PERBANDINGAN KARAKTERISTIK GELOMBANG RAYLEIGH PADA REKAMAN SUPERCONDUCTING GRAVIMETER DAN SEISMOMETER LHZ

COMPARISON OF RAYLEIGH WAVE CHARACTERISTICS ON SUPERCONDUCTING GRAVIMETER AND SEISMOMETER LHZ RECORDINGS

Mariska Natalia Rande,¹ Mahmud Yusuf²

¹Stasiun Geofisika Kelas I Palu, BMKG, Jl. Sumur Yuga No. 4 Palu, Indonesia.

²Kedeputan Instrumentasi dan Kalibrasi, Badan Meteorologi Klimatologi Geofisika, Jl. Angkasa 1 No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat, Indonesia.

E-mail: mariskarande@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history

Received date :

2018-02-25

Received in revised form date

2018-09-11

Accepted date

2018-10-24

Available online date

Mei 2019

Abstract

The vibrations of an earthquake can be properly recorded by the gravimeter. As a gravimeter, superconducting gravimeter (SG) has a very high accuracy; slightly different with general gravimeter. Rayleigh wave is the wave with the largest amplitude in earthquake, so it will be clear on SG tape. In this research, we use certain superconducting gravimeter (SG) and seismometer LHZ, spread over several locations around the world; just to know more about earthquakes occurring in the Vanuatu Islands (7.1 Mw) and Afghanistan (7.5 Mw) in October 2015. This research focuses on instrument response that records earthquake events that aims to know comparison of the characteristics of the Rayleigh wave on both instruments. Tidal value reduction were applied on SG's recording in order to get true gravity value. Then we did time-integral to get velocity and displacement. By using spectrogram function, we can display frequency of SG and LHZ. The amplitude of the Rayleigh wave recorded on the SG is smaller than that recorded on the LHZ and has signal correlation > 7.0 . In any case of Rayleigh Global waves, SG is able to record clearly the phase of Rayleigh wave to phase R6 in the earthquake of Vanuatu and R7 in the Afghanistan earthquake, while LHZ only records up to the R4 and R5 phase. The spectrograph analysis reinforces the differences in the viewing screens of SG and LHZ Rayleigh Global waves in the frequency domain, R7 recorded on SG has a frequency range of 0.002 Hz to 0.006 Hz.

Keywords: Superconducting gravimeter, Seismometer LHZ, Earthquake, Rayleigh wave.

Kata kunci:

Superconducting Gravimeter
Seismometer LHZ
Gempa bumi
Gelombang Rayleigh

Abstrak

Getaran gempa bumi dapat direkam dengan baik oleh gravimeter. Superconducting gravimeter (SG) merupakan gravimeter yang mempunyai akurasi sangat tinggi bila dibandingkan dengan gravimeter pada umumnya. Gelombang Rayleigh merupakan gelombang dengan amplitudo terbesar pada gempa bumi, sehingga gelombang Rayleigh akan jelas pada rekaman SG. Pada penelitian ini digunakan superconducting gravimeter (SG) dan seismometer LHZ pada beberapa lokasi di dunia untuk meneliti gempa bumi yang terjadi di Kepulauan Vanuatu (7,1 Mw) dan Afganistan (7,5 Mw) pada Oktober 2015. Penelitian ini dititikberatkan pada respons alat yang merekam kejadian gempa bumi yang bertujuan untuk mengetahui perbandingan karakteristik gelombang Rayleigh pada kedua instrumen. Pada rekaman SG dilakukan reduksi nilai pasang surut untuk mendapatkan nilai gaya berat sebenarnya, selanjutnya diintegrasikan terhadap waktu untuk mendapatkan nilai berupa kecepatan dan displacement. Kemudian, dengan menggunakan fungsi spektrogram, kandungan frekuensi pada rekaman SG dan LHZ bisa ditampilkan. Amplitudo gelombang Rayleigh yang terekam pada SG lebih kecil dibanding yang terekam pada LHZ dan memiliki korelasi sinyal $> 7,0$. Gelombang Rayleigh pada rekaman LHZ memiliki rentang frekuensi yang lebih lebar dibanding pada rekaman SG. Pada kasus gelombang Rayleigh Global, SG mampu merekam jelas fase gelombang Rayleigh hingga fase R6 pada gempa Vanuatu dan R7 pada gempa Afganistan, sedangkan LHZ hanya merekam hingga fase R4 dan R5. Analisis spektrogram mempertegas perbedaan tampilan rekaman SG dan LHZ gelombang Rayleigh Global dalam domain frekuensi, R7 yang terekam pada SG memiliki rentang frekuensi 0,002 Hz sampai 0,006 Hz.

PENDAHULUAN

Gelombang Rayleigh terekam baik pada komponen vertikal seismometer, hal ini karena gelombang Rayleigh terbentuk akibat interferensi dari gelombang-gelombang pantul P dan SV yang sudut datangnya melebihi sudut kritis (Afnimar 2009). Perambatan gelombang P searah dengan arah rambatnya dan perambatan gelombang SV tegak lurus terhadap *ray* dan terletak pada bidang vertikal. Sehingga, melalui rekaman seismometer yang merupakan metode seismik, informasi mengenai karakteristik gelombang Rayleigh bisa didapatkan.

Selain metode seismik, metode gaya berat dapat dimanfaatkan untuk merekam dan mendapatkan informasi gelombang Rayleigh maupun gelombang gempa lainnya. Ketika sebuah batuan mengalami *stress* maupun *strain* terjadi peningkatan nilai anomali gaya berat dan mencapai amplitudo maksimum ketika gempa bumi terjadi. Anomali gaya berat terjadi penurunan setelah terjadinya gempa bumi hingga kembali ke posisi stabilnya (Lan et al. 2011).

Superconducting gravimeter (SG) merupakan jenis gravimeter relatif yang mengukur perubahan nilai gaya berat dengan tingkat sensitivitas yang tinggi, keakuratannya mencapai 1 nGal (Hinderer et al. 2007) SG mengukur suatu medan secara vertikal, sehingga gelombang Rayleigh yang memiliki perambatan gabungan antara gelombang P dan SV, terekam baik oleh SG. SG mampu merekam aktivitas kebumihan lainnya, hingga kejadian seismik, baik yang mikroseismik maupun yang makroseismik (Lan et al. 2011), (Shen et al. 2011), (Zhang, K and Ma 2014) dan respons yang diberikan alat gravimeter berkorelasi dengan hasil pencatatan saat terjadi gempa bumi (Niebauer et al. 2011).

Pada penelitian ini, dilakukan pengamatan kejadian gempa bumi Vanuatu dengan Mw 7,1 (20 Oktober 2015) dan Afganistan dengan Mw 7,5 (26 Oktober 2015) dengan menggunakan data sekunder dari SG dan LHZ yang dipasang secara kontinu di beberapa negara, yang kemudian dilakukan perbandingan antarrekaman kedua instrumen. Penelitian ini dititikberatkan pada respons alat yang merekam kejadian gempa bumi yang bertujuan untuk mengetahui perbandingan karakteristik gelombang Rayleigh pada kedua instrumen. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk melihat sifat dispersi, atenuasi, sampai pemodelan bawah permukaan.

METODE

Data yang diunduh dari *International Geodynamics and Earth Tide Service* atau IGETS dan WebDC3 terdiri atas data SG dan *seismometer* LHZ. Dalam penelitian ini digunakan 2 gempa dengan magnitudo 7,1 dan 7,5 yang terjadi di Vanuatu dan Afganistan dengan parameter gempa bumi yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter SG

Epice- nter	Date	OT	Lat	Lon	Depth (km)	Mw
Pulau Vanuatu	20/10 /2015	21:52:02	-14.86	167.30	135	7.1
Afganistan	26/10 /2015	09:09:42	36.52	70.37	231	7.5

Dalam penelitian ini digunakan 6 SG yang terletak pada beberapa negara dan 4 LHZ yang memiliki jarak lokal dengan SG < 1°. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi eror saat melakukan perbandingan dan korelasi dari sinyal SG dan LHZ.

Gambar 1. Peta penelitian gempa bumi $M_w > 6$ (Sumber data: GFZ) dan lokasi SG (Sumber data: IGETS dan webdc3)

Koordinat/posisi SG dan LHZ dapat dilihat pada Gambar 1 serta Tabel 2 dan Tabel 3 berikut.

Tabel 2. Parameter SG. (Sumber: IGETS)

No	SG Station	Code	Lon (deg)	Lat (deg)	Delay Time (sec)	Elevasi (m)
1	Bad Homburg, Germany	H	8.6113	50.2285	10.09	190
2	Pecny, Czech Republic	PE	14.7856	49.9137	8.86	534.58
3	Sutherland, South Africa	S1	20.8109	-32.38	8.16	1791
4	Strasbourg, France	ST	7.6838	48.6217	-	180
5	Wettzell, Germany	W5	12.878	49.144	14.93	613.7
6	Yebeles, Spain	YS	-3.0902	40.5238	9.6	917.685

Tabel 3. Parameter LHZ. (Sumber: WebDC3)

NO	LHZ Station	Code	Lon (deg)	Lat (deg)
1	Bad Homburg, Germany	TNS	50.22	8.45
2	Pecny, Czech Republic	-	-	-

3	Sutherland, South Africa	-	-	-
4	Strasbourg, France	BOURR	47.39	7.23
5	Wettzell, Germany	WET	49.14	12.88

Data SG yang diunduh dari web *International Geodynamics and Earth Tide Service* (IGETS) masih dalam satuan Volt. Untuk mencari nilai sebenarnya dalam μgal dilakukan pengalihan nilai sensitivitasnya. Tahap selanjutnya, dilakukan reduksi pasang surut pada rekaman SG untuk mendapatkan nilai gaya berat sebenarnya, nilai pasang surut bumi didapatkan dari perhitungan perangkat lunak *tsort-Royal Observatory of Belgium*. SG memiliki kemampuan merekam beberapa indikasi perubahan alam, misalkan saja efek pasang surut bumi (Baldi et al. 1995), dinamika resonansi mantel bumi (Omerbashich 2007) efek hidrologi (Virtanen 2006) dan beberapa indikasi perubahan alam lainnya. Akan tetapi, untuk mendapatkan nilai gaya berat yang dipengaruhi oleh gempa bumi, hanya dilakukan koreksi pasang surutnya saja. Hal ini disebabkan oleh kecilnya perubahan yang diakibatkan efek lainnya

dan memiliki frekuensi yang jauh berbeda dengan frekuensi yang dihasilkan oleh gempa bumi. Misalnya saja pengaruh *gravitational waves* yang memiliki frekuensi 0,3 mHz (Shiomi 2008) sedangkan pasang surut bumi memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi teleseismik yaitu 10^{-4} (Havskov. J and Alguacil. G 2002). Selanjutnya, dilakukan integrasi data SG hingga mendapatkan nilai berupa *velocity* dan *displacement*. Data LHZ yang diunduh melalui *Web Data Center GFZ* hanya digunakan komponen vertikal saja dan diintegrasikan satu kali untuk mendapatkan data berupa *displacement* (mm).

Spektrogram adalah salah satu cabang dari analisis spektral yang hasilnya dalam domain *time-frequency*. Grafik spektrogram sumbu vertikal mendeskripsikan frekuensi dan sumbu horizontal mendeskripsikan waktu. Spektrogram didefinisikan dalam algoritma berikut (Priyambada 2015).

$$SPx(k, m) = \left| \sum x(n) w(m - n) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \right|^2$$

x merupakan data SG dan LHZ, w merupakan fungsi *window*, dan m adalah waktu yang diinginkan n merupakan nilai tengah *window* (lebar *window*/2) (Hippenstiel 2002).

Analisis spektrogram digunakan untuk melihat kandungan frekuensi gelombang Rayleigh pada rekaman SG dan LHZ. selanjutnya, dilakukan perbandingan gelombang Rayleigh berupa amplitudo, durasi, frekuensi, dan korelasi sinyal pada rekaman SG dan LHZ.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Saat kejadian gempa bumi Afganistan, hanya 4 sensor yang merekam. Hal ini disebabkan kondisi sensor yang mungkin tidak beroperasi atau data yang memiliki banyak *spike*. Status kondisi sensor saat merekam gempa Vanuatu dan Afganistan

ditunjukkan pada Tabel 4 untuk SG dan Tabel 5 berikut.

Tabel 4. Kondisi SG saat kejadian gempa bumi

No	SG Station	Vanuatu	Afganistan
1	Bad Homburg, Germany	√	√
2	Pecny, Czech Republic	√	-
3	Sutherland, South Africa	√	-
4	Strasbourg, France	√	√
5	Wettzell, Germany	√	√
6	Yebes, Spain	√	√

Tabel 5. Kondisi LHZ saat kejadian gempa bumi

No	LHZ Station	Vanuatu	Afganistan
1	Bad Homburg, Germany	√	√
2	Pecny, Czech Republic	-	-
3	Sutherland, South Africa	-	-
4	Strasbourg, France	√	√
5	Wettzell, Germany	√	√
6	Yebes, Spain	√	√

Amplitudo Gelombang Rayleigh dan Korelasi Sinyal

Perbandingan amplitudo gelombang Rayleigh pada rekaman SG dan LHZ pada kejadian gempa bumi Vanuatu dan Afganistan disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7 berikut.

Tabel 6. Amplitudo maksimum Gelombang Rayleigh pada rekaman SG

SG	GB. Vanuatu		GB. Afganistan	
	Jarak (o)	Amp Max (mm/s)	Jarak (o)	Amp Max (mm/s)
Sutherland, S.Africa	122.904	0.0083096	-	-
Pecny	138.449	0.0066173	-	-
Wettzell, Germany	139.844	0.0056404	42.892	0.0545
Bad Homburg	140.639	0.0067425	45.519	0.0601
Strasbourg, France	142.312	0.0062877	46.346	0.0557
Yebes, Spain	153.004	0.0041156	55.904	0.0298

Tabel 7. Amplitudo maksimum Gelombang Rayleigh pada rekaman LH

LHZ	GB. Vanuatu		GB. Afganistan	
	Jarak (o)	Amp Max (mm/s)	Jarak (o)	Amp Max (mm/s)
Sutherland, S. Africa	122.904	-	-	-
Pecny	138.449	-	-	-
Wettzell, Germany	139.844	0.007002	42.892	0.0637
Bad Homburg	140.639	0.0068746	45.519	0.0646
Strasbourg, France	142.312	0.011	46.346	0.0486
Yebes, Spain	153.004	0.0060894	55.904	0.0346

Amplitudo maksimum terkecil gelombang Rayleigh pada rekaman SG yaitu 0,0041156 mm/s untuk gempa Vanuatu dan 0,0298 mm/s untuk gempa Afganistan. Keduanya tercatat pada stasiun Yebes, Spain. Sementara, amplitudo maksimum terbesar gelombang Rayleigh yaitu 0,0083096 mm/s tercatat pada stasiun Sutherland, South Africa untuk gempa Vanuatu dan 0,0601 mm/s pada stasiun Bad Homburg, Germany untuk gempa Afganistan. Pada rekaman LHZ, Amplitudo maksimum terkecil gelombang Rayleigh yaitu 0,0060894 mm/s untuk gempa Vanuatu dan 0,0346 mm/s untuk gempa Afganistan, keduanya tercatat pada stasiun Yebes, Spain. Sementara, amplitudo maksimum terbesar gelombang Rayleigh yaitu 0,011 mm/s tercatat pada stasiun Strasbourg, France, untuk gempa Vanuatu dan 0,0646 mm/s pada stasiun Bad Homburg, Germany, untuk gempa Afganistan.

Hal menarik yang terlihat adalah amplitudo gelombang Rayleigh yang terekam pada SG lebih kecil dibanding yang terekam pada LHZ. Untuk memperjelas hal ini, maka dilakukan overlay sinyal gempa Vanuatu dan Afganistan pada rekaman SG dan LHZ (Gambar 2).

Gambar 2. Perbandingan amplitudo gelombang Rayleigh yang terekam pada SG (merah) dalam satuan mm/s dan LHZ (biru) dalam satuan mm/s; gempa Vanuatu (a); gempa Afganistan (b)

Dilakukan *overlay* sinyal rekaman sensor SG dan LHZ di Bad Homburg untuk melihat perbandingan amplitudo gelombang Rayleigh. Hal ini dilakukan karena lokasi sensor SG dan LHZ di Bad Homburg, Germany, posisinya relatif berdekatan dibandingkan sensor di lokasi lainnya, sehingga kondisi geologi antara lokasi SG dan LHZ hampir sama. Lokasi sensor SG dan LHZ memiliki jarak 11,5 km, sehingga dapat meminimalisasi kesalahan dalam analisis amplitudo gelombang Rayleigh dan korelasi sinyal. Gambar 2 menyajikan perbandingan amplitudo sinyal gempa yang terekam pada SG dan LHZ. Amplitudo gempa bumi pada rekaman LHZ lebih kecil dibanding rekaman SG. Hal ini karena sensor SG berbeda dengan seismometer yang menggunakan pegas dalam sensornya, SG menggunakan bandul yang menggantung dalam ruangan vakum yang isinya adalah helium cair. Pegas pada seismometer

dapat mengalami kejenuhan saat merekam gempa bumi, sedangkan sensor pada SG tidak mengalami kejenuhan.

Korelasi antara kedua sinyal gelombang Rayleigh yang terekam pada SG dan LHZ terlihat pada Gambar 3 berikut.

Gambar 3. Korelasi sinyal gelombang Rayleigh pada rekaman SG (merah) dan LHZ (biru); gempa Vanuatu (a); gempa Afghanistan (b)

Hasil analisis korelasi sinyal gelombang Rayleigh pada rekaman SG dan LHZ, didapatkan korelasi 0,7797 untuk gempa Vanuatu dan 0,7038 untuk gempa Afghanistan. Berdasarkan hasil korelasi dari masing-masing gempa, terdapat kesesuaian sinyal pada rekaman SG dan LHZ saat merekam gempa bumi. Gambar 3 menunjukkan perbedaan fase antara rekaman SG dan LHZ. Hal ini yang menyebabkan korelasi antara sinyal yang terekam pada SG dan LHZ bukan 1,0 atau hampir mendekati. Perbedaan fase tersebut disebabkan lokasi antara kedua sensor yang tidak sama.

Gelombang Rayleigh Global dan Frekuensinya

Rekaman SG dan LHZ diintegrasikan hingga mendapatkan rekaman dalam *displacement* (mm). Dalam unit *displacement* terlihat jelas perulangan gelombang Rayleigh yang menjalar mengelilingi bumi (Gambar 4 dan Gambar 5).

Gambar 4. (a-d) Sinyal Displacement gempa bumi Vanuatu pada rekaman SG dalam unit mm/s (kiri) dan rekaman LHZ dalam unit mm/s (kanan)

Gambar 4 merupakan sinyal gempa bumi Vanuatu yang terekam di stasiun SG dan LHZ. Gelombang Rayleigh pada gempa bumi Vanuatu terekam hingga R6 pada masing-masing SG, sedangkan pada LHZ hanya terekam hingga R4.

Gambar 5. (a—d) Sinyal *Displacement* gempa bumi Afganistan pada rekaman SG dalam unit mm/s (kiri) dan rekaman LHZ dalam unit mm/s (kanan)

Perbedaan kemampuan SG dan LHZ dalam merekam perulangan gelombang Rayleigh semakin terlihat jelas pada gempa bumi Afganistan yang memiliki magnitudo lebih besar dibanding gempa Vanuatu, seperti pada rekaman SG dan LHZ di Yebes (Gambar 5d). Kelompok kedatangan gelombang Rayleigh Global terekam berulang hingga R7 atau > 9 jam setelah impuls awal gelombang Primer pada rekaman SG di Yebes. Di lain pihak, pada rekaman LHZ tidak dapat diidentifikasi dengan jelas fase gelombang Rayleigh hingga R7, tetapi hanya sampai fase R5 (Gambar 5d). Kelompok gelombang permukaan yang pertama tiba (R1) di stasiun seismik pada jarak episenter Δ° adalah yang menempuh busur lingkaran besar yang lebih pendek, sedangkan yang

datang kemudian (R2) adalah yang menempuh lintasan busur sepanjang $360^\circ - \Delta^\circ$ (Bormann 2009) dan seterusnya. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Lintasan lingkaran besar untuk tiga kedatangan pertama gelombang Rayleigh global (Bormann 2009)

Hasil analisis spektrogram memper-
tegas rekaman perulangan gelombang
Rayleigh dalam tampilan frekuensi, seperti
pada Gambar 7 berikut.

Gambar 7. a) Hasil analisis spektrogram gempa Afganistan pada rekaman SG di Yebes; b) Hasil analisis spektrogram gempa Afganistan pada rekaman LHZ di Yebes

Durasi distribusi frekuensi gempa bumi yang terekam pada SG, yang berhubungan dengan frekuensi dari gelombang Rayleigh Global, terekam hingga > 9 jam setelah impuls awal gelombang Primer (Gambar 7a). Gelombang R7 memiliki frekuensi yang sangat rendah yaitu antara 0,002 Hz sampai 0,006 Hz pada SG. Sementara, pada rekaman LHZ di Yebes untuk kasus gempa bumi yang sama menunjukkan durasi distribusi frekuensi rekaman LHZ memiliki durasi yang relatif lebih pendek dibandingkan durasi pada rekaman SG. Durasi frekuensi gelombang Rayleigh tersebut hanya terekam hingga 6 jam setelah impuls awal gelombang primer pada rekaman LHZ (Gambar 7b). Hal ini menunjukkan SG memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi sehingga mampu merekam frekuensi-frekuensi yang relatif rendah.

Tabel 8 dan Tabel 9 menyajikan frekuensi maksimum dan minimum gempa bumi Vanuatu dan Afganistan pada rekaman SG dan LHZ.

Tabel 8. Tabel Frekuensi gelombang Rayleigh pada gempa Vanuatu

NO	Stasiun	SG		LHZ	
		MIN	MAX	MIN	MAX
1	Bad Homburg	0.00244	0.0845	0.0004883	0.1152
2	Pecny	0.00244	0.1	-	-
3	Sutherland	0.0019531	0.0771	-	-
4	Strasbourg, France	0.00244	0.1025	0.0004883	0.1245
5	Wettzell	0.0024414	0.0962	0.0004883	0.123
6	Yebes, Spain	0.0019531	0.103	0.0004883	0.1143

Tabel 9. Tabel Frekuensi gelombang Rayleigh pada gempa Afganistan

NO	Stasiun	SG		LHZ	
		MIN	MAX	MIN	MAX
1	Bad Homburg	0.0039063	0.1514	0.00245	0.2344
2	Pecny	-	-	-	-
3	Sutherland	-	-	-	-
4	Strasbourg, France	0.0039	0.1655	0.00244	0.246
5	Wettzell	0.0039	0.1528	0.00293	0.2471
6	Yebes, Spain	0.0039	0.1543	0.003418	0.228

Pada rekaman seismometer, gelombang permukaan memiliki rentang frekuensi 0,001—0,01 Hz dan untuk gelombang permukaan dengan $M_w > 6$ memiliki rentang frekuensi 0,01—0,1 Hz (Havskov. J and Alguacil. G 2002). Hasil analisis spektrogram disajikan dalam Tabel 8 dan Tabel 9, menunjukkan gelombang Rayleigh pada rekaman LHZ memiliki rentang frekuensi yang lebih lebar dibanding pada rekaman SG.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis gelombang Rayleigh pada rekaman SG dan perbandingannya dengan rekaman LHZ dapat disimpulkan bahwa SG memiliki tingkat sensitivitas tinggi dan stabil saat merekam gelombang Rayleigh pada kejadian gempa bumi: amplitudo gelombang Rayleigh yang terekam pada sensor SG relatif lebih kecil dibanding yang terekam pada sensor LHZ. Sinyal gempa pada rekaman SG dan LHZ memiliki nilai korelasi 0,7797 untuk gempa Vanuatu dan 0,7038 untuk gempa Afganistan. SG mampu merekam gelombang Rayleigh Global hingga R6 atau > 6 jam pada kejadian gempa Vanuatu dan R7 > 9 jam pada kejadian gempa Afganistan setelah impuls awal gelombang Primer. Namun, pada rekaman LHZ, hal serupa

tidak begitu jelas. Analisis spektogram menunjukkan rentang frekuensi pada rekaman LHZ memiliki rentang frekuensi yang lebih lebar dibanding pada rekaman SG.

SARAN

Pada penelitian selanjutnya dibutuhkan gempa bumi dengan magnitudo yang relatif lebih besar, yaitu $M_w > 8$ untuk melihat perbandingan signifikan respons SG dan LHZ yang merekam gelombang Rayleigh Global. Dibutuhkan lokasi *seismometer* yang berdekatan dengan SG, sehingga meminimalisasi kesalahan saat melakukan analisis gelombang gempa bumi. Penelitian ini dapat dikembangkan pada penelitian lebih lanjut untuk penentuan dispersi gelombang, atenuasi, sampai pemodelan bawah permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *International Geodynamics and Earth Tide Service* dan WebDC3 GFZ dan WebDC3 BMKG yang telah memberikan data SG, parameter gempa bumi dan data seismometer.

DAFTAR ACUAN

- Afnimar. 2009. *Seismologi*. Pertama. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Baldi, P., Casula, G., Focardi, S & Palmorari, F. 1995. "Tidal Analysis of Data Recorded by a Superconducting Gravimeter." In *ANNALI DI GEOFISICA*, 38:161–66. <http://www.earth-prints.org/handle/2122/1761>.
- Bormann, P. 2009. *New Manual of IASPEI Seismological Observatory Practice. New Manual of IASPEI Seismological Observatory Practice (NMSOPM)*. Vol. 1. <https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP>.

- Havskov, J & Alguacil, G. 2002. *Instrumentation in Earthquake Seismology. Pure and Applied Geophysics*. Vol. 22. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0538-6>.
- Hinderer, J., D. Crossley, and R. J. Warburton. 2007. *Gravimetric Methods - Superconducting Gravity Meters. Treatise on Geophysics*. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00172-3>.
- Hippenstiel, Ralph D. 2002. *Detection Theory: Applications and Digital Signal Processing*.
- Lan, Shyh Chin, Teng To Yu, Cheinway Hwang, and Ricky Kao. 2011. "An Analysis of Mechanical Constraints When Using Superconducting Gravimeters for Far-Field Pre-Seismic Anomaly Detection." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 22 (3): 271–82. [https://doi.org/10.3319/TAO.2010.11.12.01\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2010.11.12.01(T)).
- Niebauer, T.M., Jeff MacQueen, Daniel Aliod, and Olivier Francis. 2011. "Monitoring Earthquakes with Gravity Meters." *Geodesy and Geodynamics* 2 (3). Elsevier Masson SAS: 71–75. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2011.00071.2>.
- Omerbashich, Mensur. 2007. "Magnification of Mantle Resonance as a Cause of Tectonics." *Geodinamica Acta* 20 (6): 369–83. <https://doi.org/10.3166/ga.20.369-383>.
- Priyambada, Fajar Rachmadi. 2015. "Anomali Sinyal Yang Terdeteksi Oleh Superconducting Gravimeter Ketika Terjadi Gempa bumi Studi Kasus : Gempa bumi Di Indonesia, $M_w > 6$, Tahun 2011." Jakarta.
- Shen, Wenbin, Dijin Wang, and Cheinway Hwang. 2011. "Anomalous Signals prior to Wenchuan Earthquake Detected by Superconducting Gravimeter and Broadband Seismometers Records." *Journal of Earth Science* 22 (5): 640–51. <https://doi.org/10.1007/s12583-011-0215-4>.

- Shiomi, Sachie. 2008. "Testing Gravitational Physics with Superconducting Gravimeters." *Progress of Theoretical Physics Supplement*, no. 172: 61–70. <https://doi.org/10.1143/PTPS.172.61>.
- Virtanen, Heikki. 2006. *Studies of Earth Dynamics with the Superconducting Gravimeter*. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/23166>.
- Zhang, K & Ma, J. 2014. "Superconducting Gravimeters Detect Gravity Fluctuations Induced by Mw 5.7 Earthquake Along South Pacific Rise Few Hours Before the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake." *Terr. Atmos. Ocean. Sci* 25 (4): 471–81. [https://doi.org/10.3319/TAO.2014.02.24.01\(T\)1](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.02.24.01(T)1).