PENENTUAN ARAH GUGURAN DAN ALIRAN PIROKLASTIK GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY - WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING)*

SKRIPSI

oleh :
ALIFAN ZEN NURANTO
185090700111028

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
2023

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PENENTUAN ARAH GUGURAN DAN ALIRAN PIROKLASTIK GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY - WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING)*

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dalam bidang Teknik Geofisika

oleh :
ALIFAN ZEN NURANTO
185090700111028

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2023

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

PENENTUAN ARAH GUGURAN DAN ALIRAN PIROKLASTIK GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY -WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING)*

Oleh :

ALIFAN ZEN NURANTO
185090700111028

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji pada tanggal 13 Juli 2023 dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dalam bidang Teknik Geofisika

Pembimbing I	Pembimbing II
Drs. Didik Yudianto, M.Si.	**Sulistiyani, S.Si., M.Sc.**
NIP. 196904251994121001	**NIP. 198710262015032006**

Mengetahui,
Ketua Departemen Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Dr. Eng. Masruroh, S.Si., M.Si.
NIP. 197512312002122002

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PERNYATAAN

Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama	**: Alifan Zen Nuranto**
NIM	**: 185090700111028**
Departemen	**: Fisika**
Penulis skripsi berjudul	**:**

PENENTUAN ARAH GUGURAN DAN ALIRAN PIROKLASTIK GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY -WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING)*

Dengan ini menyatakaan bahwa :

1. **Isi skripsi yang saya buat adalah benar – benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama – nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.**
2. **Apabila di kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung resiko yang akan saya terima.**

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 22 Mei 2023

Yang menyatakan,

(Alifan Zen Nuranto)
185090700111028

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PENENTUAN ARAH GUGURAN DAN ALIRAN PIROKLASTIK GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY -WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING)*

ABSTRAK

Gunung Merapi memiliki tipe erupsi khas yang disebut tipe Merapi yang dicirikan dengan pertumbuhan kubah lava, guguran dan awanpanas guguran.. Namun, adanya kabut tebal sering kali mengakibatkan guguran tidak dapat teramati secara visual. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui arah sumber seismik dari awan panas guguran Gunung Merapi yang terekam dan teramati secara visual di empat stasiun pada tanggal 19, 26 Januari 2021 dan 4 Juli 2021. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *array Frequency – Wavenumber Beamforming* untuk mengetahui parameter *back azimuth* dan *slowness* yang didukung dengan pergerakan hasil analisis *particle motion*. Hasil *back azimuth* dari metode ini akan dibandingkan keselarasnya dengan pengamatan visual. Hasil analisis menunjukkan event barat daya memiliki kecenderungan persebaran energi maksimum berada di rentang *back azimuth* 200° hingga 230°. Sedangkan pada arah tenggara cenderung terjadi pada rentang 120° hingga 140°. Terdapat 3 *event* dari 12 *event* hasil *fk-beamforming* yang memiliki arah guguran kurang sesuai dengan hasil observasi. Sedangkan, persebaran data *particle motion* kurang dapat mendukung untuk penentuan arah awan panas guguran. Hasil menunjukkan adanya disperse persebaran energi yang tidak terfokus pada satu rentang arah tertentu. Pada hasil *particle motion*, sebagian besar persebaran data yang dihasilkan menunjukkan arah yang kurang sesuai dengan hasil observasi visual. Disebabkan karena penentuan gelombang P yang sulit pada *event* awan panas guguran.

Kata Kunci : Gunung Merapi, awan panas guguran, *frequency-wavenumber beamforming, back azimuth, slowness*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DETERMINATION OF THE DIRECTION OF ROCKFALL AND PYROCLASTIC FLOW AT MOUNT MERAPI USING THE FREQUENCY -WAVE NUMBER BEAMFORMING (FK – BEAMFORMING) METHOD

ABSTRACT

Mount Merapi has a unique eruption type known as the Merapi type, which is distinguished by the growth of a lava dome, rockfall, and pyroclastic flow. The thick fog often results in rockfall that cannot be observed visually. This research aims to find out the direction of the seismic source of the hot cloud rockfall of Mount Merapi recorded and visually observed at four stations 19, 26 January 2021 and 19 June 2021. This research used the Frequency–Wavenumber Beamforming array method to determine the back azimuth and slowness parameters supported by the Particle Motion method. Thus, the back azimuth results from this method will be compared for alignment by visual observation. The results of the analysis show the Southwest event energy has the highest tendency for energy distribution across the range back azimuth 200° to 230. Meanwhile, in the southeast, it tends to occur in the range of 120° to 140. There were 3 out of 12 events resulting from fk-beamforming which had a fall direction not in accordance with the observations data. Meanwhile, the distribution of particle motion data is less able to support the determination of the direction of pyroclastic flow. Some color variations indicate that energy distribution is not focused on a specific range of directions. In the results of particle motion, the majority of the distribution of the resulting data displays a direction that is inconsistent with the results of visual observations. This is due to the difficulty in picking the P wave during the pyroclastic flow event.

Keyword : *merapi volcano, pyroclastic flow, frequency-wavenumber beamforming, back azimuth, slowness*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Penulis panjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atasnya kelimpahan Rahmat dan karunia-Nya, Penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul "Penentuan Arah Guguran dan Aliran Piroklastik Gunung Merapi Menggunakan Metode *Frequency – Wave Number Beamforming (FK – Beamforming)*". Penulisan laporan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi persyaratan gelar Strata I (S1) Program Studi Teknik Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang.

Penulis menyadari bahwa berhasilnya studi dan penyusunan laporan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak yang telah memberikan semangat dan doa kepada Penulis, maka pada kesempatan kali ini mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Keluarga Penulis yang senantiasa memberikan semangat, dukungan, motovasi dan doa yang selama ini tidak pernah berhenti kepada Penulis.
2. Ibu Dr. Eng. Masruroh, S.Si., M.Si. selaku ketua Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya.
3. Bapak Drs. Alamsyah Mohammad Juwono, M.Sc., Ph.D. selaku ketua Program Studi Teknik Geofisika Universitas Brawijaya
4. Bapak Drs. Didik Yudianti, M.Si. selaku dosen pembimbing I Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, bantuan, saran dan masukan kepada Penulis.
5. Ibu Sulistiyani, S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing II atas kesediaan waktu, bimbingan, dan kesempatan bagi Penulis untuk menyelesaikan laporan ini.
6. Bapak dan Ibu yang bekerja di kantor BPPTKG yang memberikan kesempatan untuk penulis dapat melaksanakan tugas akhir di BPPTKG.
7. Teman – teman Teknik Geofisika Angkatan 2018 yang Namanya tidak saya sebutkan satu per satu, yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada Penulis.
8. Teman – teman Unit Aktivitas Band Universitas Brawijaya yang Namanya tidak saya sebutkan satu persatu yang selalu

memberikan waktu, dukungan, pengalaman dan semangat kepada Penulis.

9. Tenaga pendidik Departemen Fisika Universitas Brawijaya yang mengampu sejumlah mata kuliah yang ditempuh oleh Penulis, yang Namanya tidak dapat disebutkan satu per satu, terimakasih atas semua ilmu yang diberikan.

Malang, 22 Mei 2023

Alifan Zen Nuranto

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN..... **Error! Bookmark not defined.**
LEMBAR PERNYATAAN v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR..... xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR LAMPIRAN xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitan..... 3
1.4 Batasan Masalah..... 4
1.5 Manfaat Penelitian..... 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Gelombang Seismik 5
2.1.1 Gelombang Badan 5
2.1.2 Gelombang Permukaan 6
2.2 Aktivitas Seismik 8
2.2.1 Vulkanotektonik (VT) 8
2.2.2 Multifase (MP) 9
2.2.3 *Low-frequency* (LF)..... 9
2.2.4 *Very Long Period* (VLP) 10
2.2.5 Tremor Vulkanik 10
2.2.6 Guguran/*Rockfall* (RF) 11

2.2.7 Aliran Piroklastik (PF) 11
2.3 *Array* 12
2.4 *Beamforming* 14
2.5 Analisis *Frequency-wavenumber* (*FK*) 16
2.6 Gunung Merapi 17
BAB III METODE PENELITIAN 20
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 20
3.2 Materi Penelitian 20
3.3.1 Data Penelitian 20
3.3.2 Perangkat Lunak 22
3.3 Prosedur Penelitian 23
3.4.1 Persiapan Data 23
3.4.2 Data Filtering 26
3.4.3 FK Beamforming 29
3.4.4 Particle Motion 30
3.4.5 Interpretasi 32
3.4 Diagram Alir 33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 34
4.1 Karakteristik Sinyal 34
4.2 Analisis *FK-Beamforming* dan *Particle Motion* 41
4.2.1. 7 Januari 2021 (01:02:26 UTC) 41
4.2.2. 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC) 43
4.2.3. 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC) 45
4.2.4. 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC) 47
4.2.5. 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC) 49
4.2.6. 26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC) 51
4.2.7. 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC) 53
4.2.8. 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC) 55

4.2.9. 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC) 57
4.2.10. 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC) 59
4.2.11. 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC) 61
4.2.12. 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC) 63
4.3 Perbandingan Arah Pengolahan dan Arah Observasi 65
4.3.1 Perbandingan Arah *FK-Beamforming* dan Observasi 65
4.3.2 Perbandingan Arah *Particle Motion* dan Observasi . 66
BAB V PENUTUP 70
5.1 Kesimpulan 70
5.2 Saran 70
DAFTAR PUSTAKA 72
LAMPIRAN 76
Lampiran 1. Laporan hasil observasi visual awan panas guguran Gunung Merapi 76
Lampiran 2. Sinyal dan Spektrogram Data Penelitian Setelah Dilakukan *Bandpass Filter* 1.0 Hz hingga 12.0 Hz 84
Lampiran 3. Nilai hasil perhitungan *back azimuth, slowness* dan *relative power* 108

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi gelombang primer (Elnashai, dkk. 2008).....6
Gambar 2.2 Ilustrasi gelombang sekunder (Elnashai, dkk. 2008).....6
Gambar 2.3 Ilustrasi gelombang *love* (Elnashai, dkk. 2008).....7
Gambar 2.4 Ilustrasi gelombang *rayleigh* (Elnashai, dkk. 2008).....7
Gambar 2.5 Bentuk gelombang VTA (a) dan VTB (b) yang terekam di stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013).....8
Gambar 2.6 Bentuk gelombang multifase yang terekam dai stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013).....9
Gambar 2.7 Bentuk gelombang *low-frequency* yang terekam di stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013).....9
Gambar 2.8 Bentuk Gelombang *Very Long Period* Yang Terekam Di Stasiun L56 Pada 15 Oktober 2010 (Jousset, 2013)....10
Gambar 2.9 Sinyal tremor vulkanik Gunung Merapi pada 3 Oktober 2010 (Dairoh, 2017).....10
Gambar 2.10 Bentuk gelombang *rockfall* yang terjadi di Gunung Merapi 12 April 2019 (Darmawan, 2020).....11
Gambar 2.11 Bentuk gelombang aliran piroklastik yang terjadi di Gunung Merapi pada 14 Juni 2006 dan 26 Oktober 2010 (Ortege, 2022).....12
Gambar 2.12 Arah perambatan gelombang pada bidang vertikal (a) dan bidang horizontal (b) (Rost, 2002).....12
Gambar 2.13 Komponen *vector slowness* (*u*) (Rost, 2002).....13
Gambar 2.14 Modifikasi komponen *vector slowness* (Rost, 2002)..14
Gambar 2.15 Contoh "*delay and sum*" pada metode *beamforming* (Rost, 2002).....15
Gambar 2.16 Ilustrasi lokasi stasiun pada *vector* ***rj***, dimana pusat *array* berada pada pusat koordinat kartesian (Rost, 2002) 16
Gambar 2.17 Fisiografi pulau Jawa (Van Bemmelen, 1949 dengan modifikasi), lokasi penelitian termasuk dalam zona depresiasi Jawa dan zona randublatung (Lingkaran Merah).....18
Gambar 2.18 Grafik letusan Gunung Merapi sejak abad 18 hingga abad 20 (PVMBG, 2013).....19
Gambar 3. 1 Peta jaringan stasiun seismik yang digunakan pada penelitiantian.....21

Gambar 3.2 Input data serta waktu saat terjadinya *event* dalam format waktu UTC.....23
Gambar 3.3 Contoh sinyal pada komponen vertikal di stasiun MEPAS sebelum dipotong(a), sinyal pada stasiun MEPAS komponen vertikal setelah dipotong (b).....24
Gambar 3.4 Menghilangkan respon instrumen pada sinyal.....25
Gambar 3.5 Contoh informasi koordinat dan elevasi yang dimasukkan pada stasiun MEPAS.....26
Gambar 3.6 Jarak setiap stasiun seisimik yang digunakan pada penelitian.....26
Gambar 3.7 Contoh sinyal yang memiliki *gap* pada komponen *north – south* di stasiun MEGRA (a), sinyal yang sudah disatukan menggunakan interpolasi (b) 27
Gambar 3.8 Sinyal sebelum dilakukan *bandpass filter* (a), dan sesudah ban*dpass filter* (b) pada komponen z di stasiun MEPAS 28
Gambar 3.9 Parameter input untuk dilakukan *fk-beamforming*.....30
Gambar 3.10 Contoh hasil *fk-beamforming* pada *event* arah barat daya 30
Gambar 3.11 Pemotongan sinyal untuk dilakukan analisis *particle motion* 31
Gambar 3.12 Contoh *particle motion* pada stasiun MEPAS pada tanggal 19 Januari 2021 (17:59:00 UTC).....32
Gambar 3.13 Diagram alir penelitian 33
Gambar 4.1 Sinyal Yang mengalami gap (a) dan setelah interpolasi (b) pada awan panas guguran tanggal 19 Januari 2021 17:59:00 (UTC) di stasiun MEGRA komponen *north-south*.....35
Gambar 4.2 Sinyal, spektrogram dan spektrum komponen vertikal pada 19 Januari 2021 pukul 17:59:00(UTC) stasiun MEPAS(a) dan MELAB(b) dengan arah barat daya....36
Gambar 4.3 Sinyal, spektrogram dan spektrum 19 Januari 2021 pukul 17:59:00(UTC) stasiun MEJRO(a) dan MEGRA(b) dengan arah barat daya.....37
Gambar 4.4 Sinyal, spektrogram dan spektrum 4 Juli 2021 pukul 04:44:00(UTC) stasiun MEPAS(a) dan MELAB(b) dengan arah tenggara 39

Gambar 4.5 Sinyal, spektrogram dan spektrum 4 Juli 2021 pukul 04:44:00(UTC) stasiun MEJRO(a) dan MEGRA(b) dengan arah tenggara 40
Gambar 4.6 Plot Diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC) 42
Gambar 4.7 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada Event 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC) 44
Gambar 4.8 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC) 46
Gambar 4.9 Plot Diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC) 48
Gambar 4.10 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC) 50
Gambar 4.11 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 19 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC) 52
Gambar 4.12 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC) 54
Gambar 4.13 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC) 56
Gambar 4.14 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC) 58
Gambar 4.15 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC) 60
Gambar 4.16 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC) 62
Gambar 4.17 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada event 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC) 64

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Penelitian Terdahulu 3
Tabel 3.1 Stasiun Jaringan Seismik Gunung Merapi Yang Digunakan Pada Penelitian 20
Tabel 3.2 Informasi Data Event Terobservasi 22
Tabel 4.1 Tabel Informasi Event yang Terobservasi..... 38
Tabel 4.2 Arah Observasi dan Hasil Pengolahan *FK-Beamforming* 66
Tabel 4.3 Persebaran Data *Particle Motion*. Warna Biru Menunjukkan Arah Yang Sesuai Dengan Hasil Observasi..... 68

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan Hasil Observasi Visual Awan Panas Guguran Gunung Merapi 76
Lampiran 2. Sinyal dan Spektrogram Data Penelitian Setelah Dilakukan *Bandpass Filter* 1.0 Hz hingga 12.0 Hz 84
Lampiran 3. Nilai Hasil Perhitungan *Back azimuth*, *Slowness* dan *Relative Power* 108

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) adalah salah satu daerah di Indonesia yang berada di Zona Pegunungan Selatan menurut Van Bemmelen (1949). Daerah ini berbatasan langsung dengan Samudera Hindia yang dilewati Lempeng Indo-Australia dan Eurasia serta terdapat Gunung Merapi. Menurut Daryono (2010), keberadaan lempeng dan gunungapi ini menjadikan Daerah Istimewa Yogyakarta mengalami aktivitas kegempaan yang cukup tinggi dari gempa tektonik maupun gempa vulkanik.

Gunung Merapi menjadi salah satu gunungapi aktif yang ada di Indonesia. Menurut Bemmelen (1949), gunung ini terletak diperbatasan Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta pada 110°26’30”BT dan 7°32’30”LS dengan ketinggian 2980 meter diatas permukaan laut.

Tercatat oleh BNPB (2012) pada 26 Oktober hingga 5 November 2010, Gunung Merapi mengakibatkan adanya kerugian jiwa dan material. Erupsi ini berpotensi pula dapat terjadi lagi jika dapur magma Gunung Merapi sudah tidak mampu menahan atau mengakomodir jumlah magma tersebut ke permukaan bumi.

Selain erupsi besar pernah terjadi, Gunung Merapi juga sering kali tercatat mengalami aktivitas seismik lainnya seperti gempa vulkanik dalam (VTA), gempa vulkanik dangkal (VTB), multifase (MP), *low frequency* (LF), guguran (RF) dan aliran piroklasitk (PF). Peningkatan aktivitas yang terus menerus ini biasanya menjadi pertanda awal akan adanya erupsi, tergantung dengan peningkatan energinya pula. Pada jurnal yang ditulis oleh Santoso (2013), tercatat saat erupsi 2010 di rentang September hingga Desember mengalami peningkatan dan puncaknya berada saat erupsi di bulan November.

Oleh karena itu, pencatatan setiap kejadian ini sangat penting untuk digunakan sebagai acuan penentuan status

Gunung Merapi. Salah satu yang paling penting adalah kejadian guguran dan awan panas guguran. Guguran sering terjadi pada puncak gunung akibat aktivitas seismik di bawah permukaan. Menurut Santoso(2013), tipikal erupsi Gunung Merapi berhubungan dengan *lava dome* yang *collapse*, sehingga mengakibatkan terjadinya awan panas guguran yang membahayakan, karena aliran ini juga mengakibatkan guguran batuan juga. Seringkali pula guguran tidak teramati secara visual arah gugurnya diakibatkan oleh adanya kabut yang tebal.

Salah satu metode yang digunakan untuk identifikasi arah dari suatu *event* yaitu dengan menggunakan metode *array*. Metode ini menurut Rost (2002) memiliki nilai *signal to noise ratio* (SNR) yang lebih baik karena adanya "penjumlahan" di masing-masing data perekaman pada tiap stasiun *array*.

Salah satu metode *array* yaitu *beamforming*. Terdapat penelitian yang sudah pernah dilakukan berdasarkan metode ini, seperti yang tertera oleh pada Tabel 1.1. Menurut Rost (2002) Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui *back azimuth* dan *slowness* bergantung dari penjalaran gelombang seismik yang datang (Rost, 2002). Pada jurnal yang ditulis oleh Lacroix (2011), dilakukan monitoring di daerah rawan longsor Séchilenne yang menunjukkan banyaknya guguran yang terjadi khususnya di area Les Ruines. Pada metode ini, digunakan metode *beamforming* melihat korelasi aktivitas *microearthquake* dengan guguran yang terjadi di daerah tersebut. *Beamforming* digunakan untuk mengetahui arah guguran yang terjadi sehingga diketahui kemungkinan lokasi akhirnya untuk dihitung volume yang terakumulasi.

Dengan demikian, untuk mengetahui arah guguran yang terjadi di Gunung Merapi yang tidak teramati arahnya akibat kabut, pada penelitian ini akan digunakan metode *fk-beamforming*, untuk mengetahui arah awan panas guguran dan atau guguran yang terjadi di Gunung Merapi. Analisis *frequency-wavenumber (fk)* merupakan salah satu metode yang dapat membantu penentuan arah sumber seismik. Selain itu digunakan pula *particle motion* untuk mendukung hasil dari metode *fk-beamforming.*

Tabel 1.1 Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis	Tahun	Bentuk	Penerbit
1	*Location of Seismic Signals Associated with Microearthquakes and Rockfalls on the Séchilienne Landslide, French Alps*	P. Lacroix and A. Helmstetter	2011	Jurnal	Bulletin of the Seismological Society of America
2	*Array Seismology: Method and Applications*	Sebastian Rost, *etc*	2002	Jurnal	Reviews of Geophysics

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah pada penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai hasil *fk - beamforming* yang dilakukan dalam penentuan arah sumber seismik dari awan panas guguran?
2. Bagaimana penerapan hasil analisis *particle motion* untuk mendukung hasil *fk-beamforming*?

1.3 Tujuan Penelitan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai *back azimuth* dan efektifitas metode *fk-beamforming* dalam penentuan arah aliran piroklastik di Gunung Merapi.
2. Menentukan arah penerapan *particle motion* untuk data pendukung hasil pengolahan *fk-beamforming*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian yang dilakukan ini yaitu sebagai berikut:

1. Wilayah penelitian mencakup Gunung Merapi yang berada di koordinat 7°32’30” LS dan 110°26’30” BT.
2. Data yang digunakan adalah data gempa aliran piroklastik terekam di 4 stasiun dan terjadi pada tanggal 7, 19, 26 Januari 2021 dan 4 Juli 2021 dan teramati langsung melalui visual.
3. Penelitian menggunakan *fk-beamforming* yang teradpat pada *Obspy* yang merupakan salah satu modul pengolahan seismologi.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah dilaksanakan penelitian ini, diharapkan mampu memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi arah sumber seismik dari aliran piroklastik dan atau guguran jika tidak teramati secara visual.
2. Hasil analisis *particle motion* sebagai pendukung arah sumber seismik

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat di dalam dan permukaan bumi yang bersal dari suatu sumber seperti gempa, ledakan, aktivitas gunung api, aktivitas manusia dan longsoran. Gelombang seismik menjalar ke berbagai arah dengan nilai amplutido yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jarak yang ditempuh oleh gelombang tersebut. Sifat elastisitas pada interior bumi sangat berpengaruh terhadap perambatan gelombang (Lowrie, 2007).

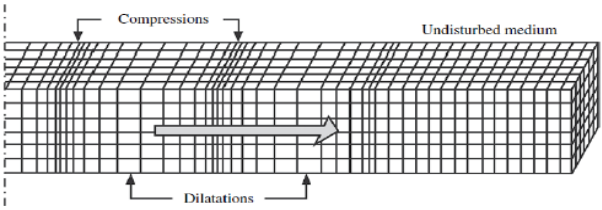
Gelombang seismik terbagi menjadi 2 yaitu gelombang yang merambat di interior bumi (*body waves*) dan gelombang yang merambat di permukaan (*surface waves*) (Telford, 1990).

2.1.1 Gelombang Badan

Gelombang badan merupakan gelombang seismi yang merambat pada suatu media dengan arah rambat gelombangnya ke segala arah dan melalui bagian dalam permukaan bumi. Gelombang badan terbagi menjadi 2, yaitu :

a. Gelombang Primer

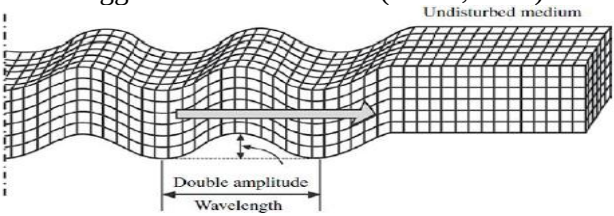
Gelombang primer atau biasa disebut gelombang P memiliki arah perambatan gelombang yang longitudinal, dimana pergerakan partikelnya sejajar dengan arah perambatannya (Gambar 2.1). Gelompang ini memiliki karakteristik berupa kecepatannya yang paling tinggi diantara gelombang lainnya, sehingga merupakan gelombang yang paling pertama terekam oleh seismograf. Menurut Braile (2006), gelombang primer memiliki kecepatan mulai dari 4-7 km/s di kerak bumi, lebih dari 8 km/s di mantel dan inti bumi, ±1,5 km/s di dalam air dan ±0,3 km/s di udara.



Gambar 2.1 Ilustrasi gelombang primer (Elnashai, dkk. 2008)

b. Gelombang Sekunder

Gelombang sekunder atau biasa disebut gelombang S memiliki arah perambatan yang tegak lurs dengan arah penjalaran gelombang, sehingga membentuk gelombang transversal dan disebut juga sebagai *shear waves* (Gambar 2.2). Kecepatan gelombang ini berada pada 3 km/s hingga 4 km/s di kerak bumi, lebih dari 4,5 km/s di mantel bumi dan 2,5 km/s hingga 3 km/s di inti bumi (Braile, 2006).



Gambar 2.2 Ilustrasi gelombang sekunder (Elnashai, dkk. 2008)

2.1.2 Gelombang Permukaan

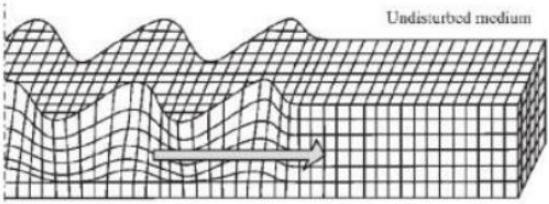
Gelombang permukaan mengalami perambatan di atas permukaan bumi dan cenderung memiliki potensi kerusakan bangunan diatasnya. Gelombang ini cenderung merusak karena memiliki frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar. Terdapat dua tipe gelombang permukaan, yaitu :

a. Gelombang *Love*

Gelombang *love* terjadi karena gelomang S yang arah gerakan partikelnya horizontal akibat adanya interferensi konstruktif. Akibatnya, seringkali gelombang ini yang membuat terjadinya pergeseran tanah kearah horizontal

(Gambar 2.3). Frekuensi gelombang ini cenderung rendah dengan kecepatan rambatnya yang tinggi, dimana kecepatan rambat gelombang (V_L) lebih besar dari kecepatan gelombang S permukaan (V_{S1}) dan lebih kecil dari kecepatan gelombang S di lapisan dalam (V_{S2}) (Lowrie, 2007)

$$V_{S1} < V_L < V_{S2}$$

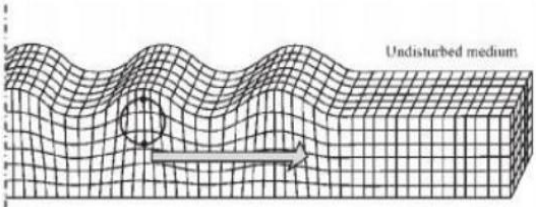


Gambar 2.3 Ilustrasi gelombang *love* (Elnashai, dkk. 2008)

b. Gelombang *Reyleigh*

Gelombang ini terbetnuk akibag interaksi gelombang S yang terpolarisasi arah gerakan partikelnya pada bidang vertical dan gelombang P, lalu diteruskan merambat secara parallel terhadap permukaan. Gerakannya eliptik tegak lurus terhadap arah penjalarannya (Gambar 2.4). Gelombang ini memiliki frekuensi yang tinggi dan kecepatan rambat Rayleigh (V_R) yang rendah (Lowrie, 2007).

$$\boldsymbol{V_R \approx 0,92\, V_S} \qquad (2.1)$$



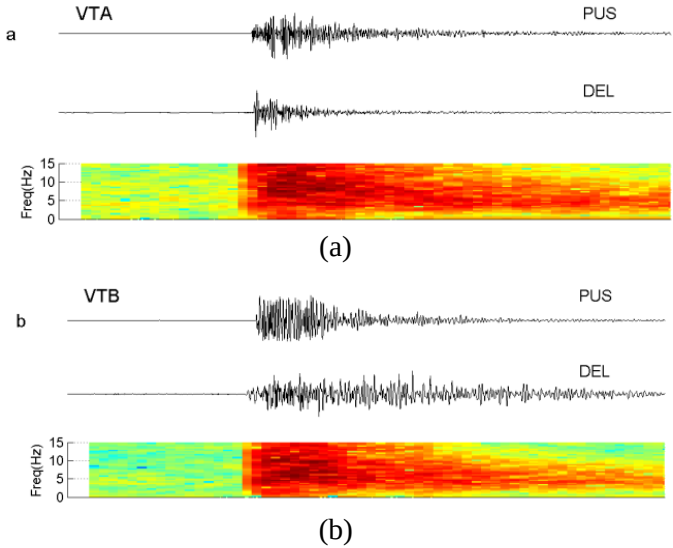
Gambar 2.4 Ilustrasi gelombang *rayleigh* (Elnashai, dkk. 2008)

2.2 Aktivitas Seismik

Aktivitas seismik pada gunung vulkanik diklasifikasikan menjadi beberapa tipe menurut Ratdomopurbo (1995). Aktivitas ini terbagi berdasarkan sinyal seismik utama antara lain gempa volcanotectonic (VT), multifase (MP), *low-frequency* (LF), *very long period* (VLP), tremor, guguran (RF) dan aliran piroklastik (PF).

2.2.1 Vulkanotektonik (VT)

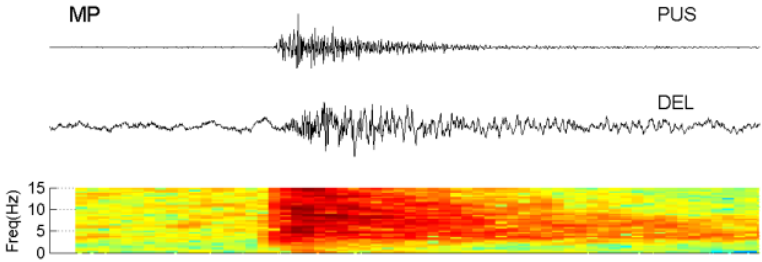
Gempa vulkanik (VT) memiliki karakteristik sinyal dengan gelombang datang yang jelas dan rentang frekuensi hingga 25 Hz Ratdomopurbo (1995). Berdasarkan jurnal milik Santoso (2013), pada erupsi Gunung Merapi, VT terbagi menjadi VTA dan VTB. *Event* VTA (Gamber 2.5a) dikarakteristikkan memiliki kedalaman hiposenter lebih dari 2 km dari puncak, dengan gelombang P dan S yang jelas. Sedangkan, VTB (Gambar 2.5b) memiliki kedalaman hiposenter kurang dari 2 km dari puncak dan gelombang S pada *event* ini cenderung tidak jelas.



Gambar 2.5 Bentuk gelombang VTA (a) dan VTB (b) yang terekam di stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013)

2.2.2 Multifase (MP)

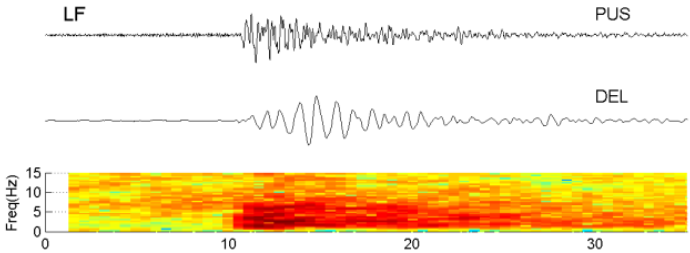
Multifase memiliki karakteristik frekuensi maksimumnya diantara 4 Hz hingga 8 Hz dengan waktu tiba gelombang yang perlahan hingga maksimum frekuensinya (Gambar 2.6). Aktivitas ini biasanya terjadi di kedalaman dangkal dengan memiliki kaitan dengan aliran magma dan pertumbuhan *dome* (Ratdomopurbo, 2013).



Gambar 2.6 Bentuk gelombang multifase yang terekam dai stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013)

2.2.3 *Low-frequency* (LF)

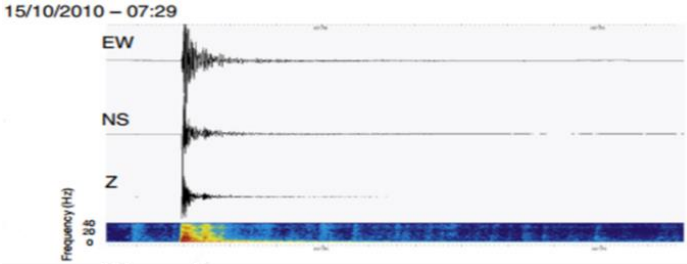
Low-frequency memiliki karakteristik gelombang tiba yang sama dengan multifase, tetapi memiliki frekuensi maksimum pada rentang 1 Hz hingga 3 Hz (Gambar 2.7). Gelombang sinyalnya cenderung berangsur angsur dan memiliki gelombang S yang kurang jelas (Santoso, 2013).



Gambar 2.7 Bentuk gelombang *low-frequency* yang terekam di stasiun MEPUS dan MEDEL (Santoso, 2013)

2.2.4 *Very Long Period* (VLP)

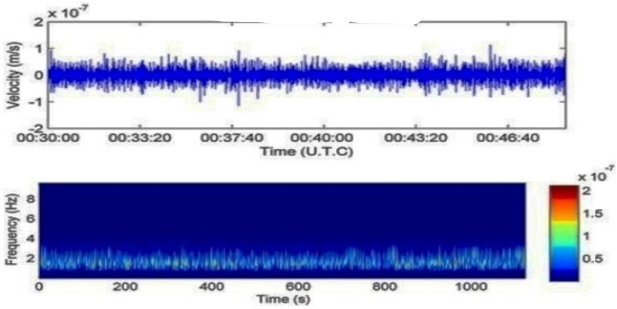
Very long period pada umumnya berhubungan atau gabungan dari komponen frekuensi rendah dari MP maupun LF (Gambar 2.8). Pada *event* ini biasanya diinterpretasikan sebagai perpindahan massa dari suatu fluida (Chouet, 2005).



Gambar 2.8 Bentuk Gelombang *Very Long Period* Yang Terekam Di Stasiun L56 Pada 15 Oktober 2010 (Jousset, 2013)

2.2.5 Tremor Vulkanik

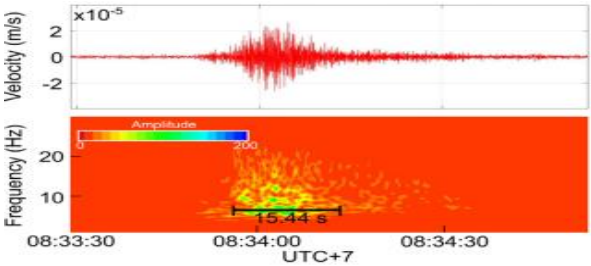
Tremor vulkanik merupakan getaran dalam kurun waktu tertentu yang secara kontinyu dengan gerakan awal dan akhir yang kurang jelas (Gambar 2.9). Tremor menjadi indikasi adanya pergerakan magma dan gas di kedalaman yang dangkal. Pada Gunung Merapi, kejadian tremor berada pada rentang frekuensi 2 Hz hingga 5 Hz (Santoso, 2013).



Gambar 2.9 Sinyal tremor vulkanik Gunung Merapi pada 3 Oktober 2010 (Dairoh, 2017)

2.2.6 Guguran/*Rockfall* (RF)

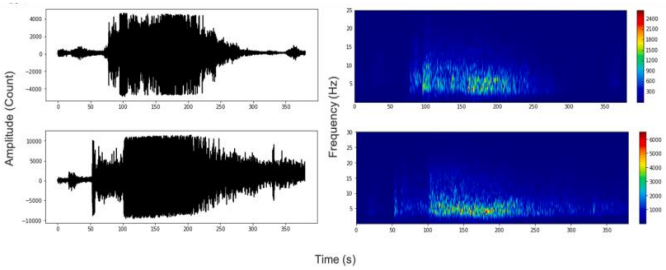
Guguran memiliki karakteristik gelombang yang memiliki kenaikan amplitude secara bertahap pada rentang waktu tertentu, kemudian mengalami penurunan gelombang yang bertahap pula (Gambar 2.10). Kejadian ini pada umumnya memiliki durasi yang cukup panjang dengan rentang frekuensi 5 Hz hingga 20 Hz (Santoso, 2013).



Gambar 2.10 Bentuk gelombang *rockfall* yang terjadi di Gunung Merapi 12 April 2019 (Darmawan, 2020)

2.2.7 Aliran Piroklastik (PF)

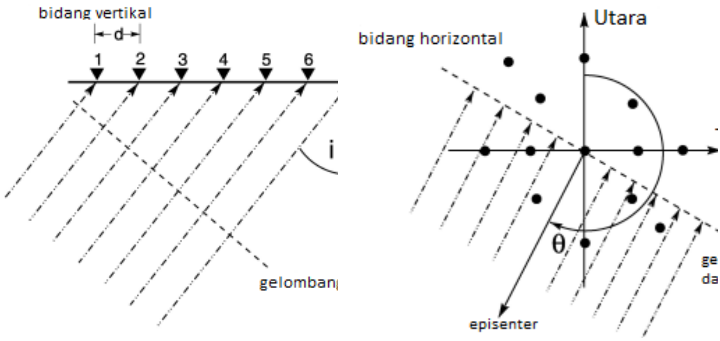
Aliran piroklastik terjadi akibat runtuhnya *dome*, yang kemudian menghasilkan guguran. Sehingga, karakteristiknya cenderung sama dengan guguran. Memiliki durasi yang lama, tetapi amplitudonya lebih tinggi (Gambar 2.11). Aliran piroklastik ini biasanya disebut juga sebagai awan panas guguran (Santoso, 2013).



Gambar 2.11 Bentuk gelombang aliran piroklastik yang terjadi di Gunung Merapi pada 14 Juni 2006 dan 26 Oktober 2010 (Ortege, 2022)

2.3 *Array*

Arah perambatan gelombang elastik pada medium bumi dapat diketahui melalui sudut insiden vertikal (*i*) (Gambar 2.12a) dan *back azimuth* (θ) (Gambar 2.12b). Sudut insiden adalah sudut vertikal yang terbentuk antara stasiun dan sumber *event*. Tetapi, pada *array* digunakan *inverse apparent velocity* dari gelombang yang disebut sebagai *slowness.* Sedangkan, *back azimuth* merupakan sudut yang terbentuk dari gelombang yang terekam antara arah utara dan episenter sumber gelombang (Rost, 2002).



(a) *(b)*

Gambar 2.12 Arah perambatan gelombang pada bidang vertikal (a) dan bidang horizontal (b) (Rost, 2002)

Slowness (*u*) digunakan sebagai parameter dalam identifikasi beda fase penjalaran gelombang. Sudut insiden dan

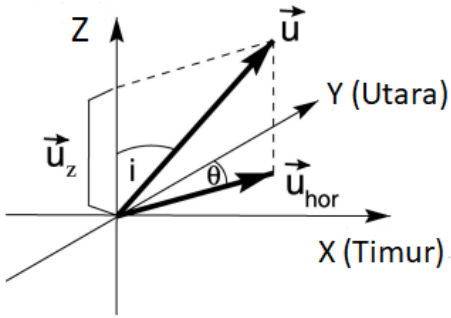
kecepatan medium bawah permukaan (v_0) yang diketahui digunakan untuk penentuan nilai *horizontal slowness*.

$$\boldsymbol{u} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{v_{app}}} = \frac{\boldsymbol{sin\, i}}{\boldsymbol{v_0}} = \boldsymbol{u_{hor}} \qquad (2.\ 2)$$

Pada Gambar 2.13, *Horizontal slowness* dan *back azimuth* menghasilkan *vector slowness* ($\bar{u}$), yaitu arah dari perambatan gelombang dan berlawanan dengan kecepatan gelombang. Arah datang gelombang pada komponen *array* dapat dideskripsikan oleh *vector slowness* $\bar{u} = (\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z)$. Jika kedua komponen *vector slowness* dan *back azimuth* dikombinasikan pada *vector slowness*, akan menghasilkan persamaan 2.3

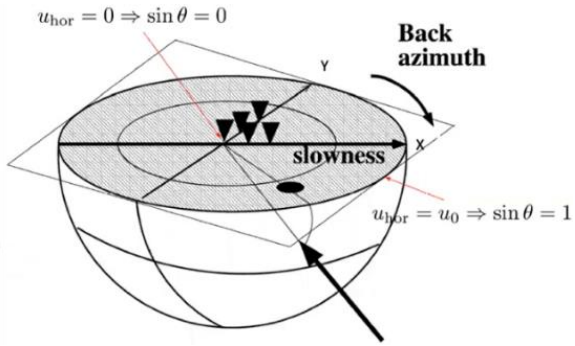
$$\bar{u} = (\bar{u}_x, \bar{u}_{y,} \bar{u}_z)$$

$$= \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{v_0}}(\boldsymbol{sin\, i\, sin\, \theta}, \boldsymbol{sin\, i\, cos\, \theta}, \boldsymbol{cos\, i}) \qquad (2.\ 3)$$



Gambar 2.13 Komponen *vector slowness* (*u*) (Rost, 2002)

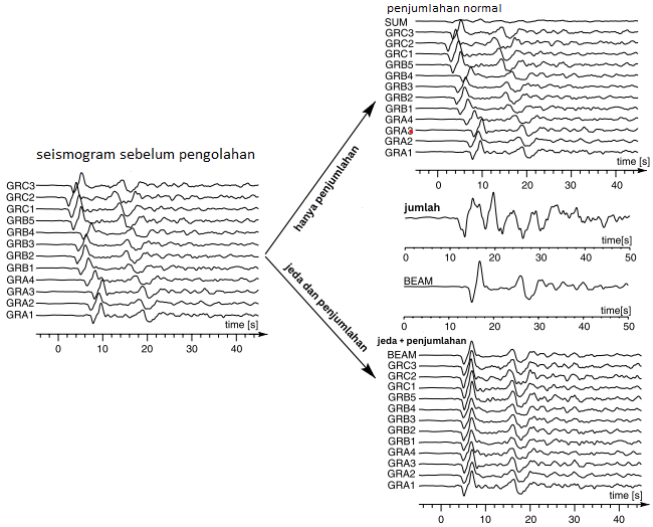
Pada Gambar 2.14, gelombang yang datang ke *array* dua komponen. Gelombang (panah hitam tebal) yang melewati half sphere di bawah *array*. Jarak nilai energi terbesar dari sumber seismik memberikan nilai horizontal *slowness*, sedangkan sudut dari utara merupakan *back azimuth*.



Gambar 2.14 Modifikasi komponen *vector slowness* (Rost, 2002)

2.4 *Beamforming*

Beamforming pada pengolahan *array* digunakan untuk memisahkan koheren dan tidak koheren pada sinyal yang terekam, sehingga meminimalisir *noise* yang ada pada data perekaman. Jumlah stasiun yang digunakan juga berpengaruh terhadap pengolahan (Harjes, 1973). Gelombang datang pada *array* diasumsikan sebagai *plane wave. Beamforming* menggunakan beda waktu perambatan (*delay*) suatu *event* karena perbedaan *slowness* dan *back azimuth* di tiap stasiun dengan pusat *array* atau stasiun referensi dan menjumlah (*sum*) beda waktu tersebut. *Delay time* dilakukan pada tiap stasiun dan dapat bernilai positif maupun negatif terhadap posisi relatif stasiun terhadap stasiun acuan (Gambar 2.15).



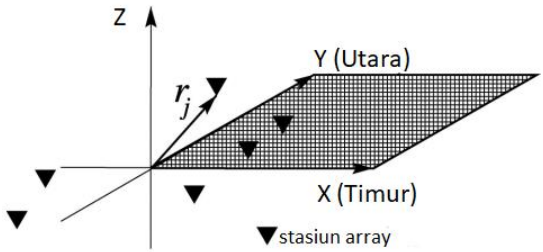
Gambar 2.15 Contoh "*delay and sum*" pada metode *beamforming* (Rost, 2002)

Pada Gambar 2.16, lokasi tiap stasiun berada pada r_j yang dianggap sebagai jarak komponen *j* pada 3 arah dari pusat *array* yang merupakan pusat instrument atau pusat geometri *array*. Perbedaan lokasi pada tiap stasiun ini menyebabkan terdapat beda waktu rambat gelombang di tiap stasiun yang bergantung terhadap *slowness* gelombang dan lokasi sensornya. Sehingga, jika stasiun *i* pada lokasi r_i (representasi vector lokasi stasiun) dituliskan sebagai $x_i(t)$, *vector slowness horizontal* u_{hor}, dengan banyaknya komponen N maka diperoleh beam untuk $\bar{u}$ yaitu :

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i(t + \bar{r}_i \cdot \bar{u}) \tag{2. 4}$$

dimana $r_i \cdot u_{hor}$ merupakan selisih sinyal tiap stasiun *array* terhadap pusat *array* yang didefinisikan sebagai

$$\boldsymbol{r_i} \cdot \boldsymbol{u_{hor}} = \boldsymbol{x_i u_x} + \boldsymbol{y_i u_y} \qquad (2.\ 5)$$



Gambar 2.16 Ilustrasi lokasi stasiun pada *vector* $\boldsymbol{r_j}$, dimana pusat *array* berada pada pusat koordinat kartesian (Rost, 2002)

Penggunaan *beamforming* bergantung pada banyaknya besar dan konfigurasi *array*, sehingga memiliki keakurasian yang tinggi. Semakin banyak stasiun yang digunakan, kecepatan fase yang diperoleh akan semakin akurat.

2.5 Analisis *Frequency-wavenumber* (*FK*)

Analisis *frequency-wavenumber* merupakan salah satu metode analisis yang digunakan dengan menggunakan *beamforming*. Pada analisis ini, melakukan estimasi distribusi energi pada tiap arah datang gelombang (Kværna, 1986). Metode ini menggunakan metode *grid search* dengan menentukan nilai trial *slowness* $\bar{u} = (u_x, u_y)$ yang kemudian dilakukan trial dan mengestimasikan energi dari sinyal *beamform* pada tiap nilai *slowness* tersebut di setiap *time window* (Borleanu, 2008) (Rost, 2002).

Sinyal *beamform* pada tiap nilai trial pada *slowness* $\bar{u} = (u_x, u_y)$ dapat dihitung melalui:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i(t + \bar{r}_i \cdot \bar{u}) \qquad (2.\ 6)$$

Energi pada setiap *time window* dengan jumlah sampel N_T dapat diestimasi melalui:

$$P(u_x, u_y) = \frac{1}{N_T}\sum_{j=1}^{N_T} \bar{x}\,(t)^2 = \frac{1}{N_T}\sum_{j=1}^{N_T}\left[\frac{1}{N_T}\sum_{j=1}^{N_T} x_i(t + ri \cdot u)\right]^2 \tag{2. 7}$$

dimana $P(u_x, u_y)$ adalah energi pada nilai trial (u_x, u_y)

Arah datang gelombang dari bidang planar dengan *array* dapat dideskripsikan melalui *vector slowness* $\bar{u} = (u_x, u_y)$. *Vector slowness* dapat dinyatakan dalam *back azimuth* yang dihitung melalui

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{u_x}{u_y}\right) \tag{2.8}$$

dan kecepatan fase (invers dari horizontal *slowness*) dapat dihitung melalui

$$|\boldsymbol{u}| = \sqrt{(\boldsymbol{u_x^2} + \boldsymbol{u_y^2})} \tag{2. 9}$$

2.6 Gunung Merapi

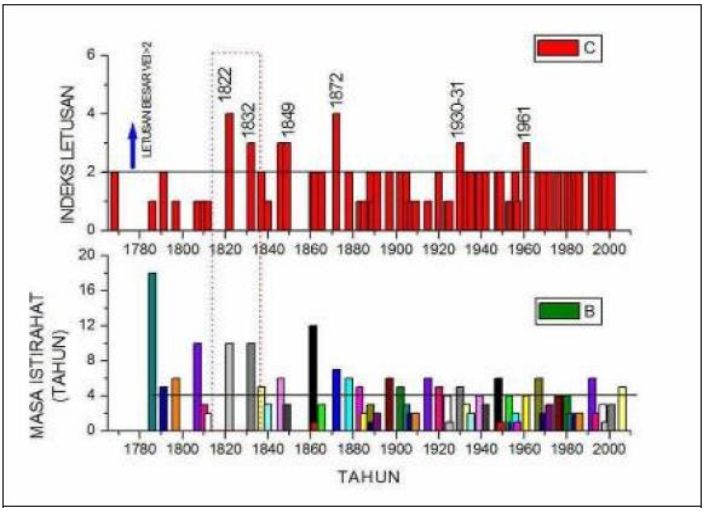
Gunung Merapi letak geografinya pada 7°32’30” LS dan 110°26’30” BT. Terletak di 4 Kabupaten yaitu Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali dan Kabupaten Klaten, Provinsi Jawa Tengah. Gunung ini berada di zona subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam Lempeng Eurasia (Van Bemmelen, 1949).

Secara fisiografi menurut Bemmelen (1949), Gunung Merapi termasuk dalam fisiografi Jawa Tenah zona pegunungan selatan. Gunung Merapi berada di bagian selatan dari kelurusan jajaran gunungapi di Jawa Tengah dengan aktivitas tektonik yang bergeser dari arah utara ke selatan mulai dari Ungaran –

Telomoyo – Merbabu – Merapi. Menjadikannya sebagai gunugapi termuda.

Gambar 2.17 Fisiografi pulau Jawa (Van Bemmelen, 1949 dengan modifikasi), lokasi penelitian termasuk dalam zona depresiasi Jawa dan zona randublatung (Lingkaran Merah)

Letusan yang tercata secara jelas dimulai pada abad 19 di tahun 1768, 1822, 1849, 1872 dan abad 20 di tahun 1930 hingga 1931. Pada abad 19 terdapat awan panas mencapai 20 km dari puncak (Newhall, 2000). Sejak tahun 1600-an, Gunung Merapi meletus lebih dari 80 kali dengan rata-rata satu letusan tiap 4 tahun. Statistik letusan yang dibuat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Grafik letusan Gunung Merapi sejak abad 18 hingga abad 20 (PVMBG, 2013)

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian tugas akhir dilaksanakan pada tanggal 28 Oktober 2022 hingga 28 Februari 2023. Tempat pelaksanaan penelitian dilakukan di Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG), Yogyakarta.

3.2 Materi Penelitian

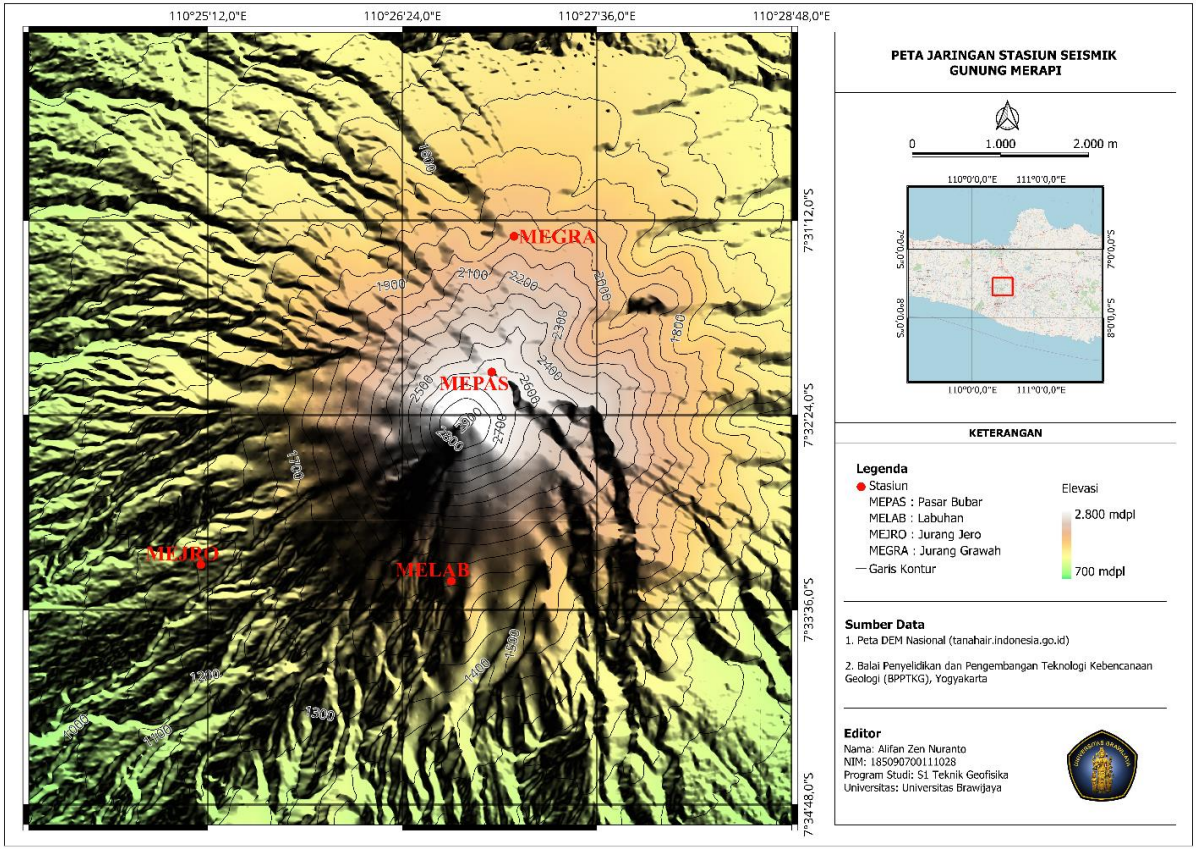
Pada penelitian ini, digunakan beberapa perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) penunjang, serta data seismik sekunder yang disediakan perusahaan.

3.3.1 Data Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data perekaman aktifitas seismik pada Gunung Merapi yang dimiliki oleh Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). Data penelitian berupa data perekaman seismik melalui 4 stasiun perekaman yang masing-masing berupa seismometer 3 sensor merk CMG-40T.

Tabel 3.1 Stasiun jaringan seismik Gunung Merapi yang digunakan pada penelitian

Kode	Nama	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Elevasi (mdpl)
MEPAS	“Pasar Bubar”	-7.535567	110.449185	2679
MELAB	“Labuhan”	-7.557044	110.445038	1730
MEJRO	“Jurang Jero”	-7.555357	110.419287	1335
MEGRA	“Jurang Grawah”	-7.52163	110.45149	2045



Gambar 3. 1 Peta jaringan stasiun seismik yang digunakan pada penelitiantian

Data yang digunakan merupakan data *event* awan panas guguran pada tanggal yang terdapat di Tabel 3.2. Untuk data pada tanggal 26 Januari 2021, berbeda dengan data lainnya pada tanggal yang berbeda. Pada data yang diberikan di tanggal 26 Januari 2021 merupakan sinyal yang sebelumnya sudah dipotong sesuai saat waktu *event* terjadi. Sedangkan, selain data pada tanggal tersebut merupakan data rekaman 24 jam pada tanggal tersebut

Tabel 3.2 Informasi data event terobservasi

Tanggal (UTC)	Waktu (UTC)	Arah *Event*
7 Januari 2021	01:02:26.35	Barat Daya
19 Januari 2021	17:59:00	Barat Daya
	22:12:30	Barat Daya
	22:34:50	Barat Daya
26 Januari 2021	13:16:58	Barat Daya
	16:29:12	Barat Daya
4 Juli 2021	04:44:32	Tenggara
	09:26:55	Tenggara
	09:51:15	Tenggara
	11:14:45	Barat
	13:21:35	Tenggara
	15:19:05	Tenggara

3.3.2 Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini antara lain :

1. *Python*, digunakan sebagai bahas *program* yang digunakan untuk menulis dan mengolah data,
2. *Obspy, python library* berisi berbagai macam perhitungan seismik,
3. *Visual Studio Code (VS Code),* merupakan *code editor* yang digunakan untuk memasukkan data, penulisan *code*, menampilkan hasil pengolahan,
4. *QGIS 3.30 Hertogenbosch, digunakan untuk pembuatan peta jaringan stasiun seismik yang digunakan,*

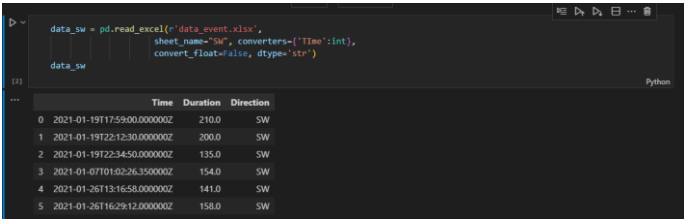
5. *Microsoft Excel* digunakan untuk mencatat informasi data *event* yang terobservasi untuk dimasukkan kedalam pengolahan di *VS Code*.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang akan dilakukan pada penelitian ini seluruhnya menggunakan python sebagai bahasa pemograman dan kalkulasinya. Serta menggunakan *Obspy* sebagai modul utama pengolahan data seismologi. Langkah yang dilakukan antara lain :

3.4.1 Persiapan Data

Data waktu terjadinya *event* dalam file dengan format (.xlsx) dilakukan *input* di python menggunakan *Pandas*. Informasinya berisi waktu terjadinya *event* (UTC), durasi, serta arah mata angin terjadinya *event* (Gambar 3.2).



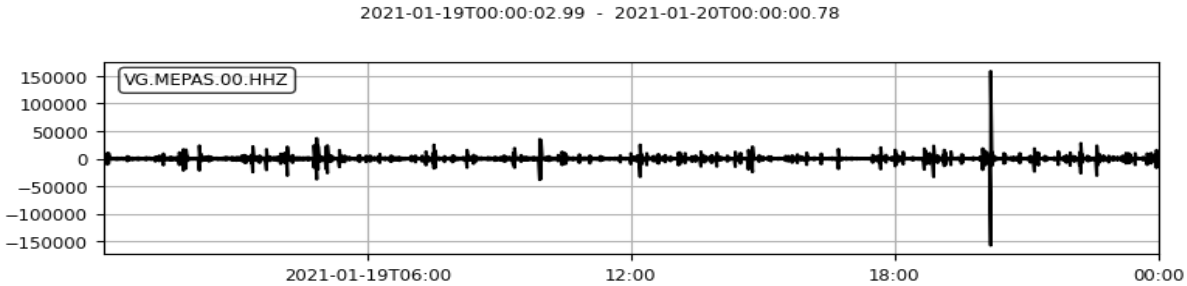
```
data_sw = pd.read_excel(r'data_event.xlsx',
                        sheet_name="SW", converters={'TIme':int},
                        convert_float=False, dtype='str')
data_sw
```

[2] Python

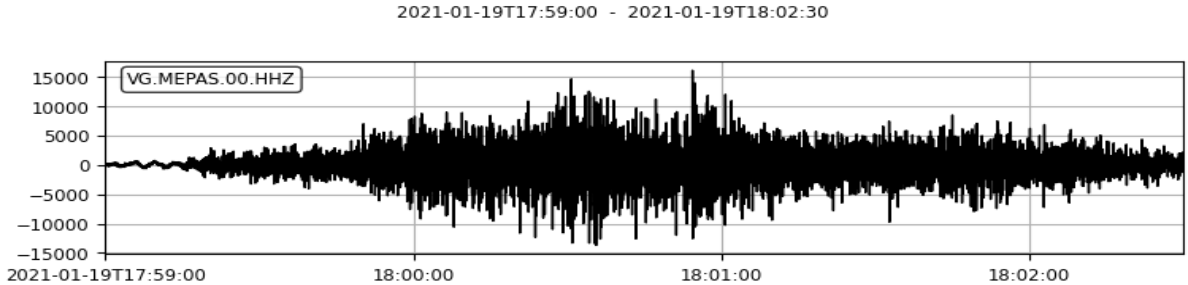
	Time	Duration	Direction
0	2021-01-19T17:59:00.000000Z	210.0	SW
1	2021-01-19T22:12:30.000000Z	200.0	SW
2	2021-01-19T22:34:50.000000Z	135.0	SW
3	2021-01-07T01:02:26.350000Z	154.0	SW
4	2021-01-26T13:16:58.000000Z	141.0	SW
5	2021-01-26T16:29:12.000000Z	158.0	SW

Gambar 3.2 Input data serta waktu saat terjadinya *event* dalam format waktu UTC

Data perekaman sinyal menggunakan format miniseed (.MSEED) pada *python* menggunakan *obspy*. Kemudian dilakukan pemotongan sinyal berdasarkan waktu terjadinya *event* dan durasinya berdasar sumber yang sudah teramati (Gambar 3.3). Akan tetapi, terdapat beberapa sinyal yang dipotong tidak sesuai informasi karena saat sinyal dipotong, sinyalnya lebih cepat atau lebih lama beberapa detik dari informasi yang diperoleh. Masing-masing sinyal pada tiap stasiun dilakukan penghilangan respon instrumen pada data, sehinga *noise* dari instrumen dapat diminimalisir (Gambar 3.4).

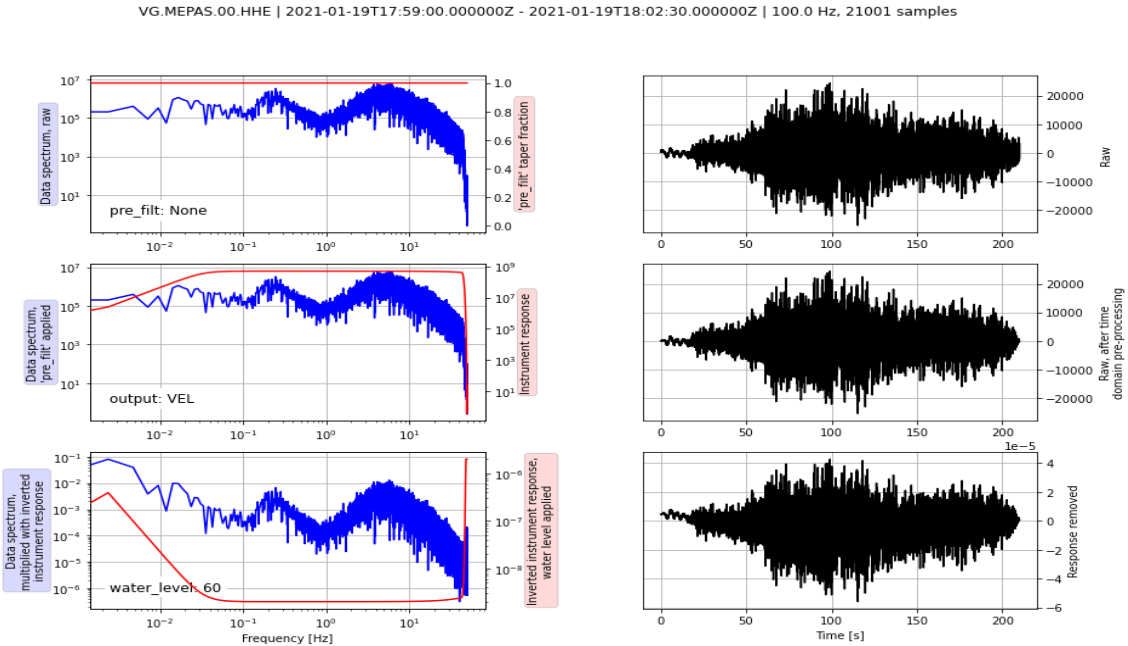


(a)



(b)

Gambar 3.3 Contoh sinyal pada komponen vertikal di stasiun MEPAS sebelum dipotong(a), sinyal pada stasiun MEPAS komponen vertikal setelah dipotong (b)

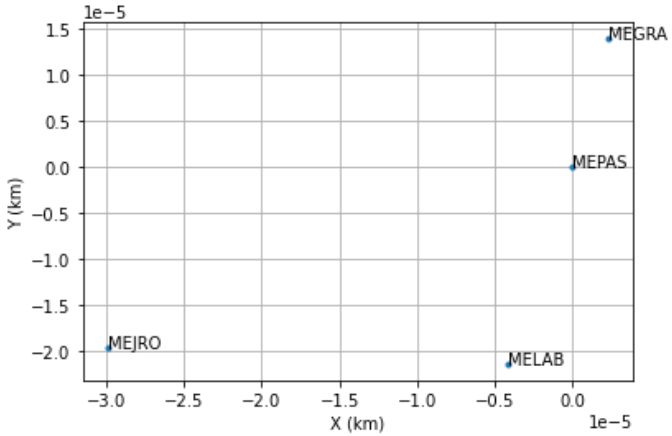


Gambar 3.4 Menghilangkan respon instrumen pada sinyal

Kemudian, dimasukkan informasi koordinat dan elevasi sensor di masing-masing stasiun (Gambar 3.5). Hal ini dilakukan untuk digunakan pada proses *grid search*. Jaringan stasiun seismik yang digunakan memiliki jarak antar stasiun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6, dengan stasiun MEPAS sebagai stasiun referensi.

```
# input coordinates
for i in range(len(mepas)):
    mepas[i].stats.coordinates = AttribDict({'latitude':-7.535567,
                                             'longitude':110.449185,
                                             'elevation':2679})
```

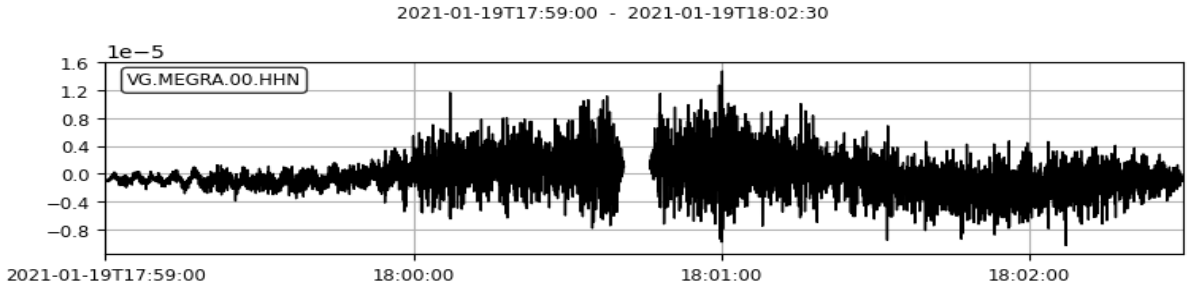
Gambar 3.5 Contoh informasi koordinat dan elevasi yang dimasukkan pada stasiun MEPAS



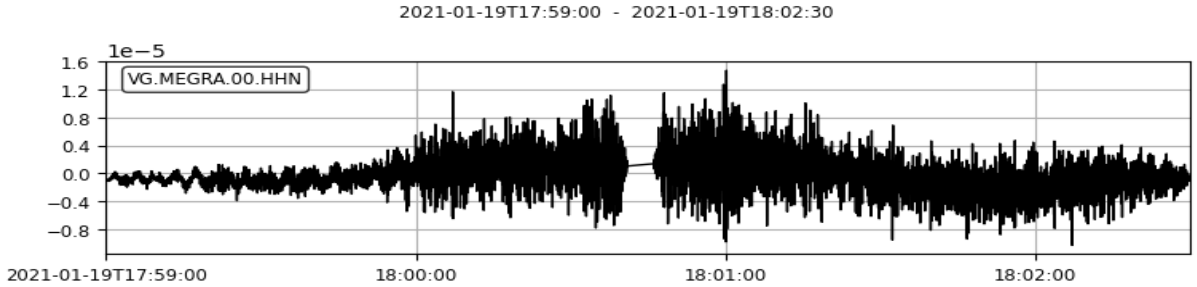
Gambar 3.6 Jarak setiap stasiun seisimik yang digunakan pada penelitian

3.4.2 Data Filtering

Terdapat beberapa data yang memiliki *gap* pada sinyalnya. Data tersebut disatukan dengan melakukan interpolasi (Gambar 3.7). Selanjutnya, data dilakukan *filtering* menggunakan *bandpass*, yaitu meloloskan sinyal dengan batas minimum dan maksimum yang telah ditentukan (Gambar 3.8). Rentang frekuensi yang digunakan yaitu1.0 Hz hingga 12.0 Hz.

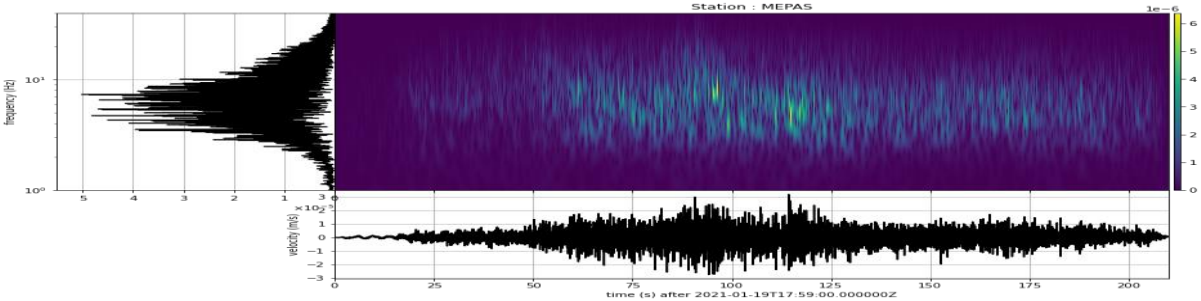


(a)

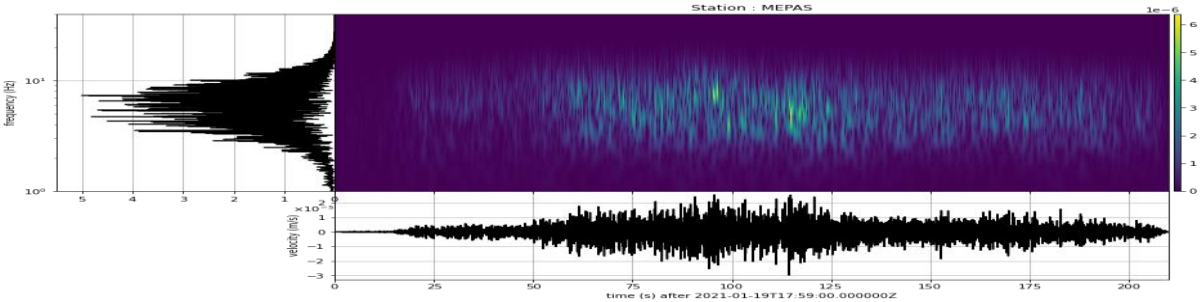


(b)

Gambar 3.7 Contoh sinyal yang memiliki *gap* pada komponen *north – south* di stasiun MEGRA (a), sinyal yang sudah disatukan menggunakan interpolasi (b)



(a)



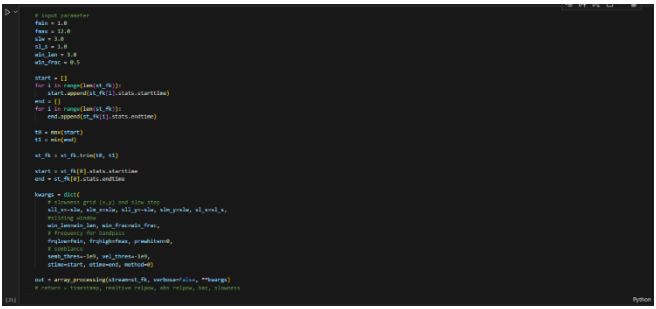
(b)

Gambar 3.8 Sinyal sebelum dilakukan *bandpass filter* (a), dan sesudah ban*dpass filter* (b) pada komponen z di stasiun MEPAS

3.4.3 FK Beamforming

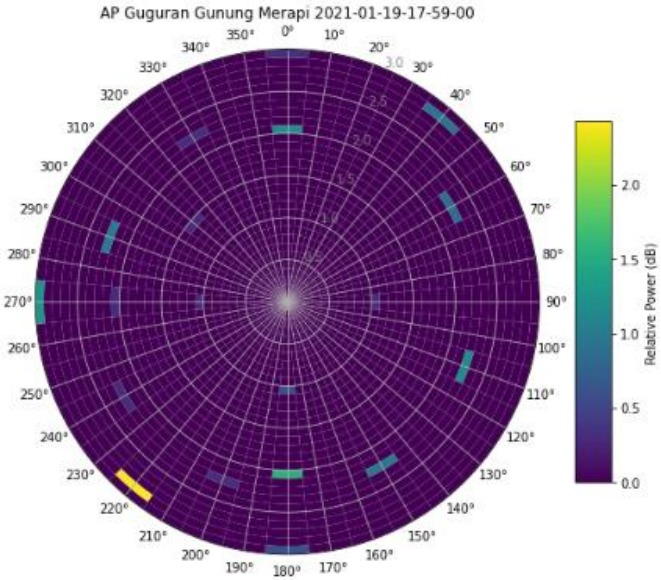
Analisis fk beamforming dijalankan memerlukan beberapa parameter, karena pada penelitian ini tidak diketahui nilai *back azimuth* dan *slowness*, maka digunakanlah metode *grid search*. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, dengan menentukan nilai trial *slowness* $\bar{u} = (u_x, u_y)$ yang kemudian dilakukan trial dan mengestimasikan energi dari sinyal *beamform* pada tiap nilai *slowness* tersebut di setiap *time window*. Nilai *slowness* yang digunakan pada parameter ini sebesar 3.0 s/deg dengan perpindahannya (*slowness step*) sebesar 1.0 s/deg. Sedangkan, untuk nilai *window* yang digunakan dibagi menjadi 2 nilai, karena *event* dengan sinyal pada arah barat daya cenderung memiliki durasi yang lebih lama dibandingkan *event* pada arah tenggara. Nilai untuk *event* yang berarah barat daya sebesar 3.0 s dengan *step* sebesar 0.5 s, sedangkan pada arah tenggara sebesar 1.0 dengan *step* sebesar 0.5 s juga. Nilai frekuensi yang digunakan dalam analisis fk berada pada rentang 1.0 Hz hinga 12.0 Hz

Hasil yang ditampilkan berupa diagram polar yang menampilkan besar *realtive power (dB)*, *back azimuth* (°), dan *slowness* (s/deg). Nilainya digambarkan melalui variasi warna, warna yang semakin terang merupakan nilai energi terbesar dan merupakan hasil dominan yang diambil untuk dilakukan analisis. Sedangkan pada *particle motion*, data yang pertama terekam dan diplot merupakan yang berwarna kuning dan data terekam terakhir yang diplot berwarna ungu.



```
# input parameter
fmin = 1.0
fmax = 12.0
slm = 3.0
sl_s = 1.0
win_len = 3.0
win_frac = 0.5

start = []
for i in range(len(st_fk)):
    start.append(st_fk[i].stats.starttime)
end = []
for i in range(len(st_fk)):
    end.append(st_fk[i].stats.endtime)

t0 = max(start)
t1 = min(end)

st_fk = st_fk.trim(t0, t1)

start = st_fk[0].stats.starttime
end = st_fk[0].stats.endtime

kwargs = dict(
    # slowness grid: (min, max, step)
    slim_x=slm, slim_y=slm, sl_x=sl_s, slim_y=slm, sl_y=sl_s,
    # sliding window
    win_len=win_len, win_frac=win_frac,
    # frequency for bandpass
    frqlow=fmin, frqhigh=fmax, prewhiten=0,
    # similarity
    semb_thres=-1e9, vel_thres=-1e9,
    stime=start, etime=end, method=0)

out = array_processing(stream=st_fk, verbose=False, **kwargs)
# return = timestamp, relative relpow, abs relpow, bmr, slowness
```

Gambar 3.9 Parameter input untuk dilakukan *fk-beamforming*



Gambar 3.10 Contoh hasil *fk-beamforming* pada *event* arah barat daya

3.4.4 Particle Motion

Particle motion digunakan untuk melihat penjalaran sinyal pada saat *event* baru terjadi. Pada data di penelitian ini, sinyal dipotong pada komponen NS dan EW untuk melihat arah pergerakan sinyalnya pada bidang horizontal. Awan panas

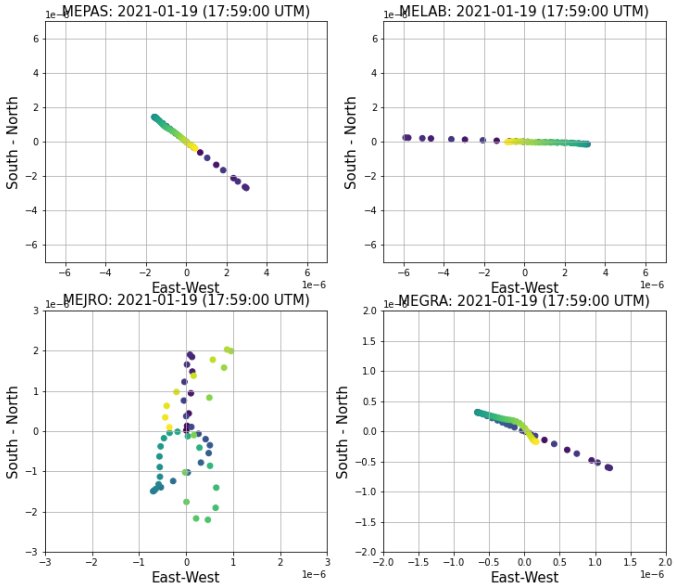
guguran dan guguran pada umumnya tidak menunjukkan bentuk sinyal P yang jelas, sehingga dalam memotong sinyal ini hanya merujuk pada waktu awal kejadian yang tercatat.

```
# trimming and plotting particle motion
mepas_pm = mepas.copy()
melab_pm = melab.copy()
mejro_pm = mejro.copy()
megra_pm = megra.copy()

st_pm = mepas_pm+melab_pm+mejro_pm+megra_pm

start = st_pm[0].stats.starttime
end_pm = start + 0.5
st_pm = st_pm.trim(starttime=start, endtime=end_pm)

for tr in st_pm.select(channel='HHZ'):
  st_pm.remove(tr)

mepas_pm = st_pm.select(station = 'mepas')
mepas_ctime = np.array(mepas_pm[0].times())
melab_pm = st_pm.select(station = 'melab')
melab_ctime = np.array(melab_pm[0].times())
mejro_pm = st_pm.select(station = 'mejro')
mejro_ctime = np.array(mejro_pm[0].times())
megra_pm = st_pm.select(station = 'megra')
megra_ctime = np.array(megra_pm[0].times())

lim = 0.000007

fig = plt.figure(figsize=(12, 22))
ax=fig.add_subplot(421)
ax.set_title('MEPAS: %s'%(start.strftime('%Y-%m-%d (%H:%M:%S UTM)')), fontsize=15)
```

```
ax.set_ylabel('South - North', fontsize = 15)
ax.set_xlim(-lim, lim)
ax.set_ylim(-lim, lim)
ax.scatter(mepas_pm[0].data, mepas_pm[1].data, marker='o', c=mepas_ctime)

ax1=fig.add_subplot(422)
ax1.set_title('MELAB: %s'%(start.strftime('%Y-%m-%d (%H:%M:%S UTM)')), fontsize=15)
ax1.set_xlabel('East-West', fontsize = 15)
ax1.set_ylabel('South - North', fontsize = 15)
ax1.set_xlim(-lim, lim)
ax1.set_ylim(-lim, lim)
ax1.scatter(melab_pm[0].data, melab_pm[1].data, marker='o', c=melab_ctime)

ax2=fig.add_subplot(423)
ax2.set_title('MEJRO: %s'%(start.strftime('%Y-%m-%d (%H:%M:%S UTM)')), fontsize=15)
ax2.set_xlabel('East-West', fontsize = 15)
ax2.set_ylabel('South - North', fontsize = 15)
ax2.set_xlim(-0.000003, 0.000003)
ax2.set_ylim(-0.000003, 0.000003)
ax2.scatter(mejro_pm[0].data, mejro_pm[1].data, marker='o', c=mejro_ctime)

ax3=fig.add_subplot(424)
ax3.set_title('MEGRA: %s'%(start.strftime('%Y-%m-%d (%H:%M:%S UTM)')), fontsize=15)
ax3.set_xlabel('East-West', fontsize = 15)
ax3.set_ylabel('South - North', fontsize = 15)
ax3.set_xlim(-0.000002, 0.000002)
ax3.set_ylim(-0.000002, 0.000002)
ax3.scatter(megra_pm[0].data, megra_pm[1].data, marker='o', c=megra_ctime)

plt.savefig('Particle Motion - %s'%(start.strftime('%Y-%m-%d-%H-%M-%S.png')), facecolor='white', transparent=False)
ax = plt.gca
```

Gambar 3.11 Pemotongan sinyal untuk dilakukan analisis *particle motion*

Hasil yang diperolah berupa titik-titik yang tiap titiknya merupakan hasil perekaman 100 sampel tiap detik. Tiap pemotongan sinyal yang dilakukan dalam *particle motion* ini sepanjang 0,5s sehingga jumlah sampel yang divisualisasikan sebanyak 50 sampel. Gradasi warna menunjukkan waktu data terekam, warna kuning merupakan data pertama, sedangkan perubahan menjadi gelap (ungu) merupakan data setelahnya.

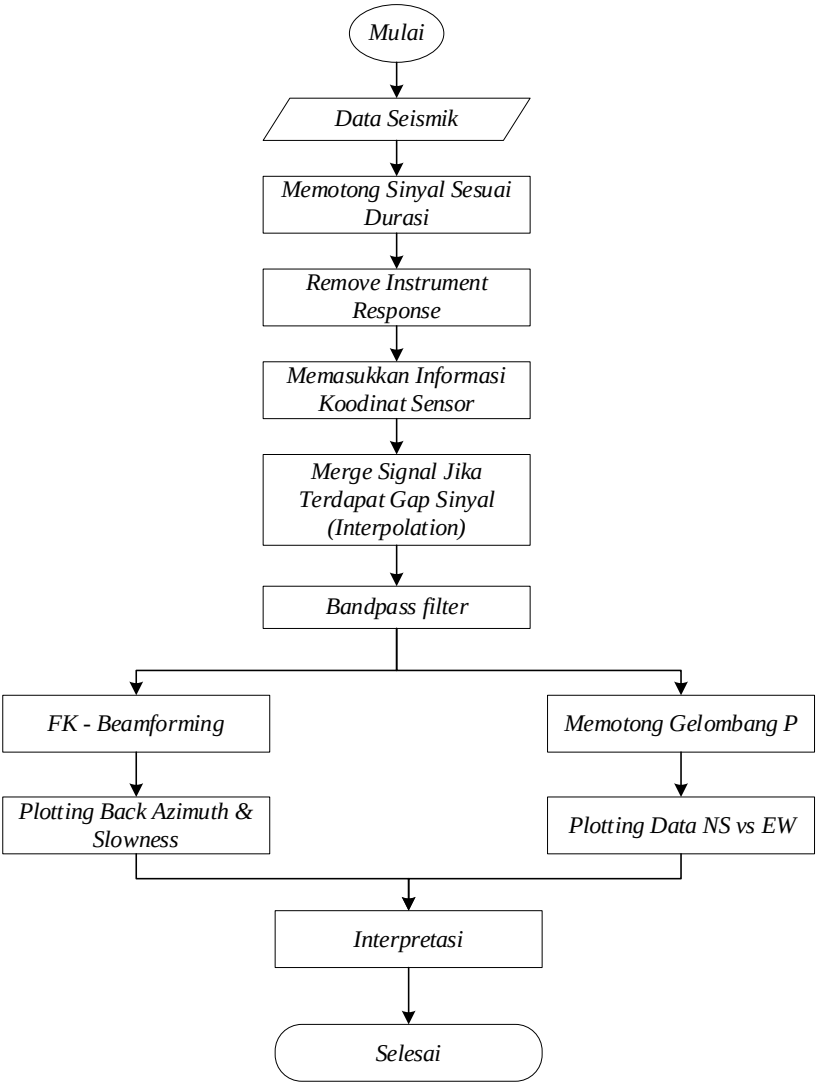


Gambar 3.12 Contoh *particle motion* pada stasiun MEPAS pada tanggal 19 Januari 2021 (17:59:00 UTC)

3.4.5 Interpretasi

Hasil pengolahan *fk-beamforming* berupa *back azimuth* didukung dengan sebaran data *particle motion* untuk mengetahui sumber dan arah awan panas guguran. Kemudian, dibandingkan arahnya dengan hasil observasi visual yang tercatat.

3.4 Diagram Alir



Gambar 3.13 Diagram alir penelitian

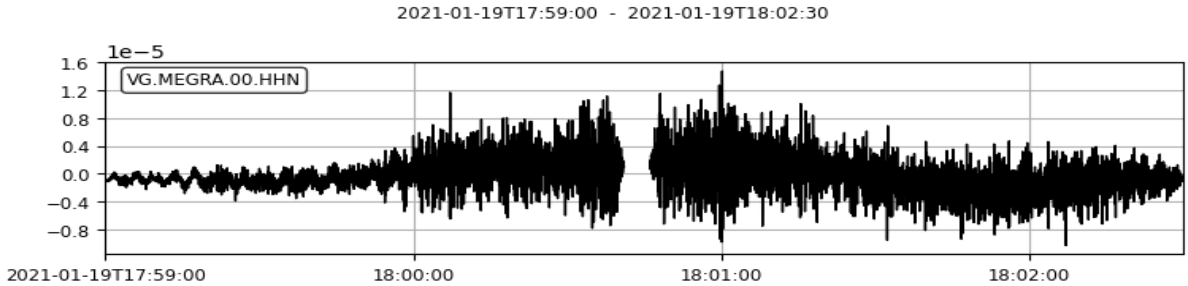
BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Sinyal

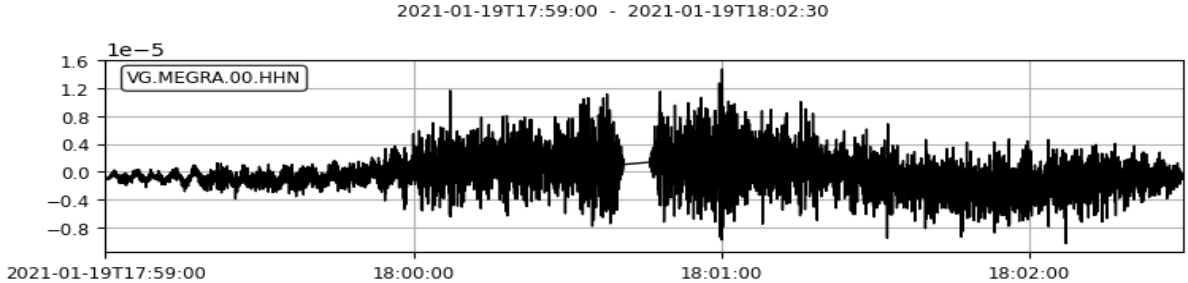
Terdapat beberapa data yang saat dibaca memiliki *gap* atau jeda waktu dimana data tidak terekam. Data yang kosong pada jeda waktu ini akan diisi dengan data interpolasi dari data terakhir sebelum jeda dan data awal setelah jeda., sehingga nantinya data yang terputus ini akan tersambung. Data yang mengalami *gap* ini antara lain pada tanggal 19 Januari 2021 waktu 17:59:00 (UTC) di stasiun MEGRA (Gambar 4.1).

Sinyal pada *event* awan panas guguran yang terekam memiliki rentang frekuensi yang berbeda beda di tiap stasiunnya. Hal ini dipengaruhi karena jarak yang bervariasi tiap stasiunnya terhadap *event*. Stasiun yang jaraknya jauh dari sumber *event* akan memiliki frekuensi yang lebih kecil dibanding stasiun yang lebih dekat dengan sumber. Hal ini karena sifat gelombang yang akan meluruh dengan semakin banyaknya medium yang dilewati.

Contoh *event* dengan arah barat daya pada tanggal 19 Januari 2021 pukul 17:59:00(UTC), di stasiun MEPAS memiliki rentang frekuensi 1.0 Hz hingga 25.0 Hz, stasiun MELAB 1.0 Hz hingga 20.0 Hz, stasiun Mejro 1.0 Hz hingga 25.0 Hz dan stasiun MEGRA 1.0 Hz hingga 15 Hz (Gambar 4.2 dan Gambar 4.3).

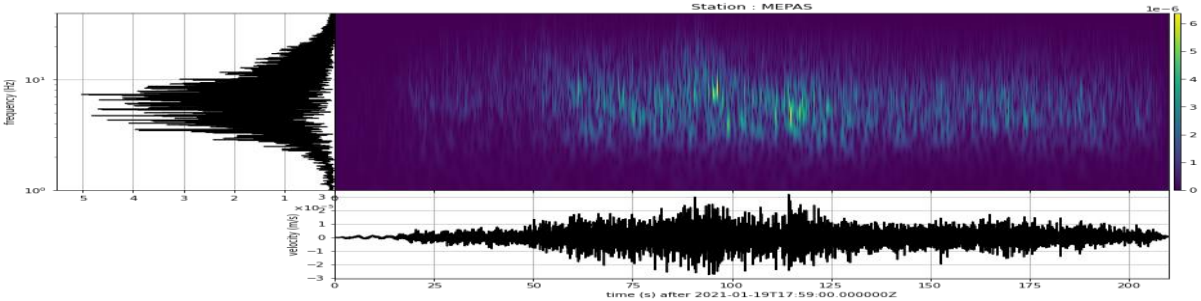


(a)

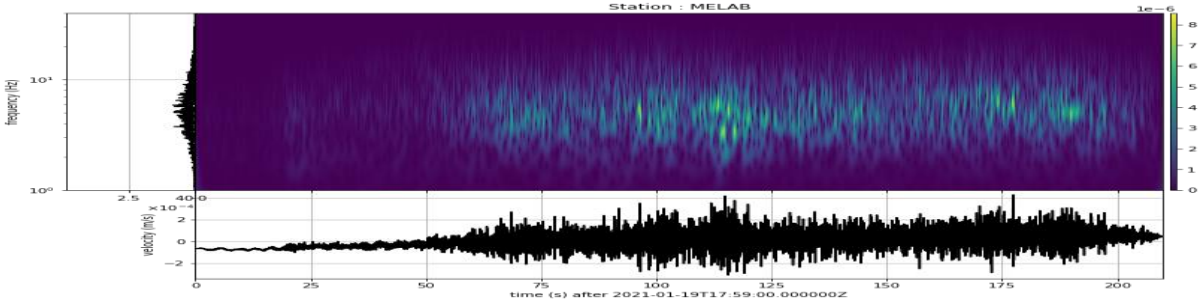


(b)

Gambar 4.1 Sinyal Yang mengalami gap (a) dan setelah interpolasi (b) pada awan panas guguran tanggal 19 Januari 2021 17:59:00 (UTC) di stasiun MEGRA komponen *north-south*

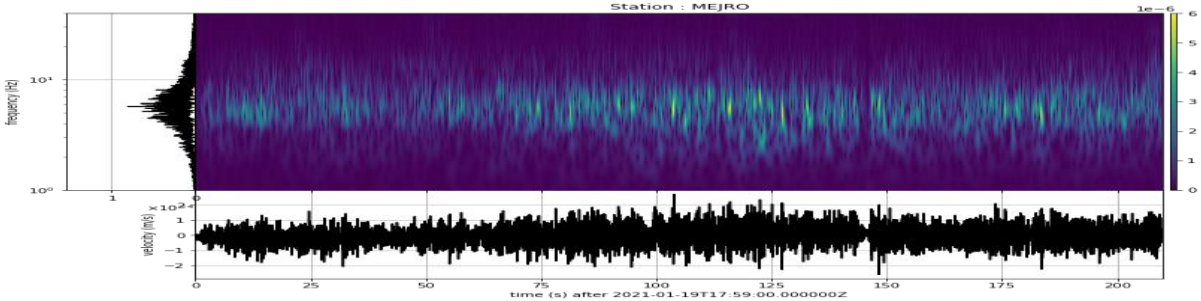


(a)

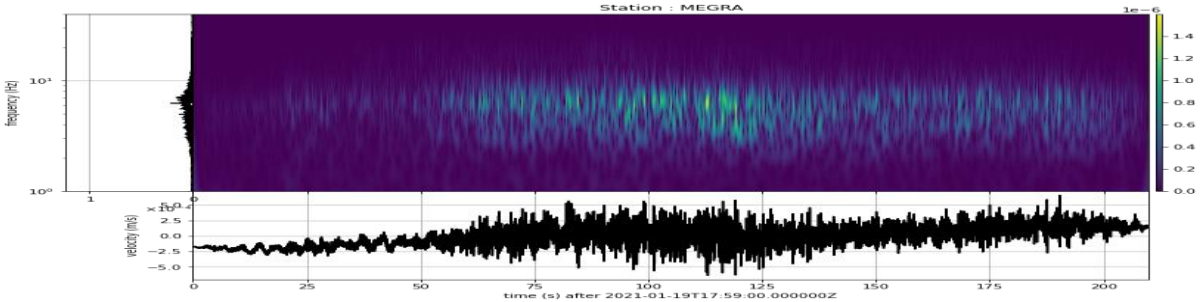


(b)

Gambar 4.2 Sinyal, spektrogram dan spektrum komponen vertikal pada 19 Januari 2021 pukul 17:59:00(UTC) stasiun MEPAS(a) dan MELAB(b) dengan arah barat daya



(a)



(b)

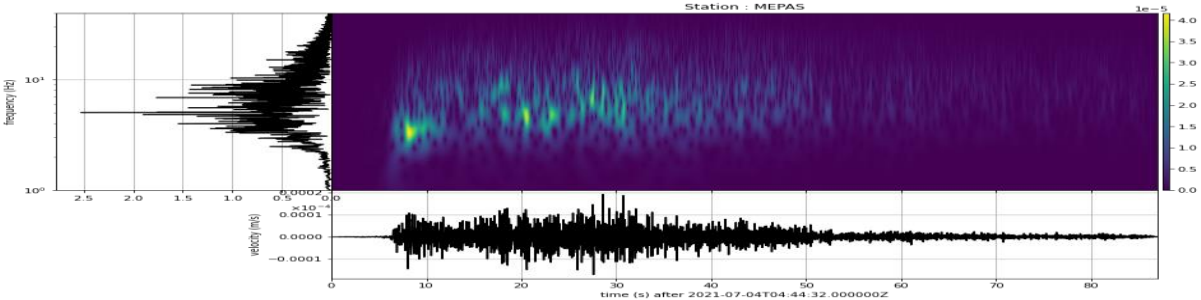
Gambar 4.3 Sinyal, spektrogram dan spektrum 19 Januari 2021 pukul 17:59:00(UTC) stasiun MEJRO(a) dan MEGRA(b) dengan arah barat daya

Sedangkan contoh pada *event* tenggara tanggal 4 Juli 2021 pukul 04:44:00(UTC), frekuensi di stasiun MEPAS memiliki rentang 1.0 Hz hingga 30 Hz, stasiun MELAB 1.0 Hz hingga 25 Hz, stasiun MEJRO 1.0 Hz hingga 20 Hz, stasiun MEGRA 1.0 Hz hingga 15Hz (Gambar 4.4 dan Gambar 4.5).

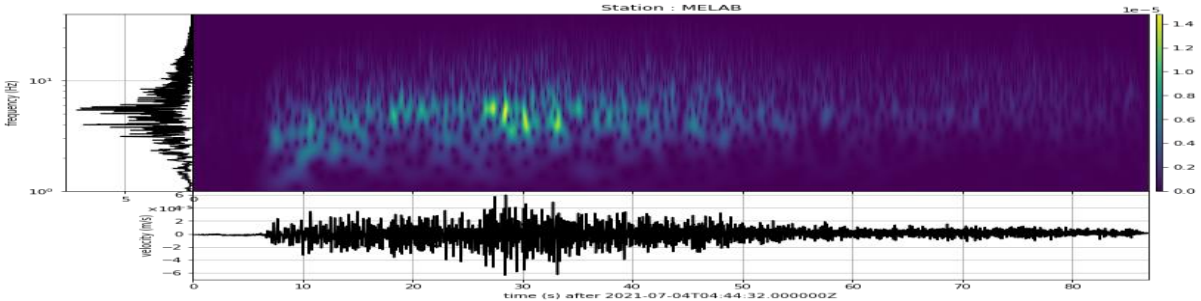
Ditinjau dari keseluruhan *event* yang dianalisis (Tabel 4.1), *event* dengan arah barat daya memiliki durasi yang lebih panjang dibandingkan *event* tenggara. *Event* dengan arah barat daya memiliki rentang durasi 135 sekon hingga 210 sekon. Sedangkan *event* tenggara memiliki rentang durasi 74 sekon hingga 108 sekon.

Tabel 4.1 Tabel informasi event yang terobservasi

Waktu (UTC)	Durasi (s)	Arah Luncur
2021-01-07T01:02:26	154	Barat Daya
2021-01-19T17:59:00	210	Barat Daya
2021-01-19T22:12:30	200	Barat Daya
2021-01-19T22:34:50	135	Barat Daya
2021-01-26T13:16:58	141	Barat Daya
2021-01-26T16:29:12	158	Barat Daya
2021-07-04T04:44:32	87	Tenggara
2021-07-04T09:26:55	108	Tenggara
2021-07-04T09:51:15	76	Tenggara
2021-07-04T11:14:45	107	Barat
2021-07-04T13:21:35	92	Tenggara
2021-07-04T15:19:05	74	Tenggara

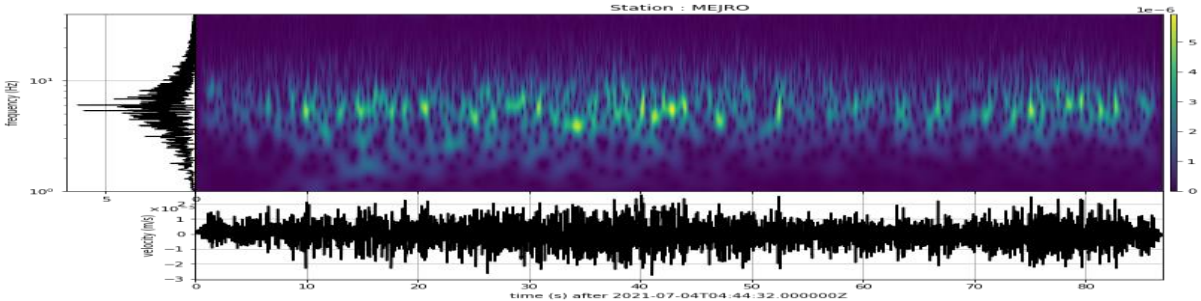


(a)

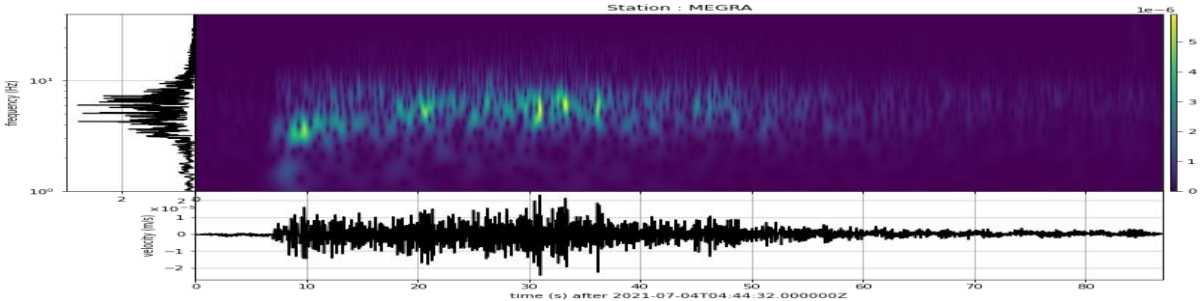


(b)

Gambar 4.4 Sinyal, spektrogram dan spektrum 4 Juli 2021 pukul 04:44:00(UTC) stasiun MEPAS(a) dan MELAB(b) dengan arah tenggara



(a)



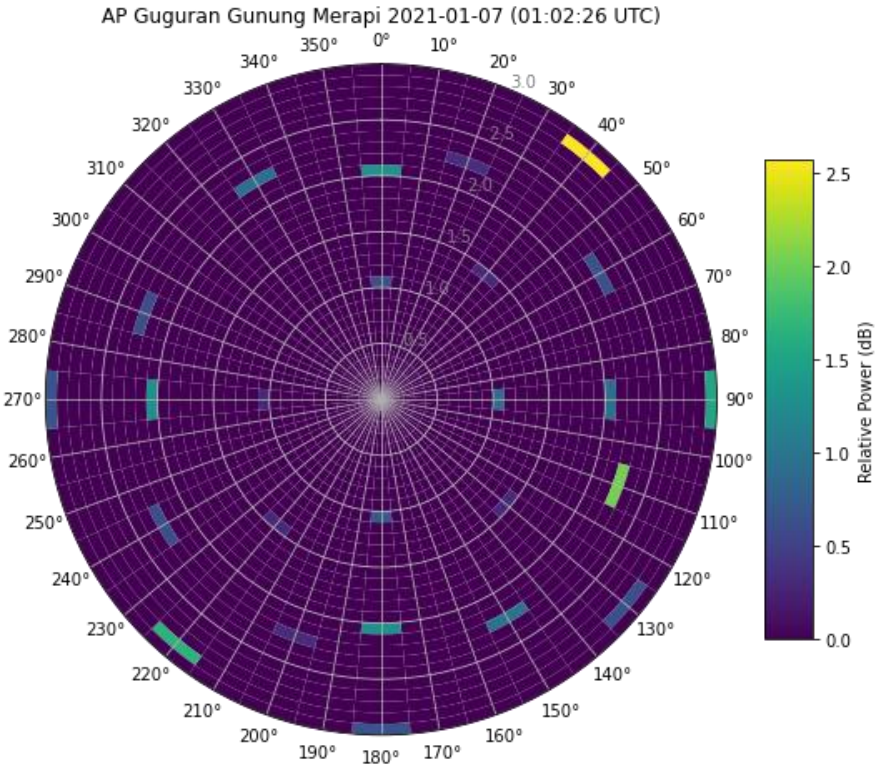
(b)

Gambar 4.5 Sinyal, spektrogram dan spektrum 4 Juli 2021 pukul 04:44:00(UTC) stasiun MEJRO(a) dan MEGRA(b) dengan arah tenggara

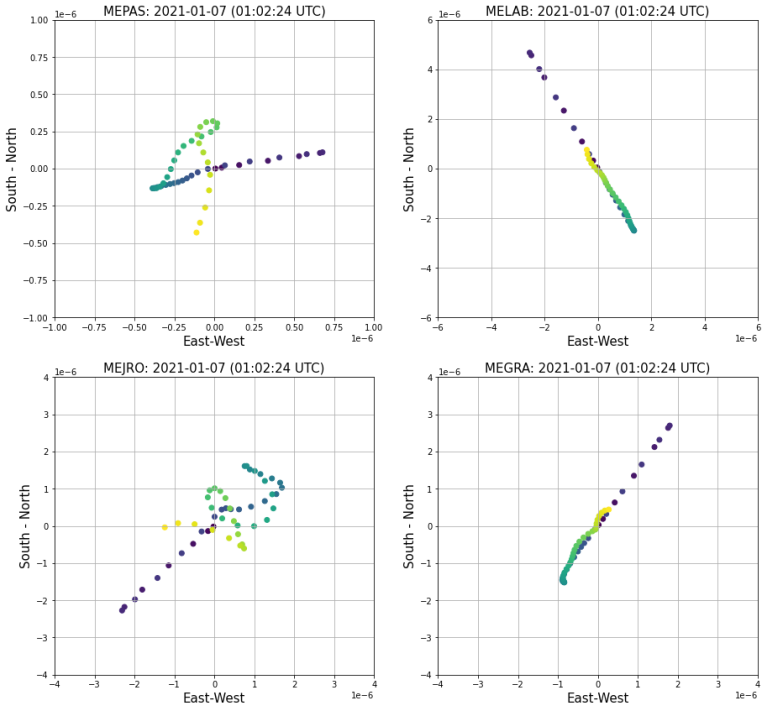
4.2 Analisis *FK-Beamforming* dan *Particle Motion*

Hasil analisis *fk-beamforming* akan dibagi berdasarkan arah kejadian awan panas guguran dari puncak gunung. Analisis particle motion akan digunakan pula untuk mendukung hasil fk-beamforming. Diagram polar merepresentasikan sebaran besar energi dalam tingkat warna, sedangkan nilai *slowness* pada tiap energi dapat dilihat melalui angka berwarna abu yang ada di dalam diagram polar. Pada grafik particle motion, data awal perekaman diplot berwarna kuning dan data akhir perekaman yang telah dipotong sepanjang 0.5s dari awal data perekaman diplot berwarna ungu seiring dengan gradasi warna..

4.2.1. 7 Januari 2021 (01:02:26 UTC)



(a)



(b)

Gambar 4.6 Plot Diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC)

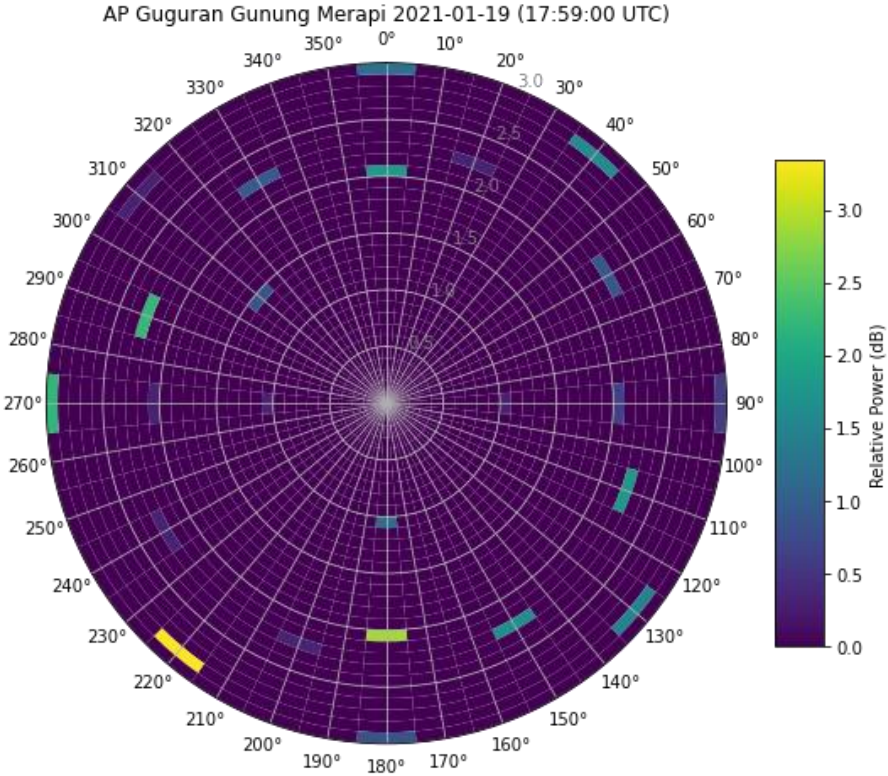
Berdasarkan Gambar 4.6a, hasil di waktu ini menunjukkan nilai *back azimuth* dengan persebaran energi terbesar berada pada sudut 40° hingga 50° arah timur laut dengan nilai *slowness* 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg. Nilai energi terbesar ditunjukkan dengan warna kuning dengan niai maksimum 2,5 dB.

Sedangkan pada plot *particle motion* di Gambar 4.6b, menunjukkan pada stasiun MEPAS memberikan persebaran nilai mengarah ke timur laut - barat daya dari stasiun, lalu stasiun MELAB memiliki persebaran data tenggara – barat laut dari stasiun, pada stasiun MEJRO cenderung memiliki persebaran barat daya – timur laut dari stasiun, sedangkan

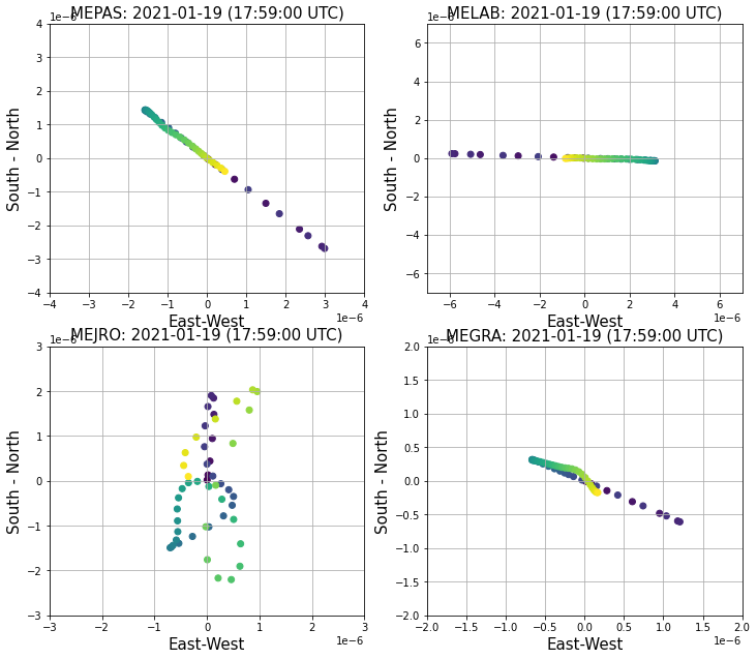
stasiun MEGRA menunjukkan persebaran barat daya – timur laut dari stasiun.

Berdasarkan nilai *back azimuth* yang diperoleh tidak sesuai dengan informasi yang terekam yaitu pada arah barat daya. Nilai hasil perhitungan *back azimuth* yang tidak sesuai ini kemungkinan dapat terjadi karena beberapa hal, seperti nilai parameter yang tidak sesuai. Sedangkan, hasil persebaran data *particle motion* pada setiap stasiun sudah sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi, yaitu mengarah ke barat daya.

4.2.2. 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC)



(a)



(b)

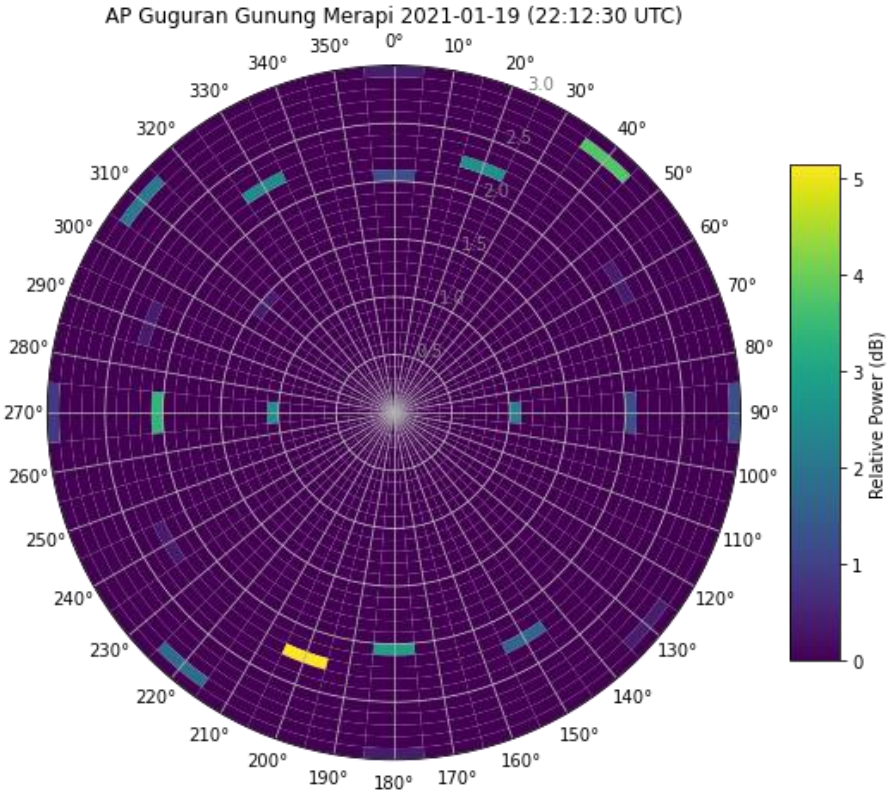
Gambar 4.7 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *Event* 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC)

Ditinjau dari Gambar 4.7a, hasil yang diperoleh pada *event* di waktu ini memiliki *back azimuth* dengan persebaran energi terbesarnya berada pada sudut 210° hingga 230° arah barat daya yang ditandai dengan warna kuning dan nilai maksimum 3.0dB. Sedangkan nilai *slowness* berada pada rentang 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg.

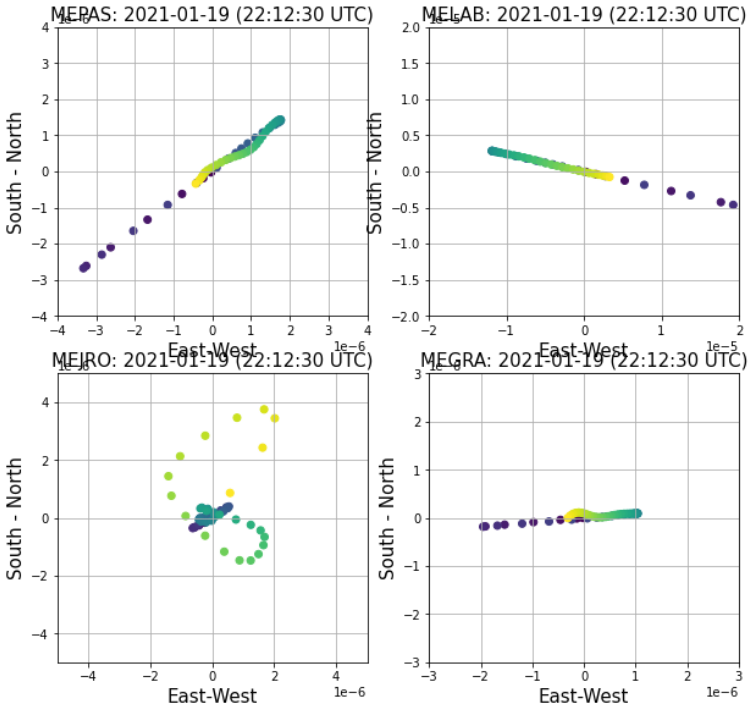
Hasil yang diperoleh pada Gambar 4.7b, plot *particle motion* di stasiun MEPAS dan MEGRA memiliki persebaran data ke tenggara – barat laut dari stasiun, pada stasiun MELAB persebaran data ke timur – barat dari stasiun, sedangkan pada stasiun MEJRO persebaran datanya cenderung tidak beraturan tetapi banyaknya data membentuk pola barat daya – timur laut.

Berdasarkan arah *back azimuth*, hasil sesuai dengan data informasi *event* yang mengarah barat daya. Persebaran data *particle motion* pada setiap stasiun tidak menunjukkan hasil yang sesui dengan informasi data *event* yang terobservasi. Hal ini dapat terjadi karena proses *picking* sinyal P yang sulit pada guguran. Data *particle motion* stasiun MEJRO cenderung lebih tersebar, hal ini dapat terjadi karena sinyal di stasiun MEJRO pada waktu *event* ini terjadi memiliki *noise* yang cukup besar dibandingkan stasiun lainnya.

4.2.3. 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC)



(a)



(b)

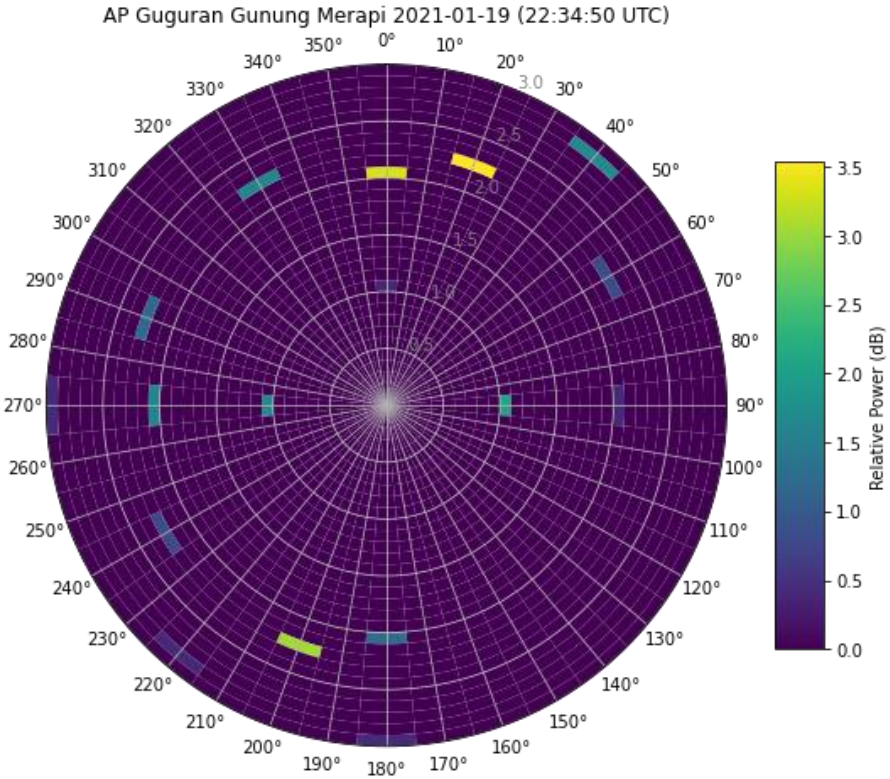
Gambar 4.8 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC)

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.8a menampilkan nilai *back azimuth* dengan energi terbesar pada rentang 190° hingga 210° (barat daya) yang ditunjukkan dengan warna kuning dan memiliki nilai maksimum 5dB. Besar *slowness* pada *back azimuth* tersebut adalah 2,3 s/deg hingga 2,4 s/deg.

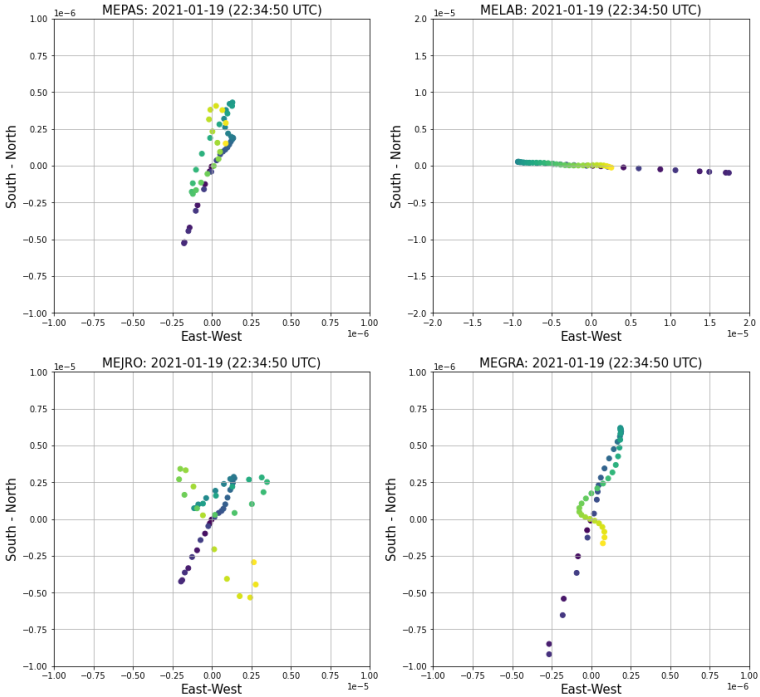
Plot *particle motion* yang ditunjukkan Gambar 4.8b, persebaran data di stasiun MEPAS mengarah barat daya – timur laut dari stasiun, pada stasiun MELAB persebaran *particle motion* mengarah ke tenggara – barat laut dari stasiun, pada stasiun MEJRO persebarannya cenderung lebih acak dengan dominan datanya mengarah barat daya – timur laut dari stasiun, sedangkan pada stasiun MEGRA memiliki arah timur – barat.

Ditinjau dari data informasi *event* yang teramati, awan panas guguran mengarah ke barat daya, dan hasil yang diperoleh pada pengolahan *fk-beamforming* sudah cukup sesuai dengan data yang teremati. Data *particle motion* menunjukkan arah *event* dari masing-masing stasiun cukup mendukung hasil *fk-beamforming*. Persebaran data yang lebih tersebar di stasiun MEJRO dapat terjadi karena sinyal yang terekam memiliki *noise* yang lebih tinggi dibanding stasiun lainnya, sehingga *picking* sinyal P pada stasiun ini lebih sulit.

4.2.4. 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC)



(a)



(b)

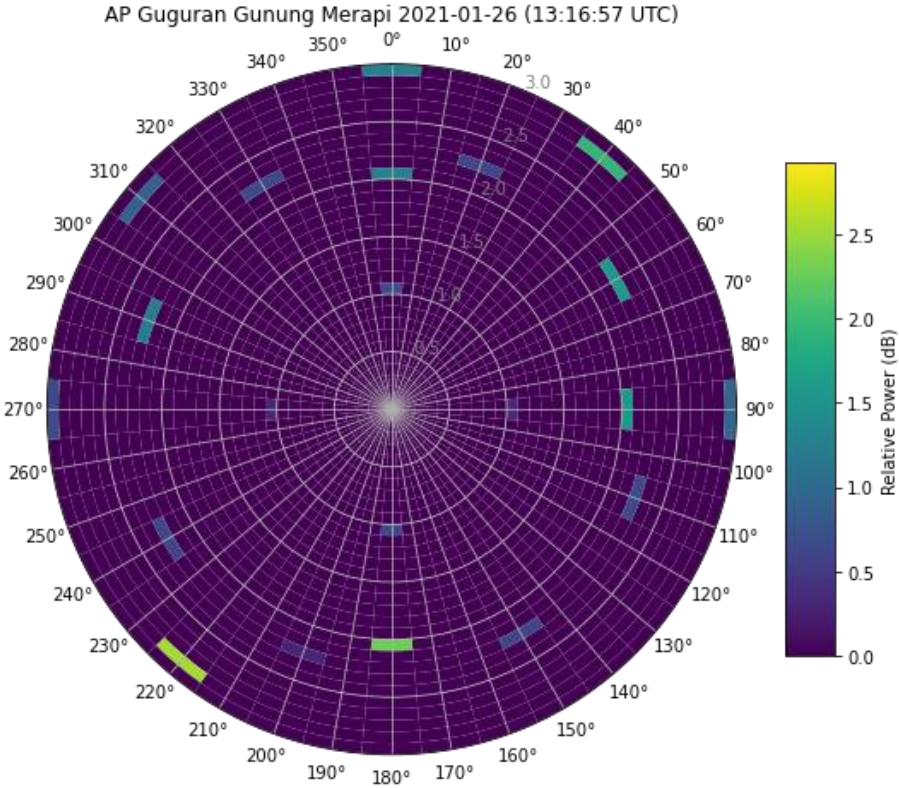
Gambar 4.9 Plot Diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC)

Berdasarkan pada Gambar 4.9a, hasil *fk-beamforming* menunjukkan nilai *back azimuth* 15° hingga 25° (timur laut) yang ditunjukkan warna kuning dengan nilai energi 3,5dB dan *back azimuth* 195° hingga 205° (barat daya) yang ditunjukkan warna hijau dengan nilai energi 3,0dB. Nilai *slowness* pada kedua sudut tersebut sama, yaitu 2,3s/deg hingga 2,4 s/deg.

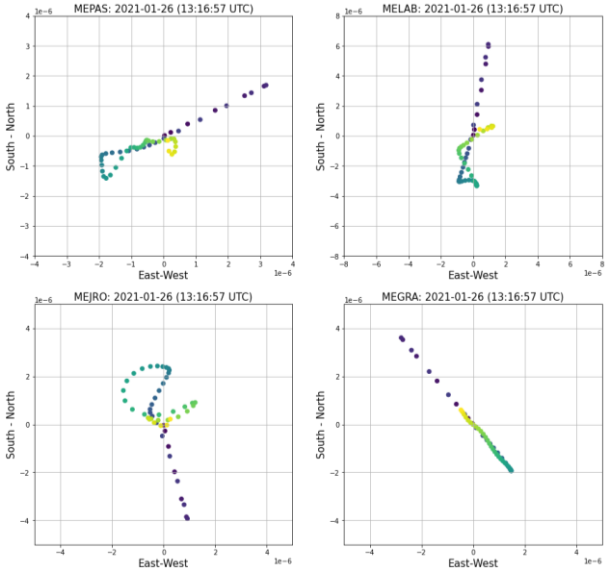
Sedangkan pada Gambar 4.9b, hasil *particle motion* di stasiun MEPAS, MEJRO dan MEGRA menunjukkan persebaran data barat daya – timur laut dari masing-masing stasiun. Pada stasiun MELAB, memiliki persebaran data timur – barat dari stasiun.

Nilai *back azimuth* pada *fk-beamforming* kurang sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi, di mana seharusnya *event* mengarah ke barat daya. Nilai yang mendekati yaitu ditunjukan pada sudut 195° hingga 205° dengan nilai energi 3,0 dB. Hal ini dapat disebabkan karena parameter seperti *grid slowness* yang kurang sesuai, jumlah *window* dan *noise* dari sinyal itu sendiri. Sedangkan, untuk hasil *particle motion* di tiap stasiun sudah cukup sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi.

4.2.5. 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC)



(a)



(b)

Gambar 4.10 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC)

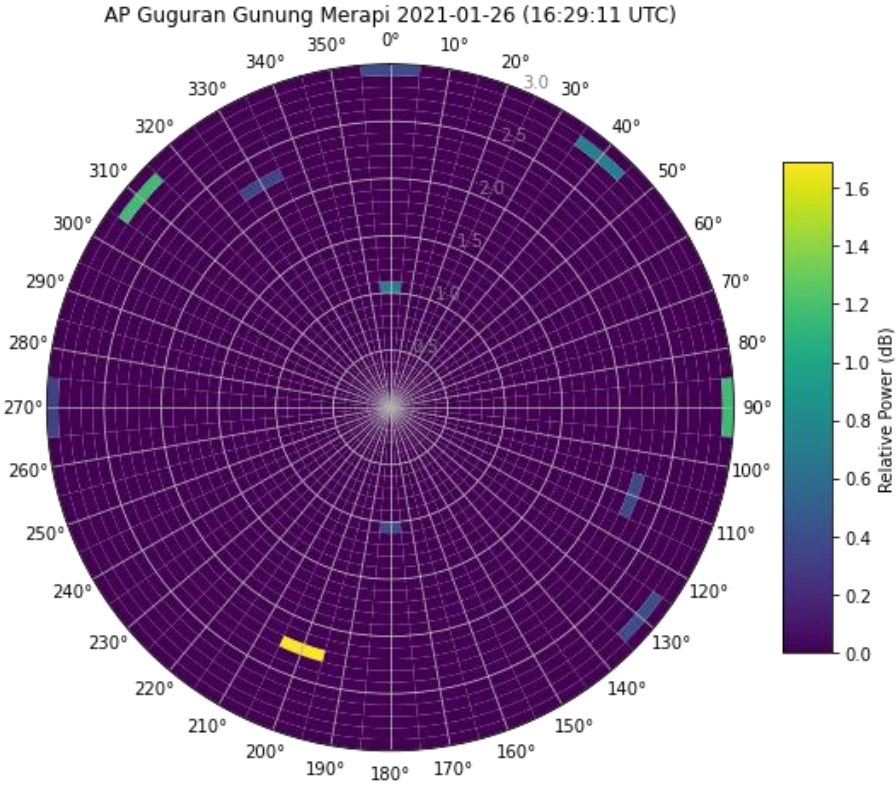
Ditinjau dari Gambar 4.10a, nilai *back azimuth* dengan energi terbesar pada *event* ini menunjukkan rentang 215° hingga 225° (barat daya) yang ditunjukkan dengan warna kuning dan memiliki energi maksimum sebesar 3,0dB. Nilai *slowness* yang diperoleh memiliki rentang pada 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg.

Sedangkan pada Gambar 4.10b, hasil plot *particle motion* pada stasiun MEPAS menunjukkan persebaran data barat daya – timur laut dari stasiun, pada stasiun MELAB persebaran datanya mengarah utara - selatan dari stasiun, pada MEJRO mengarah utara – selatan dari stasiun, dan stasiun MEGRA mengarah tenggara – barat laut.

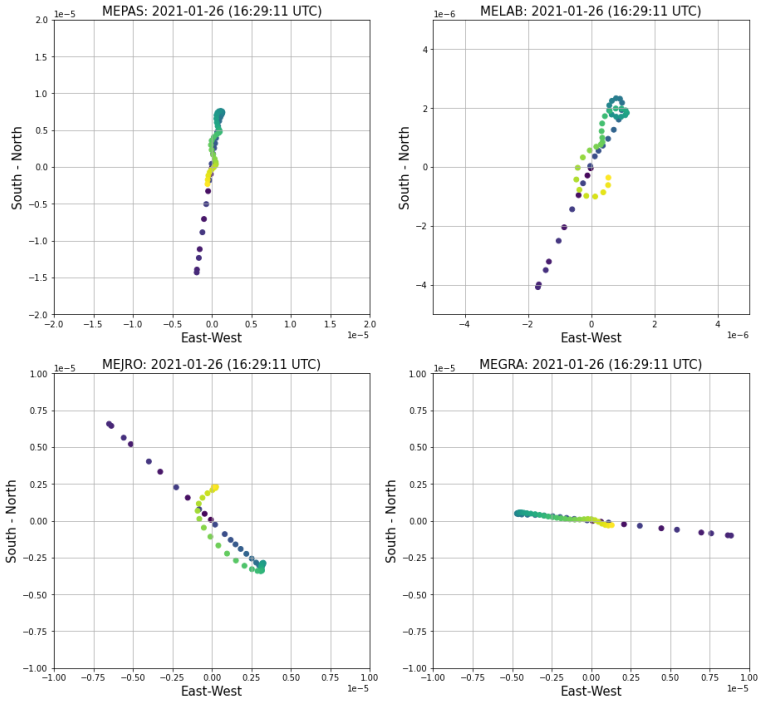
Berdasarkan informasi data *event* yang terobservasi, awan panas guguran mengarah ke barat daya. Hasil *fk-beamforming* yang diperoleh sudah cukup sesuai dengan data observasi. Akan tetapi pada plot *particle motion*, hanya stasiun MEPAS saja yang menunjukkan persebaran data dengan arah

yang sesuai. Hal ini dapat terjadi karena *event* awan panas guguran cenderung sulit untuk dideteksi gelombang P-nya, sehingga saat proses *picking* dan pemotongan sinyal yang dilakukan pada setiap stasiun cenderung kurang maksimal.

4.2.6. 26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC)



(a)



(b)

Gambar 4.11 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 19 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC)

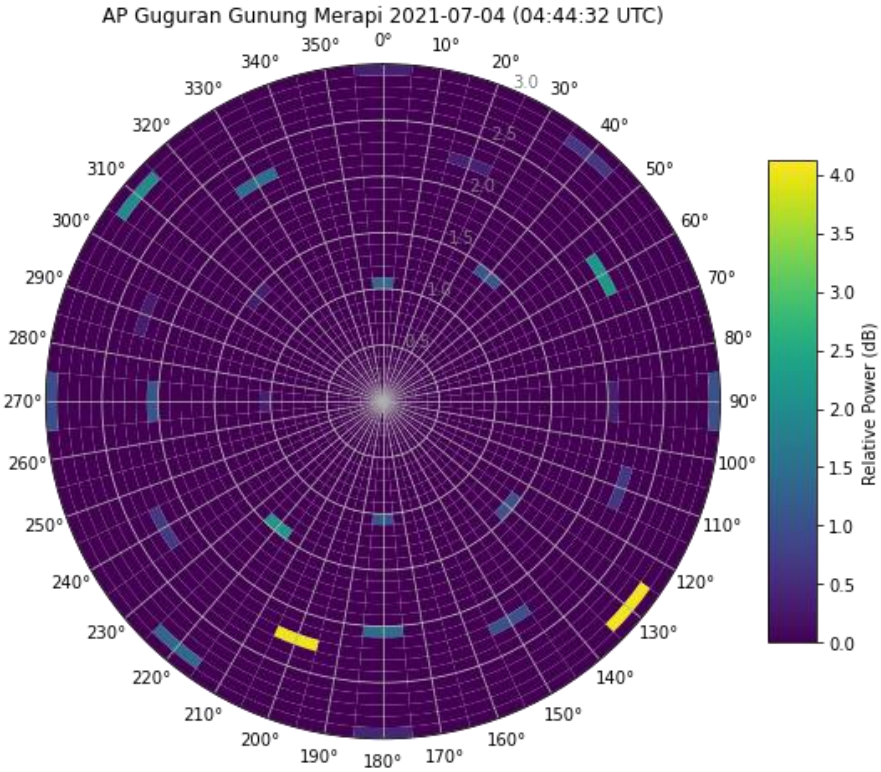
Berdasarkan pada Gambar 4.11a, nilai *back azimuth* yang dihasilkan dari *fk-beamforming* menunjukan nilai energi terbesarnya berada pada rentang 195° hingga 205° (barat daya) yang ditunjukkan dengan warna kuning dan memiliki nilai energi maksimum 1,6dB. Nilai *slowness* 2,3 s/deg hingga 2,4 s/deg.

Sedangkan pada Gambar 4.11b, hasil *particle motion* yang ditunjukkan pada stasiun MEPAS memilki persebaran data mengarah ke utara – selatan dari stasiun, pada stasiun MELAB memiliki persebaran data mengarah barat daya – timur laut dari stasiun, pada stasiun MEJRO memiliki persebaran data mengarah tenggara – barat laut dari stasiun, sedangkan pada

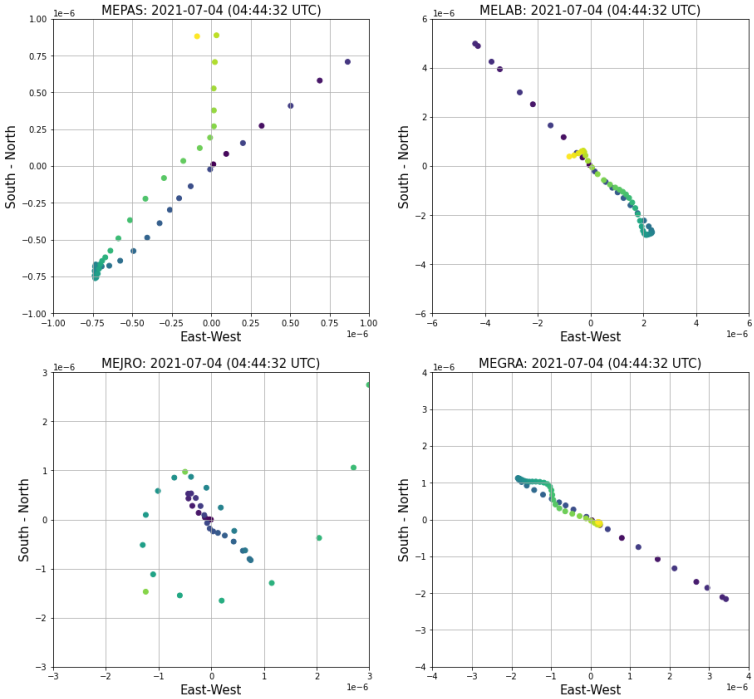
stasiun MEGRA memiliki persebaran data mengarah timur – barat dari stasiun.

Hasil yang ditunjukkan pada *fk-beamforming* sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi, yaitu mengarah ke barat daya. Hasil *particle motion* yang sesuai di tiap stasiunnya hanya ditunjukkan oleh stasiun MEPAS, sedangkan stasiun lainnya kurang sesuai. Hal ini dapat terjadi karena awan panas guguran cenderung sulit untuk dideteksi gelombang P-nya, sehingga saat pemotongan yang dilakukan untuk gelombang awal pada *particle motion* ini hanya berdasarkan waktu awal kejadian yang tercatat dari data terobservasi ditambah waktu 0,5 detik.

4.2.7. 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC)



(a)



(b)

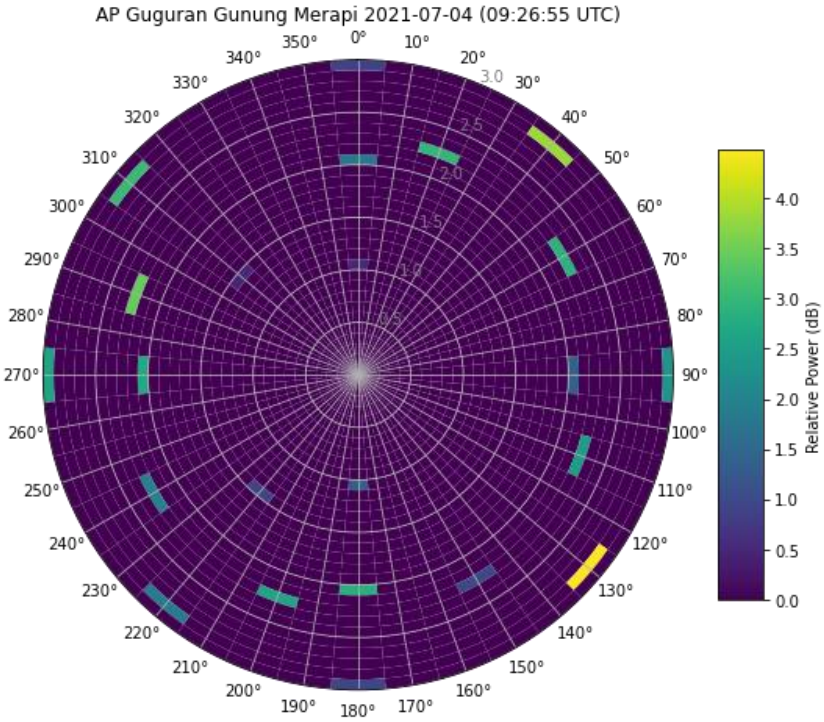
Gambar 4.12 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC)

Hasil *fk-beamforming* yang ditunjukkan pada Gambar 4.12a memberikan nilai energi terbesar memiliki *back azimuth* pada 125° hingga 135° (tenggara) dengan energi sebesar 4,0dB dan nilai *slowness* 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg . Sedangkan energi terbesar lainnya menunjukkan *back azimuth* 195° hingga 205° (barat daya) dengan besar energi 4,0dB dan nilai *slowness* 2,3 s/deg hingga 2,4 s/deg.

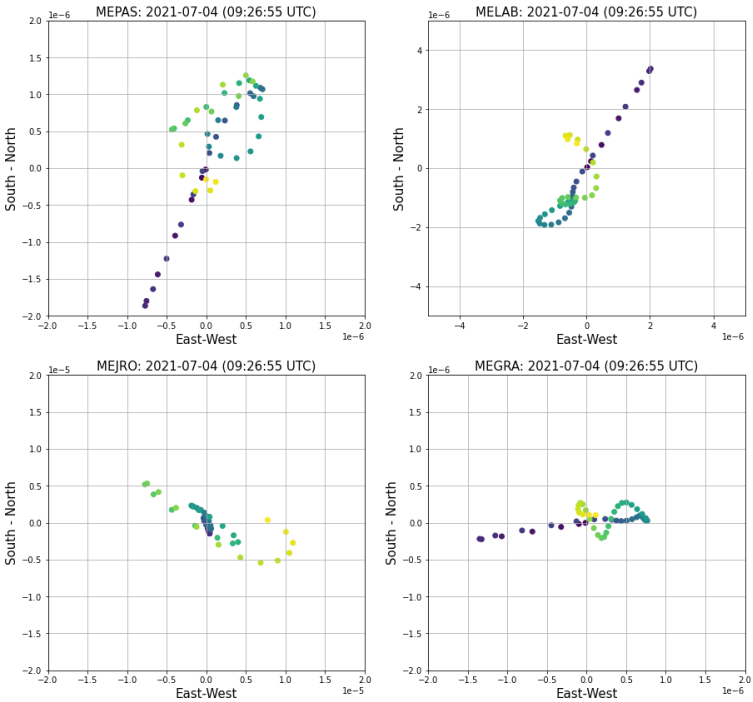
Sedangkan pada Gambar 4.12b, hasil persebaran data *particle motion* pada stasiun MEPAS memiliki persebaran data darat daya – timur laut dari stasiun, pada stasiun MELAB, MEJRO dan MEGRA memiliki persebaran data tenggara – barat laut dari masing-masing stasiun.

Berdasarkan informasi data *event* yang terobservasi, awan panas guguran mengarah ke tenggara. Akan tetapi pada hasil *fk-beamforming* memiliki 2 nilai energi terbesar yang mengarah tenggara dan barat daya. Hal ini dapat terjadi karena pengaruh *noise* pada sinyal yang terekam, serta parameter yang mungkin kurang cocok. Sedangkan, hasil *particle motion* pada stasiun MEPAS dan MELAB menunjukkan arah yang kurang sesuai dari masing-masing stasiun. Informasi *particle motion* yang tidak sesuai dari tiap stasiun dapat terjadi karena awan panas guguran cenderung sulit untuk dideteksi gelombang P-nya. Selain itu pemotongan yang dilakukan untuk gelombang awal pada *particle motion* ini hanya berdasarkan waktu awal kejadian yang tercatat dari data terobservasi ditambah waktu 0,5 detik.

4.2.8. 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC)



(a)



(b)

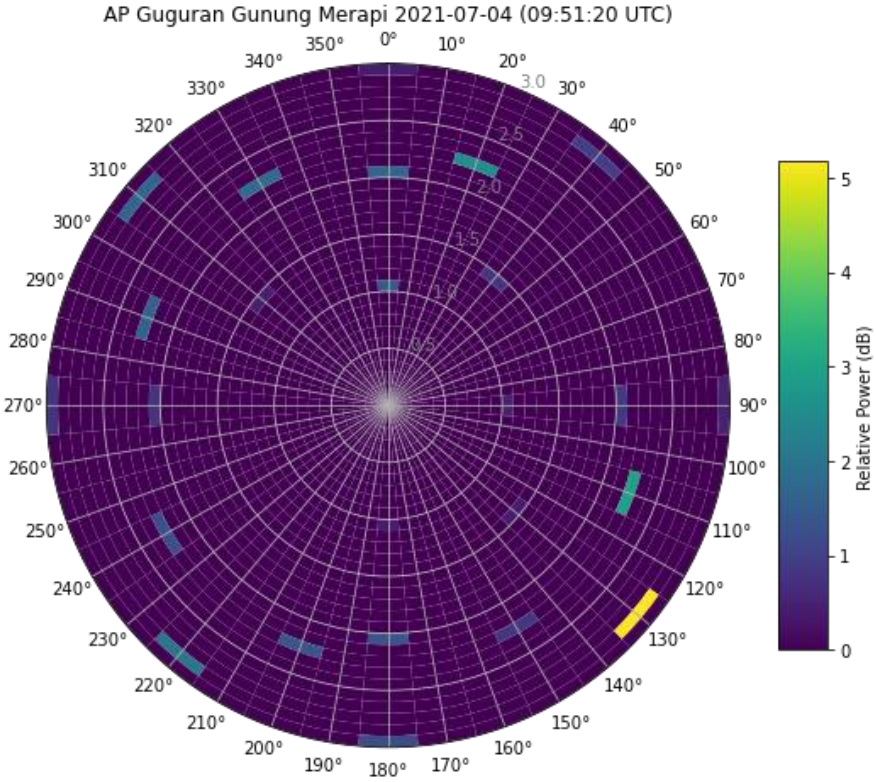
Gambar 4.13 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC)

Berdasarkan pada Gambar 4.13a, hasil *fk-beamforming* menunjukkan persebaran data dengan *back azimuth* menunjukkan energi terbesar pada rentang 125° hingga 135° (tenggara) yang ditunjukkan oleh warna kuning dengan nilai energi maksimum 4,5dB dan *slowness* 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg.

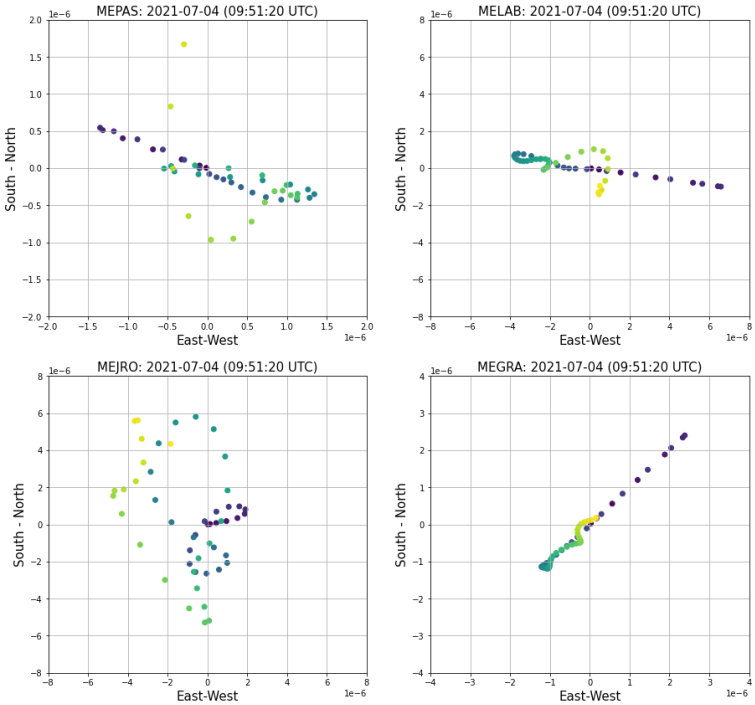
Sedangkan pada Gambar 4.13b menunjukkan persebaran data *particle motion* di setiap stasiun. Pada stasiun MEPAS dan MELAB, pesebaran data mengarah barat daya – timur laut dari masing-masing stasiun, pada stasiun MEJRO mengarah tenggara – barat laut dari stasiun dan pada stasiun MEGRA mengarah timur – barat dari stasiun.

Hasil *back azimuth* yang diperoleh sudah cukup sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi, yaitu *event* ke arah tenggara. Tetapi, pada hasil *particle motion* yang diperoleh , setiap stasiun tidak menunjukkan persebaran yang arahnya sesuai dari setiap stasiunnya terhadap arah terjadinya *event*. Sama seperti *event* yang lain, hal ini terjadi karena penentuan gelombang P yang sulit dilakukan pada awan panas guguran. . Selain itu pemotongan yang dilakukan untuk gelombang awal pada *particle motion* ini hanya berdasarkan waktu awal kejadian yang tercatat dari data yang terobservasi ditambah waktu 0,5 detik.

4.2.9. 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC)



(a)



(b)

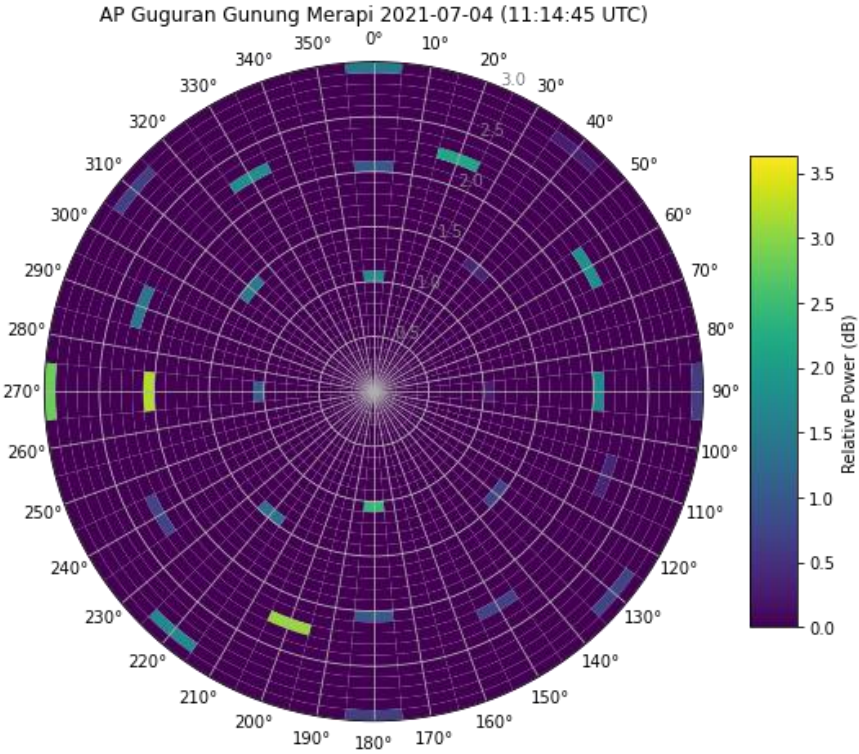
Gambar 4.14 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC)

Hasil pada Gambar 4.14a, menunjukkan *back azimuth* yang diperoleh menunjukkan nilai energi terbesar pada rentang 125° hingga 135° (tenggara) yang ditunjukkan dengan warna kuning dan memiliki nilai energi maksimum sebesar 5,0dB dan nilai *slowness* 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg.

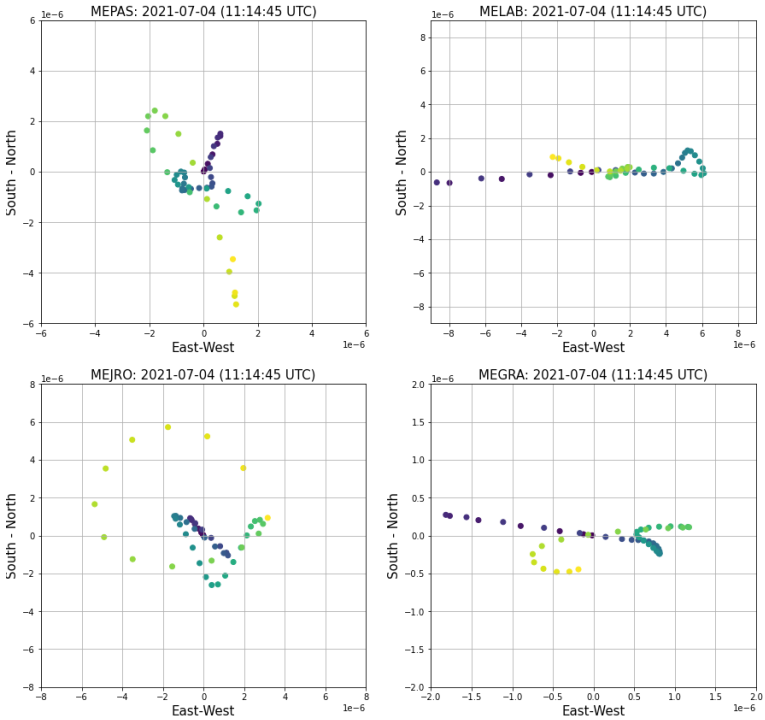
Sedangkan pada Gambar 4.14b, data *particle motion* di stasiun MEPAS memiliki persebaran data pada arah tenggara – barat laut dari stasiun, pada stasiun MELAB memiliki persebaran data mengarah ke timur – barat dari stasiun, pada stasiun MEGRA memiliki persebaran data mengarah tenggara – timur laut dari stasiun, sedangkan pada stasiun MEJRO memiliki persebaran data cenderung lebih acak.

Arah *event* yang tercatat di informasi data yaitu menuju tenggara, sehingga nilai *back azimuth* yang dihasilkan cenderung sudah sesuai. Persebaran data *particle motion* yang arahnya tidak sesuai dari stasiun terhadap *event* yaitu terdapat pada stasiun MEJRO dan MEGRA. Persebaran data *particle motion* yang tidak sesuai dari setiap stasiun terhadap *event* yang diamati dapat terjadi karena sulitnya penentuan gelombang P. Pemotongan yang dilakukan untuk data awal pada *particle motion* ini hanya berdasarkan waktu mulai kejadian yang tercatat dari data yang terobservasi ditambah waktu 0,5 detik. Selain itu, terdapat beberapa stasiun yang memiliki hasil perekaman sinyal yang kurang baik, sehingga data yang terekam dapat memiliki noise yang cukup tinggi.

4.2.10. 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC)



(a)



(b)

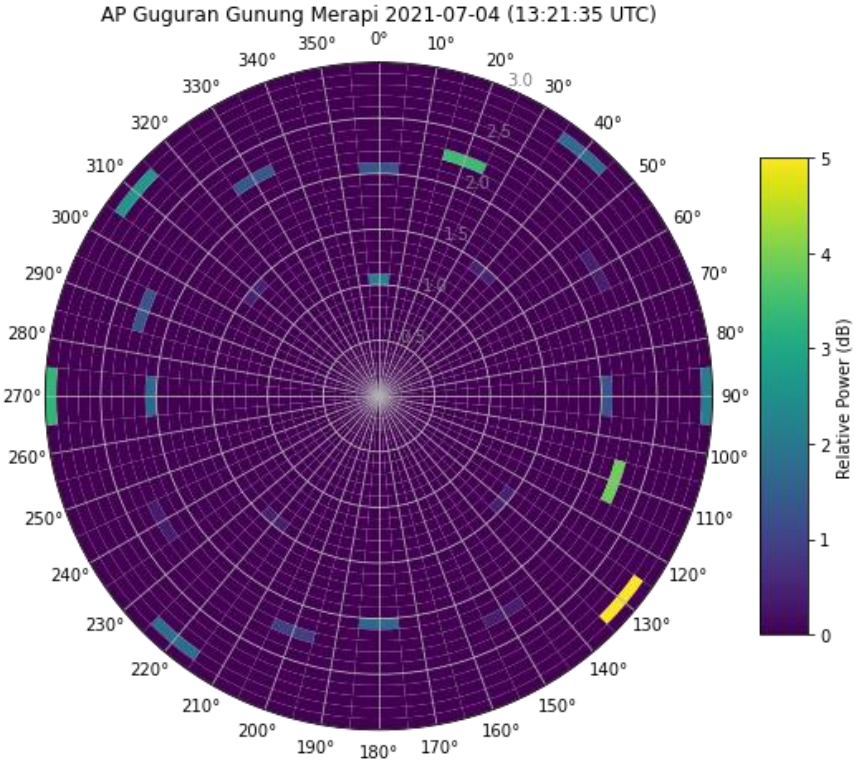
Gambar 4.15 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC)

Ditinjau pada Gambar 4.15a, hasil *fk-beamformin* memiliki nilai energi maksimum yang menunjukkan *back azimuth* pada 265° hingga 275° (barat) yang ditunjukkan dengan warna kuning dan memiliki nilai energi maksimum sebesar 3,5dB. Nilai *slowness* 2,1 s/deg hingga 2,2 s/deg dan 2,9 s/deg hingga 3,9 s/deg.

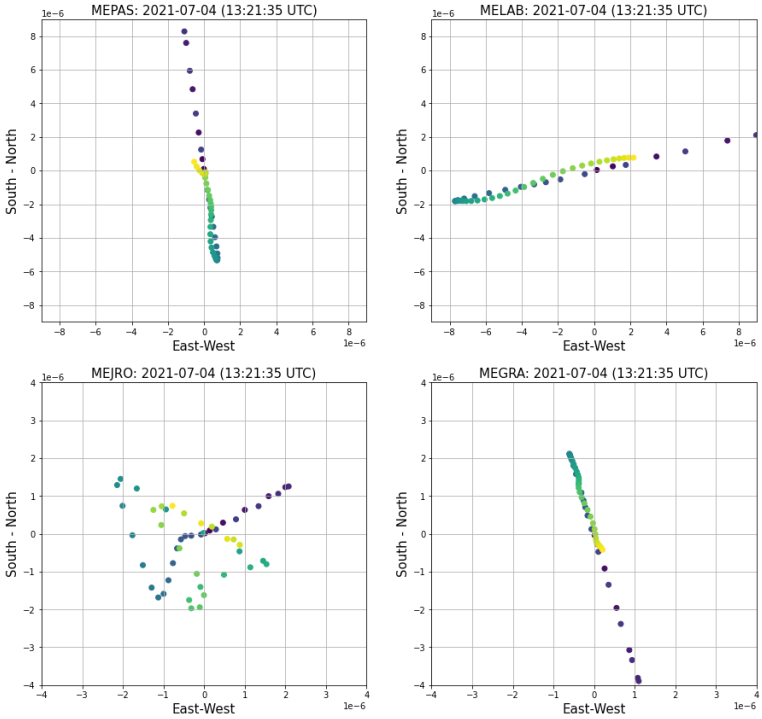
Sedangkan pada Gambar 4.15b, hasil *particle motion* pada stasiun MELAB dan MEGRA memiliki persebaran data mengarah timur – barat dari masing masing stasiun. Pada stasiun MEPAS bermula memiliki persebaran data yang mengarah selatan kemudian menjadi barat. Sedangkan pada stasiun MEJRO memiliki persebaran data yang lebih acak.

Berdasarkan informasi data *event* terobservasi, yang menunjukkan arah ke barat, hasil *back azimuth* yang diperoleh sudah sesuai. Sedangkan pada hasil *particle motion* di masing-masing stasiun MEPAS, MELAB dan MEJRO cenderung memiliki persebaran data yang kurang sesuai dengan arah *event* terhadap masing-masing stasiun. Persebaran data yang tidak sesuai dapat terjadi karena pemotongan sinyal karena sulitnya penentuan gelombang P menjadi kendala hal ini dapat terjadi. pemotongan yang dilakukan untuk gelombang awal pada *particle motion* ini hanya berdasarkan waktu awal kejadian yang tercatat dari data *event* terobservasi ditambah waktu 0,5 detik. Selain itu, Sinyal pada stasiun MEJRO dan MEPAS pada sinyal yang dipotong juga cenderung lebih tinggi *noisenya*.

4.2.11. 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC)



(a)



(b)

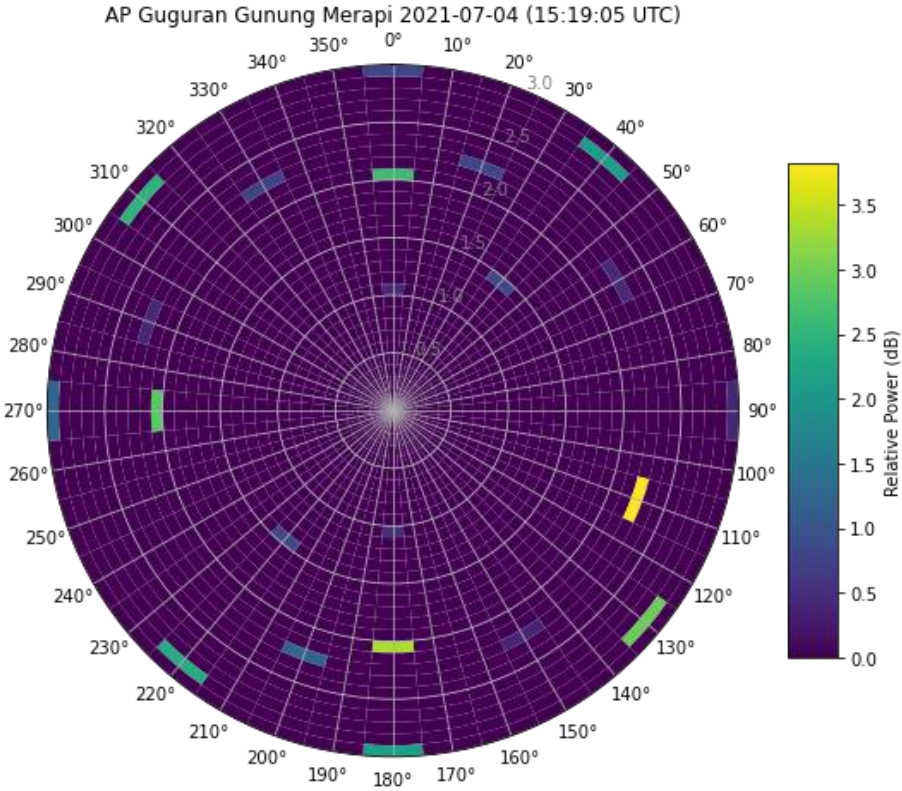
Gambar 4.16 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC)

Berdasarkan gambaer 4.16a, hasil yang diperoleh memiliki nilai *back azimuth* dengna nilai energi terbesar pada 125° hingga 135° (tenggara) yang ditunjukkan oleh warna kuning dengan nilai energi maksimum 5,0dB dan nilai *slowness* 2,8 s/deg hingga 2,9 s/deg.

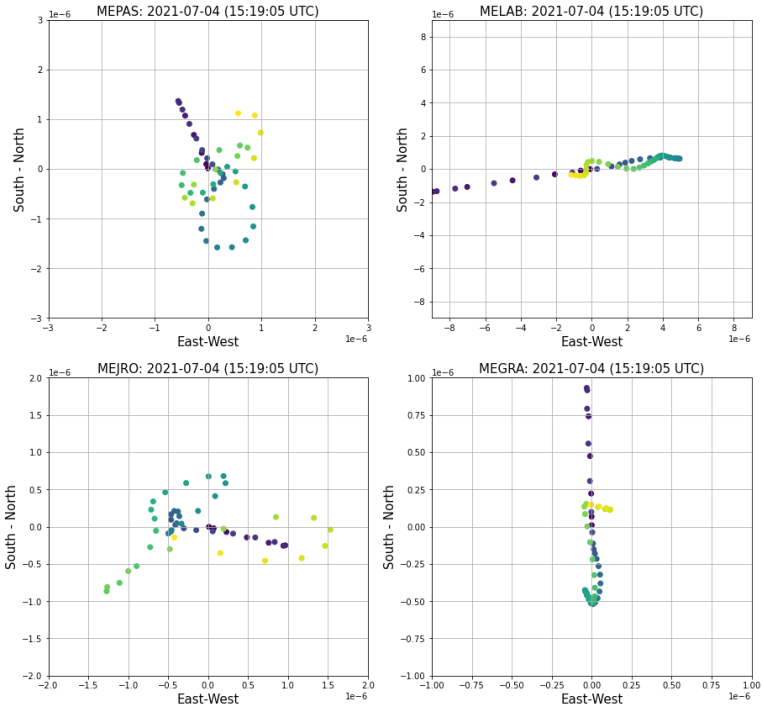
Sedangkan pada Gambar 4.16b, hasil *particle motion* pada stasiun MEPAS memiliki persebaran data mengarah utara – selatan dari masing masing stasiun. Pada stasiun MEGRA memiliki persebaran data mengarah tenggara – barat laut dari stasiun. Pada stasiun MELAB dan MEJRO memiliki persebaran data yang mengarah barat daya - timur laut dari masing – masing stasiun.

Nilai *back azimuth* yang diperoleh melalui *fk-beamforming* sudah cukup sesuai sesuai dengan informasi data *event* yang terobservasi, yaitu awan panas guguran memiliki arah ke tenggara. Begitu pula pada *particle motion*, arah dari masing-masing stasiun terhadap *event* juga sesuai. Akan tetapi, pada stasiun MEJRO memiliki persebaran data yang kurang baik, hal ini disebabkan karena pada stasiun ini, data yang terekam memiliki lebih banyak *noise* dibandingkan dengan stasiun perekaman seismik lainnya.

4.2.12. 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC)



(a)



Gambar 4.17 Plot diagram polar *fk-beamforming* (a), dan *particle motion* (b) pada *event* 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC)

Berdasarkan Gambar 4.17a, hasil yang diperoleh memiliki nilai *back azimuth* dengan energi terbesar berada pada rentang 115° hingga 125° yang ditunjukkan warna kuning dengan nilai energi maksimum sebesar 3,7dB Nilai *slowness* sebesar 2,3 s/deg hingga 2,4 s/deg.

Sedangkan pada Gambar 4.17b, hasil *particle motion* yang diperoleng menunjukkan pada stasiun MEPAS dan MEGRA memiliki persebaran data utara – tenggara dari masing-masing stasiun, sedangkan pada stasiun MELAB dan MEJRO memiliki persebaran data timur – barat dari masing masing stasiun. Akan tetapi, pada stasiun MEPAS dan MEJRO cenderung lebih acak dibandingkan dengan persebaran data lainnya.

Berdasarkan informasi data *event* yang terobservasi, awan panas guguran yang terjadi mengarah ke tenggara, sehingga hasil *back azimuth* yang diperoleh cukup sesuai. Sedangkan, pada hasil *particle motion* memiliki hasil yang cukup sesuai pula pada masing-masing stasiun, yaitu tiap stasiun memiliki persebaran data yang mengarah ke *event* sesuai dengan posisi masing-masing stasiun.

4.3 Perbandingan Arah Pengolahan dan Arah Observasi

4.3.1 Perbandingan Arah *FK-Beamforming* dan Observasi

Berdasarkan hasil yang diperoleh di atas, penggunaan metode *fk-beamforming* cukup memberikan hasil yang sesuai dengan tiap arah awan panas guguran dari informasi *event* yang terobservasi Tabel 4.2. Tetapi, terdapat beberapa hasil pengolahan yang tidak sesuai dengan hasil observasi. *Event* tersebut antara lain pada *event* tanggal 7 Januari 2021 (01:02:26 UTC), hasil observasi tercatat awan panas guguran mengarah barat daya, akan tetapi pada hasil pengolahan menunjukkan arah timur laut.

Hasil pengolahan yang arahnya tidak sesuai dengan observasi lainnya adalah pada *event* tanggal 19 Januari 2021 (22:34:50 UTC), hasil observasi yang diperoleh tercatat awan panas guguran mengarah ke barat daya, sedangkan hasil pengolahan yang diperoleh memiliki dua energi terbesar dengan masing-masing energi memiliki arah yang berbeda, yaitu pada arah barat daya dan timur laut. Hasil pengolahan yang serupa juga terdapat pada *event* tanggal 4 Juli 2021 (13:21:35 UTC) yang memiliki dua energi terbesar dengan masing-masing energi memiliki arah yang berbeda, yaitu mengarah tenggara dan barat daya. Berbeda dengan hasil observasi yang tercatat awan panas guguran mengarah ke tenggara.

Perseberan nilai energi yang terdapat pada diagram polar *fk-beamforming* dari tiap *event* menunjukkan adanya dispersi yang menunjukkan persebarannya tidak terfokus pada satu rentang arah tertentu. Hal ini dapat terjadi karena parameter nilai *slowness* untuk grid search kurang sesuai. Selain itu, kondisi data berupa sinyal yang terekam juga mempengaruhi.

Pada data yang terekam di stasiun MEJRO cenderung memiliki *noise* yang cukup banyak. Tingginya *noise level* dan jarak tiap stasiun terhadap sumber getaran yang diakibatkan awanpanas guguran menjadi penyebabnya.

Hasil persebaran data yang banyak pada diagram polar *fk-beamforming* ini dapat disebabkan pula karena konfigurasi stasiun yang terdapat di Gunung Merapi bukanlah konfigurasi yang optimal untuk disebut sebagai konfigurasi *array*, dimana jarak lokasi antar stasiun yang cukup jauh dan jaraknya tidak sama panjang.

Tabel 4.2 Arah observasi dan hasil pengolahan *fk-beamforming*

Waktu (UTC)	Arah Observasi	*Slowness (s/deg)*	*FK-Beamforming*
7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC)	Timur Laut	2,8 hingga 2,9	40° hingga 50°
19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC)	Barat Daya	2,8 hingga 2,9	210° hingga 230°
19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC)	Barat Daya	2,3 hingga 2,4	190° hingga 210°
19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC)	Barat Daya	2,3 hingga 2,4	15° hingga 25° 195° hingga 205°
26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC)	Barat Daya	2,8 hingga 2,9	215° hingga 225°
26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC)	Barat Daya	2,3 hingga 2,4	195° hingga 205°
4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC)	Tenggara	2,8 hingga 2,9 2,3 hingga 2,4	125° hingga 135° 195° hingga 205°
4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC)	Tenggara	2,8 hingga 2,9	125° hingga 135°
4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC)	Tenggara	2,8 hingga 2,9	125° hingga 135°
4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC)	Barat	2,1 hingga 2,2 2,9 hingga 3,9	265° hingga 275°
4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC)	Tenggara	2,8 hingga 2,9	125° hingga 135°
4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC)	Tenggara	2,3 hingga 2,4	115° hingga 125°

4.3.2 Perbandingan Arah *Particle Motion* dan Observasi

Persebaran data *particle motion* dilihat dari posisi masing-masing stasiun terhadap arah awan panas guguran . Pada *event* barat daya, persebaran data yang sesuai di stasiun MEPAS dan MEGRA seharusnya mengarah ke barat daya - timur laut, pada stasiun MELAB persebaran yang sesuai yaitu mengarah ke utara – selatan atau barat laut - tenggara. Sedangkan, pada stasiun MEJRO, bersebaran data yang sesuai yaitu mengarah timur laut – barat daya.

Sedangkan pada *event* tenggara, persebaran data *particle motion* yang sesuai pada stasiun MEPAS dan MEGRA yaitu mengarah ke tenggara - barat laut maupun utara selatan. Pada stasiun MELAB, persebaran data yang sesuai adalah arah timur laut – barat daya maupun utara selatan. Sedangkan pada stasiun MEJRO yaitu mengarah timur laut – barat daya.

Hasil yang diperoleh menunjukkan stasiun MEPAS yang cenderung memiliki kesusaian yang lebih baik antara hasil observasi pada tiap *event* dengan persebaran data dari *particle motion* yang diperoleh. Terdapat 9 dari 12 *event* yang persebaran data *particle motion* sesuai dengan hasil observasi, ditandai dengan warna biru pada Tabel 4.3. Stasiun MEPAS sebagai stasiun referensi memiliki sinyal yang baik dan cenderung memiliki *noise* yang lebih sedikit dibandingkan stasiun lainnya, serta sebagai stasiun yang pertama kali merekam tiap *event* yang terjadi karena letaknya yang berada paling dekat dengan *lava dome* dibandingkan 3 stasiun lainnya.

Ketidaksesuaian persebaran data *particle motion* kurang bisa mendukung hasil dari *fk-beamforming.* Hal ini dapat terjadi karena penentuan gelombang P yang sulit pada awan panas guguran. Awan panas guguran memiliki sifat yang gelombangnya mengalami kenaikan frekuensi dan amplitude yang berangsur angsur, sehingga gelombang awal yang terekam sulit untuk ditentukan. Penggunaan *particle motion* untuk mendukung hasil *fk-beamformi* ini dapat lebih efektif apabila digunakan pada *event* dengan sifat gelombang P yang mudah ditentukan, sehingga proses *picking* gelombang lebih akurat. Contohnya pada *event* vulkanotektonik tipe A dan B.

Tabel 4.3 Persebaran data *particle motion*. warna biru menunjukkan arah yang sesuai dengan hasil observasi

Waktu (UTC)	Stasiun			
	MEPAS	**MELAB**	**MEJRO**	**MEGRA**
7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Barat Laut - Tenggara	Timur Laut - Barat Daya	Timur Laut - Barat Daya
19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC)	Tenggara - Barat Laut	Timur - Barat	Timur Laut - Barat Daya	Tenggara - Barat Laut
19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Barat Laut - Tenggara	Timur Laut - Barat Daya	Timur - Barat
19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Timur - Barat	Timur Laut - Barat Daya	Timur Laut - Barat Daya
26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Utara - Selatan	Utara - Selatan	Tenggara - Barat Laut
26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC)	Utara - Selatan	Barat Daya - Timur Laut	Tenggara - Barat Laut	Timur - Barat
4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Tenggara - Barat Laut	Tenggara - Barat Laut	Tenggara - Barat Laut
4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC)	Barat Daya - Timur Laut	Timur Laut - Barat Daya	Tenggara - Barat Laut	Timur - Barat
4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC)	Tenggara - Barat Laut	Timur - Barat	Tidak Beraturan	Timur Laut - Barat Daya
4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC)	Utara - Selatan	Timur - Barat	Tidak Beraturan	Timur - Barat
4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC)	Utara - Selatan	Timur Laut - Barat Daya	Timur Laut - Barat Daya	Tenggara - Barat Laut
4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC)	Tenggara - Barat Laut	Timur - Barat	Timur - Barat	Utara - Selatan

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Pada setiap *event* barat daya cenderung memiliki persebaran energi terbesar di retang *back azimuth* 200° hingga 230°. Sedangkan pada arah tenggara cenderung pada rentang 120° hingga 140°. Dari 12 *event* yang diolah, terdapat 1 *event* yang hasilnya tidak sesuai dengan informasi data yang terobservasi,. Serta 2 *event* yang hasilnya memiliki nilai energi terbesar yang serupa pada dua arah yang berbeda, namun salah satu energi terbesarnya sesuai dengan hasil obesrvasi visual. Sehingga, penggunaan metode *fk-beamforming* cukup efektif dalam penentuan arah awan panas guguran pada Gunung Merapi.
2. Hasil *particle motion* pada tiap *event* di masing-masing stasiun cukup kurang untuk mendukung hasil *fk-beamforming*. Banyaknya arah yang tidak sama dengan hasil observasi disebabkan karena penentuan waktu tiba gelombang P yang sulit pada *event* awan panas guguran. Penggunaan *particle motion* lebih berguna pada *event* dengan sifat gelombang P yang jelas, sehingga proses *picking* akan lebih mudah dilakukan. Bersamaan dengan penggunaan *fk-beamforming*, *particle motion* dapat sangat membantu dalam penentuan arah *event* jenis lainnya seperti VTA dan VTB.

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Untuk meningkatkan akurasi dari *fk-beamforming* dapat dilakukan dengan memperbanyak data dari stasiun seismik yang digunakan.
2. Parameter-parameter *slowness grid*, *window length* dan frekuensi perlu disesuaikan lagi. Perlu *dataset* yang lebih banyak lagi untuk mempelajari sifat awan panas guguran untuk penentuan parameter yang baik.

3. Penentuan waktu tiba gelombang P untuk *particle motion* perlu ditentukan lebih baik lagi, dan pada *particle motion* ini akan lebih baik digunakan pada *event* dengan waktu tiba gelombang P yang jelas.

DAFTAR PUSTAKA

Borleanu, F., Mihaela P., Bogdan G., Mircea R. 2008. *Azimuth and Slowness Corrections at BURAR Array Estimated fro Regional Events Occurred in The Mediteranean Area*. Romanian Reports in Physics, Vol. 60(4), 1137-1149.

Chouet, B., Phillip D., Alejandra A.C. 2005. *Source Mechanism of Vulcanian Degassing at Popocatépetl Volcano, Mexico, Determined from Waveform Inversions of Very Long Period Signals*. Journal of Geophysical Research, 110.

Dairoh dan Wiwit S. 2017. Dekomposisi Wavelet Data Seismik Broadband dari Stasiun Wanagama Yogyakarta pada saat Letusan Gunung Merapi 2010. Jurnal Fisika dan Aplikasinya. 13(2).

Darmawan, H. 2020. *Dynamic velocity and seismic characteristics of gravitational rockfalls at the Merapi lava dome.* Journal Volcanology and Geothermal Research. 404. 107101.

Daryono. 2010. Aktivitas Gempabumi Tektonik di Yogyakarta Menjelang Erupsi Merapi 2010. Badan Metereologi Klimatologi dan Geofisika.

Elnashai A. and Luigi, D. 2015. *Fundamentals of Earthquake Engineering.* Hong Kong: Willey.

Harjes, H.P. and Henger M. 1973. *Array-Seismologie*. Z, Geophs 39, 865-905.

Jurkevics, A. 1988. *Polarization Analysis of Three-Component Array Data.* Bulletin of The Seismological Society of America. 78(5):1725-1743.

Jousset, P., etc. 2013. *Signs of magma ascent in LP and VLP seismic events and link to degassing: An example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia*. Journal Volcanology and Geothermal Research. 261. 171-192.

Kristianto dan Budianto, A. 2008. Buletin Vulkanologi dan Bencana Geologi : Evaluasi Seismik dan Visual Kegiatan Vulkanik G. Egon, April 2008. Bandung: PVMBG. 3(2), 9-17.

Kværna, T. and Ringdal F. 1986. *Stability of Various F-K Estimation Techniques.* NORSAR Semmianual Technical Summary, Norway.

Lacroix, P. and Helmstetter A. 2011. *Location of Seismic Signals Associated with Microearthquakes and Rockfalls on The Sechilienne Landslide, French Alps.* Bulletin of the Seismological Society of America. 101 (1), 341-353.

Lowrie, W. 2007. *Fundamentals of Geophysics* (2 edition). New York: Cambridge University Press.

Lumbanraja, W. dan Brotopuspito K. S. 2015. Identifikasi Dinamika Magma Berdasarkan Analisis Tremor Vulkanik di Gunung Slamet Jawa Tengah. Jurnal Fisika Indonesia. 57:55-61.

Newhall, C., et al. 2000. *10,000 years of explosive eruptions of Merapi volcano, Central Java: Archaeological and modern implications*. Journal Volcanology and Geothermal Research. 100:9-50.

Nguyen, D.T., Brown R.D., and Lawton D.C. 2001. *Polarization Filter for Multi-component Seismic Data*. Explor. Geophys. 90-101.

Ortege, E. T., etc. 2022. *Probabilistic analysis to correlate seismic data with lava extrusion phases at Merapi volcano (Indonesia).* Journal Volcanology and Geothermal Research. 426. 107537.

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). 2013. Data Dasar Gunungapi Indonesia. Bandung: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral. Badan Geologi., Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Ratdomopurbo, A. dan Poupinet, G. 2000. *An overview of the seismicity of Merapi volcano (Java, Indonesia), 1983–1994*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 100:193-214.

Rost, S. and Weber M. 2001. *A Reflector at 200 km Depth Beneath the Northwest Pacific.* Geophys Journal, 147, 12-28.

Rost, S. and Thomas, C. 2002. *Array Seismology: Methods and Applications.* Reviews of Geophysics. 40, 30. America.

Santoso, A. B. 2013. *Analysis of The Seismic Activity Associated with The 2010 Eruption of Merapi Volcano, Java*. Journal of Volcanology and Geothermal Research.

Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics Second Edition.* New York: Press Syndicate of The University of Cambridge.

Van Bemmelen. 1949. *General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*. Government Printing

(halaman ini sengaja dikosongkan)

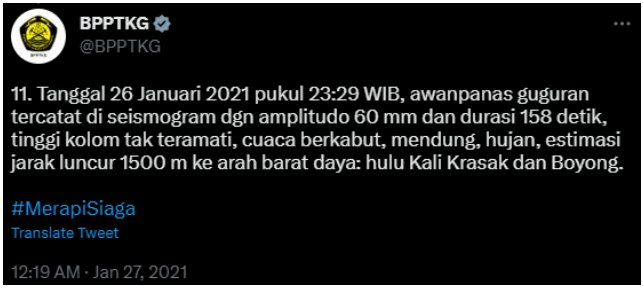
LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan hasil observasi visual awan panas guguran Gunung Merapi

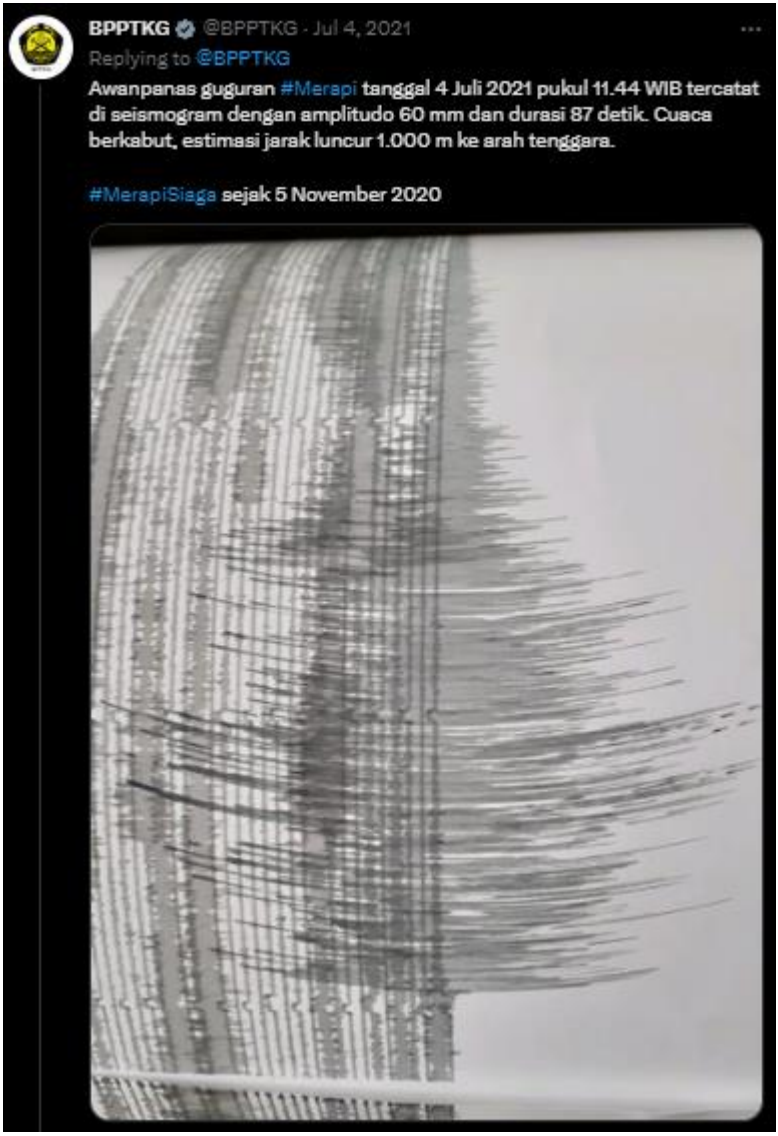
Gambar 1. *Event* terobservasi 7 Januari 2021 pukul 08:02 WIB (01:02:00 UTC)

Gambar 2. *Event* terobservasi 20 Januari 2021 pukul 00:59 WIB (19 Januari 2021 17:59:00 UTC), pukul 05:12 WIB (19 Januari 2021 22:12:00 UTC), dan pukul 05:35 WIB (19 Januari 2021 22:34:00 UTC)

Gambar 3. *Event* terobservasi 26 Januari 2021 pukul 20:17 WIB (13:17:00 UTC)

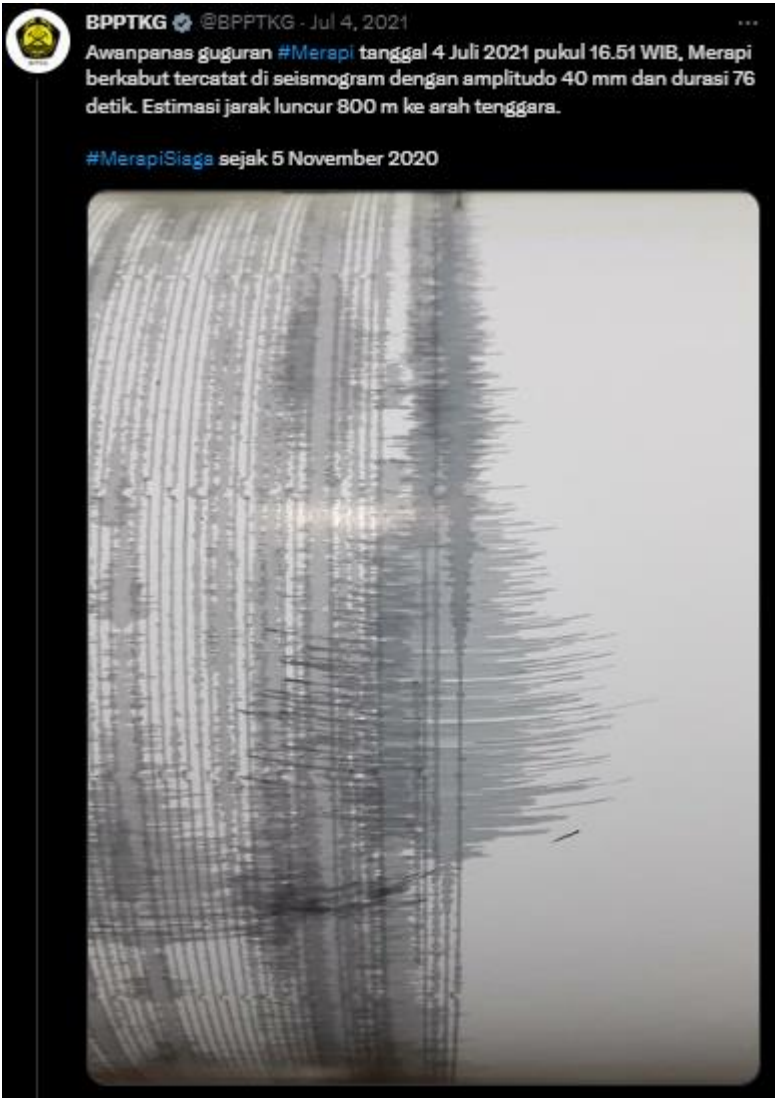


Gambar 4. *Event* terobservasi 26 Januari 2021 pukul 23:29 WIB (16:29:00 UTC)



Gambar 5. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 11:44 WIB (04:44:00 UTC)

Gambar 6. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 16:27 WIB (09:27:00 UTC)



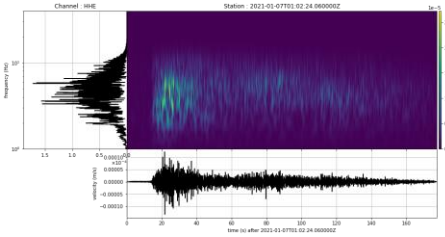
Gambar 7. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 16:51 WIB (09:51:00 UTC)

Gambar 8. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 18:15 WIB (11:15:00 UTC)

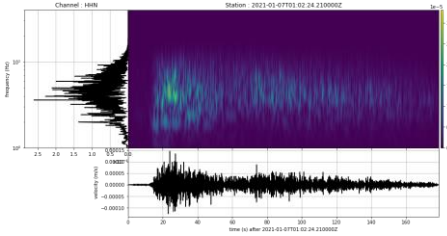
Gambar 9. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 20:21 WIB (13:21:00 UTC)

Gambar 10. *Event* terobservasi 4 Juli 2021 pukul 22:20 WIB (15:20:00 UTC)

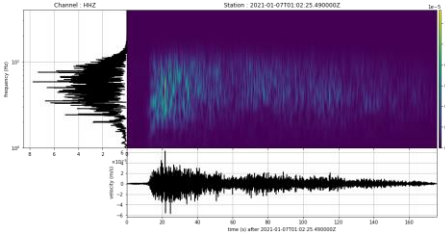
Lampiran 2. Sinyal dan Spektrogram Data Penelitian Setelah Dilakukan *Bandpass Filter* 1.0 Hz hingga 12.0 Hz



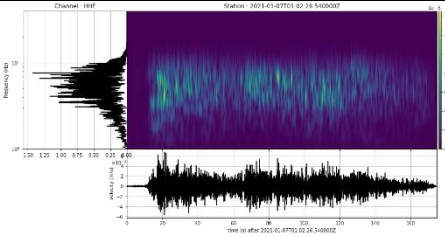
MEPAS.HHE



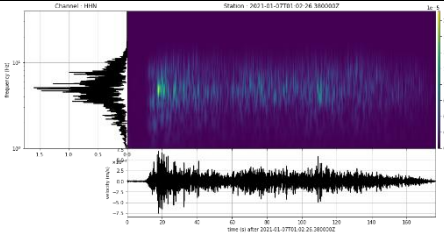
MEPAS.HHN



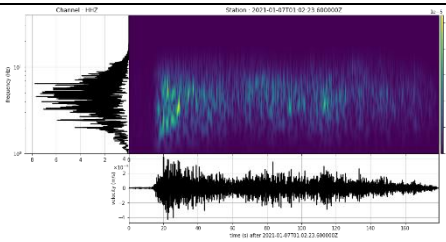
MEPAS.HHZ



MELAB.HHE

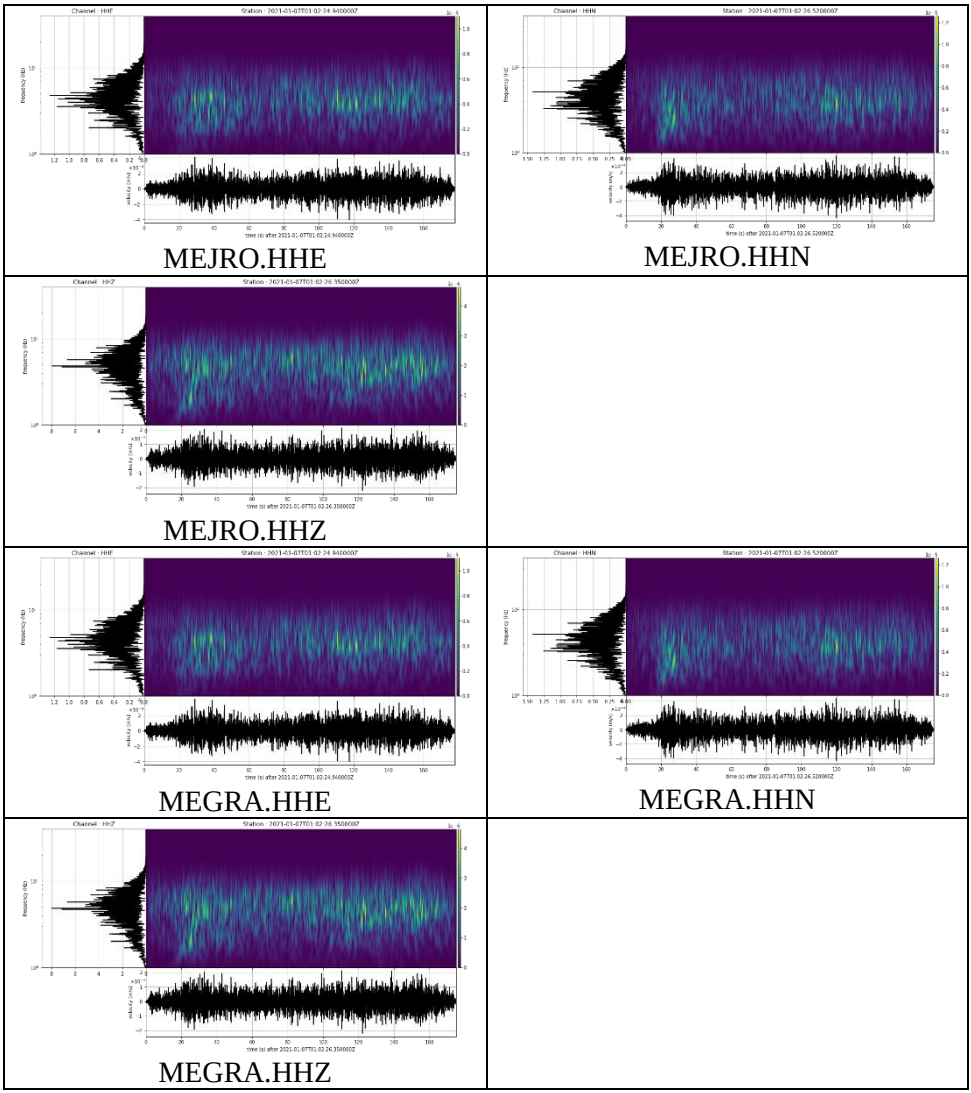


MELAB.HHN

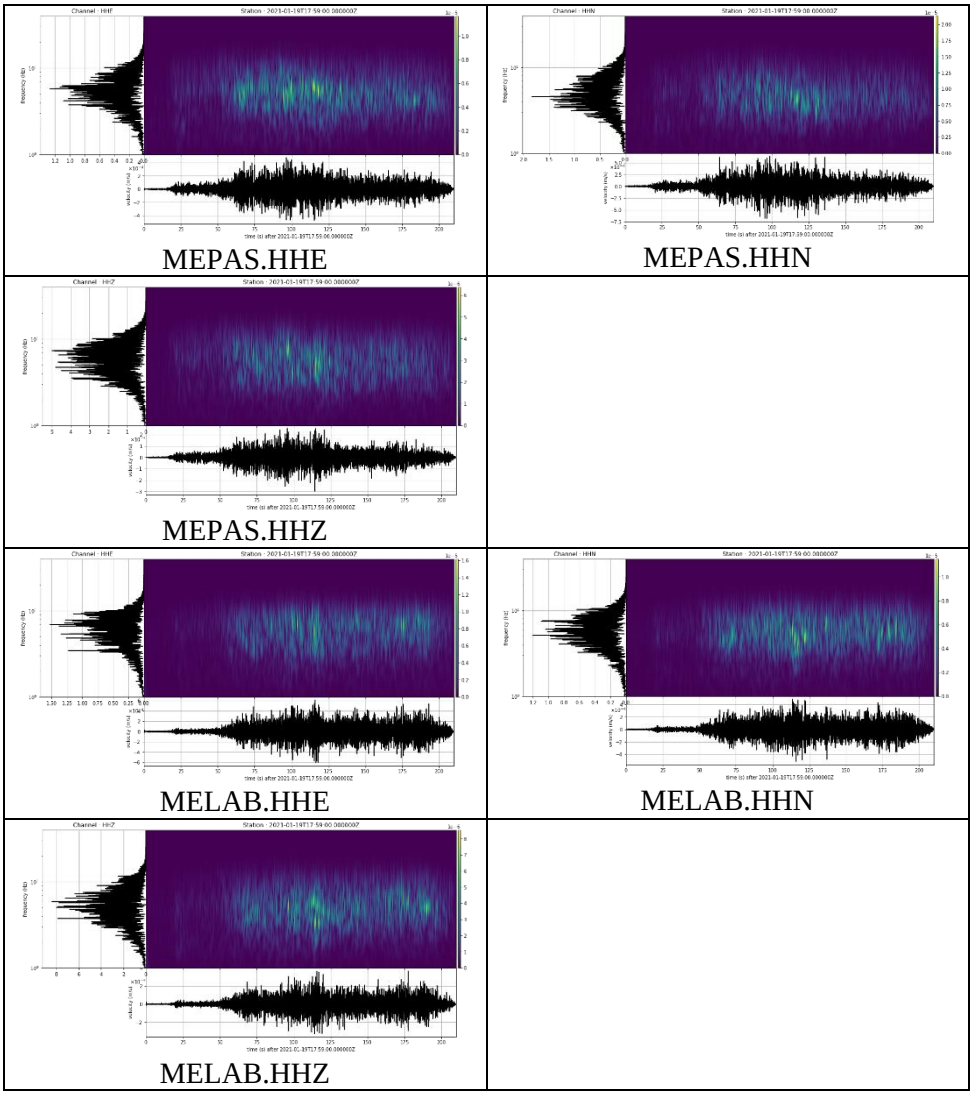


MELAB.HHZ

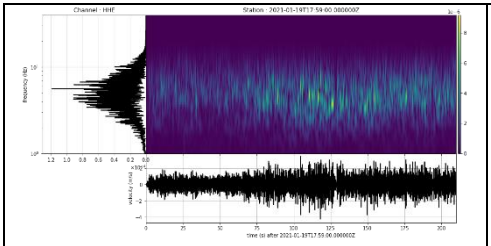
Gambar 11. *Event* 7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



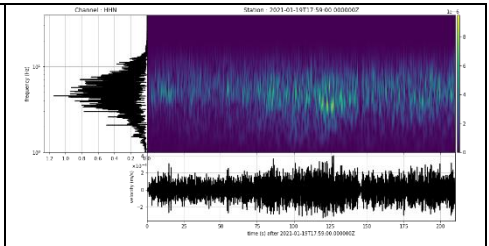
Gambar 12. *Event* 7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



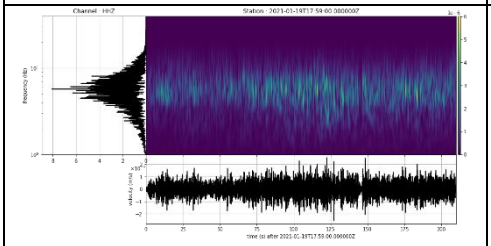
Gambar 13. *Event* 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



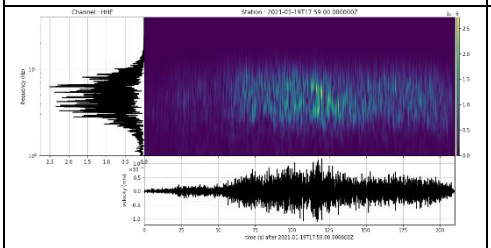
MEJRO.HHE



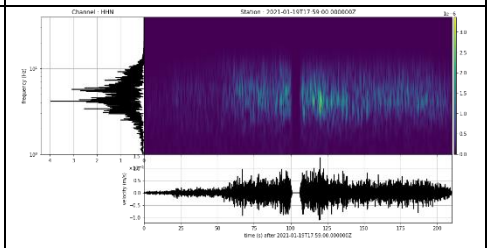
MEJRO.HHN



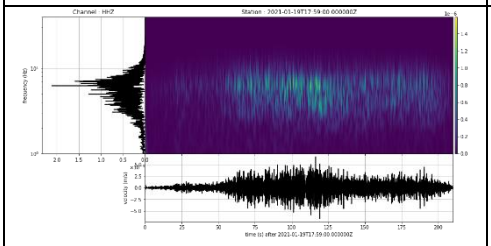
MEJRO.HHZ



MEGRA.HHE

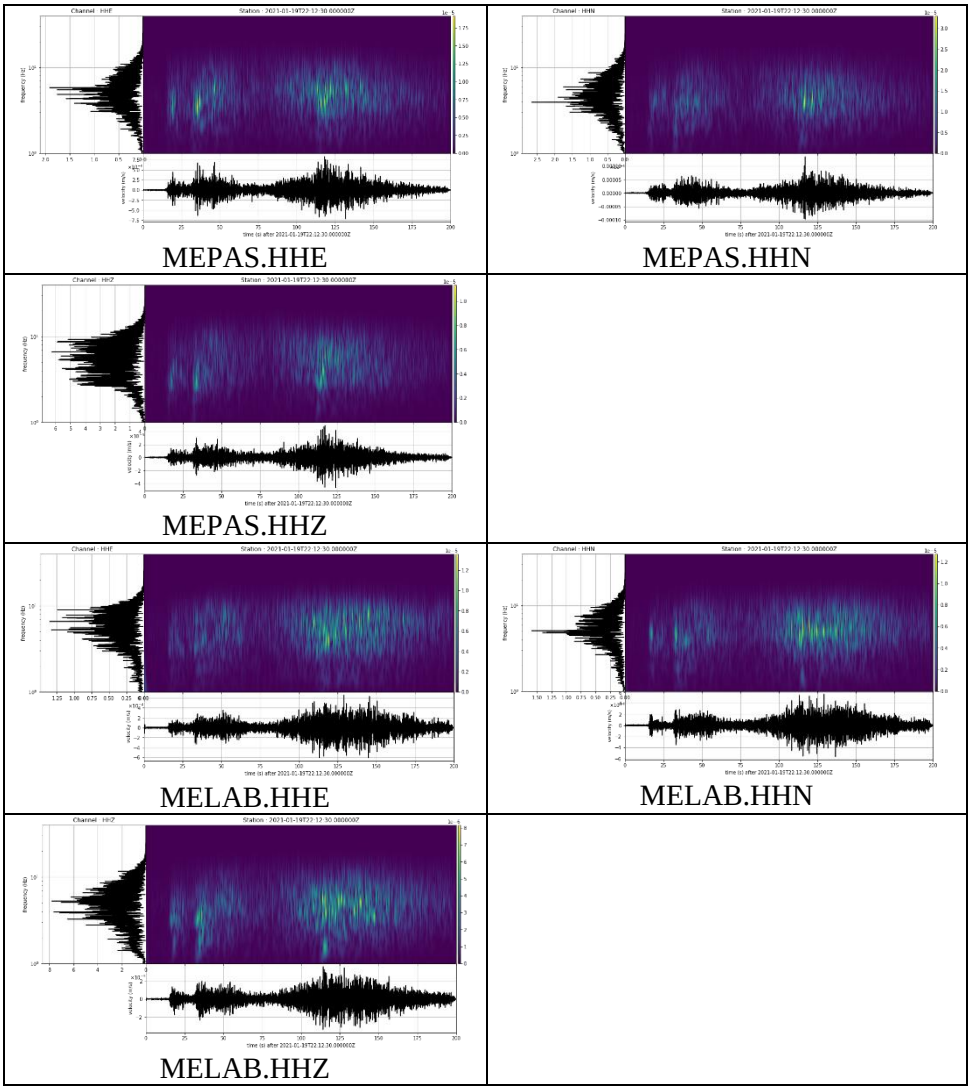


MEGRA.HHN

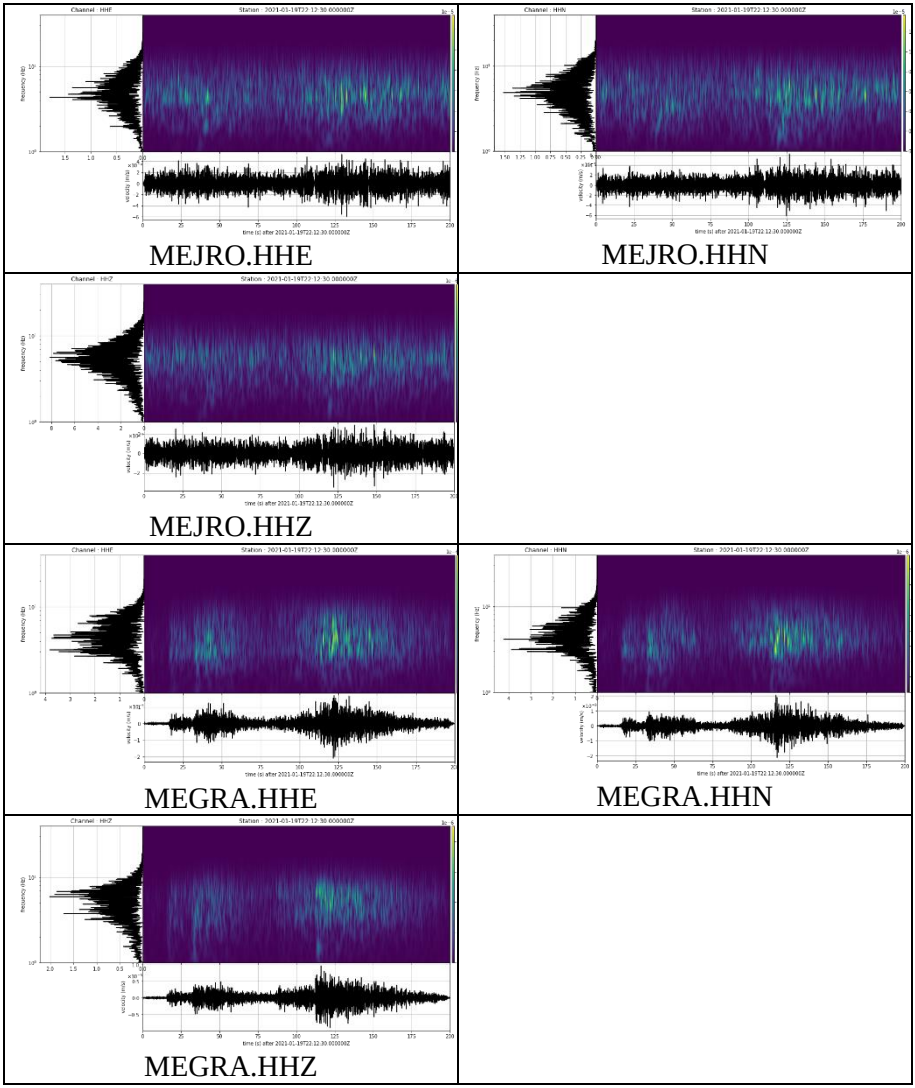


MEGRA.HHZ

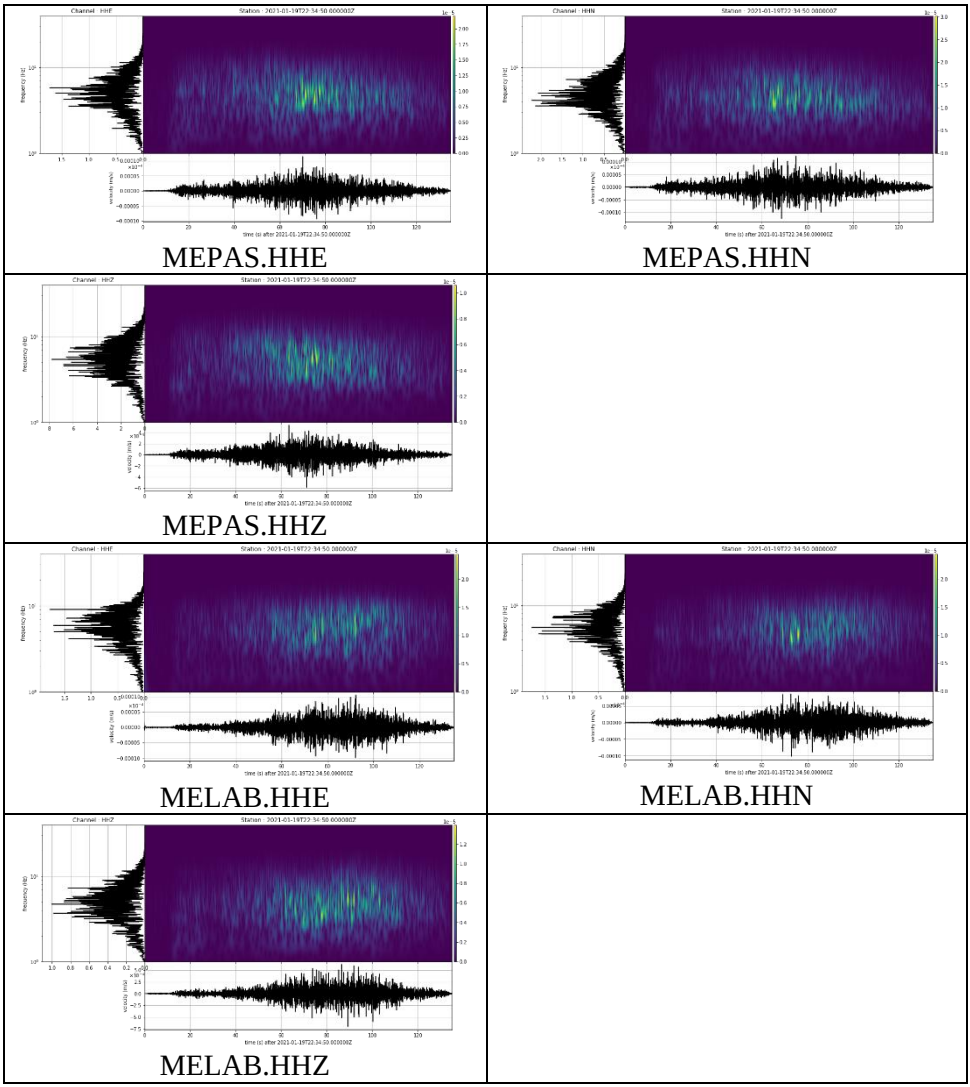
Gambar 14. *Event* 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



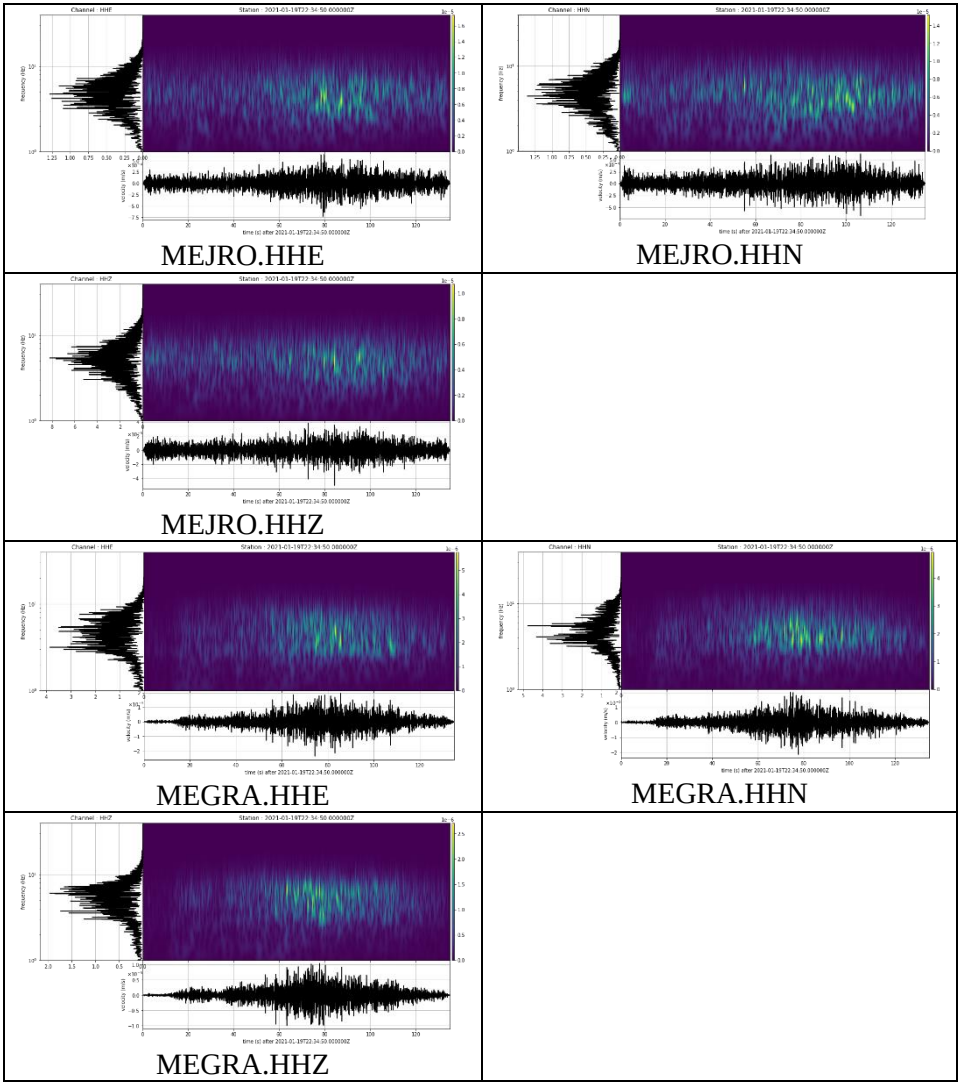
Gambar 15. *Event* 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



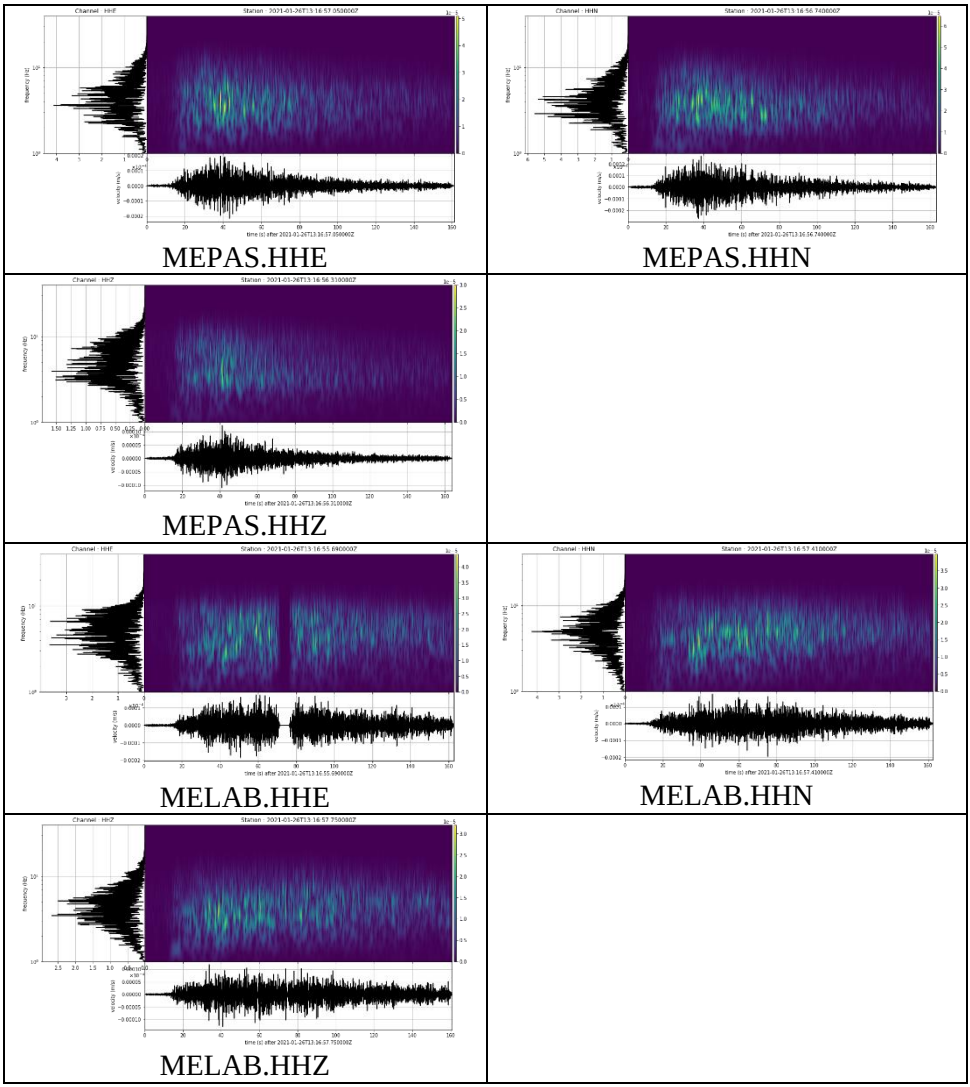
Gambar 16. *Event* 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



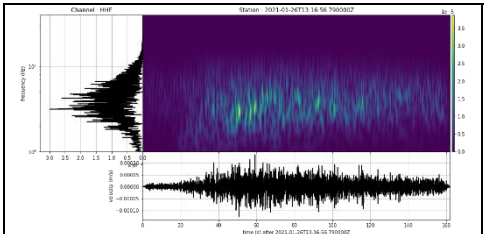
Gambar 17. *Event* 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



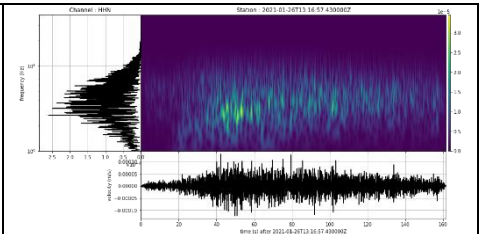
Gambar 18. *Event* 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



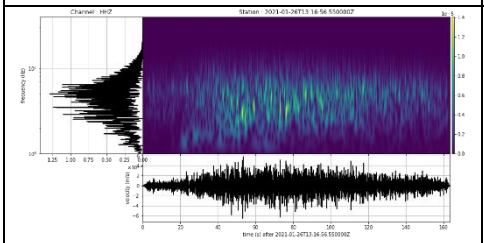
Gambar 26 *Event* Januari 2021 (13:16:57.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



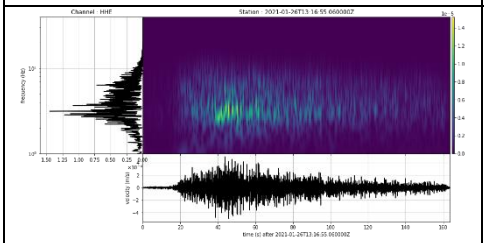
MEJRO.HHE



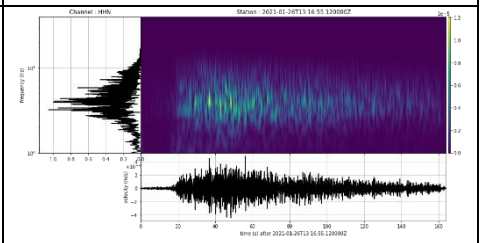
MEJRO.HHN



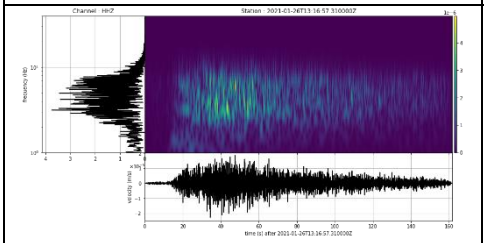
MEJRO.HHZ



MEGRA.HHE

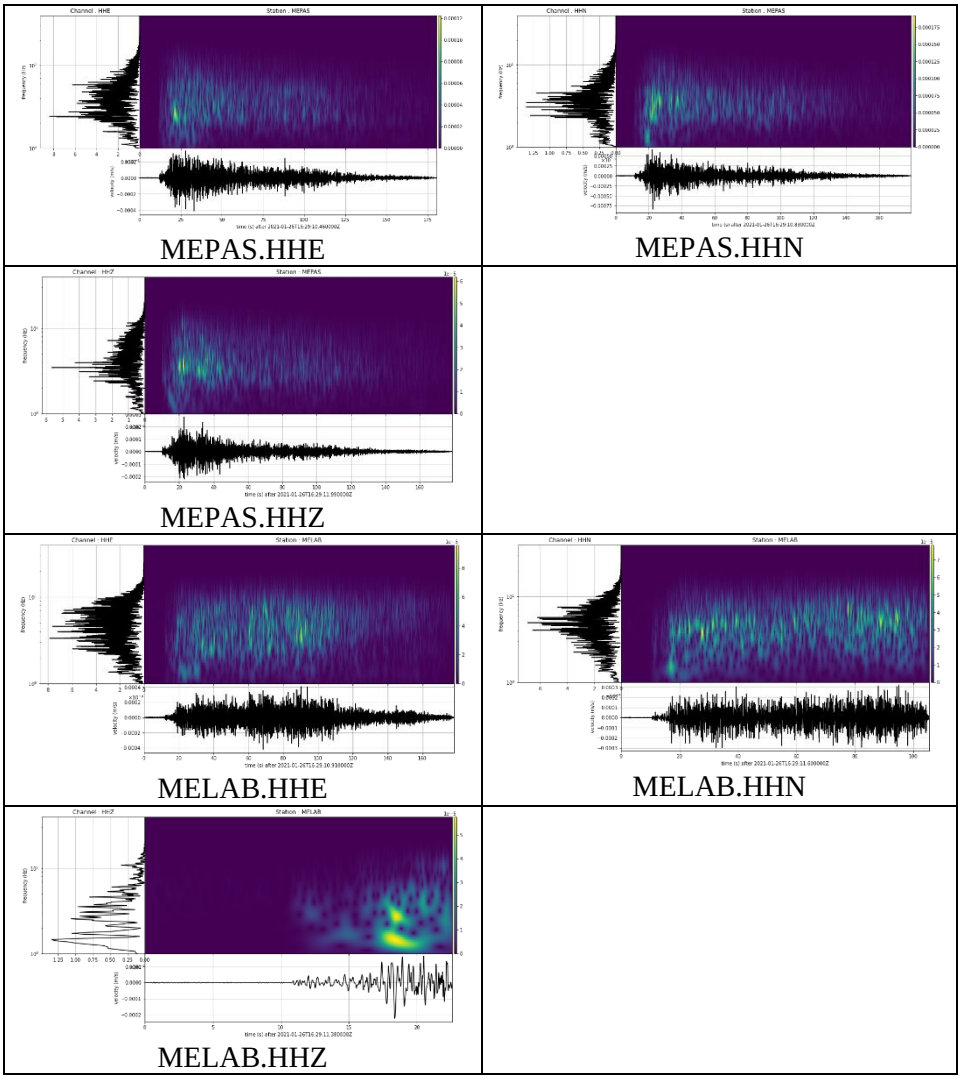


MEGRA.HHN

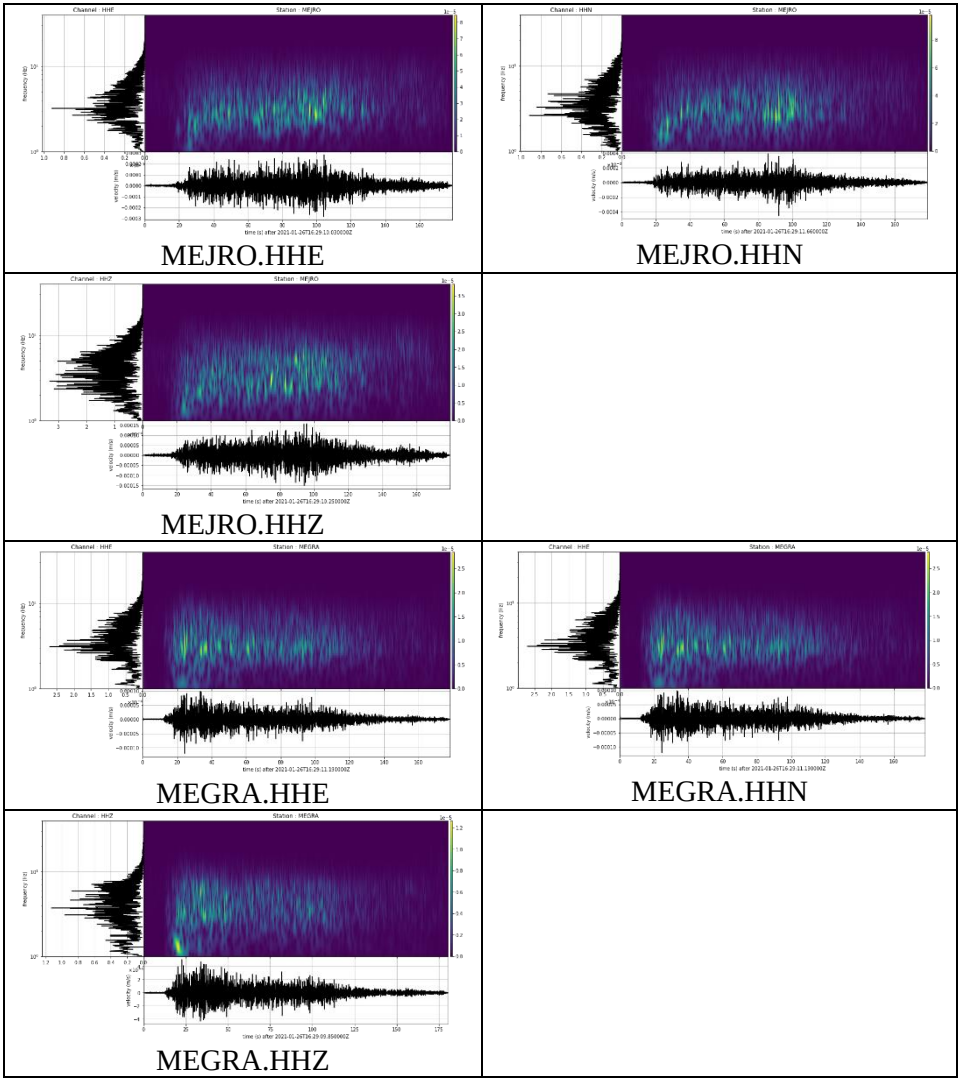


MEGRA.HHZ

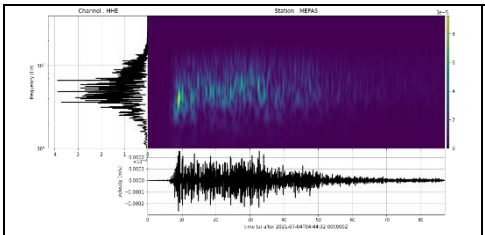
Gambar 19. *Event* 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



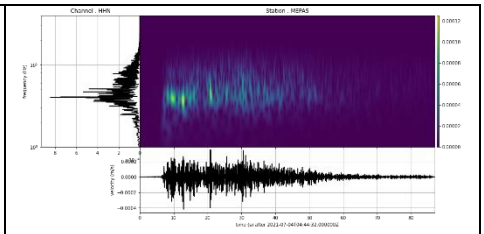
Gambar 20. *Event* 26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



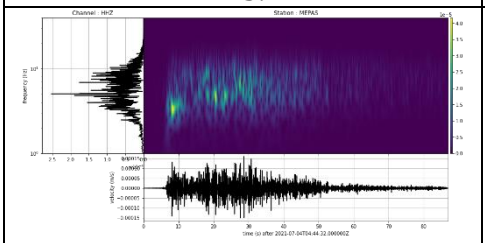
Gambar 21. *Event* 26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



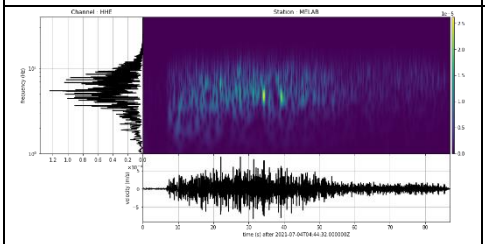
MEPAS.HHE



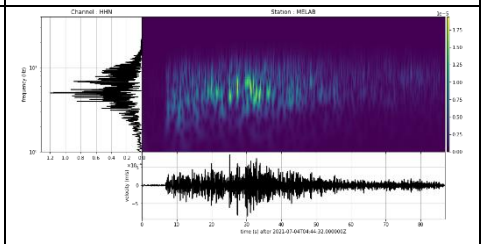
MEPAS.HHN



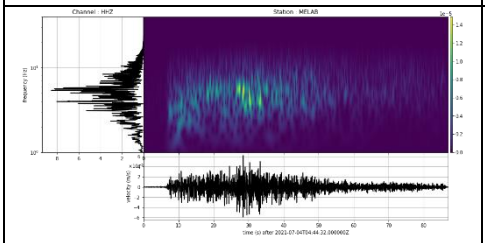
MEPAS.HHZ



MELAB.HHE

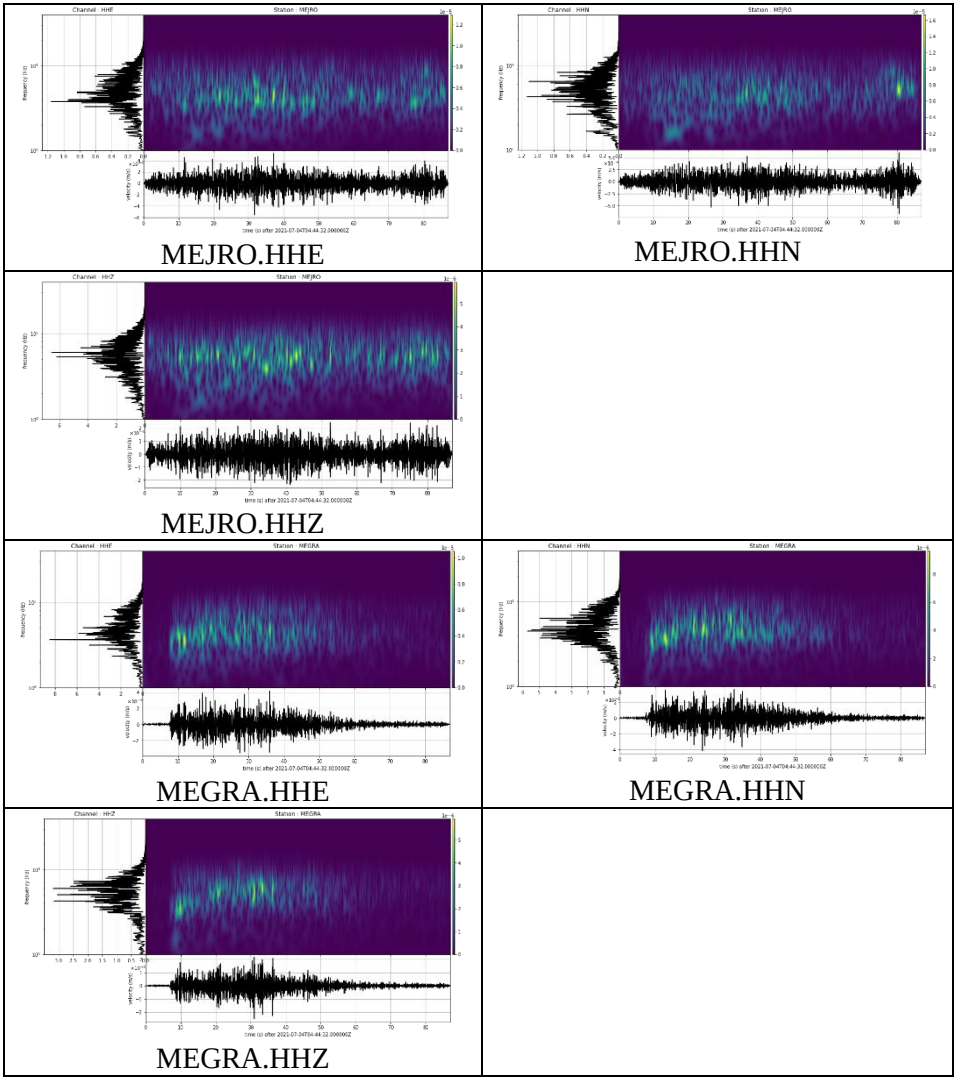


MELAB.HHN

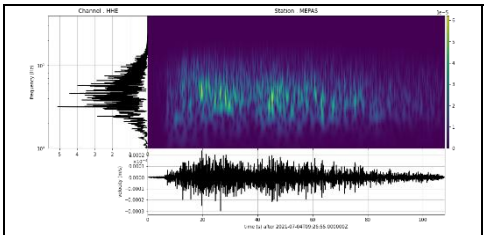


MELAB.HHZ

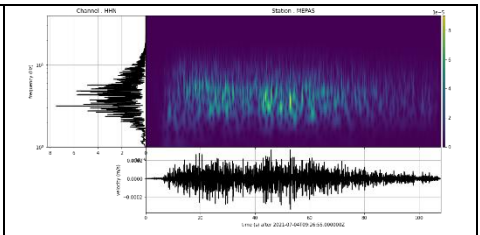
Gambar 22. *Event* 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



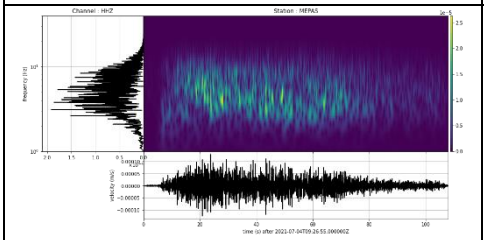
Gambar 23. *Event* 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



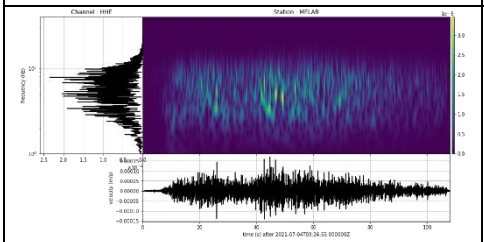
MEPAS.HHE



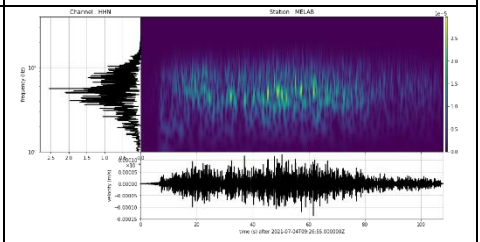
MEPAS.HHN



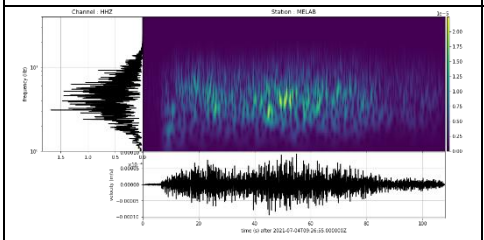
MEPAS.HHZ



MELAB.HHE

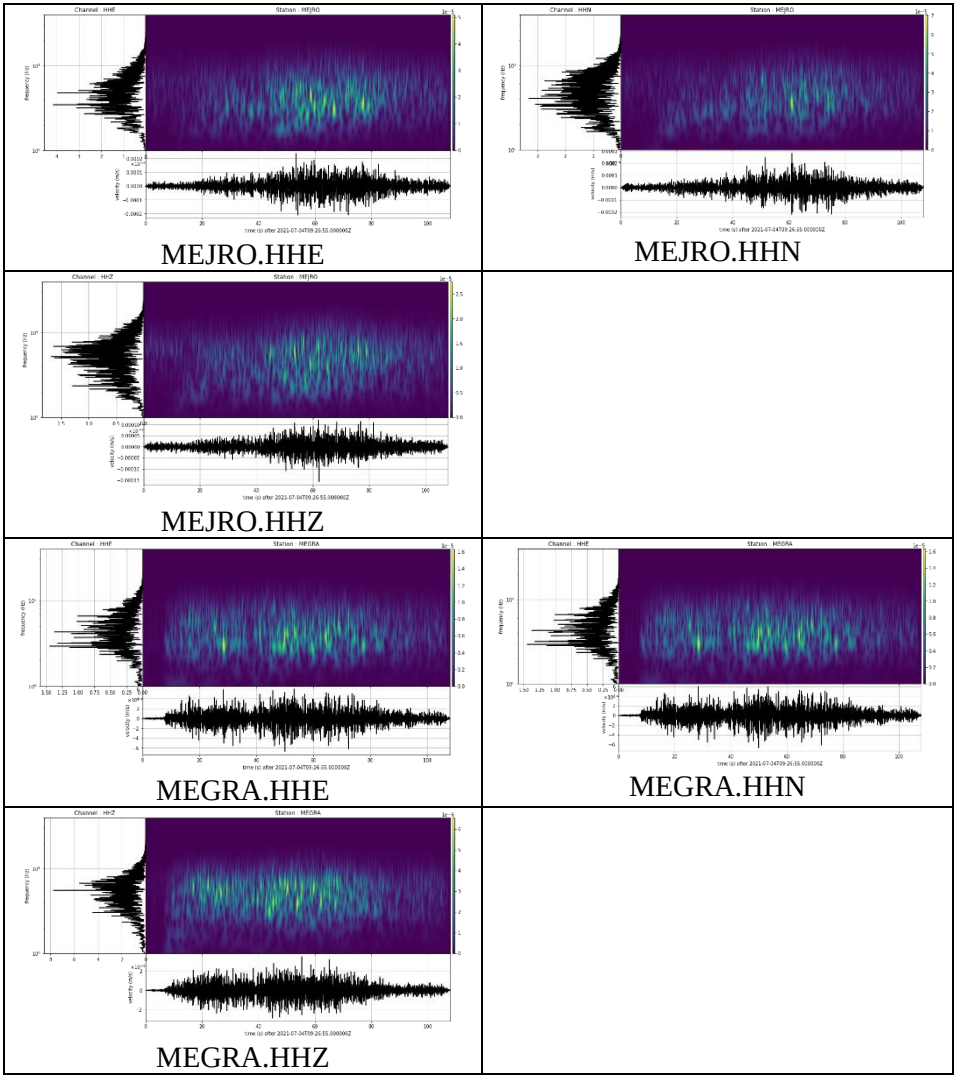


MELAB.HHN

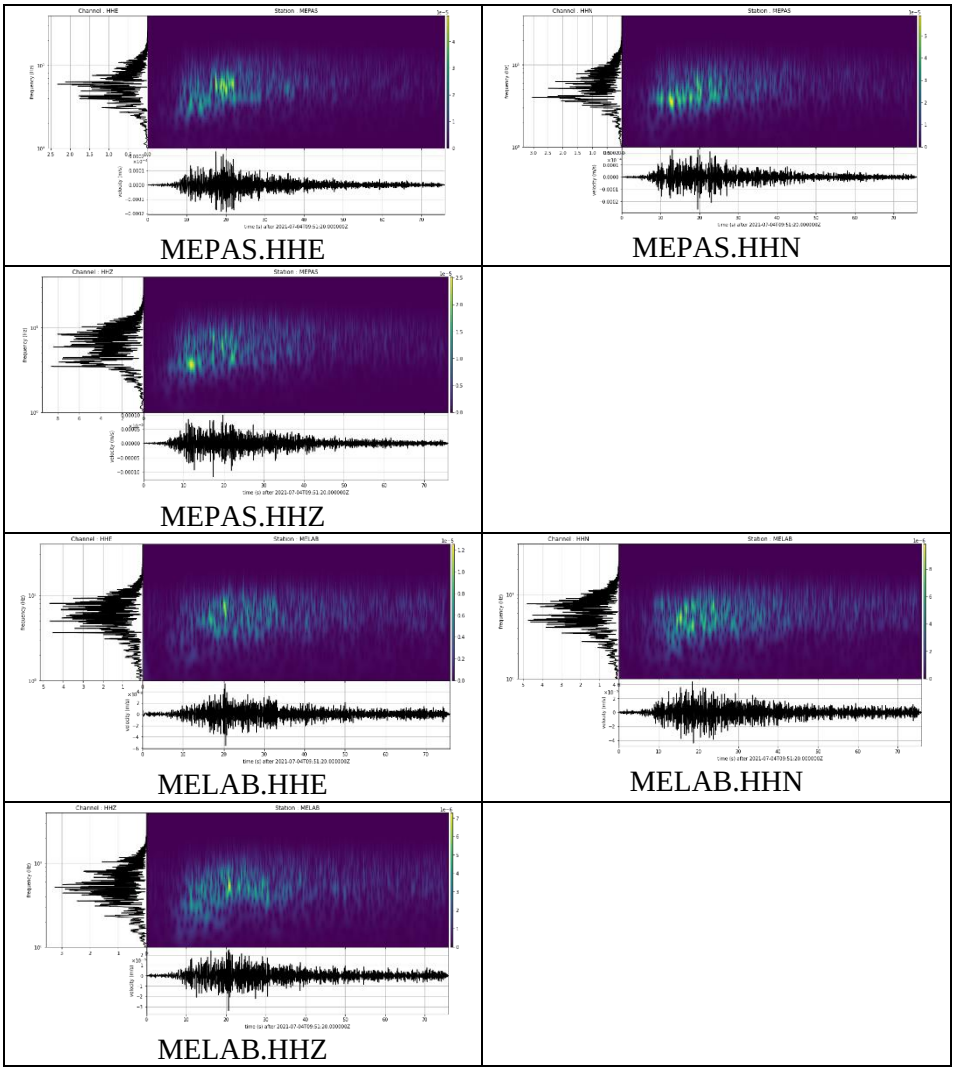


MELAB.HHZ

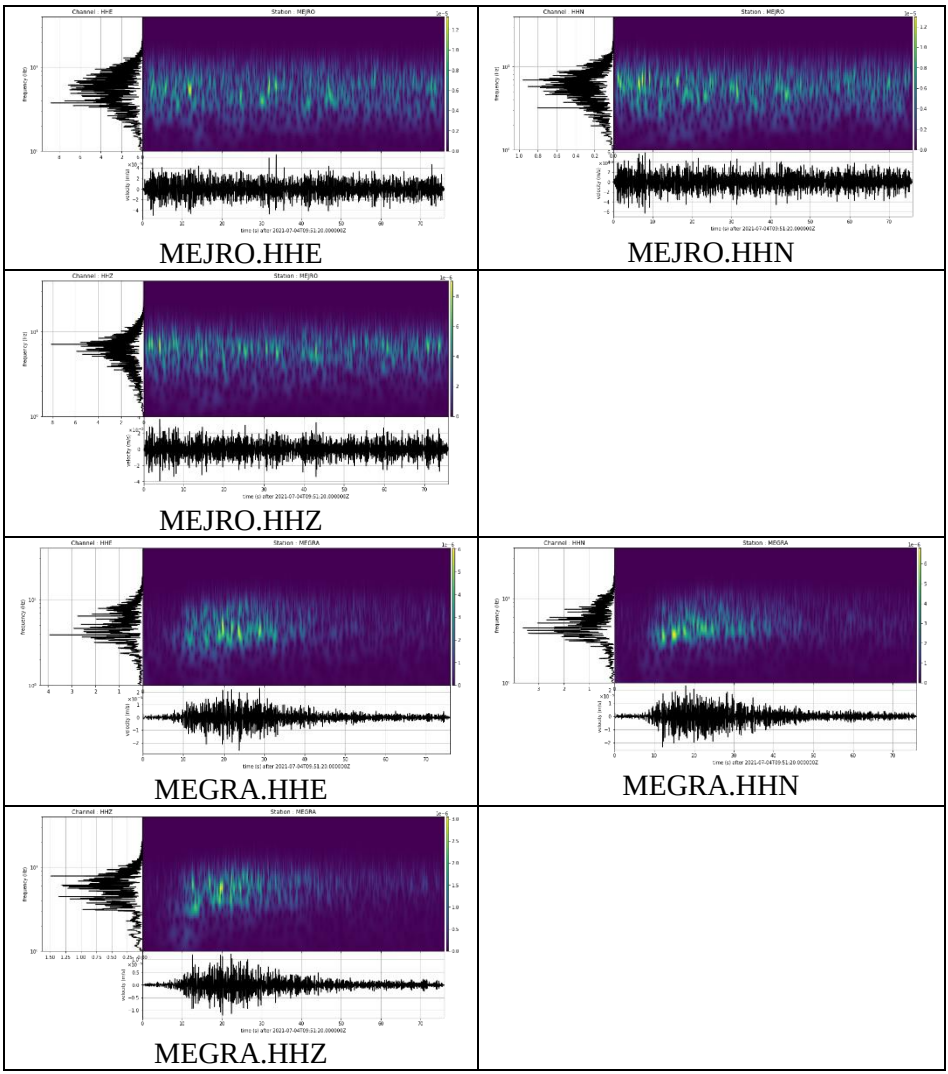
Gambar 24. *Event* 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



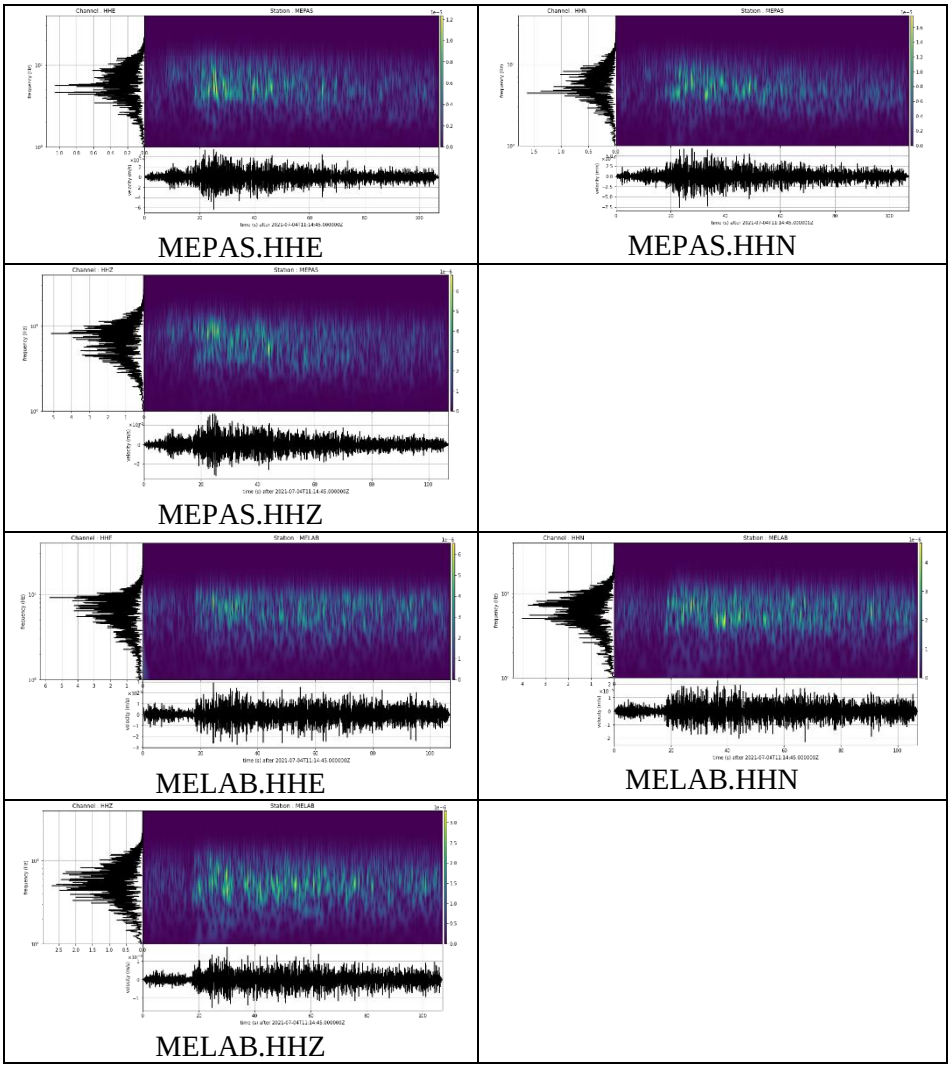
Gambar 25. *Event* 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



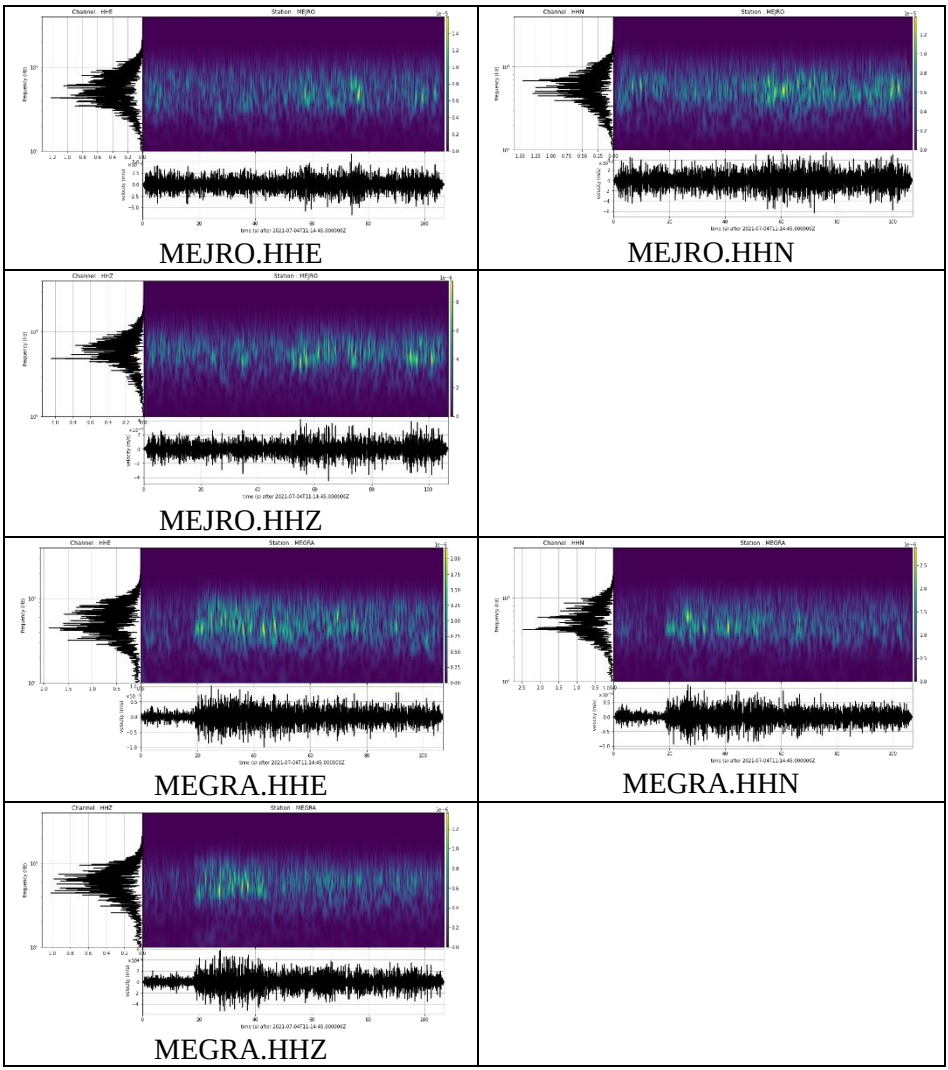
Gambar 26. *Event* 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



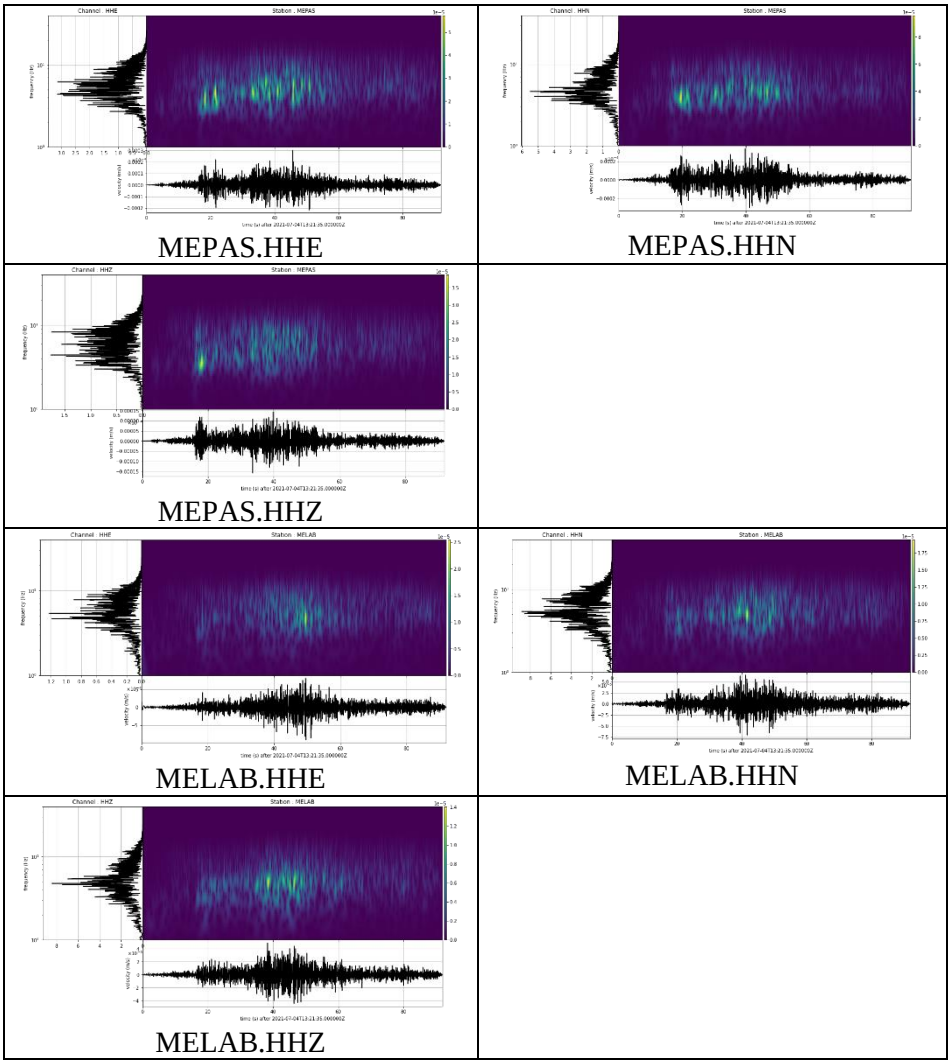
Gambar 27. *Event* 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



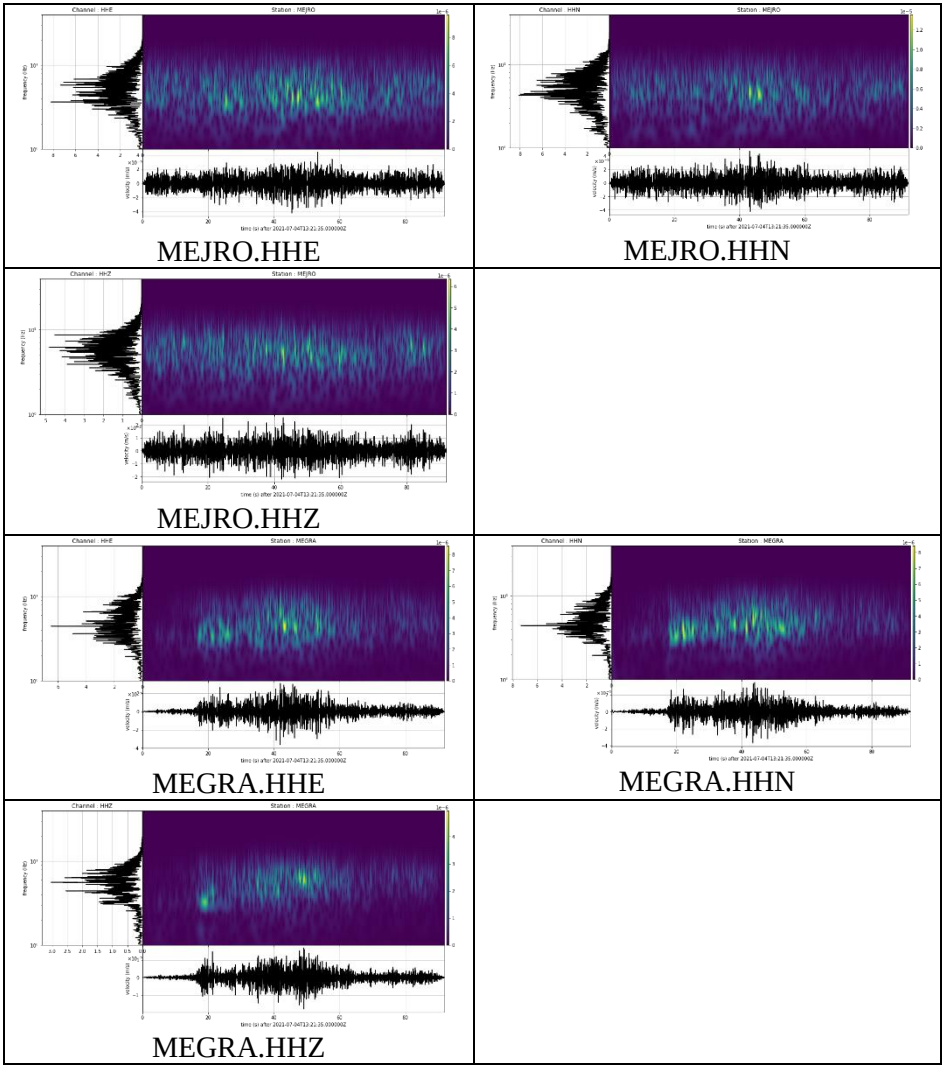
Gambar 28. *Event* 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



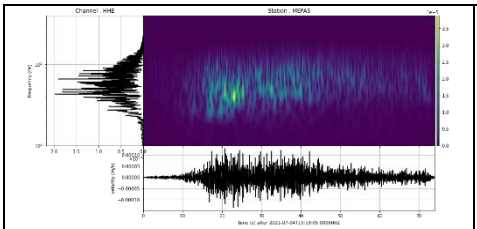
Gambar 29. *Event* 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



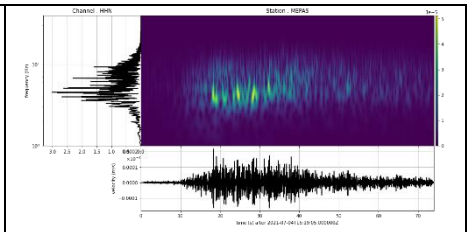
Gambar 30. *Event* 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



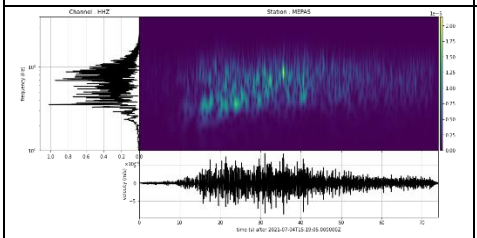
Gambar 31. *Event* 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



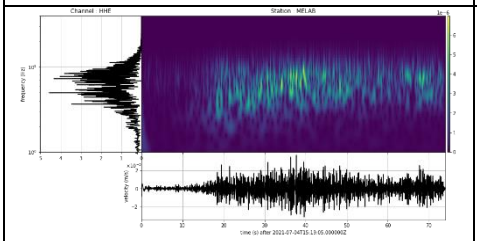
MEPAS.HHE



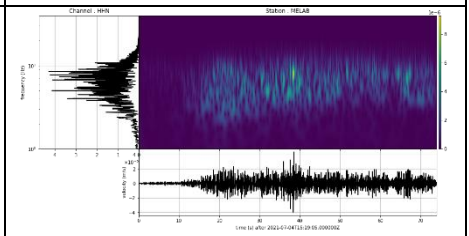
MEPAS.HHN



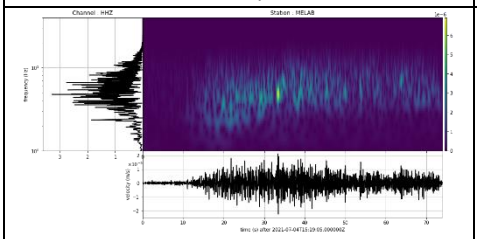
MEPAS.HHZ



MELAB.HHE

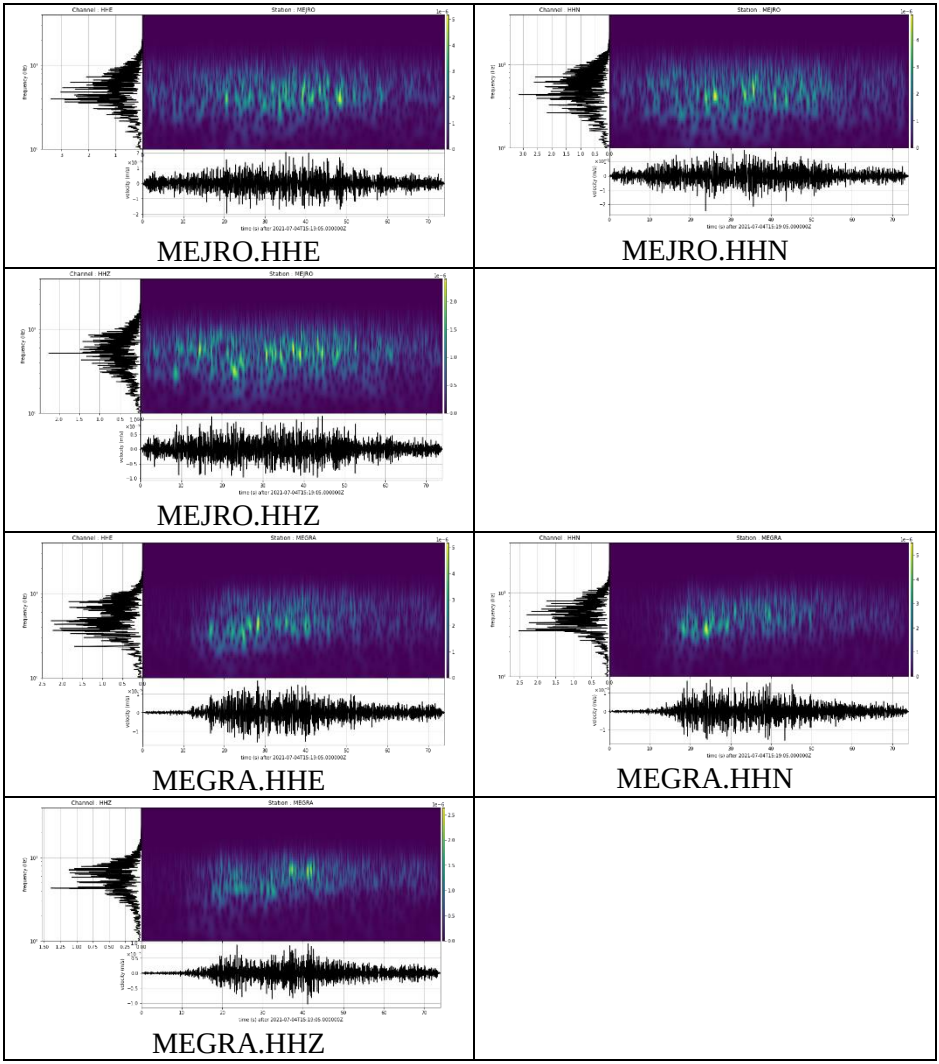


MELAB.HHN



MELAB.HHZ

Gambar 32. *Event* 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC) pada stasiun MEPAS dan MELAB, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)



Gambar 33. *Event* 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC) pada stasiun MEJRO dan MEGRA, komponen *east – west* (HHE), *north – south* (HHN) dan *vertical* (HHZ)

Lampiran 3. Nilai hasil perhitungan *back azimuth, slowness* dan *relative power*

Tabel 1. *Event* 7 Januari 2021 (01:02:26.35 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
303.690	3.606	0.291
146.310	3.606	0.300
45.000	2.828	0.274
315.000	4.243	0.277
180.000	0.000	0.297
180.000	0.000	0.282
90.000	3.000	0.287
90.000	1.000	0.301
0.000	2.000	0.358
0.000	2.000	0.344
153.435	2.236	0.359
56.310	3.606	0.294
180.000	2.000	0.334
333.435	2.236	0.291
180.000	0.000	0.354
180.000	0.000	0.309
288.435	3.162	0.323
90.000	2.000	0.323
326.310	3.606	0.321
296.565	2.236	0.300
116.565	2.236	0.324
206.565	2.236	0.324
146.310	3.606	0.307
90.000	2.000	0.304
251.565	3.162	0.305
326.310	3.606	0.318
225.000	2.828	0.325
270.000	2.000	0.350
225.000	4.243	0.322
146.310	3.606	0.328
116.565	2.236	0.331
315.000	4.243	0.302
326.310	3.606	0.303
135.000	1.414	0.303
45.000	2.828	0.345
45.000	4.243	0.314
146.310	3.606	0.315
135.000	2.828	0.340
56.310	3.606	0.320
225.000	4.243	0.300
270.000	3.000	0.337
0.000	1.000	0.299
270.000	3.000	0.343
90.000	1.000	0.304
116.565	2.236	0.329
243.435	2.236	0.304
0.000	2.000	0.313
63.435	2.236	0.334
71.565	3.162	0.318
116.565	2.236	0.367
26.565	2.236	0.342
45.000	2.828	0.320
243.435	2.236	0.319
326.310	3.606	0.336

116.565	2.236	0.308
146.310	3.606	0.327
71.565	3.162	0.312
90.000	3.000	0.298
326.310	3.606	0.330
45.000	2.828	0.300
180.000	3.000	0.329
90.000	2.000	0.308
116.565	2.236	0.375
270.000	2.000	0.333
270.000	2.000	0.297
288.435	3.162	0.325
180.000	2.000	0.312
45.000	2.828	0.329
45.000	2.828	0.312
180.000	2.000	0.340
108.435	3.162	0.313
146.310	3.606	0.290
236.310	3.606	0.298
225.000	2.828	0.294
236.310	3.606	0.310
333.435	2.236	0.350
180.000	1.000	0.338
90.000	1.000	0.329
341.565	3.162	0.334
0.000	1.000	0.345
123.690	3.606	0.329
225.000	1.414	0.295
153.435	2.236	0.328
56.310	3.606	0.348
153.435	2.236	0.309

225.000	2.828	0.368
45.000	2.828	0.332
270.000	1.000	0.289
270.000	2.000	0.313
180.000	3.000	0.331
18.435	3.162	0.300
0.000	2.000	0.327
90.000	3.000	0.340
63.435	2.236	0.321
341.565	3.162	0.315
180.000	0.000	0.327
90.000	3.000	0.316
341.565	3.162	0.311
135.000	2.828	0.301
333.435	2.236	0.314
296.565	2.236	0.318
326.310	3.606	0.321
45.000	2.828	0.362
180.000	1.000	0.377
45.000	4.243	0.303
315.000	4.243	0.317
180.000	0.000	0.333
45.000	1.414	0.309
90.000	3.000	0.290
303.690	3.606	0.323
315.000	4.243	0.333
225.000	2.828	0.318
225.000	2.828	0.357
180.000	0.000	0.337
180.000	2.000	0.315

Tabel 2. *Event* 19 Januari 2021 (17:59:00.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	**Relative Power (db)**
180.000	0.000	0.270
0.000	2.000	0.270
180.000	3.000	0.266
0.000	2.000	0.264
135.000	2.828	0.259
296.565	2.236	0.258
270.000	3.000	0.260
63.435	2.236	0.261
116.565	2.236	0.264
116.565	2.236	0.263
180.000	3.000	0.272
326.310	3.606	0.278
270.000	2.000	0.314
296.565	2.236	0.385
146.310	3.606	0.295
180.000	3.000	0.320
180.000	2.000	0.305
180.000	2.000	0.292
146.310	3.606	0.319
296.565	2.236	0.325
333.435	2.236	0.306
225.000	4.243	0.315
90.000	2.000	0.316
153.435	2.236	0.328
146.310	3.606	0.324
123.690	3.606	0.303
303.690	3.606	0.343
0.000	2.000	0.307
0.000	3.000	0.303
270.000	3.000	0.313
270.000	3.000	0.285
180.000	0.000	0.291
326.310	3.606	0.310
45.000	2.828	0.305
333.435	2.236	0.305
71.565	3.162	0.291
270.000	3.000	0.328
198.435	3.162	0.304
116.565	2.236	0.322
236.310	3.606	0.303
303.690	3.606	0.328
270.000	3.000	0.338
225.000	2.828	0.352
180.000	0.000	0.313
315.000	1.414	0.302
135.000	2.828	0.337
296.565	2.236	0.312
153.435	2.236	0.340
243.435	2.236	0.320
225.000	2.828	0.317
26.565	2.236	0.337
180.000	1.000	0.312
326.310	3.606	0.323
90.000	1.000	0.308
56.310	3.606	0.323
236.310	3.606	0.352
180.000	2.000	0.326
180.000	2.000	0.353

303.690	3.606	0.314	135.000	4.243	0.339
45.000	2.828	0.346	225.000	2.828	0.324
0.000	2.000	0.324	180.000	0.000	0.381
108.435	3.162	0.296	0.000	2.000	0.326
33.690	3.606	0.318	180.000	2.000	0.310
270.000	1.000	0.326	180.000	1.000	0.296
213.690	3.606	0.321	146.310	3.606	0.327
225.000	2.828	0.354	146.310	3.606	0.308
225.000	2.828	0.364	315.000	2.828	0.324
225.000	2.828	0.342	45.000	2.828	0.315
180.000	0.000	0.326	296.565	2.236	0.329
153.435	2.236	0.323	315.000	4.243	0.324
116.565	2.236	0.322	135.000	2.828	0.340
90.000	3.000	0.305	161.565	3.162	0.309
213.690	3.606	0.352	288.435	3.162	0.344
45.000	2.828	0.333	161.565	3.162	0.337
135.000	4.243	0.338	225.000	2.828	0.368
45.000	2.828	0.326	90.000	3.000	0.299
180.000	1.000	0.297	296.565	2.236	0.318
135.000	4.243	0.371	225.000	2.828	0.282
180.000	0.000	0.327	326.310	3.606	0.350
333.435	2.236	0.337	135.000	2.828	0.299
270.000	3.000	0.329	270.000	3.000	0.349
0.000	3.000	0.332	180.000	1.000	0.303
180.000	0.000	0.320	296.565	2.236	0.311
180.000	2.000	0.322	135.000	2.828	0.289
303.690	3.606	0.331	90.000	2.000	0.323
33.690	3.606	0.316	326.310	3.606	0.313
225.000	4.243	0.295	315.000	1.414	0.288
146.310	3.606	0.366	116.565	2.236	0.331
33.690	3.606	0.332	180.000	2.000	0.349
206.565	2.236	0.329	63.435	2.236	0.312

315.000	1.414	0.301
146.310	3.606	0.351
153.435	2.236	0.348
0.000	3.000	0.297
180.000	2.000	0.327
63.435	2.236	0.339
225.000	2.828	0.322
0.000	2.000	0.329
116.565	2.236	0.285

303.690	3.606	0.323
153.435	2.236	0.321
161.565	3.162	0.299
225.000	2.828	0.315
180.000	0.000	0.309
326.310	3.606	0.307
0.000	3.000	0.303
180.000	2.000	0.286

Tabel 3. *Event* 19 Januari 2021 (22:12:30.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
180.000	2.000	0.442
45.000	4.243	0.413
236.310	3.606	0.398
180.000	3.000	0.411
90.000	2.000	0.402
90.000	2.000	0.405
90.000	1.000	0.444
206.565	2.236	0.454
26.565	2.236	0.474
90.000	1.000	0.514
206.565	2.236	0.468
206.565	2.236	0.433
225.000	2.828	0.469
45.000	2.828	0.439
270.000	2.000	0.424
45.000	2.828	0.417
236.310	3.606	0.428
26.565	2.236	0.407
26.565	2.236	0.402
236.310	3.606	0.431
26.565	2.236	0.469
270.000	3.000	0.436
333.435	2.236	0.431
288.435	3.162	0.424
315.000	2.828	0.407
270.000	1.000	0.414
135.000	2.828	0.435
45.000	2.828	0.422
63.435	2.236	0.389
90.000	2.000	0.413
333.435	2.236	0.391
90.000	3.000	0.431
45.000	2.828	0.425
45.000	2.828	0.400
180.000	2.000	0.425
180.000	0.000	0.453
180.000	0.000	0.392
303.690	3.606	0.410
270.000	2.000	0.410
146.310	3.606	0.412

180.000	2.000	0.384
108.435	3.162	0.420
56.310	3.606	0.425
333.435	2.236	0.418
90.000	3.000	0.388
270.000	1.000	0.401
180.000	2.000	0.435
180.000	2.000	0.425
270.000	2.000	0.427
270.000	2.000	0.424
108.435	3.162	0.402
135.000	4.243	0.425
56.310	3.606	0.406
135.000	4.243	0.423
315.000	2.828	0.436
135.000	4.243	0.446
206.565	2.236	0.406
206.565	2.236	0.410
206.565	2.236	0.396
270.000	1.000	0.419
270.000	2.000	0.404
270.000	2.000	0.434

45.000	4.243	0.442
26.565	2.236	0.394
288.435	3.162	0.428
206.565	2.236	0.410
243.435	2.236	0.399
45.000	2.828	0.421
135.000	4.243	0.426
251.565	3.162	0.399
146.310	3.606	0.382
315.000	2.828	0.448
206.565	2.236	0.387
206.565	2.236	0.435
296.565	2.236	0.408
108.435	3.162	0.428
206.565	2.236	0.485
225.000	2.828	0.462
153.435	2.236	0.422
225.000	2.828	0.459
326.310	3.606	0.406
315.000	1.414	0.413
0.000	2.000	0.427
180.000	0.000	0.464

180.000	0.000	0.466
146.310	3.606	0.435
153.435	2.236	0.449
326.310	3.606	0.426
206.565	2.236	0.436
153.435	2.236	0.427
135.000	4.243	0.419
225.000	2.828	0.434
90.000	3.000	0.420
180.000	2.000	0.407
0.000	3.000	0.393
90.000	1.000	0.427
270.000	2.000	0.415
0.000	2.000	0.385
270.000	2.000	0.454
315.000	2.828	0.398
333.435	2.236	0.456
333.435	2.236	0.425
270.000	3.000	0.439
45.000	4.243	0.394
180.000	2.000	0.407
270.000	1.000	0.442

45.000	2.828	0.439
153.435	2.236	0.392
251.565	3.162	0.458
270.000	1.000	0.397
315.000	2.828	0.421
270.000	1.000	0.469
90.000	1.000	0.403
90.000	1.000	0.441
146.310	3.606	0.394
315.000	4.243	0.404
225.000	4.243	0.406
288.435	3.162	0.400
180.000	0.000	0.407
146.310	3.606	0.421
146.310	3.606	0.440
315.000	4.243	0.424
326.310	3.606	0.398
45.000	2.828	0.405
45.000	2.828	0.407
315.000	4.243	0.403
341.565	3.162	0.403
0.000	2.000	0.434

26.565	2.236	0.446	288.435	3.162	0.451
206.565	2.236	0.427	333.435	2.236	0.402

Tabel 4. *Event* 19 Januari 2021 (22:34:50.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
0.000	2.000	0.431
71.565	3.162	0.411
270.000	2.000	0.444
26.565	2.236	0.440
26.565	2.236	0.460
326.310	3.606	0.444
146.310	3.606	0.408
270.000	1.000	0.460
206.565	2.236	0.423
236.310	3.606	0.416
0.000	2.000	0.420
206.565	2.236	0.427
90.000	2.000	0.390
180.000	2.000	0.398
270.000	2.000	0.386
161.565	3.162	0.431
333.435	2.236	0.385
180.000	2.000	0.419
0.000	2.000	0.420
243.435	2.236	0.408
206.565	2.236	0.503
213.690	3.606	0.399
45.000	2.828	0.448
180.000	0.000	0.419
0.000	2.000	0.435
45.000	2.828	0.404
270.000	2.000	0.393
45.000	4.243	0.396
180.000	3.000	0.421
45.000	2.828	0.425
0.000	1.000	0.384
108.435	3.162	0.427
333.435	2.236	0.410
333.435	2.236	0.445
45.000	2.828	0.398
45.000	4.243	0.370
296.565	2.236	0.395
243.435	2.236	0.387
45.000	4.243	0.436
288.435	3.162	0.474
270.000	1.000	0.459
71.565	3.162	0.405
180.000	0.000	0.428
135.000	4.243	0.445
26.565	2.236	0.457
206.565	2.236	0.431
135.000	4.243	0.450
206.565	2.236	0.438
180.000	0.000	0.458
26.565	2.236	0.424
26.565	2.236	0.510
26.565	2.236	0.419
326.310	3.606	0.507
0.000	2.000	0.404
180.000	0.000	0.399
180.000	0.000	0.429
315.000	4.243	0.428
26.565	2.236	0.431

296.565	2.236	0.409
90.000	1.000	0.406
0.000	2.000	0.392
90.000	1.000	0.385
90.000	1.000	0.431
341.565	3.162	0.393
270.000	3.000	0.420
270.000	2.000	0.398
333.435	2.236	0.405
326.310	3.606	0.421
0.000	2.000	0.415
180.000	2.000	0.420
296.565	2.236	0.400
146.310	3.606	0.390
26.565	2.236	0.399
63.435	2.236	0.405

108.435	3.162	0.420
135.000	4.243	0.425
90.000	1.000	0.415
270.000	1.000	0.392
270.000	1.000	0.402
135.000	4.243	0.427
225.000	2.828	0.389
63.435	2.236	0.418
0.000	2.000	0.405
146.310	3.606	0.430
206.565	2.236	0.405
206.565	2.236	0.417
90.000	1.000	0.455
135.000	4.243	0.414
135.000	4.243	0.403

Tabel 5. *Event* 26 Januari 2021 (13:16:57.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
180.000	0.000	0.322
180.000	0.000	0.291
0.000	1.000	0.298
315.000	4.243	0.302
326.310	3.606	0.319
180.000	0.000	0.297
108.435	3.162	0.319
0.000	3.000	0.330
90.000	2.000	0.305
0.000	2.000	0.367
180.000	2.000	0.341
180.000	2.000	0.320
90.000	3.000	0.314
180.000	2.000	0.312
180.000	2.000	0.321
333.435	2.236	0.353
135.000	4.243	0.333
135.000	4.243	0.297
135.000	4.243	0.291
123.690	3.606	0.309
225.000	2.828	0.345
225.000	2.828	0.308
90.000	2.000	0.311
90.000	2.000	0.304
90.000	1.000	0.330
26.565	2.236	0.318
153.435	2.236	0.326
116.565	2.236	0.359
225.000	2.828	0.329
90.000	2.000	0.346
0.000	2.000	0.316
243.435	2.236	0.303
56.310	3.606	0.304
315.000	4.243	0.319
251.565	3.162	0.295
0.000	2.000	0.322
225.000	2.828	0.312
236.310	3.606	0.343
270.000	3.000	0.337
225.000	2.828	0.320
180.000	0.000	0.348
296.565	2.236	0.320
180.000	1.000	0.323
180.000	1.000	0.332
135.000	4.243	0.312
26.565	2.236	0.311
315.000	2.828	0.334
123.690	3.606	0.285
225.000	2.828	0.300
63.435	2.236	0.336
326.310	3.606	0.317
135.000	4.243	0.319
0.000	3.000	0.324
0.000	1.000	0.370
180.000	2.000	0.350
288.435	3.162	0.308
180.000	0.000	0.319
45.000	2.828	0.334

116.565	2.236	0.303	225.000	2.828	0.310
288.435	3.162	0.332	180.000	0.000	0.358
270.000	3.000	0.325	45.000	2.828	0.331
288.435	3.162	0.314	90.000	3.000	0.329
63.435	2.236	0.329	63.435	2.236	0.296
0.000	2.000	0.296	45.000	2.828	0.280
333.435	2.236	0.306	236.310	3.606	0.283
146.310	3.606	0.311	225.000	2.828	0.303
315.000	4.243	0.283	146.310	3.606	0.308
243.435	2.236	0.336	45.000	2.828	0.341
135.000	4.243	0.340	45.000	2.828	0.317
270.000	1.000	0.309	180.000	0.000	0.315
146.310	3.606	0.303	180.000	0.000	0.347
315.000	2.828	0.302	45.000	2.828	0.338
206.565	2.236	0.305	296.565	2.236	0.286
180.000	0.000	0.328	296.565	2.236	0.342
63.435	2.236	0.309	0.000	3.000	0.292
180.000	2.000	0.332	296.565	2.236	0.297
326.310	3.606	0.314	213.690	3.606	0.324
153.435	2.236	0.301	0.000	3.000	0.355
135.000	4.243	0.316	90.000	3.000	0.329
303.690	3.606	0.317	180.000	2.000	0.308
90.000	2.000	0.338	315.000	4.243	0.290
63.435	2.236	0.335	315.000	2.828	0.297

Tabel 6. *Event* 26 Januari 2021 (16:29:11.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
90.000	3.000	0.353
303.690	3.606	0.398
116.565	2.236	0.377
161.565	3.162	0.371
56.310	3.606	0.371
0.000	3.000	0.387
123.690	3.606	0.340
206.565	2.236	0.396
315.000	2.828	0.296
123.690	3.606	0.332
288.435	3.162	0.377
326.310	3.606	0.387
213.690	3.606	0.390
45.000	2.828	0.350
123.690	3.606	0.339
108.435	3.162	0.374
45.000	2.828	0.388
333.435	2.236	0.344
326.310	3.606	0.353
270.000	3.000	0.329
180.000	1.000	0.408
108.435	3.162	0.396
18.435	3.162	0.426
206.565	2.236	0.430
0.000	1.000	0.353
315.000	2.828	0.433
198.435	3.162	0.406
90.000	3.000	0.437
251.565	3.162	0.391
198.435	3.162	0.442
45.000	4.243	0.399
18.435	3.162	0.386
108.435	3.162	0.367
90.000	3.000	0.371
135.000	4.243	0.330
326.310	3.606	0.322
206.565	2.236	0.445
206.565	2.236	0.416
315.000	2.828	0.439
135.000	2.828	0.406
108.435	3.162	0.338
0.000	1.000	0.382
146.310	3.606	0.364

Tabel 7. *Event* 4 Juli 2021 (04:44:32.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
135.000	2.828	0.302
198.435	3.162	0.272
135.000	1.414	0.273
63.435	2.236	0.275
116.565	2.236	0.282
71.565	3.162	0.287
153.435	2.236	0.299
146.310	3.606	0.309
56.310	3.606	0.298
326.310	3.606	0.331
288.435	3.162	0.303
135.000	2.828	0.374
135.000	2.828	0.322
236.310	3.606	0.307
45.000	1.414	0.347
225.000	2.828	0.288
251.565	3.162	0.293
198.435	3.162	0.315
270.000	3.000	0.312
270.000	3.000	0.316
236.310	3.606	0.384
135.000	2.828	0.373
315.000	1.414	0.324
0.000	1.000	0.296
225.000	4.243	0.351
315.000	2.828	0.278
288.435	3.162	0.301
206.565	2.236	0.313
63.435	2.236	0.397
225.000	4.243	0.404
90.000	3.000	0.337
108.435	3.162	0.398
213.690	3.606	0.350
135.000	2.828	0.342
341.565	3.162	0.298
206.565	2.236	0.331
270.000	3.000	0.360
225.000	1.414	0.325
0.000	1.000	0.420
0.000	1.000	0.339
198.435	3.162	0.350
26.565	2.236	0.381
45.000	2.828	0.317
45.000	2.828	0.342
326.310	3.606	0.335
206.565	2.236	0.368
206.565	2.236	0.336
153.435	2.236	0.344
225.000	1.414	0.345
225.000	2.828	0.386
0.000	1.000	0.348
296.565	2.236	0.308
198.435	3.162	0.400
333.435	2.236	0.408
18.435	3.162	0.344
251.565	3.162	0.333
251.565	3.162	0.376
90.000	3.000	0.308
45.000	1.414	0.375

251.565	3.162	0.374	270.000	2.000	0.331
135.000	4.243	0.384	288.435	3.162	0.338
251.565	3.162	0.318	288.435	3.162	0.416
108.435	3.162	0.321	180.000	0.000	0.432
123.690	3.606	0.327	135.000	2.828	0.418
0.000	3.000	0.364	333.435	2.236	0.388
45.000	4.243	0.371	90.000	3.000	0.372
243.435	2.236	0.338	180.000	1.000	0.319
243.435	2.236	0.363	180.000	1.000	0.373
206.565	2.236	0.334	90.000	2.000	0.354
135.000	2.828	0.421	303.690	3.606	0.362
315.000	2.828	0.457	326.310	3.606	0.384
135.000	2.828	0.382	153.435	2.236	0.385
236.310	3.606	0.365	146.310	3.606	0.437
180.000	0.000	0.412	146.310	3.606	0.480
180.000	0.000	0.383	206.565	2.236	0.376
108.435	3.162	0.333	315.000	2.828	0.418
135.000	2.828	0.367	180.000	0.000	0.478
270.000	2.000	0.377	180.000	0.000	0.429
135.000	1.414	0.379	270.000	2.000	0.392
33.690	3.606	0.352	303.690	3.606	0.346
18.435	3.162	0.357	180.000	0.000	0.382
225.000	4.243	0.392	315.000	2.828	0.434
135.000	4.243	0.378	315.000	4.243	0.448
180.000	2.000	0.353	56.310	3.606	0.461
206.565	2.236	0.387	251.565	3.162	0.449
236.310	3.606	0.362	326.310	3.606	0.377
326.310	3.606	0.311	315.000	2.828	0.400
56.310	3.606	0.400	18.435	3.162	0.352
288.435	3.162	0.328	135.000	2.828	0.368
225.000	2.828	0.368	180.000	0.000	0.333
108.435	3.162	0.421	45.000	1.414	0.394

146.310	3.606	0.394	116.565	2.236	0.368
225.000	4.243	0.473	135.000	1.414	0.388
326.310	3.606	0.440	180.000	3.000	0.441
180.000	0.000	0.448	288.435	3.162	0.334
288.435	3.162	0.381	225.000	1.414	0.377
206.565	2.236	0.364	251.565	3.162	0.349
251.565	3.162	0.397	213.690	3.606	0.360
251.565	3.162	0.386	225.000	1.414	0.386
123.690	3.606	0.429	251.565	3.162	0.356
326.310	3.606	0.351	225.000	2.828	0.328
333.435	2.236	0.347	180.000	1.000	0.419
270.000	1.000	0.345	180.000	2.000	0.348
225.000	1.414	0.365	288.435	3.162	0.381
135.000	2.828	0.374	180.000	0.000	0.406
288.435	3.162	0.395	180.000	0.000	0.421
206.565	2.236	0.448	180.000	2.000	0.359
206.565	2.236	0.403	198.435	3.162	0.455
63.435	2.236	0.389	225.000	4.243	0.331
315.000	4.243	0.397	63.435	2.236	0.351
206.565	2.236	0.382	63.435	2.236	0.411
180.000	2.000	0.401	225.000	4.243	0.401
333.435	2.236	0.354	108.435	3.162	0.454
225.000	1.414	0.387	108.435	3.162	0.318
213.690	3.606	0.389	288.435	3.162	0.352
63.435	2.236	0.360	213.690	3.606	0.364

Tabel 8. *Event* 4 Juli 2021 (09:26:55.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
225.000	1.414	0.420
296.565	2.236	0.476
123.690	3.606	0.457
315.000	2.828	0.517
270.000	2.000	0.483
90.000	3.000	0.424
45.000	2.828	0.559
225.000	4.243	0.474
206.565	2.236	0.380
315.000	4.243	0.419
303.690	3.606	0.434
303.690	3.606	0.383
315.000	2.828	0.500
236.310	3.606	0.439
326.310	3.606	0.427
26.565	2.236	0.508
0.000	2.000	0.397
71.565	3.162	0.502
146.310	3.606	0.522
198.435	3.162	0.490
180.000	1.000	0.475
225.000	2.828	0.402
213.690	3.606	0.437
251.565	3.162	0.434
108.435	3.162	0.435
116.565	2.236	0.465
0.000	3.000	0.487
315.000	2.828	0.546
116.565	2.236	0.470
33.690	3.606	0.511
180.000	0.000	0.477
288.435	3.162	0.413
108.435	3.162	0.455
341.565	3.162	0.435
135.000	2.828	0.466
206.565	2.236	0.452
315.000	1.414	0.487
63.435	2.236	0.500
135.000	2.828	0.554
146.310	3.606	0.489
315.000	4.243	0.421
315.000	2.828	0.429
26.565	2.236	0.478
135.000	2.828	0.443
213.690	3.606	0.526
146.310	3.606	0.462
270.000	3.000	0.514
206.565	2.236	0.473
213.690	3.606	0.522
146.310	3.606	0.450
45.000	2.828	0.454
26.565	2.236	0.489
225.000	1.414	0.497
288.435	3.162	0.496
18.435	3.162	0.421
71.565	3.162	0.522
180.000	2.000	0.492
315.000	2.828	0.537

326.310	3.606	0.445
45.000	2.828	0.436
296.565	2.236	0.441
146.310	3.606	0.446
33.690	3.606	0.540
198.435	3.162	0.443
225.000	4.243	0.396
0.000	3.000	0.405
270.000	2.000	0.457
161.565	3.162	0.402
225.000	4.243	0.529
161.565	3.162	0.487
206.565	2.236	0.424
315.000	4.243	0.415
326.310	3.606	0.454
146.310	3.606	0.457
71.565	3.162	0.460
71.565	3.162	0.478
56.310	3.606	0.500
270.000	2.000	0.439
326.310	3.606	0.520
326.310	3.606	0.418
270.000	2.000	0.453
180.000	3.000	0.463
56.310	3.606	0.454
33.690	3.606	0.499
251.565	3.162	0.461
315.000	4.243	0.433
341.565	3.162	0.501
45.000	2.828	0.470
90.000	2.000	0.469
243.435	2.236	0.492

243.435	2.236	0.494
146.310	3.606	0.431
71.565	3.162	0.494
71.565	3.162	0.564
270.000	3.000	0.584
135.000	2.828	0.451
45.000	2.828	0.471
116.565	2.236	0.554
26.565	2.236	0.551
326.310	3.606	0.508
180.000	2.000	0.479
180.000	2.000	0.434
206.565	2.236	0.461
90.000	3.000	0.474
146.310	3.606	0.491
270.000	2.000	0.435
161.565	3.162	0.463
63.435	2.236	0.409
225.000	2.828	0.464
18.435	3.162	0.503
270.000	3.000	0.454
180.000	2.000	0.466
288.435	3.162	0.422
213.690	3.606	0.409
180.000	2.000	0.539
326.310	3.606	0.411
225.000	2.828	0.534
296.565	2.236	0.506
146.310	3.606	0.544
251.565	3.162	0.554
161.565	3.162	0.496
0.000	2.000	0.466

135.000	2.828	0.502
225.000	4.243	0.524
146.310	3.606	0.525
71.565	3.162	0.465
180.000	1.000	0.447
315.000	4.243	0.416
326.310	3.606	0.494
63.435	2.236	0.536
243.435	2.236	0.481
303.690	3.606	0.481
45.000	2.828	0.466
198.435	3.162	0.434
270.000	3.000	0.560
63.435	2.236	0.459
18.435	3.162	0.516
236.310	3.606	0.464
243.435	2.236	0.518
0.000	2.000	0.458
198.435	3.162	0.547
63.435	2.236	0.515
18.435	3.162	0.490
206.565	2.236	0.444
56.310	3.606	0.494
270.000	3.000	0.507
236.310	3.606	0.493
56.310	3.606	0.486
71.565	3.162	0.486
71.565	3.162	0.510
71.565	3.162	0.500
56.310	3.606	0.491
180.000	3.000	0.475
251.565	3.162	0.497

71.565	3.162	0.522
108.435	3.162	0.471
0.000	2.000	0.465
18.435	3.162	0.539
225.000	4.243	0.479
90.000	3.000	0.436
90.000	3.000	0.552
296.565	2.236	0.558
26.565	2.236	0.525
26.565	2.236	0.423
296.565	2.236	0.516
213.690	3.606	0.445
45.000	2.828	0.433
135.000	4.243	0.504
146.310	3.606	0.503
161.565	3.162	0.445
161.565	3.162	0.426
180.000	1.000	0.436
135.000	2.828	0.585
135.000	2.828	0.490
45.000	4.243	0.428
90.000	2.000	0.429
45.000	2.828	0.510
326.310	3.606	0.481
326.310	3.606	0.473
135.000	2.828	0.496
135.000	2.828	0.490
341.565	3.162	0.474
90.000	3.000	0.465
33.690	3.606	0.426
225.000	4.243	0.474
33.690	3.606	0.488

161.565	3.162	0.451
198.435	3.162	0.448
116.565	2.236	0.457
116.565	2.236	0.527
18.435	3.162	0.486
71.565	3.162	0.568
123.690	3.606	0.415
341.565	3.162	0.461
296.565	2.236	0.485
63.435	2.236	0.468
18.435	3.162	0.567
71.565	3.162	0.539
33.690	3.606	0.527
56.310	3.606	0.562
153.435	2.236	0.550

0.000	1.000	0.504
326.310	3.606	0.511
296.565	2.236	0.460
18.435	3.162	0.527
180.000	2.000	0.426
270.000	2.000	0.455
288.435	3.162	0.551
71.565	3.162	0.510
71.565	3.162	0.519
315.000	2.828	0.502
225.000	2.828	0.463
33.690	3.606	0.451
90.000	2.000	0.481
153.435	2.236	0.446

Tabel 9. *Event* 4 Juli 2021 (09:51:20.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
206.565	2.236	0.525
135.000	2.828	0.428
333.435	2.236	0.507
71.565	3.162	0.505
198.435	3.162	0.444
225.000	2.828	0.382
296.565	2.236	0.439
135.000	2.828	0.398
26.565	2.236	0.462
45.000	4.243	0.427
33.690	3.606	0.452
198.435	3.162	0.403
326.310	3.606	0.406
135.000	4.243	0.403
303.690	3.606	0.389
236.310	3.606	0.374
45.000	1.414	0.383
288.435	3.162	0.379
270.000	2.000	0.385
116.565	2.236	0.451
45.000	4.243	0.360
123.690	3.606	0.384
288.435	3.162	0.396
251.565	3.162	0.369
270.000	3.000	0.401
243.435	2.236	0.426
45.000	4.243	0.454
90.000	2.000	0.393
26.565	2.236	0.378
333.435	2.236	0.428
116.565	2.236	0.417
90.000	1.000	0.477
71.565	3.162	0.395
135.000	2.828	0.399
135.000	2.828	0.384
123.690	3.606	0.421
303.690	3.606	0.435
206.565	2.236	0.439
146.310	3.606	0.407
26.565	2.236	0.427
198.435	3.162	0.467
90.000	3.000	0.493
161.565	3.162	0.409
135.000	4.243	0.392
296.565	2.236	0.420
45.000	2.828	0.498
225.000	4.243	0.411
315.000	2.828	0.422
146.310	3.606	0.433
243.435	2.236	0.424
326.310	3.606	0.442
0.000	2.000	0.450
326.310	3.606	0.429
116.565	2.236	0.397
135.000	2.828	0.414
135.000	2.828	0.445
315.000	4.243	0.441
180.000	3.000	0.384

0.000	2.000	0.508	123.690	3.606	0.400
135.000	1.414	0.421	315.000	2.828	0.436
251.565	3.162	0.424	135.000	2.828	0.510
56.310	3.606	0.426	135.000	4.243	0.422
236.310	3.606	0.368	315.000	4.243	0.381
146.310	3.606	0.368	341.565	3.162	0.401
116.565	2.236	0.379	213.690	3.606	0.369
0.000	2.000	0.359	198.435	3.162	0.443
315.000	2.828	0.439	56.310	3.606	0.459
315.000	1.414	0.451	206.565	2.236	0.450
45.000	2.828	0.446	225.000	4.243	0.439
315.000	2.828	0.404	213.690	3.606	0.450
0.000	3.000	0.404	153.435	2.236	0.415
146.310	3.606	0.435	180.000	3.000	0.414
213.690	3.606	0.419	198.435	3.162	0.421
270.000	2.000	0.417	315.000	4.243	0.419
180.000	2.000	0.420	326.310	3.606	0.422
146.310	3.606	0.400	225.000	2.828	0.408
45.000	1.414	0.423	146.310	3.606	0.471
225.000	4.243	0.390	180.000	3.000	0.409
243.435	2.236	0.410	296.565	2.236	0.411
225.000	2.828	0.427	135.000	4.243	0.424
153.435	2.236	0.430	326.310	3.606	0.448
225.000	2.828	0.401	135.000	2.828	0.407
198.435	3.162	0.379	135.000	2.828	0.446
333.435	2.236	0.399	0.000	1.000	0.451
236.310	3.606	0.397	108.435	3.162	0.415
180.000	2.000	0.434	33.690	3.606	0.450
251.565	3.162	0.449	161.565	3.162	0.416
296.565	2.236	0.403	0.000	2.000	0.401
26.565	2.236	0.452	33.690	3.606	0.442
26.565	2.236	0.406	45.000	4.243	0.423

270.000	3.000	0.400
135.000	2.828	0.426
146.310	3.606	0.404
18.435	3.162	0.458
18.435	3.162	0.429
180.000	1.000	0.411
123.690	3.606	0.464
0.000	1.000	0.491
333.435	2.236	0.478
251.565	3.162	0.429
18.435	3.162	0.449
71.565	3.162	0.416
213.690	3.606	0.453
90.000	2.000	0.478
108.435	3.162	0.448

236.310	3.606	0.394
33.690	3.606	0.478
116.565	2.236	0.383
180.000	2.000	0.484
315.000	4.243	0.587
0.000	1.000	0.532
116.565	2.236	0.429
180.000	0.000	0.486
135.000	2.828	0.509
225.000	2.828	0.436
135.000	2.828	0.412
33.690	3.606	0.447
26.565	2.236	0.452
116.565	2.236	0.520

Tabel 10. *Event* 4 Juli 2021 (11:14:45.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
45.000	4.243	0.439
180.000	1.000	0.314
225.000	1.414	0.358
108.435	3.162	0.337
33.690	3.606	0.308
270.000	3.000	0.300
45.000	2.828	0.312
108.435	3.162	0.306
206.565	2.236	0.417
270.000	3.000	0.340
90.000	2.000	0.343
56.310	3.606	0.341
135.000	4.243	0.311
288.435	3.162	0.320
0.000	1.000	0.346
270.000	2.000	0.335
213.690	3.606	0.289
0.000	2.000	0.302
18.435	3.162	0.352
236.310	3.606	0.339
288.435	3.162	0.356
56.310	3.606	0.407
180.000	1.000	0.342
146.310	3.606	0.337
225.000	4.243	0.309
303.690	3.606	0.364
315.000	2.828	0.360
180.000	0.000	0.338
180.000	0.000	0.352
153.435	2.236	0.321
288.435	3.162	0.305
180.000	3.000	0.327
225.000	4.243	0.323
180.000	2.000	0.331
108.435	3.162	0.322
45.000	4.243	0.356
326.310	3.606	0.369
296.565	2.236	0.347
270.000	3.000	0.332
333.435	2.236	0.402
236.310	3.606	0.370
303.690	3.606	0.346
270.000	3.000	0.390
225.000	1.414	0.359
333.435	2.236	0.323
135.000	4.243	0.363
0.000	1.000	0.336
146.310	3.606	0.374
161.565	3.162	0.392
63.435	2.236	0.353
146.310	3.606	0.381
236.310	3.606	0.353
270.000	2.000	0.350
135.000	4.243	0.333
146.310	3.606	0.350
153.435	2.236	0.400
236.310	3.606	0.352
270.000	2.000	0.356
236.310	3.606	0.293

18.435	3.162	0.461	26.565	2.236	0.483
90.000	2.000	0.376	26.565	2.236	0.401
315.000	2.828	0.346	206.565	2.236	0.460
33.690	3.606	0.456	33.690	3.606	0.405
0.000	2.000	0.382	341.565	3.162	0.416
326.310	3.606	0.398	18.435	3.162	0.403
180.000	1.000	0.352	33.690	3.606	0.335
0.000	1.000	0.372	180.000	0.000	0.430
90.000	2.000	0.338	56.310	3.606	0.385
33.690	3.606	0.377	270.000	2.000	0.400
63.435	2.236	0.390	146.310	3.606	0.455
135.000	1.414	0.366	146.310	3.606	0.406
135.000	2.828	0.386	90.000	3.000	0.329
45.000	4.243	0.332	206.565	2.236	0.382
26.565	2.236	0.541	251.565	3.162	0.377
225.000	4.243	0.419	146.310	3.606	0.397
315.000	1.414	0.387	0.000	3.000	0.384
146.310	3.606	0.380	315.000	1.414	0.385
315.000	4.243	0.327	146.310	3.606	0.308
326.310	3.606	0.408	180.000	1.000	0.365
326.310	3.606	0.365	326.310	3.606	0.387
180.000	1.000	0.342	288.435	3.162	0.373
206.565	2.236	0.389	270.000	3.000	0.375
108.435	3.162	0.445	135.000	4.243	0.329
270.000	1.000	0.399	315.000	1.414	0.387
116.565	2.236	0.387	225.000	2.828	0.356
251.565	3.162	0.371	251.565	3.162	0.353
225.000	2.828	0.327	56.310	3.606	0.358
296.565	2.236	0.347	213.690	3.606	0.366
270.000	1.000	0.410	180.000	0.000	0.384
270.000	2.000	0.364	146.310	3.606	0.388
270.000	2.000	0.393	63.435	2.236	0.352

135.000	1.414	0.399
108.435	3.162	0.367
0.000	1.000	0.379
270.000	2.000	0.357
180.000	2.000	0.309
123.690	3.606	0.326
315.000	1.414	0.354
0.000	3.000	0.372
63.435	2.236	0.364
33.690	3.606	0.321
315.000	4.243	0.353
63.435	2.236	0.389
225.000	2.828	0.352
270.000	1.000	0.330
180.000	2.000	0.367
270.000	3.000	0.372
45.000	1.414	0.363
180.000	3.000	0.346
180.000	0.000	0.406
288.435	3.162	0.407
270.000	3.000	0.371
90.000	3.000	0.318
90.000	1.000	0.311
225.000	1.414	0.323
135.000	4.243	0.385
243.435	2.236	0.356
206.565	2.236	0.343
135.000	4.243	0.359
333.435	2.236	0.390
303.690	3.606	0.343
56.310	3.606	0.382
288.435	3.162	0.376

326.310	3.606	0.326
288.435	3.162	0.331
315.000	4.243	0.342
333.435	2.236	0.315
315.000	4.243	0.404
315.000	4.243	0.424
180.000	1.000	0.339
135.000	2.828	0.364
45.000	4.243	0.403
45.000	4.243	0.423
333.435	2.236	0.375
90.000	2.000	0.340
0.000	1.000	0.347
161.565	3.162	0.400
146.310	3.606	0.387
288.435	3.162	0.333
288.435	3.162	0.365
296.565	2.236	0.366
180.000	1.000	0.375
135.000	4.243	0.337
0.000	3.000	0.354
326.310	3.606	0.359
296.565	2.236	0.389
288.435	3.162	0.380
0.000	3.000	0.356
146.310	3.606	0.416
341.565	3.162	0.328
243.435	2.236	0.393
90.000	2.000	0.343
123.690	3.606	0.304
270.000	3.000	0.335
123.690	3.606	0.367

0.000	2.000	0.313	180.000	0.000	0.354
303.690	3.606	0.333	180.000	0.000	0.354
146.310	3.606	0.370	180.000	0.000	0.341
206.565	2.236	0.338	180.000	0.000	0.342
206.565	2.236	0.325	206.565	2.236	0.413
270.000	2.000	0.339	225.000	1.414	0.329
225.000	2.828	0.353	135.000	4.243	0.292
225.000	2.828	0.326	71.565	3.162	0.411
180.000	0.000	0.330	71.565	3.162	0.397
270.000	2.000	0.319	135.000	4.243	0.344
315.000	4.243	0.304	146.310	3.606	0.346
251.565	3.162	0.341	26.565	2.236	0.402
315.000	4.243	0.368	26.565	2.236	0.357

Tabel 11. *Event* 4 Juli 2021 (13:21:35.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
26.565	2.236	0.444
341.565	3.162	0.497
33.690	3.606	0.427
296.565	2.236	0.428
326.310	3.606	0.493
0.000	1.000	0.494
45.000	4.243	0.442
270.000	2.000	0.427
0.000	1.000	0.439
146.310	3.606	0.416
146.310	3.606	0.565
270.000	3.000	0.512
71.565	3.162	0.473
45.000	2.828	0.402
45.000	4.243	0.445
108.435	3.162	0.384
161.565	3.162	0.380
236.310	3.606	0.406
225.000	2.828	0.434
71.565	3.162	0.395
18.435	3.162	0.380
71.565	3.162	0.430
296.565	2.236	0.420
71.565	3.162	0.386
225.000	4.243	0.435
90.000	3.000	0.429
161.565	3.162	0.409
71.565	3.162	0.414
26.565	2.236	0.419
0.000	2.000	0.382
213.690	3.606	0.383
116.565	2.236	0.344
108.435	3.162	0.358
0.000	1.000	0.418
123.690	3.606	0.378
116.565	2.236	0.370
90.000	2.000	0.403
108.435	3.162	0.409
225.000	1.414	0.431
90.000	2.000	0.435
270.000	3.000	0.450
270.000	3.000	0.559
90.000	3.000	0.402
26.565	2.236	0.420
0.000	2.000	0.451
243.435	2.236	0.399
135.000	4.243	0.425
135.000	2.828	0.410
153.435	2.236	0.418
206.565	2.236	0.496
180.000	2.000	0.467
213.690	3.606	0.437
236.310	3.606	0.453
45.000	2.828	0.430
0.000	1.000	0.375
213.690	3.606	0.429
135.000	2.828	0.397
270.000	2.000	0.390
123.690	3.606	0.397

180.000	2.000	0.383	315.000	2.828	0.419
90.000	3.000	0.384	315.000	2.828	0.431
341.565	3.162	0.416	315.000	1.414	0.474
225.000	2.828	0.406	18.435	3.162	0.453
213.690	3.606	0.462	18.435	3.162	0.412
26.565	2.236	0.454	90.000	2.000	0.458
56.310	3.606	0.406	146.310	3.606	0.488
146.310	3.606	0.374	270.000	3.000	0.491
146.310	3.606	0.380	236.310	3.606	0.458
116.565	2.236	0.401	236.310	3.606	0.508
225.000	4.243	0.428	288.435	3.162	0.461
315.000	2.828	0.454	45.000	1.414	0.483
303.690	3.606	0.456	108.435	3.162	0.379
225.000	2.828	0.448	146.310	3.606	0.410
26.565	2.236	0.408	135.000	2.828	0.456
45.000	4.243	0.434	18.435	3.162	0.450
333.435	2.236	0.442	56.310	3.606	0.467
270.000	3.000	0.434	135.000	2.828	0.501
251.565	3.162	0.439	333.435	2.236	0.442
251.565	3.162	0.414	135.000	2.828	0.410
123.690	3.606	0.407	198.435	3.162	0.455
26.565	2.236	0.430	26.565	2.236	0.454
146.310	3.606	0.403	303.690	3.606	0.430
116.565	2.236	0.442	225.000	4.243	0.445
341.565	3.162	0.469	116.565	2.236	0.577
315.000	4.243	0.401	45.000	2.828	0.472
296.565	2.236	0.457	18.435	3.162	0.451
56.310	3.606	0.490	71.565	3.162	0.501
326.310	3.606	0.433	135.000	2.828	0.439
270.000	2.000	0.435	135.000	2.828	0.493
225.000	4.243	0.480	333.435	2.236	0.521
116.565	2.236	0.428	225.000	2.828	0.541

161.565	3.162	0.506	326.310	3.606	0.406
288.435	3.162	0.507	303.690	3.606	0.442
315.000	2.828	0.423	0.000	2.000	0.492
135.000	2.828	0.533	341.565	3.162	0.422
315.000	2.828	0.473	315.000	4.243	0.382
135.000	2.828	0.440	213.690	3.606	0.441
135.000	2.828	0.516	71.565	3.162	0.431
270.000	3.000	0.426	45.000	2.828	0.452
206.565	2.236	0.425	180.000	2.000	0.413
270.000	2.000	0.447	213.690	3.606	0.482
108.435	3.162	0.434	56.310	3.606	0.455
18.435	3.162	0.433	90.000	3.000	0.489
341.565	3.162	0.423	198.435	3.162	0.455
116.565	2.236	0.430	56.310	3.606	0.396
135.000	4.243	0.411	63.435	2.236	0.438
251.565	3.162	0.444	146.310	3.606	0.426
180.000	2.000	0.415	90.000	3.000	0.427
33.690	3.606	0.400	198.435	3.162	0.381
116.565	2.236	0.402	0.000	1.000	0.467
71.565	3.162	0.401	45.000	4.243	0.455
123.690	3.606	0.422	315.000	2.828	0.486
198.435	3.162	0.553	18.435	3.162	0.488
26.565	2.236	0.426	180.000	0.000	0.605
135.000	2.828	0.408	180.000	0.000	0.534
56.310	3.606	0.393	341.565	3.162	0.445
146.310	3.606	0.452	341.565	3.162	0.395
116.565	2.236	0.495	288.435	3.162	0.437
326.310	3.606	0.448	270.000	3.000	0.441
56.310	3.606	0.416	71.565	3.162	0.448
135.000	1.414	0.452	180.000	0.000	0.477

Tabel 12. *Event* 4 Juli 2021 (15:19:05.00 UTC)

***Back azimuth* (°)**	***Slowness* (s/deg)**	***Relative Power* (dB)**
18.435	3.162	0.435
333.435	2.236	0.383
116.565	2.236	0.439
180.000	2.000	0.405
180.000	2.000	0.397
45.000	2.828	0.393
146.310	3.606	0.406
56.310	3.606	0.426
135.000	4.243	0.397
45.000	2.828	0.446
45.000	2.828	0.421
116.565	2.236	0.419
198.435	3.162	0.403
135.000	2.828	0.386
206.565	2.236	0.393
161.565	3.162	0.415
198.435	3.162	0.426
213.690	3.606	0.422
315.000	2.828	0.393
0.000	3.000	0.351
146.310	3.606	0.366
116.565	2.236	0.397
270.000	3.000	0.376
33.690	3.606	0.377
206.565	2.236	0.397
213.690	3.606	0.422
45.000	4.243	0.405
270.000	2.000	0.403
213.690	3.606	0.388
45.000	4.243	0.367
116.565	2.236	0.401
225.000	2.828	0.385
116.565	2.236	0.381
225.000	2.828	0.370
45.000	1.414	0.372
270.000	2.000	0.355
0.000	2.000	0.394
236.310	3.606	0.381
146.310	3.606	0.437
180.000	0.000	0.422
135.000	2.828	0.421
213.690	3.606	0.417
135.000	2.828	0.417
315.000	4.243	0.392
225.000	1.414	0.384
225.000	4.243	0.443
270.000	2.000	0.380
180.000	2.000	0.366
296.565	2.236	0.429
315.000	4.243	0.389
153.435	2.236	0.415
26.565	2.236	0.377
326.310	3.606	0.420
135.000	2.828	0.468
135.000	2.828	0.411
326.310	3.606	0.453
108.435	3.162	0.442
225.000	2.828	0.395

71.565	3.162	0.437	45.000	2.828	0.414
236.310	3.606	0.461	71.565	3.162	0.421
333.435	2.236	0.391	0.000	2.000	0.428
270.000	3.000	0.405	180.000	2.000	0.463
180.000	3.000	0.401	18.435	3.162	0.407
0.000	2.000	0.377	108.435	3.162	0.441
225.000	2.828	0.392	135.000	2.828	0.420
0.000	3.000	0.453	341.565	3.162	0.407
0.000	2.000	0.467	180.000	2.000	0.431
341.565	3.162	0.430	45.000	4.243	0.534
213.690	3.606	0.427	315.000	2.828	0.378
326.310	3.606	0.436	108.435	3.162	0.396
198.435	3.162	0.367	108.435	3.162	0.376
315.000	2.828	0.369	116.565	2.236	0.387
236.310	3.606	0.393	236.310	3.606	0.410
56.310	3.606	0.418	116.565	2.236	0.411
56.310	3.606	0.450	135.000	2.828	0.433
225.000	2.828	0.427	303.690	3.606	0.441
251.565	3.162	0.414	213.690	3.606	0.441
146.310	3.606	0.445	198.435	3.162	0.427
315.000	2.828	0.412	45.000	1.414	0.491
303.690	3.606	0.421	0.000	1.000	0.419
18.435	3.162	0.385	180.000	2.000	0.408
270.000	2.000	0.432	225.000	1.414	0.450
251.565	3.162	0.423	63.435	2.236	0.454
26.565	2.236	0.437	18.435	3.162	0.443
180.000	3.000	0.427	146.310	3.606	0.441
180.000	3.000	0.443	180.000	0.000	0.441
315.000	2.828	0.440	270.000	2.000	0.401
123.690	3.606	0.417	270.000	2.000	0.411
18.435	3.162	0.458	206.565	2.236	0.450
180.000	1.000	0.534	56.310	3.606	0.437

146.310	3.606	0.435
270.000	2.000	0.460
56.310	3.606	0.433
180.000	2.000	0.436
146.310	3.606	0.557
0.000	2.000	0.489
0.000	2.000	0.475
180.000	3.000	0.418
116.565	2.236	0.489
213.690	3.606	0.487
315.000	2.828	0.491
341.565	3.162	0.446
108.435	3.162	0.448

180.000	2.000	0.450
116.565	2.236	0.496
225.000	4.243	0.474
225.000	2.828	0.407
251.565	3.162	0.414
198.435	3.162	0.471
270.000	3.000	0.459
180.000	3.000	0.481
326.310	3.606	0.476
45.000	2.828	0.432
90.000	3.000	0.433
135.000	4.243	0.419