



Pembuatan Master Shock Seismogram Tiga Komponen Gempa Gunungapi Krakatau 27 Juni 1995

Bambang Wijatmoko^{1*}, Wahyudi², Kirbani Sri Brotopuspito²

¹Staf Pengajar, Departemen Geofisika FMIPA Universitas Padjadjaran

²Staf Pengajar, Program Studi Geofisika FMIPA Universitas Gadjah Mada

*E-mail: bwmoko@geophys.unpad.ac.id

Abstrak

Pada aktivitas erupsi Gunungapi Krakatau tanggal 27 Juni 1995, seismisitas yang terjadi didominasi oleh tipe *shock* vulkanik. Gejala-gejala *shock* vulkanik yang terekam mempunyai kemiripan atau similaritas bentuk, baik dalam kawasan waktu maupun frekuensi. Hal ini mengindikasikan suatu mekanisme sumber yang identik dan terjadi secara berulang. Adanya kemiripan bentuk ini memungkinkan untuk melakukan proses *stacking* (penumpukan) terhadap gejala-gejala *shock* yang similar, sehingga diperoleh *master shock* dengan kualitas data yang lebih baik. Proses ini perlu dilakukan karena data-data seismik sangat dipengaruhi oleh noise pada saat perekaman. Dalam makalah ini dibahas proses pembuatan *master shock* berdasarkan data-data seismik tiga komponen yang direkam di stasiun Pulau Panjang dan Pulau Sertung.

Kata kunci: *shock* vulkanik, similaritas, *stacking*, *master shock*

Abstract

Krakatau Volcano eruption activity on June 27, 1995, recorded the seismicity which dominated by shock volcanic type. The symptoms of shock volcanic recorded resemblance or similarity of form, either in time or frequency domain. This indicates an identical mechanism of source and occur repeatedly. The existence of a similar shape makes it possible to make the process of stacking to the symptoms of similar shock, thus it could obtained master shock with better data quality. This process is necessary because the seismic data is strongly influenced by noise during recording. In this paper discussed the process of making master shock based on the data of three component seismic stations recorded in Panjang and Sertung Island.

Keywords: volcanic shock, similarity, stacking, master shock

1. Pendahuluan

Krakatau merupakan salah satu gunungapi yang sangat aktif. Berdasarkan pengamatan seismisitas selama aktivitas tahun 1992–1997, gempa vulkanik yang terjadi didominasi oleh tipe *shock* vulkanik. Tremor vulkanik hanya muncul pada tahap awal erupsi, yaitu sekitar bulan November dan Desember 1992 (Wahyudi, 1999). Fakta ini menunjukkan adanya relevansi yang sangat kuat antara *shock* vulkanik dengan dinamika internal Gunungapi Krakatau.

Fenomena menarik yang lain adalah dijumpainya kemiripan bentuk gelombang diantara gejala-gejala *shock* vulkanik yang terekam. Hal ini kemungkinan mengindikasikan suatu mekanisme sumber gempa yang identik dan terjadi secara berulang. Adanya kemiripan bentuk ini memungkinkan untuk melakukan *stacking* (penumpukan) terhadap gejala-gejala *shock* tersebut. *Stacking* merupakan salah satu cara untuk meningkatkan rasio S/N (*signal to noise ratio*) data atau dengan kata lain memperbaiki kualitas data. Proses ini dirasakan perlu karena data-data seismik sangat dipengaruhi oleh sifat medium bumi yang berkelakuan sebagai tapis lolos rendah (*low pass*

filter) dan juga *noise* yang seringkali cukup dominan.

Berbeda dengan gempa tektonik, mekanisme terjadinya gempa vulkanik dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Shick (1981), mendeskripsikan beberapa penyebab gempa vulkanik berdasarkan bentuk spektrumnya, yaitu *shear fracture*, ledakan gas, tekanan hidrolik transien, guguran dan aliran magma. Metode seismik memegang peranan utama dalam mengkaji aspek kegempaan yang ditimbulkan oleh aktivitas gunungapi. Gejala-gejala seismik yang terekam akan memberikan informasi mengenai sumber dan dapat digunakan untuk memodelkan dinamika sumber. Kemiripan spektrum suatu gejala seismik yang direkam simultan oleh dua buah stasiun, dapat diasosiasikan dengan karakteristik sumber. Dalam kaitannya dengan medium, seismogram merupakan superposisi dari sejumlah *raypath* yang melewati struktur sangat kompleks.

Menurut Ruscetti, *et al.*, (1977), spektrum gempa vulkanik tidak menunjukkan ketergantungannya pada azimuth maupun jarak dari kawah. Hal ini berarti bahwa spektrum gempa dapat diasosiasikan dengan sumber, dan bukan *path* atau medium. Medium dan *path* tidak akan



merubah bentuk sumber, melainkan hanya merubah besar sumber akibat adanya faktor atenuasi (pelemahan).

Pengkajian seismisitas semakin lengkap dengan digunakannya seismometer berpita-lebar (*broadband*). Seismometer berpita-lebar mempunyai dua keunggulan komparatif terhadap seismometer konvensional (1 Hz), yaitu pada tanggap frekuensi yang lebih lebar (0.01 - 50 Hz terhadap 1 - 50 Hz) dan jangkau dinamik lebih besar (132 dB terhadap 60 dB). Dengan keunggulan-keunggulan tersebut, penggunaan seismometer berpita-lebar di gunungapi aktif diharapkan dapat mendeteksi dan merekam sinyal seismik dengan frekuensi rendah (kurang dari 1 Hz), yang mungkin merupakan gejala menarik yang belum banyak terungkap (Kirbani, 1996).

Dreier, *et al.*, (1994), telah melakukan analisis seismogram berpita-lebar Gunungapi Stomboli yang direkam selama 24 jam pada sebuah stasiun berjarak 1800 m dari kawah aktif. Pengukuran tersebut menghasilkan sekitar 80% dari 178 *shock* yang terekam dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok dengan bentuk gelombang yang mirip. Kemiripan bentuk gelombang ini dikuantisasi dengan operasi korelasi silang. Signifikansi kemiripan ditentukan berdasarkan kriteria koefisien korelasi lebih dari 0,650. Setelah dilakukan penumpukan (*stacking*) terhadap setiap kelompok *shock* dengan berpedoman pada hasil korelasi silang, diperoleh dua buah *master shock*. Bagian awal *shock-shock* tersebut pada umumnya mempunyai frekuensi dominan antara 0,2 – 0,5 Hz, dan menunjukkan gejala dekompresif sistem gunungapi tersebut.

Tahun 1995, Kirbani, dkk., melakukan analisis koherensi data seismik tiga komponen dalam kawasan waktu, frekuensi maupun ruang. Selanjutnya pada tahun 1996, berdasarkan perekaman data seismometer berpita lebar, menemukan fenomena yang hampir sama dengan yang dilakukan oleh Braun (1993) terhadap Gunungapi Stromboli. Fenomena itu adalah adanya spektrum dengan kandungan frekuensi rendah yang berasosiasi dengan gelombang seismik dan spektrum berfrekuensi tinggi yang berasosiasi dengan gelombang bunyi. Penelitian ini juga dapat mengukur kecepatan seismik di Komplek Krakatau, kecepatan aliran gas vulkanik saat erupsi serta secara kualitatif menginterpretasikan dentuman letusan vulkanik akibat aliran gas berkecepatan supersonik (Kirbani, 1996).

Penelitian ini bermaksud untuk melakukan analisis data seismik hasil rekaman aktivitas Gunungapi Krakatau pada tanggal 27 Juni 1995, sedangkan tujuannya adalah membuat *master shock* untuk meningkatkan kualitas *signal to noise ratio* data.

2. Metode

2.1 Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa rekaman seismik tiga komponen arah. Pengambilan data dilakukan oleh Tim Geofisika UGM di Komplek Krakatau, Selat Sunda, pada saat aktivitas Anak Krakatau tanggal 27 Juni 1995. Perekaman data dilaksanakan secara simultan pada stasiun PAN (06°05.242' LS; 105°27.138' BT) dan SER (06°04.443' LS; 105°24.065'BT). Stasiun SER terletak di Pulau Sertung, berjarak sekitar 3,6 km, dan berarah Barat Laut dari puncak Anak Krakatau, sedangkan stasiun PAN terletak di Pulau Panjang, berjarak sekitar 3,2 km di sebelah Timur Laut puncak Anak Krakatau. Parameter perekaman di kedua stasiun ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1: Parameter Perekaman Data.

No	Parameter	Stasiun PAN	Stasiun SER
1	Transduser	Broad-band STS-2	Long-period Le3D/5s
2	Frekuensi Diri	0,01 Hz	0,2 Hz
3	Data Logger	REFTEK	MARS88
4	Sampling Rate	20 ms	32 ms
5	Durasi Rekam	6 jam	5 jam

Sumber: Wahyudi, 1999.

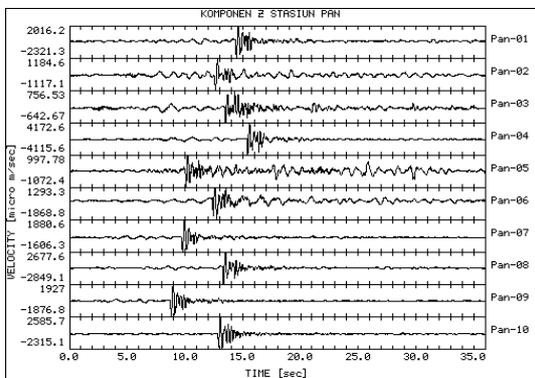
Dalam pengukuran seismisitas tersebut, berhasil direkam belasan *event* seismik. Data-data seismik itulah yang kemudian dipilih dan diolah sesuai dengan tujuan penelitian ini. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat keras berupa *personal computer* dan perangkat lunak program PITSA (*Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis*) versi 5,0 serta DADiSP (*Data Analysing and Display*).

2.2 Metode Analisis Data

Pemilihan *event* seismik yang akan dianalisis lebih lanjut, didasarkan pada tiga kriteria, yaitu merupakan gejala *shock*, terekam lengkap tiga komponen dan tidak melebihi jangkau dinamik peralatan rekam. Berdasarkan kriteria tersebut, telah dipilih masing-masing sepuluh buah data gejala *shock* vulkanik terbaik yang terekam di stasiun PAN dan SER. Setiap *shock* diekstraksi dari seismogram menerus dengan panjang data ditentukan sedemikian rupa agar dapat mencakup keseluruhan *event shock* dari *onset* hingga *offset time*.

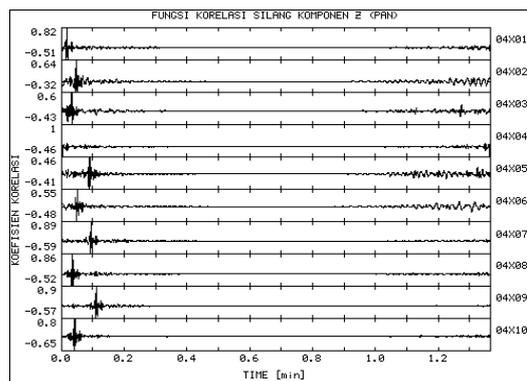
Gejala *shock* stasiun PAN diberi nama berturut-turut dari Pan-01 sampai dengan Pan-10, sedangkan untuk stasiun SER adalah Ser-01 sampai dengan Ser-10. Data-data *shock* vulkanik

ini merupakan seismogram peka kecepatan dalam tiga komponen arah, yaitu komponen Vertikal (Z), komponen Utara-Selatan (N) dan komponen Timur-Barat (E). Sebagai contoh, pada Gambar 1 ditampilkan komponen Z gejala *shock* terpilih stasiun PAN.

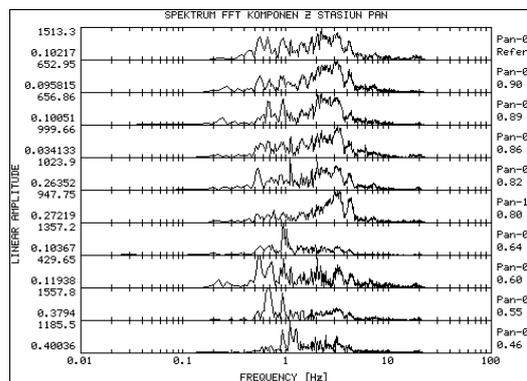


Gambar 1. Contoh data gejala *shock* vulkanik terpilih yang diekstraksi dari seismogram menerus. Data di atas adalah komponen Vertikal (Z) gejala *shock* terpilih untuk stasiun PAN.

Dari kesepuluh gejala *shock* terpilih di setiap stasiun, selanjutnya dilakukan analisis similaritas untuk menentukan gejala-gejala *shock* yang mempunyai kemiripan (similar) secara signifikan. Analisis similaritas dilakukan dalam kawasan waktu dan frekuensi. Dalam kawasan waktu, dilakukan analisis kemiripan bentuk gelombang melalui operasi korelasi silang. Operasi korelasi silang dilakukan terhadap semua gejala *shock* terpilih dengan *shock* referensinya di setiap stasiun. Perhitungan ini menghasilkan koefisien-koefisien korelasi sebagai fungsi dari pergeseran waktu, atau secara umum disebut sebagai fungsi korelasi. Analisis kemiripan dalam kawasan frekuensi dilakukan dengan mengamati kemiripan bentuk spektrum amplitudo. Spektrum amplitudo ini dihasilkan melalui operasi Transformasi Fourier Cepat (FFT). Parameter yang digunakan untuk menentukan signifikansi kemiripan bentuk spektrum adalah kecocokan (*matching*) puncak-puncak frekuensi. Pada Gambar 2 dan Gambar 3, berturut-turut ditampilkan contoh fungsi korelasi dan spektrum untuk komponen vertikal (Z) gejala *shock* similar di stasiun PAN.



Gambar 2. Contoh fungsi korelasi pada perhitungan korelasi silang data gejala *shock* vulkanik terpilih komponen Vertikal untuk stasiun PAN. Koefisien korelasi maksimum ditunjukkan oleh puncak fungsi korelasi tersebut.



Gambar 3. Spektrum FFT komponen Z gejala *shock* stasiun PAN. Paling atas adalah spektrum *shock* referensi, sedangkan dibawahnya merupakan spektrum gejala *shock* yang diurutkan berdasarkan nilai koefisien korelasi rata-rata. Pada ujung kanan dari setiap spektrum ditunjukkan nilai koefisien korelasi komponen yang bersangkutan.

Secara umum, *shock* vulkanik yang direkam memiliki kandungan sinyal seismik dan sinyal akustik. Oleh karena itu, tahapan pertama yang harus dilakukan adalah memisahkan kedua jenis kandungan sinyal tersebut. Pemisahan *shock* vulkanik berdasarkan jendela seismik dan akustik, dilakukan melalui pemotongan (ekstraksi) dengan panjang data yang sesuai sehingga dapat mencakup masing-masing sinyal secara keseluruhan. Kontras karakteristik kedua sinyal merupakan faktor yang sangat membantu dalam melaksanakan proses ini. Sinyal akustik mempunyai frekuensi tinggi dan amplitudonya relatif besar dibandingkan dengan sinyal seismik, sehingga *onset time* relatif lebih jelas.

Tahapan berikutnya adalah pengepasan fase untuk setiap kelompok sinyal. Pengepasan fase bertujuan untuk melakukan sinkronisasi sinyal-sinyal sedemikian hingga fase setiap sinyal dapat terjaga selama proses *stacking*. Besarnya waktu sinkronisasi dapat diketahui melalui operasi korelasi silang, yaitu diindikasikan oleh harga pergeseran waktu yang menghasilkan koefisien korelasi maksimum. Untuk itu, terlebih dahulu dilakukan korelasi silang terhadap setiap kelompok

sinyal dengan sinyal referensi, yakni sinyal seismik atau akustik dari hasil pemisahan *shock* referensi. Apabila puncak fungsi korelasi silang terletak di bagian sebelah kiri, hal ini menunjukkan bahwa sinyal yang bersangkutan mendahului sinyal referensi sebesar *time lead*-nya. Sebaliknya, jika nilai koefisien korelasi maksimum tercapai pada bagian fungsi sebelah kanan, berarti sinyal tersebut tertinggal dari sinyal referensi sebesar *time lag*-nya (Scherbaum, 1996). Pengepasan fase dilakukan melalui pergeseran sinyal sesuai dengan waktu sinkronisasi yang diindikasikan oleh besarnya *time lead* atau *time lag*. Hal ini dilakukan agar noise yang inheren dapat direduksi ketika proses *stacking*.

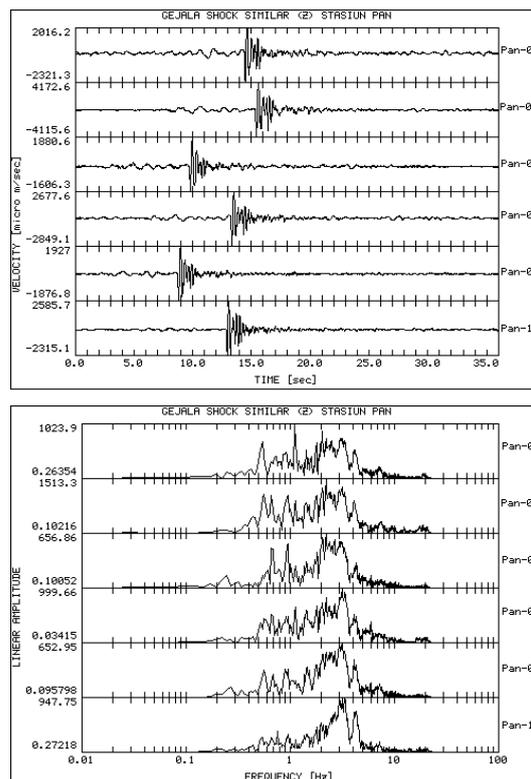
Proses *stacking* ini menghasilkan master sinyal seismik dan master sinyal akustik. Tahapan terakhir adalah melakukan penggabungan master sinyal seismik dan master sinyal akustik sehingga *master shock*.

3. Hasil dan Pembahasan

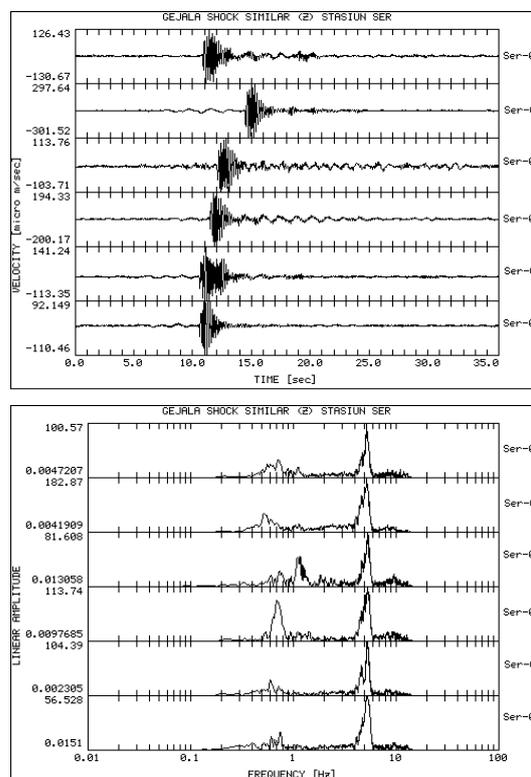
3.1 Gejala *Shock* Similar

Gejala *similar shock* adalah gejala-gejala *shock* yang mempunyai kemiripan bentuk sampul gelombang dan spektrum yang signifikan. Kriteria yang digunakan untuk memilih gejala-gejala *shock* ini ditentukan melalui analisis kemiripan bentuk sampul gelombang (dalam kawasan waktu) dan kecocokan puncak-puncak spektrum (dalam kawasan frekuensi). Kriteria signifikansi kemiripan gejala *shock* stasiun PAN, didasarkan pada nilai koefisien korelasi lebih dari 0,70, sedangkan untuk stasiun SER adalah lebih dari 0,50. Dengan menggunakan kriteria tersebut, maka berhasil dipilih masing-masing enam buah gejala *similar shock* stasiun PAN stasiun SER. Hal ini berarti bahwa 60% dari sepuluh gejala *shock* terpilih yang terekam di setiap stasiun mempunyai kemiripan bentuk yang signifikan. Pada Gambar 4 dan Gambar 5 berturut-turut ditunjukkan gejala *shock* similar pada stasiun PAN dan SER untuk komponen vertikal (Z) dalam kawasan waktu dan frekuensi.

Perbedaan kriteria ini kemungkinan berkaitan dengan perbedaan jenis transduser yang digunakan untuk perekaman. Stasiun PAN menggunakan seismometer *broadband* STS-2, sedangkan stasiun SER menggunakan seismometer *long-period* Le3D/5s. Kedua jenis transduser tersebut mempunyai sifat dan spesifikasi berbeda, sehingga berpengaruh terhadap hasil rekaman.



Gambar 4. Komponen Z gejala *similar shock* untuk stasiun PAN. Atas : Dalam kawasan waktu. Bawah : Dalam kawasan frekuensi.



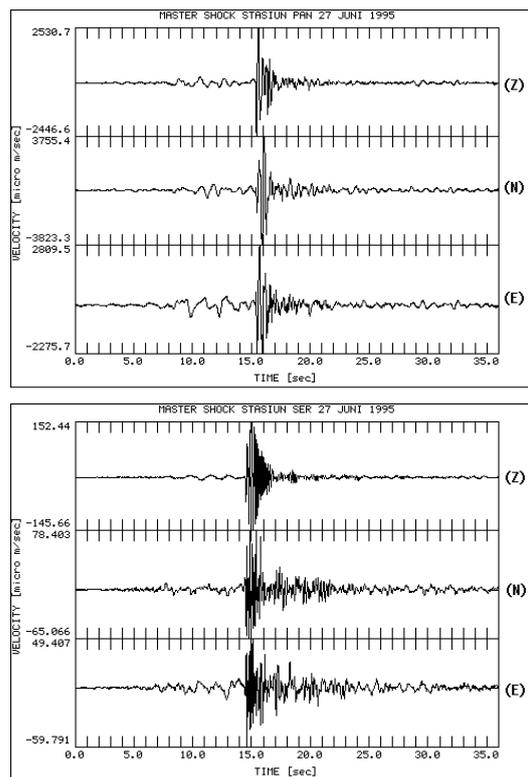
Gambar 5. Komponen Z gejala *similar shock* untuk stasiun SER. Atas : Dalam kawasan waktu. Bawah : Dalam kawasan frekuensi.

3.2 Master Shock

Gejala-gejala *shock* similar yang terekam di stasiun PAN dan SER mempunyai bentuk gelombang yang mirip baik dalam kawasan waktu mau maupun frekuensi. Berkaitan dengan bentuk gelombang yang dibangkitkan oleh gempa vulkanik, Geller dan Mueller (1980) dalam Wahyudi (1991), memformulasikan suatu hipotesis bahwa gempa yang mempunyai bentuk gelombang mirip harus mempunyai mekanisme yang identik. Hipotesis ini telah dibuktikan terhadap 14 sumber ledakan tambang (*mine blast*) yang diketahui posisinya dan hasilnya mendukung hipotesis tersebut. Hipotesis yang telah teruji tersebut, dapat digunakan sebagai dasar validitas proses *stacking* terhadap gejala-gejala *shock* dengan tingkat kemiripan yang signifikan, sedemikian hingga *master shock* yang dihasilkan dapat diterima sebagai representasi dari gejala-gejala *shock* tersebut.

Master shock stasiun PAN dan SER yang dihasilkan dari penelitian ini, berturut-turut disajikan pada Gambar 6. Bentuk sampul gelombang *master shock* ditandai oleh kedatangan sinyal berfrekuensi relatif rendah dengan amplitudo awal kecil, kemudian membesar secara perlahan. Setelah amplitudo sinyal pertama cenderung stasioner, kemudian disusul kedatangan sinyal berfrekuensi lebih tinggi dengan amplitudo setelah *onset time* yang besar dan kemudian berkurang secara eksponensial. Kedua jenis sinyal mempunyai karakteristik yang berbeda, namun diyakini mempunyai kaitan yang erat. Pengkajian lebih lanjut menunjukkan bahwa sinyal pertama berasosiasi dengan sinyal seismik, sedangkan sinyal kedua berhubungan dengan sinyal akustik yang dibangkitkan oleh suara dentuman.

Berdasarkan pengamatan bentuk sampul gelombang, *master shock* tersebut dapat dikelompokkan ke dalam tipe gempa eksplosif pada klasifikasi Minakami (1974). Gempa eksplosif adalah gempa yang diikuti dengan letusan eksplosif dan biasanya berhubungan dengan kawah yang masih aktif. Hal ini sesuai dengan kondisi Gunung Krakatau yang mempunyai kawah sangat aktif. Apabila ditinjau dari klasifikasi Schick (1981), *master shock* lebih cenderung dikelompokkan ke dalam tipe gempa ledakan gas (*shallow explosions*). Hal ini didasarkan pada pengamatan bentuk spektrum yang ditandai oleh adanya dua puncak frekuensi dominan, yang kemungkinan merupakan frekuensi sumber dari sinyal seismik dan akustik. Menurut klasifikasi Wahyudi (1999), *master shock* dapat digolongkan ke dalam kelas A, yakni dikarakterisasikan oleh kandungan pita frekuensi yang relatif sempit (0,5 – 5 Hz).



Gambar 6. Komponen Z *master shock* untuk stasiun PAN (gambar atas) dan stasiun SER (gambar bawah).

Berdasarkan pengamatan terhadap spektrum koherensi, diketahui bahwa koherensi yang sangat bagus muncul pada pita-pita frekuensi tertentu serta berbeda untuk setiap jenis sinyal maupun stasiun perekaman. Sinyal seismik data stasiun PAN mempunyai lebar pita koheren (0,4-4 Hz), sedangkan untuk data stasiun SER adalah (0,2-3 Hz). Sinyal akustik data stasiun PAN mempunyai koherensi yang sangat bagus pada pita frekuensi (2-7 Hz), sedangkan untuk data stasiun SER adalah (3-10 Hz). Analisis lebih lanjut dengan membandingkan spektrum FFT sinyal master dan sinyal referensi, menunjukkan bahwa ketidakkoherenan yang muncul diluar pita-pita frekuensi tersebut, diperkirakan akibat penekanan sinyal-sinyal yang bersifat inheren selama proses *stacking*. Hasil analisis koherensi ini membuktikan bahwa dengan proses *stacking* maka sinyal-sinyal yang koheren akan terjaga dan cenderung saling memperkuat, sedangkan sinyal-sinyal inheren cenderung untuk saling melemahkan. Oleh karena itu, melalui proses *stacking* akan diperoleh data *master shock* dengan kualitas yang relatif lebih baik.

Hasil pengukuran durasi dan beda waktu tiba sinyal akustik terhadap sinyal seismik berdasarkan data *master shock* di atas, disajikan pada Tabel 2. Sebagai data pembanding, ditampilkan pula harga beda waktu tiba untuk *shock* referensi berdasarkan hasil pengukuran data sinyal 1049 (Wahyudi, 1999).



Tabel 1: Durasi dan Beda Waktu Tiba Sinyal Akustik Terhadap Sinyal Seismik.

No	Event	Durasi (s)	Beda Waktu Tiba (s)
1	Master Shock PAN	23,410	9,280
2	Master Shock SER	24,230	10,976
3	Shock Referensi PAN	-	8,2
4	Shock Referensi SER	-	9,5

Durasi *master shock* kedua stasiun relatif sama, yaitu mempunyai harga rerata (23.800 ± 0.400) detik. Dari perbandingan antara data *master shock* dan *shock* referensi di stasiun PAN dan SER menunjukkan bahwa harga beda waktu tiba sinyal master akustik terhadap sinyal master seismik menjadi lebih besar dengan nilai pertambahan yang hampir sama, yaitu 1,080 (stasiun PAN) terhadap 1,476 (stasiun SER).

4. Kesimpulan

Dari sepuluh data seismik terpilih di setiap stasiun, 60% diantaranya merupakan gejala *similar shock* yang mempunyai bentuk sangat mirip. Kriteria kemiripan gejala *shock* stasiun PAN ditentukan berdasarkan koefisien korelasi rata-rata lebih dari 0,70, sedangkan untuk stasiun SER adalah lebih dari 0,50. Perbedaan kriteria ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan jenis transduser yang digunakan di kedua stasiun.

Dalam pembuatan *master shock*, sinyal seismik dan akustik yang terkandung pada setiap gejala *similar shock* harus dipisahkan terlebih dahulu. Pengepasan fase dan *stacking* dilakukan terhadap setiap kelompok sinyal tersebut. Proses ini perlu dilakukan agar kandungan informasi kedua sinyal tetap terjaga sehingga dapat diperoleh *master shock* dengan kualitas data yang lebih baik.

Ucapan Terima Kasih

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil pengukuran Tim dari Laboratorium Geofisika FMIPA UGM. Kami mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas perkenan ijinnya untuk menggunakan data tersebut. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Panitia Semnas MIPA 2016 FMIPA

Universitas Padjadjaran yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan diseminasi hasil penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Braun, T., Ripepe, 1993. Interaction of Seismic and Air Waves Recorded at Stromboli Volcano. *Geophysical Research Letter*, V. 20, p. 65-68.
- Drier, R., Widmer, R., Schick, R., Zuern, W., 1994. Stacking of Broad-band Seismograms of Shocks at Stromboli. Submitted to *EOS Transactions*, American Geophysical Union.
- Effendi, A.C., Bronto, S., Sukhyar, R., 1986. *Peta Geologi Kompleks Gunungapi Krakatau Selat Sunda, Propinsi Lampung*. Direktorat Vulkanologi Indonesia.
- Kirbani, S.B.P., Wahyudi, Imam, S., Ari, S., Budi, E.N., 1993. Studi Banding Tremor Harmonik antara Gunung Merapi dan Gunung Krakatau. *Jurnal Matematika & Sains*, V. 1, Suplemen B, September 1995.
- Kirbani, S.B.P., 1996. *Penggunaan Seismometer Broad-band dalam Pengukuran Seismisitas Gunung Krakatau. Laporan Penelitian*, Lembaga Penelitian UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Minakami, T., 1974. Seismology of Volcanoes in Japan. In : L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla (Editors), *Physical Volcanology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York.
- Riuscetti, M., Schick, R., Seidl, D., 1977. Spectral Parameters of Volcanic Tremor at Etna. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 2, p. 289-298.
- Scherbaum, F., 1996. *Of Poles and Zero: Fundamentals of Digital Seismology*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Shick, R., 1981. *Source Mechanism of Volcanic Earthquake*. Bulletin Volcanology, V. 44-3, p. 491-497.
- Wahyudi, 1991. *Studi tentang Karakteristik Sumber Gempa Vulkanik di Gunung Merapi Jawa Tengah*. Tesis S-2, Program Studi Ilmu Fisika, Jurusan Ilmu-ilmu MIPA, UGM, 1991.
- Wahyudi, 1999. *A Study of Eruption Mechanism of Krakatau Volcano Based on Seismic Data of 1992-1997 Activities*. Doctoral Thesis, Physics Dept., Gajah Mada, Indonesia.