluasi Kekuatan Bangunan Studi Kasus Gedung Perpustakaan ITS. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 1(1): 52-56.
- Cipta, A. 2009. *Laporan Penelitian Penyelidikan Amplifikasi Wilayah Seririt, Propinsi Bali*. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Bappeda. 2013. *Semarang Dalam Angka 2012*. Tersedia di <http://bappeda.semarangkota.go.id/v2/wp-content/uploads/2014/04/Semarang-Dalam-Angka-Tahun-2012.pdf> [diakses pada 04/03/2016].
- Elnashai, A.S. & L.D. Sarno. 2008. *Fundamentals of Earthquake Engineering From Source to Fragility*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gosar, A. 2010. Site Effects and Soil-Structure Resonance Study in The Kobarid Basin (NW Slovenia) Using Microtremors. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 10:761-772.
- Herak, M. 2008. Model HVSR-A Matlabs Tool to Model Horizontal to Vertical Spectral Ratio of Ambient Noise. *Journal Computer and Geosciences*, 34(11): 1514-1526.
- Herak, M., I. Allegretti, D. Herak, K. Kuk, V. Kuk, K. Marić, & J. Stipčević. 2010. *HVSR of Ambient Noise in Ston (Croatia): Comparison with The Damage Distribution After The 1996 Ston-Slano Earthquake*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(3): 483-499.
- Hernanti, H.Y., S.A. Kristiawan, & S. As'ad. 2014. Evaluasi Kerentanan Bangunan dengan Pengujian Mikrotremor dan Kinerja Dinamik Bangunan terhadap Gempa disertai Metode Rehabilitasi Bangunan Rusunawa Lubuk Buaya Padang, *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1).

- Kanai, K. 1983. *Engineering Seismology*. Tokyo: University of Tokyo Press.
- Karnawati, D. 2005. *Bencana Alam Gerakan Massa Tanah di Indonesia dan Upaya Penanggulangannya*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Karyadi, D. 2008. *Penentuan Pola Mekanisme Sumber Gempa Bumi Berdasarkan Polarisasi Pertama Gelombang P (Gempa Bumi Bengkulu 12 September 2007)*. Jakarta: Akademi Meteorologi dan Geofisika.
- Lachet, C. & P.Y. Bard. 2014. Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*, 42: 377-397.
- Mirzaoglu, M. & U. Dykmen. 2003. Application of Microtremors to Seismic Microzoning Procedure. *Journal of The Balkan Geophysical Society*, 6(3): 143-156.
- 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):25-33.
- Nakamura, Y. 2000. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applicatios. *Proceeding 12th World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand: Auckland.
- Nakamura, Y., E.D. Gurler, J. Saita, A. Rovelli, & S. Donati. 2000. Vulnerability Investigation of Roman Colloseum Using microtremor. *Proceeding 12th World Conference on Earthquake Engineering*. New Zealand: Auckland.
- Sato, T., Y. Nakamura, & J. Saita. 2008. *The Change of The Dynamic Characteristics Using Microtremor*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Nashir, M.A.L. & A.S. Bahri. 2013. Karakterisasi Kekuatan Bangunan Wilayah Surabaya Jawa Timur Menggunakan Analisis Mikrotremor. *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, 1(1): 1-6.
- Nugraha, J., G. Pasau, B. Sunardi, & S. Widiyantoro. 2013. *Analisis Hazard Gempa dan Iseismal untuk Wilayah Jawa-Bali-NTB*. Jakarta: BMKG.
- Nugraha, P., J. Hermiansyah, & K.D. Pancawati. 2014. *Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas untuk Identifikasi Struktur Bawah Tanah Jalan Pawiyatan Luhur Untag*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Nur, A. M. 2010. Gempa Bumi, Tsunami, dan Mitigasinya. Balai Informasi dan Konservasi Kebumian Karangsembung, 7(1). Kebumen: LIPI.

- Partono, W., M. Irsyam., S. Prabandiyani. R.W., & S. Maarif. 2013. Aplikasi Metode HVSR pada Perhitungan faktor Amplifikasi di Kota Semarang. *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, 19(2): 125-134.
- Poedjoprajitno, S., J. Wahyudiono, & A. Cita. 2008. Reaktivitas Sesar Kaligarang, Semarang. *Jurnal Geologi Indonesia*, 3(3): 129-138.
- Prakosa, P.T., M. I. Ibad, M.S. Kafi, M. A. Burhanudin, & A. Rahmania. 2014. *Earthquake Microzonation and Strength Building Evaluation at Gelora Bung Tomo Stadium Surabaya Using Micro-Tremor Method*. 7th International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA).
- Rahmatullah, F. S. 2013. *Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Indeks Kerentanan Seismik dan Percepatan Tanah Maksimum Kota Makassar*. Tesis. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- SESAME. 2004. *Guidelines for The Implementation of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation*. European Commission – Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Shaleha, A., Supriyadi, & N. M. D. Putra. 2016. *Identifikasi Struktur Lapisan Tanah Daerah Rawan Longsor di Kecamatan Banyubiru Kabupaten Semarang dengan Metode Horizontal to Vertical Spectral ratio (HVSR)*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Soedarsono. 2012. Kondisi Geologi dan Geomorfologi Kaitannya dengan Degradasi Lingkungan di Kota Semarang. *Jurnal Lingkungan Sultan Agung*, 1(1).
- Soehaimi, A. 2008. Seismotektonik dan Potensi Kegempaan Wilayah Jawa. *Jurnal Geologi Indonesia*, 3(4): 227-240.
- Subardjo. 2008. *Parameter Gempabumi*. Materi Diklat Teknis. Jakarta: BMKG.
- Sulistiawan, H., Supriyadi, & I. Yulianti. 2016. *Analisis Seismic Hazard Berdasarkan Data Peak Ground Acceleration (PGA) dan Kerentanan Gempa Menggunakan Metode Mikroseismik di Daerah Kampus Unnes Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Sunardi, B., Daryono, J. Arifin, P. Susilanto, D. Ngadmanto, B. Nurdiyanto, & Sulastri. 2012. Kajian Potensi Bahaya Gempa Bumi Daerah Sumbawa Berdasarkan Efek Tapak Lokal. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(2): 131-137.

- Susilawati. 2008. *Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian Dalam Bumi*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Thanden, R.E., H. Sumadirdja, P.W. Richards, K. Sutisna, & T.C. Amin. 1996. *Peta Geologi Lembar Magelang Semarang Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- Tipler, P. 1991. *Fisika untuk Sains dan Teknik*. Jakarta: Erlangga.
- Varnes, D.J. 1978. *Slope Movement Types and Processes in Landslides, Analysis and Control Transportation Research Board*. Washington D.C: National Academy of Sciences.
- Warnana, D.D., Triwulan, Sungkomo, & W. Utama. 2011. Assesment to the Soil-Structure Resonance Using Microtremor Analysis on Pare – East Java, Indonesia. *Asian Transactions on Engineering*, 1(4):6-12.
- Zulfiar, M.H., R.Z. Tamin, K.S. Pribadi, & I. Imran. 2014. Identifikasi Faktor Dominan Penyebab Kerentanan Bangunan di Daerah Rawan Gempa, Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 17(2):116-125.
- <http://earthquake.usgs.gov/> Diakses pada tanggal 15 Desember 2015