

Skripsi Geofisika

**ANALISIS FREKUENSI KOMPLEKS GEMPABUMI *LOW*
FREQUENCY** BERDASARKAN DATA SEISMOGRAM
GUNUNG MERAPI PERIODE MEI 2018 – JUNI 2019



MUH. ALFITRA MAHENDRA

H221 15 516

**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**ANALISIS FREKUENSI KOMPLEKS GEMPABUMI *LOW*
FREQUENCY BERDASARKAN DATA SEISMOGRAM
GUNUNG MERAPI PERIODE MEI 2018 – JUNI 2019**

Skripsi untuk Melengkapi Tugas-Tugas dan
Memenuhi Syarat untuk Mencapai Gelar Sarjana



MUH. ALFITRA MAHENDRA

H221 15 516

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

LEMBAR PENGESAHAN

**Analisis Frekuensi Kompleks Gempabumi *Low Frequency*
Berdasarkan Data Seismogram Gunung Merapi Periode Mei 2018
– Juni 2019**

Oleh:

MUH. ALFITRA MAHENDRA

H221 15 516

Disetujui Oleh :

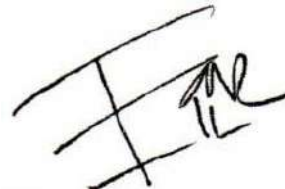
Makassar, 20 Juli 2020

Pembimbing Utama



**Ir. Bambang Harimei, M.Si
NIP. 196105011991031003**

Pembimbing Pertama



**Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., MT
NIP. 199111092019031010**

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi ini merupakan karya orisinil saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk memperoleh gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan lainnya, dimanapun, kecuali yang telah dikutip sesuai kaidah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri dan dibantu oleh pihak pembimbing.

Makassar, 20 Juli 2020

Penulis



Muh. Alfitra Mahendra

ABSTRAK

Gunung Merapi merupakan gunungapi yang paling aktif di Indonesia yang terletak di Daerah Istimewa Yogyakarta. Salah satu klasifikasi gempabumi yang digunakan sebagai pemantauan aktivitas seismik Gunung Merapi adalah Gempa *Low Frequency* (LF). Gempa LF terjadi dikarenakan adanya getaran dari fluida magmatik yang mengisi *crack* atau retakan yang kosong. Oleh karena itu, dilakukan penelitian tentang analisis frekuensi kompleks untuk mengetahui estimasi jenis fluida yang terdapat dalam tubuh Gunung Merapi pada periode Oktober – November 2018. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode Sompi dengan parameter frekuensi kompleks yang terdiri dari frekuensi osilasi (f) dan karakteristik peluruhan gelombang (Q factor). Gempa LF pada periode 08 Oktober – 14 November 2018 mempunyai distribusi nilai Q factor berada pada rentang 17-82 dengan frekuensi dominan terjadi pada rentang 2 – 3 Hz. Hasil analisis frekuensi kompleks memperkirakan bahwa proses keluarnya magma terjadi cenderung secara efusif (lelehan), hal ini ditandai dengan estimasi fluida berupa *gas mixture*, *bubble water* dan *water foam*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi Ilmu pengetahuan dalam memprediksi tipe erupsi dan mitigasi bencana gunungapi

Kata kunci : Frekuensi Kompleks, Merapi, Q Factor, Sompi.

ABSTRACT

Mount Merapi is the most active volcano in Indonesia located in the special region of Yogyakarta. One of the earthquake classification used as monitoring of the seismic activity of Mount Merapi is Low Frequency earthquake (LF). The LF earthquake occurs due to the vibration of the magmatic fluid that fills the crack or the empty cracks. Therefore, research on the analysis of complex frequencies to determine the estimation of the type of fluid contained in the body of Mount Merapi in the period of October – November 2018. This study was conducted using SOMPI method with complex frequency parameters consisting of oscillation frequency (f) and characteristic of waveform decay (Q factor). The LF earthquake in the period of 08 October – 14 November 2018 has a distribution of Q factor values located in the range of 17-82 with the dominant frequency occurring in the range of 2 – 3 Hz. The results of the analysis of complex frequencies estimate that the process of discharge magma occurs effusive (melt), this is characterized by the estimation of fluids such as gas mixture, bubble water and water. The results of this study are expected to be able to have knowledge in predicting the type of eruption and mitigation of volcano disaster

Keywords: Complex Frequency, Sompi, Merapi, Q factor

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Wa Rahmatullaahi Wa Barakaatuuh.

Alhamdulillahirabbil'alamiin. Tidak ada kata yang paling layak penulis ucapkan selain kalimat syukur yang indah ini kepada الله *Subhanahu Wa Ta'ala.* Tuhan semesta alam yang dengan segala Rahman dan Rahim-Nya, penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “**Analisis Frekuensi Kompleks Gempabumi Low Frequency Berdasarkan Data Seismogram Gunung Merapi Periode Mei 2018 – Juni 2019**”. Tidak ada Dzat yang dapat membantu penulis melewati segala lika-liku perjuangan untuk sampai pada tahap akhir penulisan skripsi ini selain Dia, Dzat Maha Sempurna. *Alhamdulillah. Alhamdulillah. Alhamdulillah.*

Shalawat dan Salam tidak luput untuk selalu tucurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad ﷺ. Nabi akhir zaman yang sudah menjadi teladan Umat, dalam berakhlak, berusaha dan berdoa. Insya Allah, setiap laku beliau menjadi cerminan bagi penulis untuk senantiasa berbuat sebaik-sebaiknya, sungguh-sungguhnya, dan seikhlas-ikhlasnya.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis dapat melewati berbagai hambatan yang ada berkat bantuan dari berbagai pihak, terutama dari ciptaan-Nya yang penulis sangat cintai dan hormati yakni **Ayahanda H. Aco Rifai dan Ibunda Hj. Yanti Darwis** serta saudara-saudari terkasih dan tersayang kak **Muh. Yan Aslan**, kak

Indira Pratiwi, dek **Muh. Yaumil Fausi** dan dek **Muh Abdillah** terimakasih atas kasih sayang yang tak terhingga dan segala dukungan yang diberikan kepada penulis tanpa mengenal lelah, baik berupa dukungan moril, material, pengorbanan, dan setiap doa yang senantiasa mereka langitkan untuk penulis. Tidak lupa pula, dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terimakasih yang tulus kepada:

1. Bapak **Ir. Bambang Harimei, M.Si** dan Bapak **Muhammad Fawzy Ismullah M, S.Si., MT.** selaku Pembimbing Utama dan Pertama. Terimakasih atas bimbingan, waktu, arahan, dan segala jenis bantuan yang Bapak berikan selama penyusunan skripsi ini. Kemudian bapak **Dr.Muh. Altin Massinai, MT.Surv** dan ibu **Makhrani, S.Si, M.Si** selaku tim penguji. Terimakasih atas kritik dan saran yang telah diberikan sehingga penulis dapat memperbaiki dan menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Dr. Eng, Amiruddin, S.Si, M.Si** selaku Dekan Fakultas MIPA dan Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika, serta seluruh Staf Fakultas MIPA dan staf Departemen Geofisika yang telah membantu dalam menyelesaikan urusan-urusan akademik, terutama selama pengurusan skripsi ini.
3. Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si, MT** selaku Penasehat Akademik penulis. Terimakasih atas saran dan nasihat-nasihatya. Serta kepada dosen-dosen yang telah mendedikasikan waktunya sebagai pengajar. Terimakasih atas ilmu yang telah diberikan baik di dalam maupun di luar kelas.

4. Kepala BPPTKG ibu **Dr. Dra. Hanik Humaida, M.Sc** yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas bagi penulis untuk mengeksplorasi data seismisitas G.Merapi. Dan Kepala Seksi Gunungapi Merapi BPPTKG Bapak Agus Budi Santoso yang telah bersedia berbagi data, pengalaman dan informasi selama penelitian;
5. Saudara-saudari tak sedarah penulis yaitu **F15IKA** yang selalu menemani, menyemangati, membantu, menghibur, penulis kapanpun dan dimanapun. Terimakasih karena telah memilih berjalan bersama, terimakasih karena selalu ada, terimakasih untuk kebersamaannya selama ini, terimakasih untuk segala yang telah diberikan kepada penulis yang tidak dapat lagi penulis jabarkan satu per satu terutama selama proses penelitian ini. Semoga “**SATU DALAM DEKAPAN**”-nya **kita** selalu hangat dimanapun kaki kita berpijak nantinya.
6. Teman-teman **Geofisika 2015** yang sejak awal penerimaan mahasiswa baru hingga sekarang pun selalu menemani penulis. Terimakasih karena selalu membantu penulis dalam hal apapun, terkhususnya masalah akademik dan terutama dalam proses penelitian ini. Terimakasih untuk kisah-kisah menyenangkannya selama di kelas, di laboratorium dan di lapangan.
7. Keluarga Besar **Himafi FMIPA Unhas**. Kanda-kanda dan adik-adik yang secara langsung maupun tidak langsung, telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih telah menjadi keluarga dan sebaik-

baiknya rumah bagi penulis semenjak penulis bergabung . *Jayalah Himafi Fisika Nan Jaya*.

8. **Keluarga Mahasiswa Fakultas MIPA Unhas**. Kanda-kanda, teman angkatan, dan adik-adik. Terimakasih telah memperkenalkan penulis dunia organisasi yang selalu menjunjung tinggi kebersamaan dan kekeluargaan. Salam *Use your mind be the best*.
9. Teman-teman **TAMPAN OTODIDAK** yang sejak awal penerimaan mahasiswa baru hingga sekarang pun selalu menemani penulis. Serta teman teman **DG SQUAD** yang membantu penulis dalam menghilangkan stress selama proses penyelesaian tugas akhir ini. Terimakasih atas persaudaraannya selama ini.
10. Teman-teman **Pengurus BEM FMIPA Unhas Periode 2018-2019** dan teman-teman **MAPERWA Periode 2019-2020**.
11. Keluarga **POSKO KADING** selaku saudara-saudari penulis yang lahir dan dipertemukan oleh program KKN Gelombang 99 Universitas Hasanuddin Desa Kading, Kecamatan Tanete Riaja, Kabupaten Barru. Terimakasih atas segala bantuan dan kebersamaannya sejak pertama bersama di posko KKN bahkan hingga sekarang.
12. Kepada rekan Kerja Praktek (**Nur Aysyah, Husnul Khatimah, Mustahira, dan Fara**), terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan selama di kantor.
13. Seluruh pihak yang ikut serta membantu dalam penelitian ini namun tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. **TERIMA KASIH**

Terimakasih. Skripsi ini tidak mungkin selesai jika hanya campur tangan Penulis sendirian. Semoga Allah merahmati kita dalam kebaikan-kebaikan ikhlas kita.

Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan dan digunakan sebagaimana mestinya. Mengingat keterbatasan penulis sebagai manusia biasa, kritik dan saran akan sangat membantu untuk mengembangkan kemampuan penulis dalam menyusun penelitian lainnya di kemudian hari.

Wassalamu'alaikum Wa Rahmatullaahi Wa Barakaatuuh

Makassar, 20 Juli 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Hendri' or similar, written in a cursive style.

Penulis

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN PENUNJUK SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
I. 1 Latar belakang	1
I. 2 Rumusan Masalah	6
I. 3 Ruang Lingkup	6
I. 4 Tujuan Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
II. 1 Gunungapi	7
II. 1. 1 Proses Terbentuknya Gunungapi	9
II. 1. 2 Jenis Letusan Gunungapi.....	13
II. 1. 3 Material Gunungapi.....	13
II. 2 Gunung Merapi.....	15
II. 2. 1 Sejarah Terbentuknya Gunung Merapi.....	16
II. 2. 2 Sejarah Letusan Gunung Merapi	18
II. 2. 3 Tipe Gempabumi Gunung Merapi.....	20
II. 2. 4 Jaringan Seismik Gunung Merapi	23
II. 3 Gelombang Seismik	25
II. 3. 1 Gelombang Badan	25
II. 3. 2 Gelombang Permukaan	27
II. 4 Karakteristik Peluruhan Gelombang	28
II.5 Metode Sompi	30
II.6 Fluid – Filled Crack Model	32
II.6.1 <i>Crack</i> yang Mengandung Campuran Gas-Gas.....	36
II.6.2 <i>Crack</i> yang Mengandung Campuran Gas-Cair	38

II.6.3	<i>Crack</i> Mengandung Gas Berdebu dan Berkabut.....	40
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	41
III. 1	Waktu dan Tempat Penelitian	41
III. 2	Alat dan Bahan.....	41
III. 2. 1	Alat	41
III. 2. 2	Bahan.....	41
III. 3	Prosedur dan Pengumpulan Data.....	41
III. 3. 1	Pre-Processing	42
III. 3. 2	Processing.....	43
III. 3. 3	Post-processing.....	50
III. 4	Bagan Alir Penelitian	51
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
IV. 1	Kronologi Gunung Merapi Mei 2018 – Juni 2019	52
IV. 2	Karakteristik Gempabumi <i>Low Frequency</i> (LF).....	55
IV. 3	Analisis Frekuensi Kompleks	59
BAB V	PENUTUP	65
V.1	Kesimpulan	65
V.2	Saran	66
DAFTAR PUSTAKA.....		67
LAMPIRAN.....		70

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Jumlah sebaran gunungapi di Indonesia (ESDM, 2014)	8
Tabel 2. 2 Stasiun jaringan seismik Gunung Merapi (BPPTKG, 2016).....	24
Tabel 2.3 Properti matriks batuan dalam <i>Crack Model</i> (Kumagai dan Chouet, 2000)	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses pembentukan gunung (Sumardani, 2018)	9
Gambar 2. 2 Busur Vulkanik (Wahyu, 2014)	11
Gambar 2. 3 <i>Volcanic Island Arc</i> (Wahyu, 2014)	12
Gambar 2. 4 Peta lokasi Gunung Merapi yang terletak di Jawa Tengah	15
Gambar 2. 5 Grafik statistik letusan Gunung Merapi sejak abad ke-18 dan ke-19 (ESDM, 2014).	19
Gambar 2. 6 Distribusi gempa vulkanik dilihat dari samping arah Barat - Timur. Tampak informasi mekanisme sumber gempa dari VTA dan VTB (BPPTKG, 2016).	21
Gambar 2. 7 Peta stasiun jaringan seismik gunung Merapi (BPPTKG, 2016). ..	25
Gambar 2. 8 Penjalaran gelombang P (Geldart & Sheriff, 1995).	26
Gambar 2. 9 Penjalaran Gelombang S (Geldart & Sheriff, 1995).	26
Gambar 2. 10 Penjalaran Gelombang Rayleigh (Geldart & Sheriff, 1995).	27
Gambar 2. 11 Penjalaran Gelombang Love (Geldart & Sheriff, 1995).	28
Gambar 2. 12 Analisis frekuensi kompleks dengan metode Sompi dalam bentuk $f-g$ plot antara Stasiun Pasarbubar pada <i>event</i> Gempabumi LP pada tanggal 01 Juni 2019; 13:37 UTC =	32
Gambar 2.13 Geometri Crack Model (Kumagai dan Chouet, 2000)	33
Gambar 2. 14 Kontur diagram α/a versus $\rho f/ps$ untuk bervariasi tipe fluid	355
Gambar 2.15 Qr dan v untuk <i>crack</i> yang mengandung campuran-campuran gas (a, c) gas H_2O-CO_2 dan (b, d) gas H_2O-SO_2 . (Kumagai dan Chouet, 2000).....	37
Gambar 2.16 Qr dan v untuk retakan yang mengandung (a, c) air bergelembung dan (b, d) basal bergelembung sebagai fungsi fraksi volume gas dengan asumsi jari-jari gelembung 1 mm dan frekuensi gelombang perjalanan 1Hz. (Kumagai dan Chouet, 2000).....	38
Gambar 2.17 Qr dan v untuk retakan yang mengandung (a, c) busa air - H_2O dan (b, d) busa basalt- H_2O . (Kumagai dan Chouet, 2000)	40
Gambar 2.18 Qr dan v untuk retakan yang mengandung campuran (a, c) gas ash- SO_2 dan (b, d) tetesan air-gas H_2O dengan fraksi volume gas murni lebih besar dari 0,5. Hasilnya diberikan sebagai fungsi fraksi berat dari gas murni, di mana kita mengasumsikan jari-jari partikel 1 ftm dan frekuensi gelombang 1 Hz (Kumagai dan Chouet, 2000).	41
Gambar 3. 1 <i>Display</i> SCREAM 4.6 pada <i>event</i> gempab Gambar 2. 13 Kontur diagram α/a versus $\rho f/ps$ untuk bervariasi tipe umi pada tanggal 18 Juni 2019 jam 21:00-22.00 WIB.	42
Gambar 3. 2 <i>Display</i> SCREAM event gempabumi LF pada tanggal 10 Juni 2018 ; 21:58:53 dengan durasi 21,7 sekon.	433
Gambar 3. 3 Pemilihan <i>coda</i> sinyal gempabumi Gunung Merapi.....	44
Gambar 3. 4 Format data dalam program Sompi.....	45
Gambar 3. 5 <i>Script</i> melihat hasil analisis sompi dalam bentuk $f-g$ plot.....	48
Gambar 3. 6 Plot diagram $f-g$ menggunakan MATLAB.....	48
Gambar 3. 7 Contoh tampilan hasil <i>running program</i> ./fgpperr.....	49
Gambar 4. 1 Poster Kronologi Gunung Merapi 2012-2019	54

Gambar 4. 2 Display <i>waveform</i> a. LF b. VTA c. VTB.....	56
Gambar 4. 3 Perbandingan hasil analisis frekuensi kompleks dengan metode sompri dalam bentuk $f - g$	57
Gambar 4. 4 <i>Timeseries</i> dari frekuensi kompleks Gunung Merapi	59
Gambar 4. 5 <i>Scatter plot</i> hasil analisis frekuensi kompleks.	60
Gambar 4. 6 <i>Timeseries</i> dari analisis frekuensi kompleks Gunung Merapi periode Mei 2018-Juni 2019.	61
Gambar 4. 7 Q_r dan v untuk <i>crack</i> mengandung fluida dengan tipe : (a,) campuran gas $H_2O - CO_2$ (b,) campuran air dan uap air , dan (c,) <i>mysti</i> gas (Kumagai dkk,2002).	62
Gambar 4. 8 Q_r untuk <i>crack</i> mengandung fluida dengan tipe <i>ash - gas</i> (Kumagai dan Chouet, 2000)	63

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1 Latar belakang

Secara geografis Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak pada pertemuan tiga lempeng yaitu Lempeng Benua Eurasia, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Samudera Pasifik. Interaksi antar lempeng membentuk jalur pegunungan berapi yang membentang dari Sumatera ke Laut Banda, dilanjutkan sampai ke perairan Maluku dan Sulawesi Utara. Di sepanjang zona penunjaman lempeng terdapat 129 gunungapi yang masih aktif dari total keseluruhan sekitar 500 gunungapi di Indonesia. Banyaknya gunungapi aktif di Indonesia disebabkan karena Indonesia merupakan negara kepulauan yang berada pada daerah lingkaran gunungapi yang biasa kita sebut dengan istilah *Ring of Fire*. Salah satu gunungapi yang paling aktif di Indonesia adalah Gunung Merapi (Pratiwi, Suhandi, & Syahbana, 2018).

Gunung Merapi (2986 mdpl) terletak di perbatasan empat kabupaten yaitu Kabupaten Sleman di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Klaten di Provinsi Jawa Tengah. Posisi geografisnya terletak pada 7° 32'30" LS dan 110° 26'30" BT. Karakteristik erupsi Gunung Merapi ditandai dengan keluarnya lava baru ke permukaan dan membentuk kubah lava di sekitar puncak. Ketika lava baru mencapai permukaan,

lava lama akan mengalami perusakan sehingga menghambat aliran dan menyebabkan terjadinya guguran lava. Kubah lava yang dibentuk oleh lava baru di sekitar puncak akan terus tumbuh membesar dan menyebabkan ketidakstabilan pada kubah lava tersebut. Kubah lava yang posisinya tidak stabil akan runtuh karena didorong oleh tekanan gas dari dalam sehingga menyebabkan terjadinya awan panas. Awan panas akan mengalir secara gravitasional menyusuri lembah sungai dengan kecepatan 60-100 km/jam. Awan panas inilah yang disebut sebagai Tipe Merapi (ESDM, 2014).

Pada tahun 2010 Gunung Merapi kembali melakukan aktifitas, dengan letusan yang bersifat eksplosif disertai dengan awan panas dan dentuman. Hal ini berbeda dengan kejadian sebelumnya, yaitu letusan bersifat efusif dengan pembentukan kubah lava dan guguran awan panas. Letusan yang terjadi pada 29 - 30 Oktober lebih bersifat eksplosif (Marlina, 2018).

Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), korban jiwa akibat erupsi Gunung Merapi 2010 sebanyak 347 Orang. Korban terbanyak berada di Kabupaten Sleman yaitu 246 jiwa. Kabupaten Magelang 52 jiwa, Klaten 29 jiwa, dan Boyolali 10 jiwa. Sedangkan pengungsi mencapai 410.388 Orang. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya mitigasi bencana untuk mengurangi resiko bencana bagi masyarakat yang berada pada kawasan rawan bencana.

Salah satu upaya mitigasi yang dilakukan adalah dengan melakukan pemantauan aktivitas Gunung Merapi untuk dapat memahami karakteristik Gunung Merapi secara mendalam. Pemantauan aktivitas Gunung Merapi dilakukan oleh Balai

Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) dengan menggunakan berbagai metode yaitu metode visual, deformasi, geokimia dan seismik.

Pemantauan Gunung Merapi dengan cara mengamati secara langsung atau visual merupakan cara yang telah sejak awal dilakukan. Peranan pos pengamatan menjadi penting karena pengamatan secara visual membutuhkan posisi yang semakin dekat ke obyek yang diamati. Parameter yang diamati yaitu, cuaca, kabut, hujan, arah angin, asap vulkanis, adanya titik-titik bara api di puncak guguran lava, perubahan morfologi puncak dan kubah lava. Dalam keadaan di mana aktivitas dalam “siaga”, pemantauan visual dari pos pengamatan lebih ditingkatkan. Pemantauan secara menerus tentang keadaan puncak, kubah, guguran lava dan asap merupakan bahan pembandingan penting bagi data-data yang diperoleh dari peralatan pemantauan seperti seismograf, tiltmeter dan lain-lain (Ratdomopurbo, 2000).

Metode deformasi banyak diaplikasikan dalam pemantauan gunungapi dengan berbagai macam sensor dan sistem. Beberapa tiltmeter dipasang di Merapi pada elevasi yang berbeda. Tiltmeter tertinggi dipasang di puncak Merapi. Dalam pencatatan data tiltmeter dikenal istilah inflasi dan deflasi. Inflasi adalah kejadian pengembungan tubuh gunung sedangkan deflasi sebaliknya (Ratdomopurbo, 2000). Besarnya deformasi puncak Merapi dapat pula dipantau dengan EDM (*Electrooptical Distance Measurement*). Peralatan ini mengukur jarak antara dua titik seperti yang pernah dilakukan Wismaya dkk. pada tahun 2015. Arah dan

besar pergeseran dari titik pengamatan GPS Gunung Merapi pada bulan Februari hingga Juli 2015 didapatkan nilai pergeseran horizontal sebesar 0,01822 meter menuju ke arah barat laut dan vertikal sebesar -0,06924 meter dengan sifat deflasi untuk stasiun DELS, horizontal sebesar 0,030508 meter menuju ke arah barat daya dan vertikal sebesar -0,00875 meter dengan sifat deflasi untuk stasiun GRWH, horizontal sebesar 0,025822 meter menuju ke arah tenggara dan vertikal sebesar 0,07725 meter dengan sifat inflasi untuk stasiun KLAT.

Pemantauan geokimia dilakukan dengan cara mengambil sampel-sampel gas, kondensat dan sublimat di kawah Merapi. Kajian geokimia erupsi pada Gunung Merapi sudah pernah dilakukan oleh Humaida pada tahun 2013. Kajian dilakukan berdasarkan perbedaan karakter erupsi yang bersifat eksplosif dan efusif. Hasil kajian didapatkan gas vulkanik yang dapat digunakan sebagai indikator menjelang terjadinya erupsi, baik eksplosif maupun efusif, adalah H_2O , CO_2 , HCl , SO_2 , H_2S dan sebagainya. Gas H_2O dan CO_2 merupakan komponen utama gas vulkanik mempunyai korelasi yang signifikan pada saat erupsi eksplosif, karena besarnya konsentrasi gas CO_2 yang terlepas dari magma yang lebih dalam. Pada saat erupsi efusif, di awal kenaikan aktivitas, gas SO_2 berkorelasi dengan guguran, pada saat Multiphase (MP) mulai muncul dan guguran tidak terjadi, maka SO_2 berkorelasi dengan MP. Hal ini mengindikasikan gas SO_2 terlepas dipermukaan pada saat erupsi efusif. Pada erupsi efusif gas vulkanik (emisi gas HCl dan rasio CO_2 / H_2O) mempunyai korelasi positif dengan pertumbuhan kubah lava.

Penyelidikan kegempaan dengan menggunakan metode seismik sampai saat ini dianggap sebagai metode geofisika terpenting untuk monitoring aktivitas gunungapi. Peningkatan aktivitas seismik adalah tanda yang paling umum terjadi bila ada kenaikan aktivitas gunungapi. Jika magma dari dalam bumi naik menuju permukaan maka batuan di sekelilingnya akan menerima tekanan yang lebih tinggi dan apabila kekuatan batuan di sekitar kantong atau saluran magma terlampaui maka batuan tersebut akan retak dan gempa terjadi. Perubahan jumlah dan jenis gempa per satuan waktu serta sebaran hiposenter adalah parameter paling penting untuk peramalan erupsi gunungapi.

Pada penelitian ini dilakukan analisis frekuensi kompleks gempabumi *low frequency* untuk dapat mengetahui jenis fluida yang terdapat dalam tubuh Gunung Merapi pada aktivitas erupsi dengan menggunakan Metode Sompi. Metode Sompi yang diperkenalkan oleh Kumazawa dkk. (1990) adalah metode analisis spektral berdasarkan persamaan homogen Auto-Regresif (AR) yang sesuai untuk menganalisis sinyal harmonik dengan amplitudo yang meluruh terhadap waktu. Analisis frekuensi kompleks menggunakan Metode Sompi dilakukan untuk mengetahui parameter frekuensi kompleks yang terdiri atas frekuensi osilasi (f) dan karakteristik peluruhan gelombang (Q faktor). Metode ini telah digunakan di beberapa gunungapi, seperti Kusatsu-Shirane, Japan, Mount Spurr, Alaska US, Gunung Lokon, Sulawesi Utara. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan dalam memprediksi tipe erupsi dan mitigasi bencana gunungapi.

I. 2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik sinyal gempabumi *Low Frequency* (LF) pada Gunung Merapi?
2. Jenis fluida apa saja yang terdapat dalam tubuh Gunung Merapi pada Mei 2018 – Juni 2019 ?
3. Bagaimana hubungan antara faktor kualitas seismik (*Q factor*) dengan tipe letusan Gunung Merapi

I. 3 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup selama penelitian diantaranya:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gempabumi Gunung Merapi bulan Mei 2018 – Juni 2019 dari data stasiun Pasarbubar.
2. Analisis frekuensi kompleks menggunakan Metode Sompi.
3. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan berdasarkan model *fluid-filled crack*.

I. 4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, antara lain:

1. Mengidentifikasi karakteristik sinyal gempabumi *Low Frequency* (LF) Gunung Merapi.
2. Mengestimasi jenis fluida yang terdapat dalam tubuh Gunung Merapi.
3. Mengetahui hubungan antara faktor kualitas seismik (*Q factor*) dengan tipe letusan Gunung Merapi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Gunungapi

Secara definisi gunungapi adalah bukit atau gunung yang mempunyai lubang tempat keluarnya batuan cair (magma) dan atau gas ke permukaan bumi. Lebih lengkap, gunungapi adalah bentuk tumpukan (kerucut dan lainnya) di permukaan bumi yang dibangun oleh timbunan rempah letusan, atau tempat munculnya batuan lelehan / rempah lepas yang berasal dari bagian dalam bumi. Bila batuan cair (magma) dan atau gas mendesak keluar dan batuan penutup tidak sanggup menahannya, maka terjadi letusan (Abdulrahman dkk., 2007).

Pengelompokan gunungapi aktif hanya berdasarkan pernah dan tidaknya gunungapi tersebut meletus sejak tahun 1600, sehingga tidak menginformasikan jenis ancaman bahaya dan karakteristik gunungapi tersebut secara sistematis. Klasifikasi gunungapi ini dibuat agar dapat dipergunakan sebagai acuan dalam penelitian dan pengembangan gunungapi aktif di Indonesia agar dapat mengantisipasi ancaman bahaya letusannya secara efektif (Pratomo, 2006).

Jumlah gunungapi di Indonesia sebanyak 129 atau 13% dari seluruh gunungapi yang ada di dunia dan menempati peringkat pertama dunia. Sesungguhnya, gunungapi sebanyak itu berdasarkan catatan sejarah tidak semua pernah meletus, tetapi berdasarkan kriteria secara definisi (kenampakan permukaan, jenis batuan yang menyusun dsb) pantas disebut sebagai gunungapi. Untuk menghindari

kesimpangsiuran dan memudahkan mengamatinya, maka gunungapi Indonesia dibagi menjadi 3 (tiga) tipe berdasarkan sejarah kegiatannya, yaitu gunungapi tipe A, tipe B, tipe C bisa kita lihat pada tabel 2.1 (Abdulrahman dkk., 2007).

- 1) Gunungapi tipe A adalah gunungapi yang pernah meletus atau meningkat kegiatannya sejak tahun 1600 sampai sekarang. Gunungapi tipe A sebanyak 78 gunung.
- 2) Gunungapi tipe B adalah gunungapi yang tidak memiliki sejarah letusan sejak tahun 1600 atau sebelumnya, tetapi ada lubang bekas letusan (kawah tidak aktif) di tubuh/pucaknya. Gunungapi tipe B sebanyak 30 gunung.
- 3) Gunungapi tipe C adalah gunungapi yang memiliki manifestasi panasbumi (solfatara, fumarola) di permukaan, tetapi tidak ada sejarah letusan sejak tahun 1600 atau sebelumnya maupun lubang bekas letusan di tubuh / puncaknya. Gunungapi tipe C sebanyak 21 gunung.

Tabel 2. 1 Jumlah sebaran gunungapi di Indonesia (ESDM, 2014)

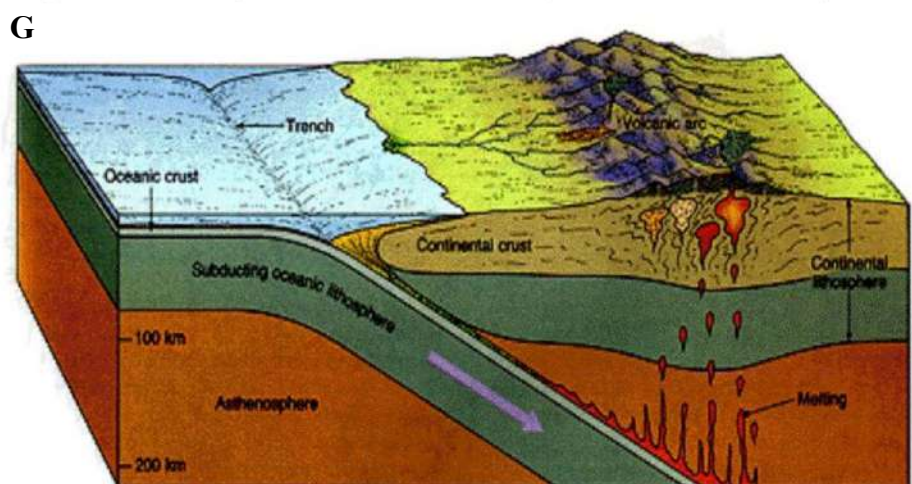
Daerah	Tipe-A	Tipe-B	Tipe-C	Jumlah
Sumatera	13	12	6	21
Jawa	21	9	5	35
Bali	2	-	-	2
Lombok	1	-	-	1
Sumbawa	2	-	-	2
Flores	16	3	5	24
Laut Banda	8	1	-	9
Sulawesi	6	2	5	13

Kep. Sangihe	5	-	-	5
Halmahera	5	2	-	7

II. 1. 1 Proses Terbentuknya Gunungapi

Teori tektonik lempeng (*plate tectonic*) menerangkan bahwa bagian dari kulit bumi (*litosfer*) merupakan lempeng yang tegar (*rigid*) bergerak satu terhadap lainnya di atas suatu massa yang plastis (*astenosfer*) dengan kecepatan beberapa sentimeter setiap tahun (para ilmuwan berbeda pendapat, ada yang mengatakan 1 - 10 cm dan ada juga berpendapat antara 4 – 6 cm pertahun). Bila kedua lempeng yang sifatnya berbeda tersebut bertabrakan, maka salah satu akan menukik ke dalam (Sumardani, 2018).

Gunungapi terbentuk karena adanya gerakan magma sebagai arus konveksi, dimana arus tersebut menyebabkan gerakan dari kerak bumi. Dikenal ada 2 kerak bumi yaitu kerak samudera dan kerak benua.



Gambar 2. 1 Proses pembentukan gunung (Sumardani, 2018)

Pergerakan lempeng kerak bumi ada 3 macam, yaitu pergerakan saling mendekati, saling menjauh dan saling berpapasan. Pergerakan lempeng saling mendekati akan menyebabkan tumbukan dimana salah satu dari lempeng akan menunjam ke bawah yang lain (Gambar 2.1). Daerah penunjaman membentuk suatu palung yang dalam, yang biasanya merupakan jalur gempa bumi yang kuat. Di belakang jalur penunjaman akan terbentuk rangkaian kegiatan magmatik dan gunung api serta berbagai cekungan pengendapan. Salah satu contohnya terjadi di Indonesia, pertemuan antara lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Pergerakan lempeng saling menjauh akan menyebabkan penipisan dan peregangan kerak bumi dan akhirnya terjadi pengeluaran material baru dari mantel membentuk jalur magmatik atau gunung api. Pergerakan lempeng kerak bumi yang saling bertumbukan akan membentuk zona subduksi dan menimbulkan gaya yang bekerja baik secara horizontal maupun vertikal, yang akan membentuk pegunungan lipatan, jalur gunung api, pergeseran batuan, dan jalur gempa bumi serta terbentuknya wilayah tektonik tertentu (Massinai, 2015).

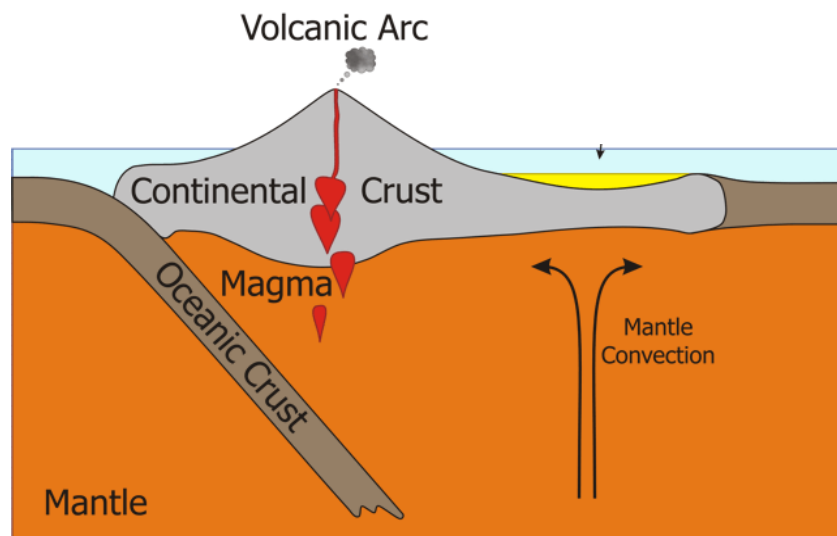
Wahyu (2014) membagi hasil dari pergerakan lempeng ini sebagai zona atau busur magmatisme. Busur magmatisme tersebut adalah :

1) *Continental Rift Zone*

Pada zona ini pergerakan lempeng yang saling menjauh adalah dua lempeng benua. Gejala yang di perhatikan adalah terbentuknya gunung api muda dan kecil-kecil di atas dataran benua. Jenis magma yang di hasilkan adalah jenis magma asam.

2) *Volcanic Arc*

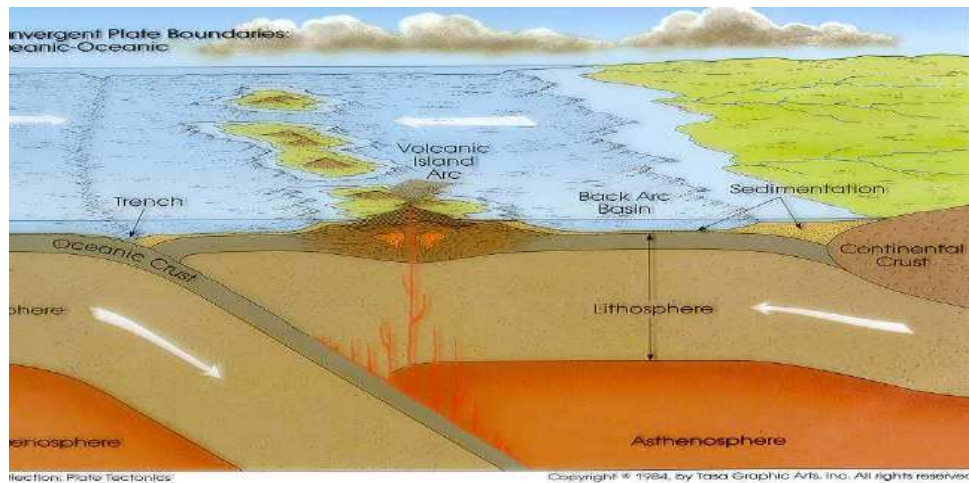
Volcanic Arc atau disebut juga *Continental Arc* terbentuk dari pertemuan lempeng benua dengan lempeng samudra dimana lempeng samudra menyusup ke bawah menuju astenosfer. Gejala ini biasanya di perhatikan oleh jajaran gunungapi di atas lempeng benua sebagai akibat dari dorongan arus konveksi dari selubung.



Gambar 2. 2 Busur Vulkanik (Wahyu, 2014)

3) *Island Arc*

Sama halnya dengan proses yang terjadi pada pembentukan busur magmatik *volcanic arc* yaitu pertemuan antara dua lempeng. Bedanya pada *island arc* lempeng yang bertumbuk adalah dua lempeng samudera dimana salah satu lempeng mununjam ke bawah menuju astenosfer kemudian meleleh pada suhu tertentu yang menyebabkan arus konveksi ke atas yang mendorong lapisan di atasnya. Sehingga gejalanya diperlihatkan oleh terbentuknya pulau-pulau di tengah samudra dan juga gunungapi kecil. Jenis magma yang di hasilkan di busur magmatisme ini adalah magma bertipe basaltis.



Gambar 2. 3 *Volcanic Island Arc* (Wahyu, 2014)

4) *Hotspot Volcanoes*

Hotspot Volcanoes terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu, *Oceanic Island* dan *Continental Intraplate*. *Oceanic Island* merupakan busur magmatisme dimana magma menerobos ke atas melalui arus konveksi tanpa pergerakan lempeng yang terjadi di lantai samudra. Diinterpretasikan bahwa zona magmatisme ini termasuk zona lemah sehingga magma dapat menerobos ke atas membentuk rangkaian struktur vulkanik ataupun gunungapi. Jenis magma yang dihasilkan adalah magma basaltis. *Continental Intraplate* sama seperti pada proses pembentukan busur magmatisme pada *oceanic island*, pada busur *continental drift* juga terbentuk akibat erupsi langsung oleh magma yang naik ke atas akibat arus konveksi dari selubung. Bedanya pada busur ini terjadi di lempeng benua. Gejala yang ditimbulkan juga sama yaitu berupa struktur vulkanik dan gunungapi. Sedangkan magma yang dihasilkan adalah magma asam (Wahyu, 2014).

II. 1. 2 Jenis Letusan Gunungapi

Dikenal ada 3 (tiga) macam jenis letusan, masing-masing letusan freatik (letusan gas), letusan magmatik dan yang ketiga sebagai akibat interaksi air tanah dengan magma yang mengakibatkan letusan freatomagmatik atau letusan hydrovulkanik (Abdulrahman dkk., 2007).

1) Letusan Freatik

Letusan freatik terjadi karena adanya air tanah, air danau (kawah), atau air hujan yang menyentuh magma di dalam bumi, sehingga membentuk uap panas bertekanan tinggi yang akhirnya menjebol penghalang di atasnya (Alfauzy, 2016).

2) Letusan Magmatik

Letusan magmatik merupakan jenis letusan gunungapi yang berbahaya. Penyebab letusan ini murni karena desakan fluida magma (tentu ada gas dikandungnya). Letusan magmatik dibagi atas beberapa letusan, yaitu letusan eksplosif dan efusif.

3) Letusan Freatomagnetik

Letusan Freatomagnetik atau hydrovulkanik terjadi akibat adanya interaksi air tanah dengan kantong magma. Pada proses berikutnya terbentuk uap dan memicu terjadinya letusan dan mengundang magma ikut naik bersama letusan. Pada umumnya gunungapi yang berdanau kawah dan berada di tengah laut (gunungapi laut) sering mengalami letusan jenis ini (Abdulrahman dkk.,2007)

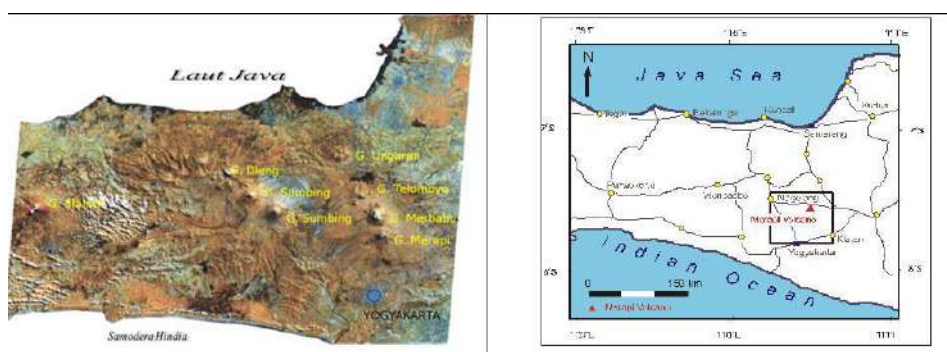
II. 1. 3 Material Gunungapi

Sumardani (2018) menjabarkan beberapa hasil letusan gunung berapi adalah sebagai berikut:

- 1) Gas Vulkanik, yaitu gas-gas yang dikeluarkan saat terjadi letusan gunung berapi disebut Gas Vulkanik. Gas-gas tersebut antara lain karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), hydrogen sulfida (H₂S), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen dioksida (NO₂) yang membahayakan manusia.
- 2) Lava, yaitu cairan magma bersuhu tinggi yang ada di dalam gunung berapi yang mengalir ke permukaan melalui kawah. Lava yang keluar dari kawah gunung berapi disebut lahar. Lava encer akan mengalir mengikuti aliran sungai sedangkan lava kental akan membeku dekat dengan sumbernya. Lava yang membeku akan membentuk bermacam-macam batuan.
- 3) Lahar, yaitu lava yang telah bercampur dengan batuan, air, dan material lainnya. Lahar sangat berbahaya bagi penduduk di lereng gunung berapi. Terdapat berapa jenis lahar, yaitu lahar cair, lahar dingin, lahar panas, lahar hujan, dan lahar letusan.
- 4) Hujan abu, yaitu material yang sangat halus yang disebarkan ke udara saat terjadi letusan. Karena sangat halus, abu letusan dapat terbawa angin dan dirasakan sampai ratusan kilometer jauhnya. Abu letusan ini bisa mengganggu pernapasan.
- 5) Awan Panas yakni hasil letusan yang mengalir bergulung seperti awan. Di dalam gulungan ini terdapat batuan pijar yang panas dan material vulkanik padat dengan suhu lebih besar dari 600 °C. Awan panas dapat mengakibatkan luka bakar pada tubuh yang terbuka seperti kepala, lengan, leher atau kaki dan juga dapat menyebabkan sesak napas.

II. 2 Gunung Merapi

Gunung Merapi (2986 mdpl) terletak di perbatasan empat kabupaten yaitu kabupaten Sleman, provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan kabupaten Magelang, kabupaten Boyolali dan kabupaten Klaten di provinsi Jawa Tengah. Posisi geografinya terletak pada $7^{\circ}32'30''$ LS dan $110^{\circ}26'30''$ BT. Berdasarkan tatanan tektoniknya, gunung ini terletak di zona subduksi, dimana lempeng Indo-Australia menunjam di bawah lempeng Eurasia yang mengontrol vulkanisme di Sumatera, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara. Gunung Merapi muncul di bagian selatan dari kelurusan dari jajaran gunungapi di Jawa Tengah mulai dari utara ke selatan yaitu Ungaran-Telomoyo-Merbabu-Merapi dengan arah N165 E. Kelurusan ini merupakan sebuah patahan yang berhubungan dengan retakan akibat aktivitas tektonik yang mendahului vulkanisme di Jawa Tengah. Aktivitas vulkanisme ini bergeser dari arah utara ke selatan, dimana Gunung Merapi muncul paling muda (ESDM, 2014).



Gambar 2. 4 Peta lokasi Gunung Merapi yang terletak di Jawa Tengah (ESDM, 2014).

II. 2. 1 Sejarah Terbentuknya Gunung Merapi

Pergerakan lempeng saling mendekati akan menyebabkan tumbukan dimana salah satu dari lempeng akan menunjam ke bawah yang lain. Daerah penunjaman membentuk suatu palung yang dalam, yang biasanya merupakan jalur gempa yang kuat. Di belakang jalur penunjaman akan terbentuk rangkaian kegiatan magmatik dan gunungapi serta berbagai cekungan pengendapan. Salah satu contohnya terjadi di Indonesia, pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia menghasilkan jalur penunjaman di selatan Jawa dan jalur gunungapi Sumatera, Jawa dan Nusa Tenggara (Massinai, 2015).

Sekitar 70 juta hingga 5 juta tahun yang lalu Indonesia terbentuk menjadi gugusan pulau yang ditumbuhi dengan gunung gunung berapi, termasuk di dalamnya adalah Pulau Jawa. Proses terbentuknya Pulau Jawa berlangsung dalam waktu yang sangat lama (evolusi) yakni sekitar 50 juta hingga 65 juta tahun. Susunan batuan dasar yang membentuk Pulau Jawa memiliki asal-usul dan umur yang berbeda satu dengan yang lainnya.

Jawa bagian barat diperkirakan telah terbentuk pada akhir Zaman Kapur (145 hingga 65 juta tahun lalu) dan menjadi bagian dari Paparan Sunda (Sundaland Core). sementara Jawa bagian timur diyakini berasal pecahan kecil benua Australia. Bagian timur ini diperkirakan mulai bertumbukan dan bergabung dengan bagian barat sekitar 100-70 juta tahun yang lalu hingga menciptakan bentuk awal Pulau Jawa yang ada saat ini.

Jika melihat kenampakan morfologi, Pulau Jawa dahulunya adalah lautan, hal ini dibuktikan di pesisir selatan Pulau Jawa terdapat banyak gunung kapur dan batuan gamping (endapan marine/laut) yang membujur dari barat hingga ke timur Pulau Jawa. Perlu di ketahui bahwa gunung/batuan gamping merupakan endapan laut (bekas koral) yang seringkali ditemukan fosil-fosil binatang laut. Kemudian sekitar 20 juta tahun SM, zona tumbukan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia menyebabkan menunjamnya lempeng Indo-Australia dibawah lempeng Eurasia. Penunjaman ini berlangsung hingga sekarang dan menyebabkan munculnya gunung-gunungapi sebelah selatan Pulau Jawa yang kemudian diikuti oleh proses pengangkatan lempeng Eurasia dan keluarnya material-material dari gunung berapi, yang akhirnya terbentuklah Pulau Jawa sekarang (Husein, 2015).

Hasil penelitian stratigrafi menunjukkan sejarah terbentuknya Merapi sangat kompleks.. Penelitian menemukan unit-unit stratigrafi di Merapi yang semakin detil. Berdasarkan studi stratigrafi, sejarah Merapi dapat dibagi atas 4 bagian.

Secara garis besar sejarah geologi Gunung Merapi terbagi dalam empat periode yaitu Pra Merapi, Merapi Tua, Merapi Muda dan Merapi Baru. Periode pertama adalah Pra Merapi dimulai sejak sekitar 700.000 tahun lalu dimana saat ini menyisakan jejak Gunung Bibi (2025 m dpl) di lereng timurlaut Gunung Merapi. Gunung Bibi memiliki lava yang bersifat basaltic andesit. Periode kedua, periode Merapi Tua menyisakan bukit Turgo dan Plawangan yang telah berumur antara 60.000 sampai 8.000 tahun. Saat ini kedua bukit tersebut mendominasi morfologi lereng selatan Gunung Merapi. Pada periode ketiga yaitu Merapi Muda

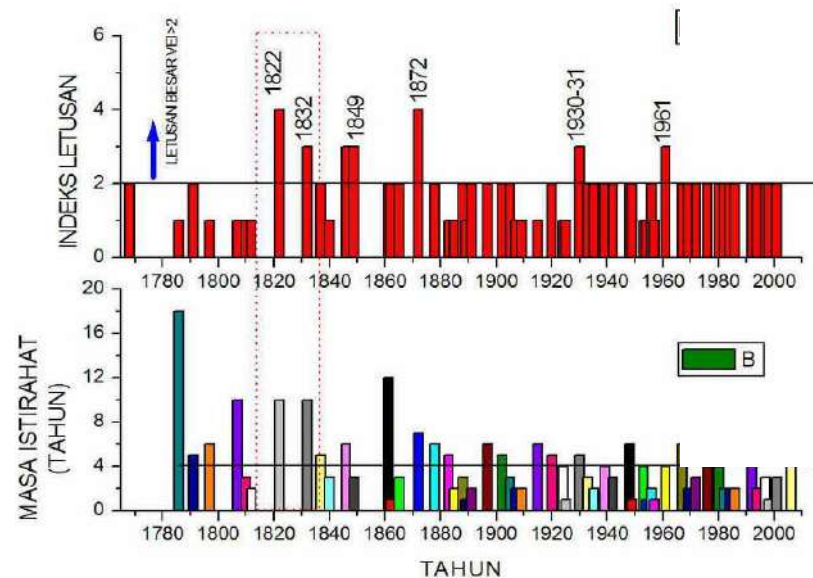
beraktivitas antara 8000 sampai 2000 tahun lalu. Di masa itu terjadi beberapa lelehan lava andesitik yang menyusun bukit Batulawang dan Gajahmungkur yang sekarang tampak di lereng utara Gunung Merapi serta menyisakan kawah Pasar Bubar. Periode keempat aktivitas Merapi yang sekarang ini disebut Merapi Baru, dimana terbentuk kerucut puncak Merapi yang sekarang ini disebut sebagai Gunung Anyar di bekas kawah Pasar Bubar dimulai sekitar 2000 tahun yang lalu (ESDM, 2014).

II. 2. 2 Sejarah Letusan Gunung Merapi

Sejarah letusan Gunung Merapi secara tertulis mulai tercatat sejak awal masa kolonial Belanda sekitar abad ke-17. Letusan sebelumnya tidak tercatat secara jelas. Sedangkan letusan-letusan besar yang terjadi pada masa sebelum periode Merapi baru, hanya didasarkan pada penentuan waktu relatif. Secara umum, sejarah letusan Gunung Merapi dapat dirangkum sebagai berikut (ESDM, 2014):

- a) Pada periode 3000 - 250 tahun yang lalu tercatat lebih kurang 33 kali letusan, dimana 7 diantaranya merupakan letusan besar. Dari data tersebut menunjukkan bahwa letusan besar terjadi sekali dalam 150-500 tahun (Andreastuti, Alloway, & Smith, 2000).
- b) Pada periode Merapi baru telah terjadi beberapa kali letusan besar yaitu abad ke-19 (tahun 1768, 1822, 1849, 1872) dan abad ke-20 yaitu 1930-1931. Erupsi abad ke-19 jauh lebih besar dari letusan abad ke-20, dimana awan panas mencapai 20 km dari puncak. Kemungkinan letusan besar terjadi sekali dalam 100 tahun (Newhall, et al., 2000).

- c) Aktivitas Merapi pada abad ke-20 terjadi minimal 28 kali letusan, dimana letusan terbesar terjadi pada tahun 1931. Sudah $\frac{3}{4}$ abad tidak terjadi letusan besar.



Gambar 2. 5 Grafik statistik letusan Gunung Merapi sejak abad ke-18 dan ke-19 (ESDM, 2014).

Berdasarkan data yang tercatat sejak tahun 1600-an, gunung Merapi meletus lebih dari 80 kali atau rata-rata sekali meletus dalam 4 tahun. Masa istirahat berkisar antara 1-18 tahun, artinya masa istirahat terpanjang yang pernah tercatat adalah 18 tahun. Secara umum, letusan Merapi pada abad ke-18 dan abad ke-19 bisa dilihat pada Gambar 2.5 masa istirahatnya relatif lebih panjang, sedangkan indeks letusannya lebih besar. Akan tetapi tidak bisa disimpulkan bahwa masa istirahat yang panjang, menentukan letusan yang akan datang relatif besar. Karena berdasarkan fakta, bahwa beberapa letusan besar, masa istirahatnya pendek. Atau sebaliknya pada saat mengalami istirahat panjang, letusan berikutnya ternyata kecil. Ada kemungkinan juga bahwa periode panjang letusan pada abad ke-18 dan

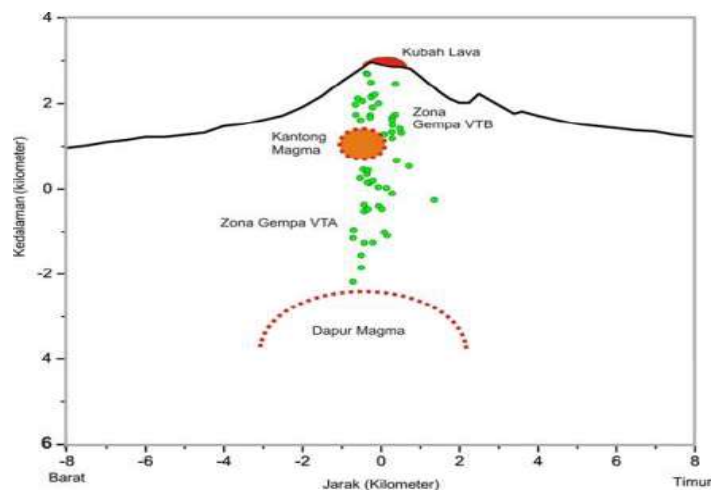
abad ke-19 disebabkan banyak letusan kecil yang tidak tercatat dengan baik, karena kondisi saat itu. Jadi besar kecilnya letusan lebih tergantung pada sifat kimia magma dan sifat fisika magma. Gambar 2.5 menunjukkan grafik statistik letusan gunung Merapi sejak abad ke-18. Pada abad ke-18 dan ke-19, letusan gunung Merapi umumnya relatif besar dibanding letusan pada abad ke-20, sedangkan masa istirahatnya lebih panjang (ESDM, 2014).

Pada awal abad ke-21, Gunung Merapi mengalami erupsi pada tahun 2001, 2006, dan 2010. Erupsi pada Gunung Merapi pada Oktober sampai November 2010 terjadi sangat besar dalam waktu yang lama dan merupakan erupsi terbesar sejak tahun 1872. Erupsi Merapi 2010 muncul kolom letusan awan panas dengan VEI 4. Peristiwa ini telah menyebabkan korban luka-luka sebanyak 1.705 jiwa, terdiri dari 1.412 jiwa luka ringan dan 293 jiwa luka berat, korban meninggal sebanyak 332 jiwa serta korban yang mengalami gangguan psikologis sebanyak 4.874 jiwa. (Marfai dkk., 2012).

II. 2. 3 Tipe Gempabumi Gunung Merapi

Menjelang erupsi biasanya didahului dengan peningkatan aktivitas seismik di bawah gunungapi karena magma dan gas vulkanik akan menekan ke atas sebelum muncul di permukaan. Ketika magma dan gas vulkanik atau fluida bergerak akan menyebabkan batuan menjadi patahan ataupun vibrasi retakan. Patahnya batuan menimbulkan gempabumi vulkanik yang berfrekuensi tinggi, sedangkan vibrasi retakan akan menimbulkan gempabumi frekuensi rendah atau getaran kontinyu yang sering disebut dengan tremor (Santoso, 2009).

Gunung Merapi merupakan gunungapi yang gempa-gempanya tergolong berskala kecil sehingga hampir semua gempa vulkanik Gunung Merapi tidak terasa oleh manusia, yaitu kekuatan gempa berada di bawah Magnitudo 3.0. Dari posisi sumber gempa, gempa-gempa Merapi terjadi pada kedalaman dari kurang sekitar 6 kilometer di bawah puncak. Pada umumnya gempa-gempa tergolong dangkal bahkan kurang dari 2 (dua) kilometer dibawah puncak, bisa dilihat pada Gambar 2.6 (ESDM, 2014).



Gambar 2. 6 Distribusi gempa vulkanik dilihat dari samping arah Barat - Timur. Tampak informasi mekanisme sumber gempa dari VTA dan VTB (BPPTKG, 2016).

Pada saat ini klasifikasi gempa Merapi yang dipakai bagi pemantauan aktivitas seismik Gunung Merapi adalah sebagai berikut (Ratdomopurbo, 2000):

1) Gempabumi VTA

Gempa ini berasal dari kedalaman antara 2 sampai 5 kilometer dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6. Frekuensi dominan gempa dari analisa frekuensi rekaman seismogram yang tercatat pada elevasi 2625 meter, berkisar antara 5–8 Hz. Sebagai gempa yang mekanisme sumbernya seperti gempa tektonik, gempa ini mempunyai fase P dan S yang relatif dapat dibedakan dengan jelas.

2) Gempabumi VTB

Gempa jenis ini bersumber pada kedalaman kurang dari 2 kilometer di bawah puncak. Frekuensi dominan gempa berkisar antara 4 dan 7 Hz. Dari kenampakannya pada seismogram, gempa ini mirip dengan gempa VTA hanya saja fase P dan S tidak terlihat jelas.

3) Gempabumi MP (*Multhi-phase*)

Gempa MP adalah gempa yang terjadi di kubah lava. Pada saat kubah lava tumbuh cepat, jumlah kejadian gempa MP dapat mencapai 700 gempa per hari. Frekuensi dominannya berkisar antara 3 dan 4 Hz. Dibandingkan dengan gempa VTA dan VTB, awalan gempa yaitu impuls pertamanya tidak begitu jelas.

4) Gempabumi LF (*Low Frequency*)

Gempa LF mempunyai frekuensi dominan sekitar 1,5 Hz. Gempa ini jarang terjadi di Merapi, namun demikian pada masa-masa tertentu, misalnya tahun 1989, gempa LF sering muncul. Amplitudo gempa biasanya sangat kecil sehingga hanya bisa dibaca dengan jelas pada stasiun pada elevasi tinggi, atau sekitar puncak.

5) Tremor

Di Merapi terdapat dua macam tremor yaitu tremor frekuensi rendah dan tremor frekuensi tinggi. Tremor frekuensi rendah mempunyai frekuensi dominan 1.5 Hz. Sebagaimana gempa LF, tremor frekuensi rendah jarang terjadi. Tremor frekuensi tinggi berkaitan dengan kejadian erupsi. Pada saat sebelum letusan, sering tercatat adanya tremor dengan frekuensi tinggi.

6) Guguran

Guguran lava atau material dari puncak Merapi yang menuju ke lereng terlihat pada rekaman seismogram sebagai sinyal gempa dengan durasi yang panjang. Amplitudo guguran berkembang dari kecil dan mencapai maksimum setelah lebih dari 15 detik dari awal gempa.

II. 2. 4 Jaringan Seismik Gunung Merapi

Monitoring Gunung Merapi dilakukan dengan memantau melalui stasiun-stasiun yang tersebar disekitar Gunung Merapi. Sampai saat ini terdapat empat stasiun seismograf di Merapi yaitu di Bukit Pusong london (PUS) ketinggian 2625 mdpl, Bukit Plawangan (PLA) pada 1276 mdpl, Deles (DEL) pada 1487 mdpl dan di Klatakan (KLA) pada 1918 mdpl. Stasiun-stasiun tadi tetap dipertahankan jumlahnya sebanyak empat buah y aitu syarat minimal untuk perhitungan pusat gempa (Hiposenter).Sebelumnya terdapat stasiun di Gemer (GEM), di lereng barat pada ketinggian 1318 mdpl, yang hilang karena terlanda awan panas pada saat letusan bulan Juli 1998. Selain stasiun seismograf tersebut juga terdapat stasiun jaringan broadband yang tersebar di Gunung Merapi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7. Sistem pemantauan seismik analog yang ada di Gunung Merapi dibedakan menjadi dua yaitu unit lapangan dan unit penerima. Unit lapangan terdiri dari semua peralatan yang dipasang dilapangan yang terdiri dari sensor, amplifier, VCO (*Voltage Converter Oscillator*) dan pemancar. Pada unit penerima, sinyal akan diterima oleh seismograf atau disimpan dan ditampilkan secara digital di komputer (BPPTKG, 2016).

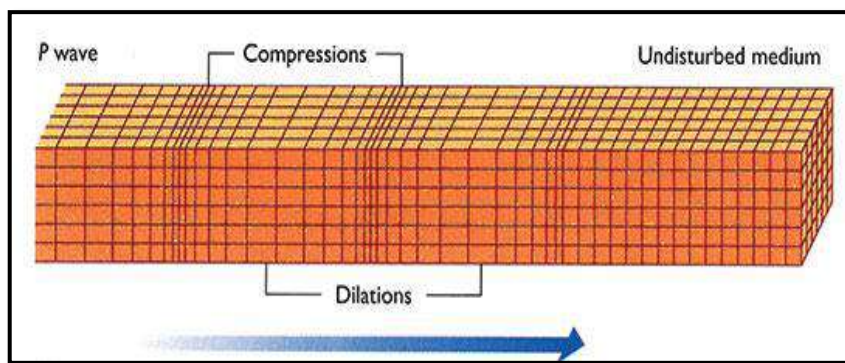
Tabel 2. 2 Stasiun jaringan seismik Gunung Merapi (BPPTKG, 2016)

Alias	Name	Lat. (WGS84) UTM	Lon. (WGS84) UTM	Elev. (m)	Start / Installation
MEBDT	"MEBDT (Bawah Kendit"	-755.292	11.044.489	2040	14/07/2014
MEDEL	"BPPTK SEIS Deles"	-756.017	11.046.133	1487	01/01/2011
MEGRA	"MEGRA (Jurang Grawah)"	-752.163	11.045.149	2045	01/01/2011
MEIJO	"MEIJO (Gunung Ijo)"	-755.264	11.046.413	2048	01/01/2011
MEIMO	"MEIMO (Imogiri)"	-796.317	11.037.188	212	14/07/2014
MEJRO	"MEJRO (Jurang Jero)"	-755.536	11.041.929	1335	01/01/2015
MEKLA	"MEKLA (Klatakan)"	-753.240	11.043.230	1920	01/01/2011
MEKLS	"MEKLS (BPPTK SEIS Klatakan SP)"	-753.240	11.043.230	1920	01/01/2011
MEL02	"MEL02 (Lava Flow 1902)"	-753.914	11.044.907	2700	23/11/2013
MEL53	"MEL53 (Lava 1953)"	-753.462	11.044.443	2500	17/11/2013
MELAB	"MELAB (Labuhan)"	-755.704	11.044.504	1730	01/01/2011
MEMBB	"MEMBB (Gunung Merbabu)"	-746.002	11.044.066	2886	14/07/2014
MEPAS	"MEPAS (Pasar Bubar)"	-753.557	11.044.918	2679	14/07/2014
MEPLA	"MEPLA (BPPTK SEIS Plawangan)"	-758.567	11.043.150	1276	01/01/2011
MEPUS	"MEPUS (BPPTK SEIS Pusunglondon)"	-753.833	11.045.400	2700	01/01/2011
MEDEL	"Merapi Deles"	-756.017	11.046.133	1487	01/01/2011
MEKLS	"MEKLS (BPPTK SEIS	-753.240	11.043.230	1920	01/01/2011

	Klatakan SP)"				
MEPLA	"MEPLA (BPPTK SEIS Plawangan)"	-758.567	11.043.150	1276	01/01/2011
MEPUS	"Merapi Pusunglondon"	-753.833	11.045.400	2700	01/12/2016

1. Gelombang P (gelombang Primer).

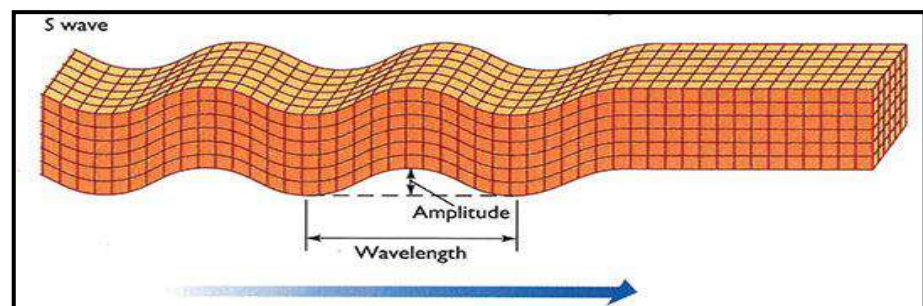
Gelombang P disebut juga gelombang kompresi, gelombang longitudinal, gelombang dilatasi, atau gelombang irotasional. Gelombang ini menginduksi gerakan partikel media dalam arah paralel terhadap arah penjalaran gelombang (Gambar 2.8).



Gambar 2. 8 Penjalaran gelombang P (Geldart & Sheriff, 1995).

2. Gelombang S (gelombang Sekunder).

Gelombang S disebut juga gelombang shear, gelombang transversal atau gelombang rotasi. Gelombang ini menyebabkan gerakan partikel media dalam arah tangensial terhadap arah perjalanan gelombang (Gambar 2.9) (Afnimar, 2009).



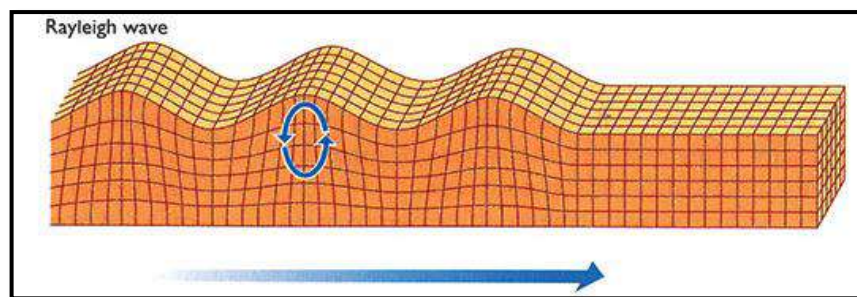
Gambar 2. 9 Penjalaran Gelombang S (Geldart & Sheriff, 1995).

II. 3. 2 Gelombang Permukaan

Gelombang permukaan (*surface*) merupakan gelombang elastik yang menjalar sepanjang permukaan bumi dan biasa disebut sebagai tide waves. Gelombang permukaan menjalar melalui lapisan permukaan bumi. Gelombang permukaan terdiri dari gelombang Love (L) dan Rayleigh (R) yang menjalar melalui permukaan bebas dari bumi (Sunarjo, Gunawan, & Pribadi, 2012)

1. Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang gerakan partikel medianya merupakan kombinasi gerakan partikel 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 (Gambar 2.10) (Susilawati, 2008).

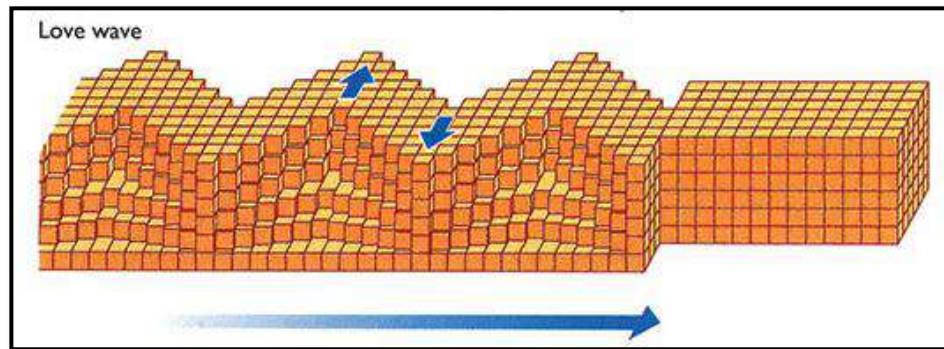


Gambar 2. 10 Penjalaran Gelombang Rayleigh (Geldart & Sheriff, 1995).

2. Gelombang Love

Menurut Afnimar (2009) gelombang Love merupakan gelombang terbentuk akibat adanya interferensi gelombang-gelombang pantul gelombang S horizontal pada suatu lapisan dekat permukaan bumi. Gerak partikel *medium* ketika dilewati gelombang Love tentu saja sama dengan gelombang S horizontal, tetapi

amplitudonya berkurang terhadap kedalaman. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dalam Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Penjalaran Gelombang Love (Geldart & Sheriff, 1995).

II. 4 Karakteristik Peluruhan Gelombang

Dalam mengungkapkan fenomena gelombang, ada banyak sekali permasalahan yang perlu dikaji lebih dalam. Salah satunya adalah mengenai atenuasi gelombang. Dalam sistem transmisi gelombang, misalnya dalam pengiriman sinyal, biasanya sinyal yang diterima pada receiver tidaklah selalu sama dengan yang ditransmisikan. Hal ini diakibatkan banyaknya *noise* yang ditemui selama penjalaran sinyal tersebut.

Atenuasi merupakan gejala pelemahan sinyal informasi akibat bertambahnya jarak oleh suatu sinyal dan juga karena makin tingginya frekuensi sinyal tersebut. Apabila sebuah sinyal dilewatkan suatu medium seringkali mengalami berbagai perlakuan dari medium yang dilaluinya karena frekuensi sinyal tersebut semakin tinggi. Energi gelombang suara akan akan berkurang sepanjang perambatannya dari sumbernya karena gelombang suara menyebar keluar dalam bidang yang lebar, energinya tersebar ke dalam area yang luas.

Parameter yang dipakai untuk mengukur secara kuantitatif atenuasi gelombang adalah faktor kualitas. Dalam bidang seismologi, parameter Q ini disebut sebagai faktor kualitas seismik (*seismic quality factor*). Faktor kualitas seismik adalah parameter gelombang yang sangat penting selain kecepatan penjalarannya dalam usaha memahami sifat material bumi yang dilaluinya (Hurriyah, 2013).

Selain digunakan untuk mengetahui karakter dari batuan sebagai medium perambatan gelombang seismik, atenuasi juga dikembangkan untuk mengetahui properti dan atau komposisi dari fluida magmatik. Aki (1984) dalam diskusi tremor harmonik dan intrusi magma di Danau Mammoth California mengemukakan pendapat bahwa diperlukan adanya getaran fluida dalam *crack* sebagai sumber dari tremor vulkanik. Energi seismik yang diradiasikan dari sumber getaran tersebut dapat dinyatakan sebagai Q factor (Q_r) yang menunjukkan kehilangan energi akibat dari radiasi. Sehingga total energi yang hilang dapat dinyatakan dalam persamaan (2.1) sebagai berikut:

$$Q_a^{-1} = Q_i^{-1} + Q_r^{-1} \quad (2.1)$$

Dimana :

Q_a^{-1} : total energi yang hilang (Q factor semu)

Q_i^{-1} : energi yang hilang akibat dari atenuasi intrinsik

Q_r^{-1} : energi yang hilang akibat dari radiasi

Dalam penelitian ini digunakan pendekatan berdasarkan hasil studi yang dilakukan oleh Kumagai dan Chouet (1999) mengasumsikan bahwa proses radiasi mendominasi mekanisme kehilangan energi. Pendekatan tersebut digunakan untuk

mengetahui komposisi dari fluida vulkanik/magmatik dengan membandingkan hasil pengukuran dengan Q_a^{-1} hasil percobaan dengan model *fluid – filled crack*.

II.5 Metode Sompi

Selain Transformasi Fourier, terdapat metode spektral analisis berdasarkan pada sistem dinamika linier yang diperkenalkan oleh Kumazawa dkk. pada tahun 1990 yang disebut dengan Metode Sompi. Pada metode ini, sinyal gelombang diuraikan menjadi kombinasi linear dari getaran sinusoidal dengan amplitudo yang meluruh terhadap waktu dan *inkoherent noise* yang ditunjukkan dalam persamaan (2.2)

$$x(t) = \sum_{i=0}^n A_i e^{\gamma_i t} \cos(\omega_i t + \theta_i) + \varepsilon(t) \quad (2.2)$$

dengan n adalah jumlah elemen gelombang, $\varepsilon(t)$ adalah inkoheren *noise* dan ω_i , γ_i , A_i dan θ_i merupakan parameter yang mencirikan setiap elemen gelombang, secara berurutan adalah bagian riil dari frekuensi kompleks, bagian imajiner dari frekuensi kompleks, riil amplitudo dan fase.

Dalam analisis spektral ini, sinyal yang diberikan data deret waktu diwakili oleh elemen-elemen gelombang. Setiap elemen gelombang ditentukan oleh dua parameter kompleks z dan α , atau empat parameter riil. γ dan ω didefinisikan sebagai persamaan sebagai berikut :

$$z = \exp(\gamma + j\omega) \quad (2.3)$$

dan kemudian ω dan $(-\gamma)$ sesuai dengan bagian riil dan imajiner dari frekuensi sudut kompleks. Positif dan negatif γ menunjukkan bahwa amplitudo sesaat dari

elemen gelombang yang relevan tumbuh dan meluruh secara eksponensial dengan waktu.

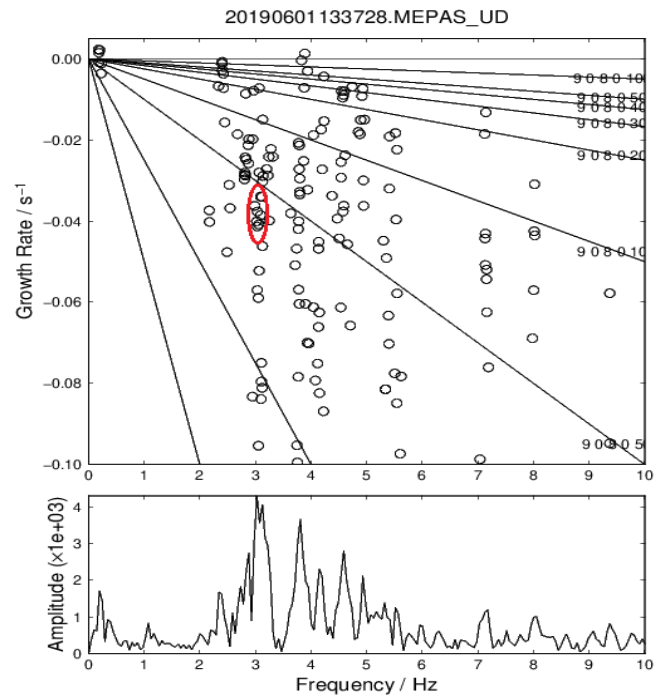
Didefinisikan bagian riil dari frekuensi kompleks (f) sebagai frekuensi osilasi dan *growth rate* (g) serta hubungan kedua parameter tersebut dengan *Q factor* sebagai karakteristik peluruhan gelombang (Kumazawa dkk, 1990) sebagai berikut :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.4)$$

$$g = \frac{\gamma}{2\pi} \quad (2.5)$$

$$Q = - \frac{f}{2\gamma} \quad (2.6)$$

Pada analisis spektral dengan metode sompi, bagian dari gelombang yang tidak homogen dihilangkan sehingga yang digunakan dalam analisis hanya bagian dari ekor gelombang. Hasil dari analisis metode Sompi diplot pada diagram 2D f - g seperti yang dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Analisis frekuensi kompleks dengan metode Sompi dalam bentuk $f - g$ plot antara Stasiun Pasarbubar pada *event* Gempabumi LP pada tanggal 01 Juni 2019; 13:37 UTC

II.6 Fluid – Filled Crack Model

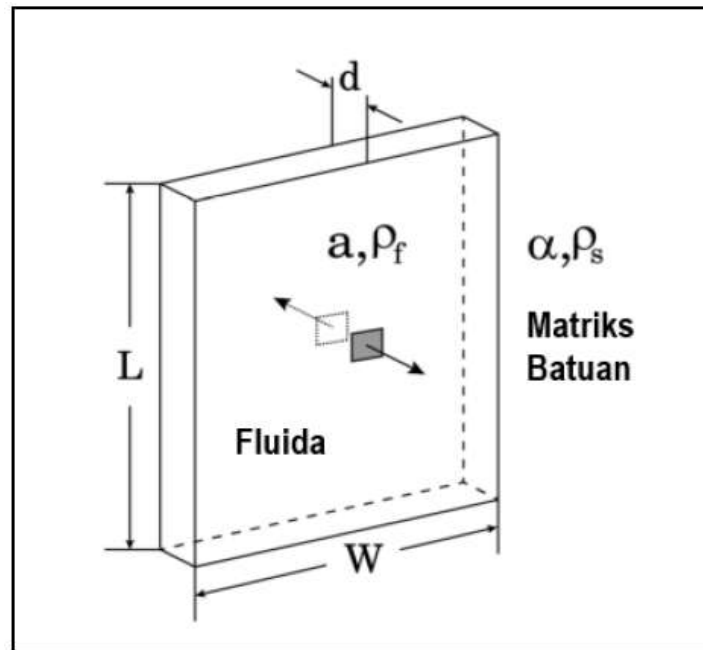
Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Fluid-driven crack model* untuk mengetahui properti akustik sebuah rongga atau retakan yang terisi oleh fluida hidrotermal atau magmatik. Untuk mengetahui properti akustik sebuah rongga atau retakan yang terisi oleh fluida hidrotermal atau magmatik. Model ini dipilih dikarenakan sudah disimulasikan oleh Kumagai dan Chouet (2000) dan dikombinasikan dengan Metode Sompi untuk analisis gelombang sintetik yang dihasilkan dari *Fluid-driven crack model*.

Parameter dalam model ini adalah α/a , b/μ , dan kemudahretakan rongga (*crack stiffness*) $C = (b/\mu) (L/d)$ dimana α adalah kecepatan rambat gelombang P dalam

medium, a adalah kecepatan bunyi dalam fluida, b adalah modulus bulk fluida, μ adalah rigiditas solid, W adalah Lebar crack, L adalah panjang crack dan d adalah panjang celah (Gambar 2.13) .

Perbandingan dimensi antara a/a dan ρ_f / ρ_s yang dikenal dengan kontras impedansi (*impedance contrast*) sebagai Z antara fluida dengan medium solid ditulis dalam persamaan (2.2).

$$Z = \frac{\alpha \rho_f}{a \rho_s} \quad (2.2)$$

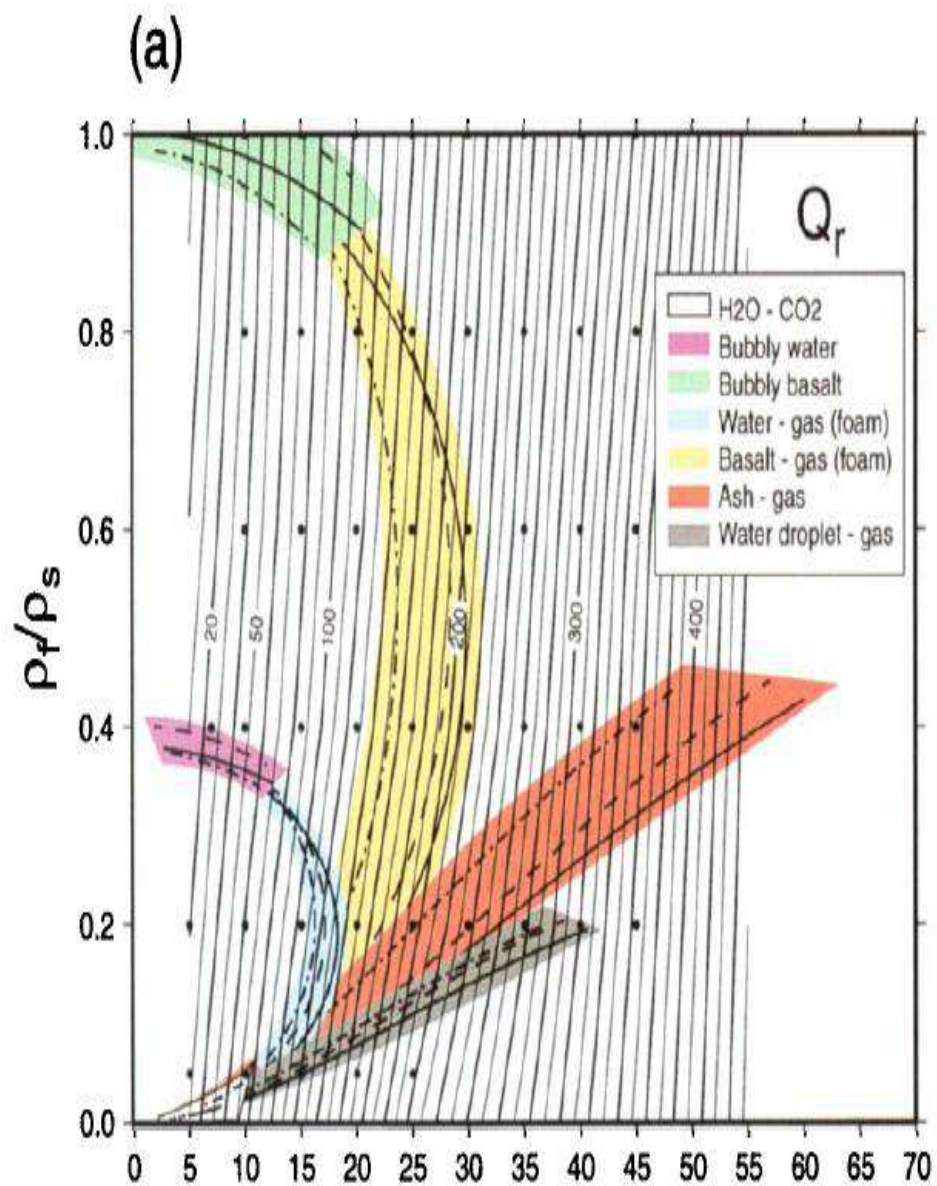


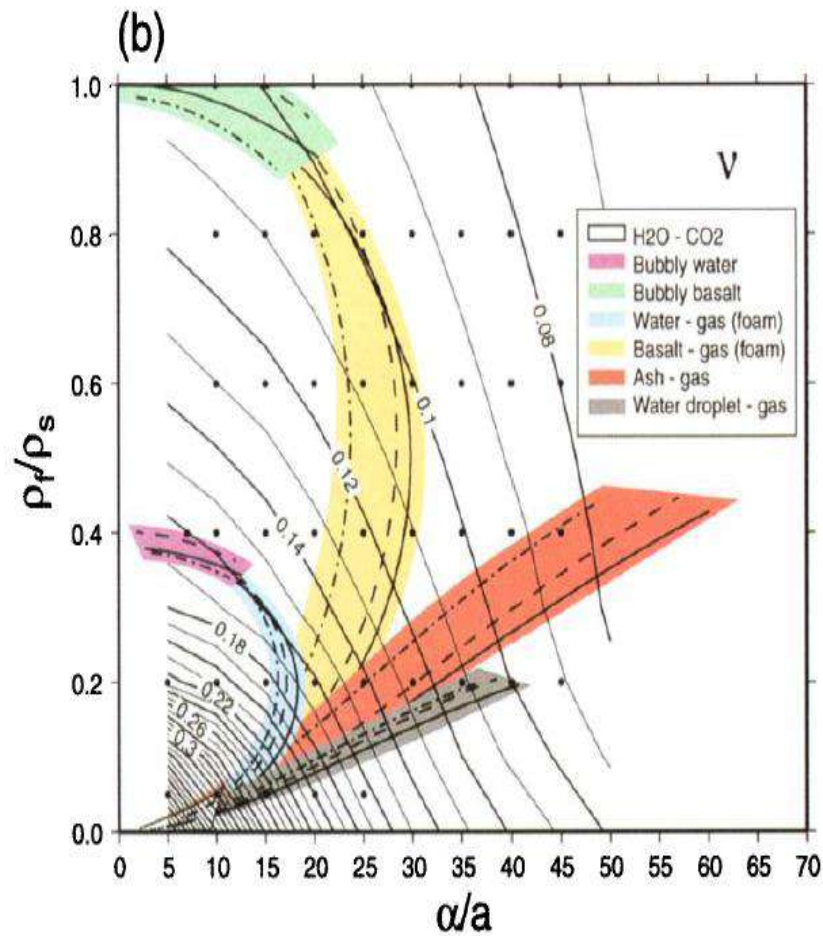
Gambar 2.13 Geometri Crack Model (Kumagai dan Chouet, 2000)

Perkembangan monitoring gunungapi menuntut adanya pemahaman dinamika fluida gunungapi. Aki dkk. (1977) mempelopori analisis kuantitatif untuk memodelkan dinamika fluida dengan memanfaatkan sinyal gempabumi

berfrekuensi rendah. Seismisitas *low frequency* baik yang berupa *event* gempabumi LP maupun tremor, telah dikaji di berbagai gunungapi di dunia.

Simulasi crack model dilakukan untuk mengestimasi Q dirangkum dalam diagram kontur α/a versus ρ_f/ρ_s dalam berapa variasi tipe fluida (Gambar 2.14).





Gambar 2. 14 Kontur diagram a/a versus p_f/p_s untuk bervariasi tipe fluida (Kumagai dan Chouet, 2000)

Gelombang sistetik dibuat dari *fluid-filled crack* yang mengandung beberapa tipe fluida. Fluida yang digunakan berupa campuran dari gas, cairan dan solid, termasuk campuran gas-gas ($H_2O - CO_2$, $H_2O - SO_2$), cairan – gas (air – H_2O dan Basalts – H_2O), serta *dusty* dan *misty gases* (*ash* – SO_2 dan *water droplet* - H_2O). Dots (•) mengidikasikan titik gelombang sintetik dikalkulasi, sedangkan lingkaran dengan dot (⊙) mengindikasikan Q_r pada mode resonansi dan geometri *crack* dihitung. Garis titik, garis strip dan garis strip titik mengindikasikan a/a dan p_f/p_s di kalkulasi pada tekanan 5 Mpa, 10 Mpa dan 20 atau 25 Mpa; secara berurutan (Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Properti matriks batuan dalam *Crack Model*
(Kumagai dan Chouet, 2000)

Tekanan P (Mpa)	Kecepatan Gelombang P α (m/s)	Massa Jenis Batuan ρ_s (Kg/m ³)
5	2700	2500
10	4000	2650
20 & 25	5000	2700

Hasil dari simulasi (Kumagai dan Chouet, 2000) dapat dirangkum sebagai berikut:

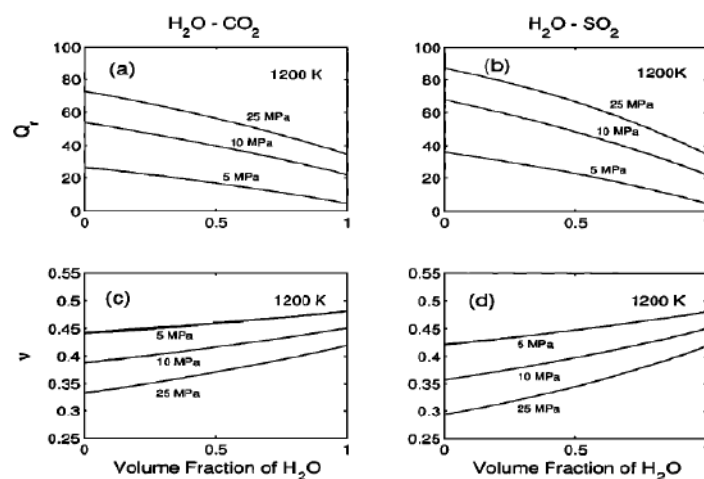
- 1) Q_r dalam campuran gas – gas berada dalam kisaran 20 s/d 70. dan Q_i^{-1} diabaikan karena nilainya kecil dibandingkan dengan Q_r^{-1} .
- 2) Q_r dapat berada para range satu untuk *pure liquid water* dan *pure liquid basalt* hingga 70 dan 110 dalam *bubbly water* atau *bubbly basalt*.
- 3) Q_r dalam *liquid – gas foams* nilainya lebih besar dari Q_r dalam *bubbly fluids* dan berada pada range s.d 100 dalam campuran *water – gas*, dan 160 dalam campuran *basalt – gas*.
- 4) Q_r dalam *dusty* dan *misty gas* berada pada range hingga beberapa ratus dikarenakan besar kontras kecepatan antara fluida dan matriks batuan.

II.6.1 *Crack* yang Mengandung Campuran Gas-Gas

Gambar 2.15 menunjukkan Q_r dan v untuk *crack* yang mengandung campuran gas gas (H_2O-CO_2 dan H_2O-SO_2) sebagai fungsi fraksi volume H_2O untuk tekanan antara 5 dan 25 MPa pada suhu tetap 1200 K. Kedua jenis campuran, Q_r meningkat dengan meningkatnya tekanan. Meskipun kecepatan suara α dari campuran ini tidak tergantung pada tekanan, peningkatan α dalam matriks batuan

menimbulkan kenaikan α/a yang lebih tinggi pada tekanan yang lebih tinggi, yang menghasilkan peningkatan Q_r dengan meningkatnya tekanan. Q_r berkurang dengan meningkatnya fraksi volume H_2O . Untuk sumber yang lebih dangkal (5 MPa), Q_r biasanya sekitar 20, dan untuk sumber yang lebih dalam (10 dan 25 MPa), Q_r biasanya sekitar 50. Q_r sedikit lebih besar untuk campuran H_2O-SO_2 daripada campuran H_2O-CO_2 . Untuk campuran gas-gas, Q_i jauh lebih besar dari Q_r yang diperkirakan di sini sehingga Q pada dasarnya setara dengan Q_r untuk campuran gas-gas.

frekuensi tanpa dimensi v berkisar antara 0,25 dan 0,5 dan meningkat dengan meningkatnya fraksi volume H_2O tetapi berkurang dengan meningkatnya tekanan. v sedikit lebih besar untuk campuran H_2O-CO_2 daripada campuran H_2O-SO_2 . Campuran gas-gas memiliki nilai α/a dan $\rho f / \rho_s$ yang lebih kecil, yang menghasilkan nilai v yang lebih besar karena v meningkat dengan penurunan α/a dan $\rho f / \rho_s$ (bisa dilihat pada Gambar 2.14 b).

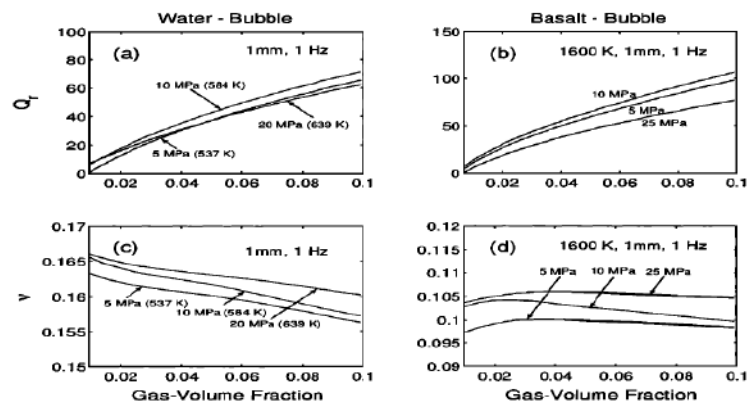


Gambar 2.15 Q_r dan v untuk *crack* yang mengandung campuran-campuran gas (a, c) gas H_2O-CO_2 dan (b, d) gas H_2O-SO_2 (Kumagai dan Chouet, 2000).

II.6.2 Crack yang Mengandung Campuran Gas-Cair

Gambar 2.16 menunjukkan Q_r dan ν untuk *Water-Bubble* dan *Basalt-Bubble*. Q_r untuk *Water-Bubble* meningkat dengan meningkatnya fraksi volume gas. Q_r berkisar dari hampir satu untuk cairan murni hingga 70 dan 110 untuk air bergelembung dan basal bergelembung, masing-masing, pada fraksi volume gas 10% (Gambar 2.16a dan 2.16b). Perlu dicatat bahwa Q_r meningkat dengan meningkatnya tekanan hingga 10 MPa dan kemudian berkurang dengan meningkatnya tekanan.

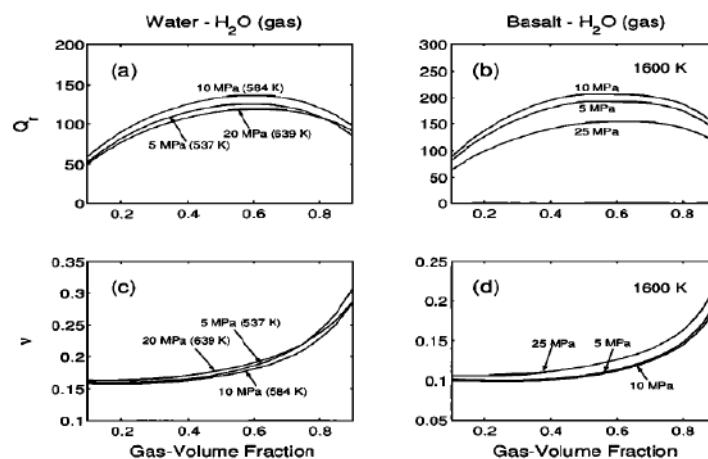
Frekuensi tak berdimensi ν dalam cairan bergelembung (Gambar 2.16c dan 2.16d) hampir konstan pada seluruh rentang fraksi dan tekanan volume gas. Nilai ν untuk *Water-Bubble* dan *Basalt-Bubble* masing-masing sekitar 0,16 dan 0,1. Estimasi ini jauh lebih kecil dari nilai diperoleh untuk campuran gas-gas.



Gambar 2.16 Q_r dan ν untuk retakan yang mengandung (a, c) air bergelembung dan (b, d) basal bergelembung sebagai fungsi fraksi volume gas dengan asumsi jari-jari gelembung 1 mm dan frekuensi gelombang perjalanan 1 Hz. (Kumagai dan Chouet, 2000)

Gambar 2.17 menunjukkan Q_r dan ν untuk *foams*. Nilai Q_r untuk kedua jenis *foams* (Gambar 2.17a dan 2.17b) mencapai maksimum di sekitar fraksi volume gas 50%. Q_r berkisar hingga 140 dalam campuran gas-air, dan hingga 210 dalam campuran basal-gas. Nilai Q_r yang besar ini sebagian besar dicapai melalui nilai α/a yang besar (lihat Gambar 2.14a). Dengan cara yang sama seperti Q_r dalam cairan bergelembung, Q_r dalam busa meningkat dengan meningkatnya tekanan hingga 10 MPa dan kemudian berkurang dengan meningkatnya tekanan.

Frekuensi tanpa dimensi ν dalam *foams* (Gambar 2.17c dan 2.17d) hampir konstan hingga fraksi volume gas 60%, dan kemudian meningkat dengan cepat seiring meningkatnya fraksi volume terhadap nilai ν yang sesuai dengan gas H₂O. Nilai ν dalam *Water-gas foams* dan *basalt-gas foams* yang hampir konstan adalah masing-masing 0,16 dan 0,1. Nilai-nilai ini identik dengan nilai yang diperkirakan untuk cairan bergelembung.

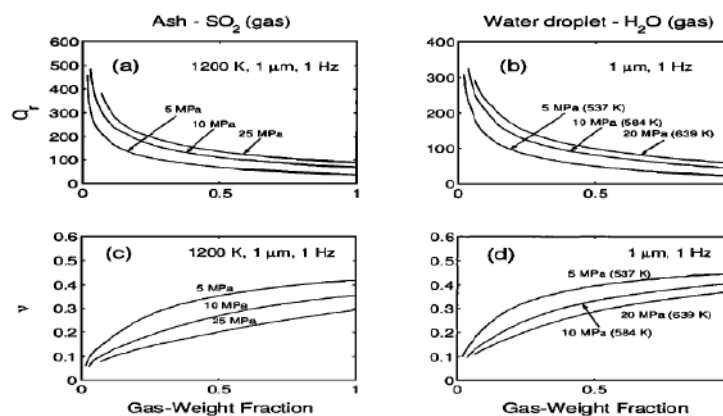


Gambar 2.17 Q_r dan ν untuk retakan yang mengandung (a, c) busa air - H₂O dan (b, d) busa basalt- H₂O. (Kumagai dan Chouet, 2000)

II.6.3 Crack Mengandung Gas Berdebu dan Berkabut

Gambar 2.18 menunjukkan Qr dan ν untuk gas berdebu dan berkabut. Bersama dengan peningkatan α dengan tekanan, ini mengarah pada nilai α/a yang sangat besar dan menghasilkan nilai Qr secara signifikan lebih besar dari 100 (seperti yang terlihat pada Gambar 2.18a dan 2.18b). Qr meningkat dengan penurunan fraksi berat gas murni dan dengan meningkatnya tekanan. Qr dapat berkisar hingga beberapa ratus di kedua jenis cairan, meskipun nilai Qr lebih besar dari 360 diekstrapolasi.

Frekuensi tanpa dimensi ν dalam gas berdebu dan berkabut (Gambar 2.18c dan 2.18d) menampilkan perubahan paling drastis di antara cairan yang ada. ν menunjukkan nilai yang sangat besar hingga 0,45 dalam cairan yang mengandung sejumlah besar gas dan berkurang dengan menurunnya fraksi berat gas. ν menjadi 0,1 atau lebih kecil dalam cairan dengan fraksi berat gas lebih kecil dari 0,1. (Kumagai dan Chouet, 2000).



Gambar 2.18 Qr dan ν untuk retakan yang mengandung campuran (a, c) gas ash-SO₂ dan (b, d) tetesan air-gas H₂O dengan fraksi volume gas murni lebih besar dari 0,5. Hasilnya diberikan sebagai fungsi fraksi berat dari gas murni, di mana kita mengasumsikan jari-jari partikel 1 μ m dan frekuensi gelombang 1 Hz (Kumagai dan Chouet, 2000).