



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Studi Awal Rancang Bangun *Geophone* Menggunakan Koil Magnetik Sebagai Massa Inersia dan Pegas Tipe *Static Balancing Stiffness*

IGB Darmawan*, RAK Mahli, PH Matondang, M Maharani, S Mahmudah, I Dani, A Zaenudin dan Karyanto

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 11/11/2024
Direvisi 13/01/2025
Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:
Geophone
Induktansi
Koil
Massa inersia
Static balancing stiffness

ABSTRAK

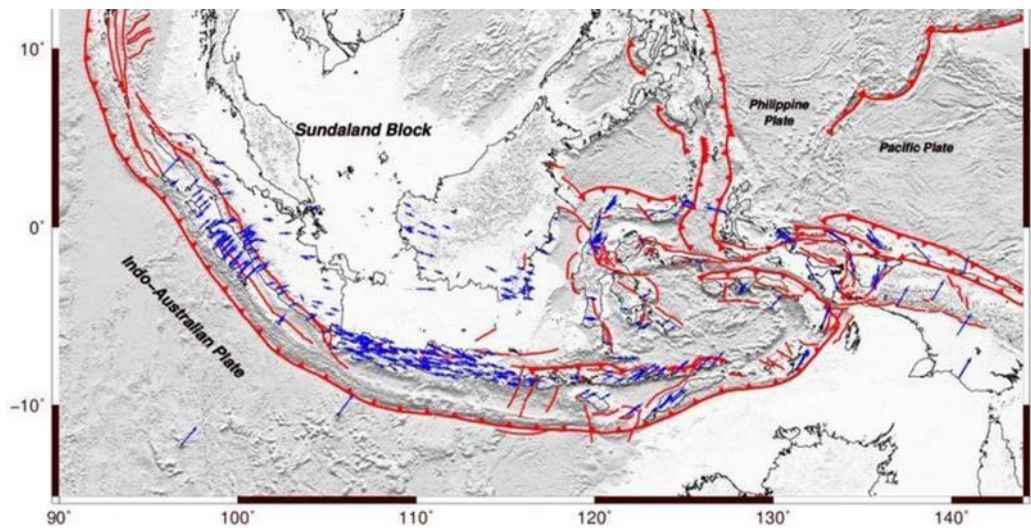
Geophone merupakan sensor utama yang digunakan untuk merekam gelombang seismik bumi yang banyak digunakan di Indonesia khususnya dalam sistem peringatan dini gempa bumi dan tsunami. Kondisi ini menunjukkan bahwa kebutuhan sensor *geophone* di Indonesia sangat tinggi dan penting, namun hingga saat ini, belum ada produsen *geophone* di Indonesia. Penelitian ini merupakan studi awal untuk membuat rancang bangun sensor *geophone* dengan prinsip koil magnetik dengan massa inersia bergerak menggunakan pegas yang menerapkan *static balancing stiffness*. Metode perancangan dilakukan menggunakan pemodelan dan pencetakan 3D sedangkan pengujian dilakukan dengan *geophone* pembanding tipe GD45 dengan frekuensi 4,5 Hz. Enam dari sepuluh rancang bangun koil *geophone* berhasil mendekati nilai induktansi *geophone* pembanding sebesar ± 23 mH, dengan diameter 10 – 15 mm, jumlah lilitan 640 – 750 kali dan massa 8 – 9 gram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa koil tanpa pegas memiliki *noise* lebih tinggi dibandingkan *geophone* pembanding, yang berdampak pada rasio *signal to noise* (S/N) yang lebih rendah. Namun, koil dengan pegas dan diameter lebih besar (15 mm) menunjukkan rasio *noise* yang lebih rendah dan mendekati *geophone* pembanding. Sensitivitas koil terhadap getaran meningkat seiring dengan bertambahnya diameter koil, terutama pada diameter 15 mm. Selain itu, efek *damping* dari pegas pada semua koil lebih tinggi dibandingkan *geophone* pembanding, menunjukkan kemampuan peredaman yang lebih baik pada desain pegas *static balancing stiffness*.

1. Pendahuluan

Indonesia berada pada pertemuan antara lempeng besar dunia dan lempeng kecil atau microblocks menyebabkan daerah ini berpotensi mengalami banyak kejadian gempa. Secara regional, Indonesia memang dikelilingi oleh empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Laut Filipina dan Pasifik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Beberapa penelitian menggunakan metode geologi, geofisika dan geodetik, wilayah tektonik Indonesia dapat dibagi ke dalam beberapa lempeng kecil yaitu

Burma, Laut Banda, Laut Maluku, Sunda, Timor, Kepala Burung, Maoke dan Woodlark (Irsyam dkk., 2017). Berdasarkan kondisi seismisitas dan tektonik tersebut, Indonesia memiliki resiko gempabumi yang cukup tinggi. Salah satu usaha dalam melakukan mitigasi yaitu melakukan pemetaan nilai percepatan getaran tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration* atau PGA). Berdasarkan data PGA ini, kita dapat menghitung dan memetakan sebaran tingkat resiko bencana gempa bumi tektonik di suatu kawasan (Brotopuspito dkk., 2006). Namun untuk melakukan pengukuran PGA diperlukan rangkaian instrumen seis-

* Penulis korespondensi.
E-mail: igedeboy@eng.unila.ac.id (IGB Darmawan)

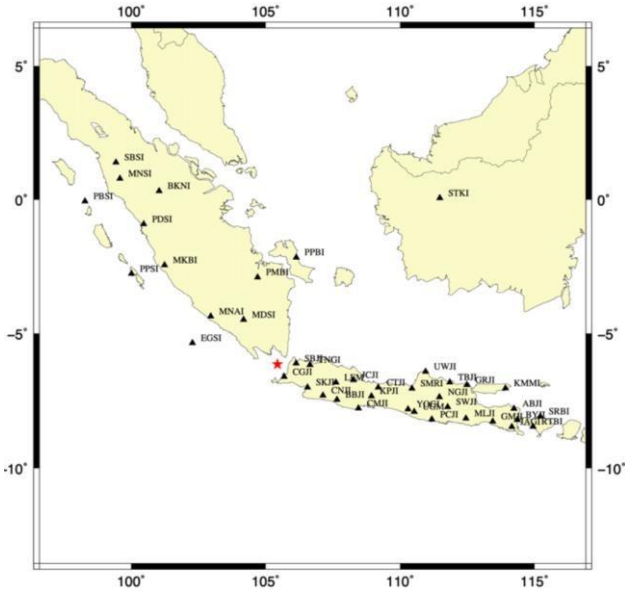


Gambar 1. Peta Tektonik wilayah Indonesia dari data geodetik hingga tahun 2016, garis merah menunjukkan struktur dan batas lempeng pada zona subduksi. Garis biru menunjukkan arah pergerakan lempeng di titik pengukuran geodetik (Pusat Data Gempa Nasional Hal.1, 2016).

-mometer dan akselerometer cukup banyak yang menggunakan geofon sebagai sensor utamanya.

Berbagai kebutuhan instrumen seismometer yang menggunakan geofon saat ini belum diimbangi dengan produksi dalam negeri, meskipun kebutuhan seismometer di Indonesia sangat tinggi. Instrumen seismometer banyak dibutuhkan dalam industri termasuk BUMN di bidang eksplorasi dan monitoring seperti PT Pertamina Geothermal Energy bahkan PT Freeport Indonesia (Nurhandoko dkk., 2015). Selain itu di instrumen ini merupakan alat utama di BMKG (Gambar 3) (Putratama, 2021), PVMBG (Siswadi & Persada, 2019) bahkan digunakan juga oleh Pusat Survei Geologi (PSG) (PSG, 2022). Namun yang tidak kalah jumlah penggunaannya adalah universitas yang memiliki program studi geofisika/teknik geofisika. Berdasarkan data dari PDDIKTI terdapat kurang lebih 18 prodi geofisika/teknik geofisika yang tentu saja membutuhkan instrumen Seismograf dalam kegiatan pengajaran, praktikum maupun penelitian terkait gelombang seismik (PDDIKTI, 2023). Bahkan riset tentang geoteknik oleh Prodi Teknik Sipil juga banyak melibatkan pengukuran getaran menggunakan akselerometer dan seismometer (Husna.K.R., 2019; Mufid Kusuma dkk., 2021; Muhtar & Alihudien, 2015; Sungkowo, 2018). Namun, seismometer broadband konvensional masih mahal, besar, dan berat (Dai dkk., 2015). Oleh karena itu, rancang bangun sensor geofon sangat dibutuhkan dalam penelitian ini agar mampu memproduksi seismometer secara mandiri di dalam negeri.

Belum adanya produsen yang mampu memproduksi sensor geofon di Indonesia menjadi peluang kebaruan pada penelitian ini. Selain itu, penelitian ini juga selaras dengan isu ekonomi hijau yang menjadi salah satu prio-



Gambar 2. Peta sebaran stasiun seismometer BMKG wilayah Sumatera, Jawa dan Kalimantan yang digunakan untuk memantau gempa bumi dan Gunung Anak Krakatau (Haridhi dkk., 2022).

-ritas penelitian nasional. Penelitian ini bertujuan khusus untuk melakukan perancangan model geofon berbasis koil magnetik dengan memanfaatkan massa inersia dengan mode akuisisi vertikal dan horizontal. Kegiatan perancangan dilakukan untuk mendapatkan model dan dimensi geofon yang tepat berdasarkan target frekuensi naturalnya. Hasil racangan tersebut kemudian direalisasikan menjadi prototipe untuk dilakukan uji coba. Dalam proses uji diharapkan dapat membuktikan bahwa geofon hasil rancangan mampu merekam gelombang seismik. Pengukuran dan uji pada geofon dibatasi hanya dilakukan di laboratorium.

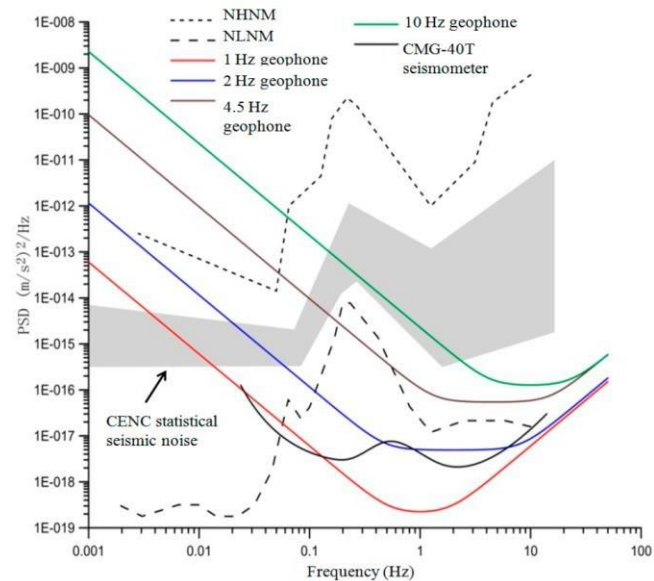
2. Metodologi

Geofon merupakan sensor dari instrumen seismometer/seismograf yang paling banyak digunakan dalam survei gelombang seismik. Berbagai penelitian terkait eksplorasi sumber daya alam dan mitigasi bencana geologi yang menggunakan seismometer berarti menggunakan sensor geofon di dalamnya, termasuk penelitian geoteknik seperti mikrotremor (Dai dkk., 2015). Pengukuran gelombang seismik permukaan aktif juga memanfaatkan sensor geofon dalam seismometer seperti metode Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) dan Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (Nazarian dkk., 1983; Richart Jr. dkk., 1970). Selain itu, sensor geofon dalam seismometer juga digunakan dalam pengukuran gelombang seismik pasif seperti metode *spatial autocorrelation* (SPAC) dan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) (Nogoshi & Igarashi, 1970; Okada & Suto, 2003). Metode-metode tersebut sering diaplikasikan dalam bidang mikrozonasi seismik, penilaian risiko likuifaksi, karakterisasi tanah dan struktur bawah permukaan (Arosio dkk., 2013; Cadet dkk., 2011; Karastathis dkk., 2010; Manakou dkk., 2010; Tallavó dkk., 2009).

2.1. Karakteristik Noise Sensor Geofon

Sensor geofon dengan memanfaatkan massa inersia yang dikaitkan dengan sistem pegas dan koil magnetik merupakan model umum yang digunakan dalam pengukuran gelombang seismik. Geofon ini umumnya memiliki kanal frekuensi antara 1 Hz, 2 Hz, 4,5 Hz dan 10 Hz (Dai dkk., 2015). Pemilihan rentang frekuensi ini dikarenakan beberapa faktor penting terutama faktor noise dari perangkat keras atau komponen penyusun geofon (*self noise*). Jika geofon memiliki kanal frekuensi dengan *self noise* tinggi maka tidak akan dapat diaplikasikan dalam pengukuran seismik alami bumi seperti mikrotremor yang memiliki amplitudo rendah (Dai dkk., 2015). Ketika *self noise* mengandung informasi akibat interferensi gelombang seismik, maka sangat penting untuk mengestimasi pengaruhnya dalam perekaman data menggunakan geofon (Chaput dkk., 2012; Ringler dkk., 2014).

Untuk mengetahui karakteristik self noise dari geofon umumnya dilakukan menggunakan pengukuran *Power Spectral Density* (PSD) (Hopp dkk., 2022; Zhang dkk., 2012). Metode paling sederhana untuk menguji dan menganalisis *self noise* menggunakan PSD adalah dengan membandingkan data geofon dengan instrumen pembanding berupa *broadband seismometer* (Zou dkk., 2010). Untuk pengukuran di bidang geoteknik terutama dalam pengukuran gelombang permukaan dengan



Gambar 3. Contoh perbandingan kurva PSD dari empat frekuensi geofon dengan instrumen seismometer pembanding (Dai dkk., 2015).

metode pasif seismik menggunakan geofon dengan frekuensi 1Hz hingga 10 Hz. Dalam kurva PSD, nilai self noise akan dikomparasikan dengan data model di wilayah tersebut seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Nilai PSD akan dibatasi dengan kurva termasuk *new high-noise model* (NHNM) dan *new low-noise model* (NLNM) (Peterson, 1993).

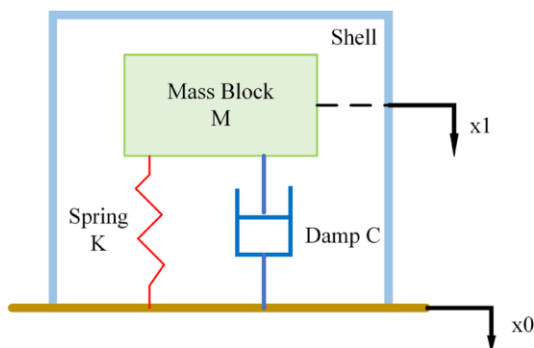
2.2. Prinsip kerja Geofon

Struktur internal geofon terdiri dari koil/kumparan dengan sistem pegas yang bergerak relatif terhadap magnet mengikuti getaran dari gelombang seismik. Magnet dipasang pada *casing* secara permanen untuk membuat medan magnet internal tersebar lebih merata (Hong & Park, 2010). Prinsip kerja geofon adalah bergeraknya koil/kumparan mengikuti sumber getaran bumi atau gelombang seismik. Ketika koil bergerak, permasalahan kopling antara getaran seismik dengan koil diabaikan dan dianggap sinkron. Akibat gerak relatif antara koil dengan magnet dalam geofon, maka timbul gaya gerak listrik induksi berdasarkan Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik (Ma dkk., 2023).

Secara sederhana, model mekanik geofon memiliki satu sumbu arah gerak bebas (*single-degree-of-freedom*) dengan tiga komponen utama yaitu massa inersia (*m*) dari koil, pegas (*k*) dan sistem damping (*c*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Dari model dinamis tersebut, diperoleh Persamaan 1 sebagai formula kinematikanya (Ma dkk., 2023):

$$mx_1'' + c(x_1' - x_0') + k(x_1 - x_0) = F(t)$$
 (1)

Dengan x_1'' adalah percepatan massa, x_1' adalah kecepa-



Gambar 4. Model dinamis sensor geofon sederhana (Ma dkk., 2023).

-tan absolut dari massa inersia sedangkan $\dot{x}_0$ adalah kecepatan absolut dari magnet. Kemudian x_1 dan x_0 perpindahan absolut dari massa inersia dan magnet. Sedangkan $F(t)$ adalah gaya dalam waktu tertentu, saat $t = 0$ maka $F(t) = 0$. Akibat gerak relatif koil terhadap magnet, maka gaya gerak listrik induksi yang dihasilkan dituliskan pada Persamaan 2 berikut (Ma dkk., 2023):

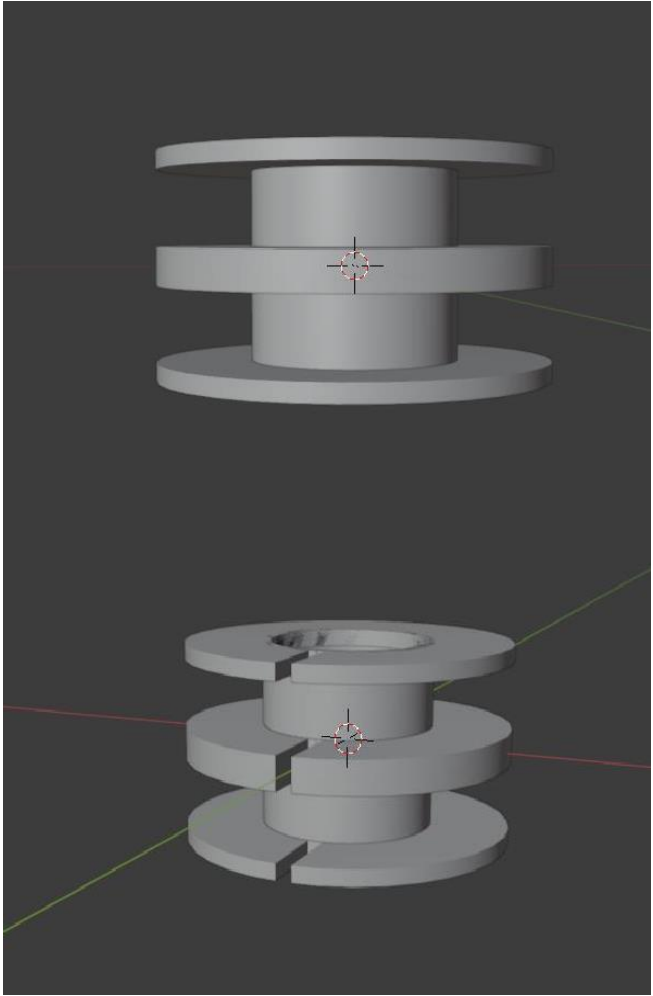
$$U = Blv = Bl(x_1 - x_0) \tag{2}$$

Dengan U adalah luaran gaya gerak listrik dan B merupakan intensitas medan magnet induksi. Sedangkan l dan v adalah panjang koil dan kecepatan relatif antara massa inersia koil dengan magnet.

3. Hasil dan pembahasan

Kegiatan pembuatan rancang bangun sensor geofon dengan prinsip koil magnetik dengan massa inersia dilakukan dengan membuat model koil menggunakan mesin pencetak 3D. Perancangan dibagi menjadi tidak ukuran diameter dalam yaitu 10 mm, 12 mm dan 15 mm. Masing-masing koil memiliki dua ruas untuk kumparan dengan dimensi seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Secara sederhana dapat ditunjukkan bahwa pada rancang bangun, koil akan dipisahkan menjadi dua bagian yang sama. Di antara kedua posisi koil diberi sekat dengan lebar 4 mm. Pemisahan ini dilakukan untuk mendapatkan dua kali penguatan koil relatif terhadap posisi magnet. Untuk menghubungkan koil satu dengan koil dua, maka pada rancang bangun, dibuat coakan yang berfungsi sebagai jalur perpindahan kawat. Selain itu, posisi magnet pada rancang bangun ini berada di bagian tengah dari koil berbentuk silinder.

Dalam menentukan berapa jumlah lilitan, maka diperlukan suatu instrumen pembanding yaitu geophone. Geophone pembanding yang digunakan merupakan geophone pabrikan dari perusahaan Guangda, China dengan seri GD45. Untuk mendapatkan respon induktansi standar dari geophone, maka dilakukan pengukuran nilai induktansi dari sensor geophone pembanding dengan nilai frekuensi alami yaitu 4,5 Hz. Pengukuran dilakukan dengan peralatan ESR Meter Digital tipe LCR-T4 Mega328. Hasil pengukuran



Gambar 5. Rancang bangun koil untuk sensor geophone.



Gambar 6. Cuplikan kegiatan pengujian koil untuk mengukur berat, resistensi dan induktansi.

pada sensor pembanding menunjukkan bahwa nilai induktansi kurang lebih sebesar 23 mH dengan hambatan dalam koil kurang lebih sebesar 375,7 Ohm.

Dari kegiatan perancangan dan perakitan koil magnetik tersebut, diperoleh setidaknya 10 prototipe koil magnetik yang siap diuji. Adapun 10 koil yang akan diuji terdiri dari 5 koil dengan diameter dalam 10 mm, 3 koil dengan diameter dalam 12 mm dan 2 koil dengan diameter dalam 15 mm. Perbedaan diameter dalam ini bertujuan untuk menguji respon koil dengan diameter

Tabel 1. Hasil pengukuran parameter koil hasil rancang bangun geophone.

No	Diameter koil (mm)	Jumlah lilitan (N)		Resistensi / R (Ω)	Induktansi / L (mH)	Massa / m (gr)
		koil 1	koil 2			
1	10	745	745	162.2	23.6	8.3
2	10	750	750	219.8	23.9	8
3	10	750	750	162.9	23.9	8.1
4	10	900	900	190.2	32	8
5	10	765	765	151.6	19.9	7.3
6	12	635	635	154.5	20.5	7.8
7	12	675	675	166.1	23.9	9
8	12	680	670	165.7	23.5	8.5
9	15	600	600	152.5	20.2	8.2
10	15	640	640	165	23.2	8.9

magnet yang berbeda-beda sesuai dengan diameter dalam dari koil. Dengan membuat beberapa jenis diameter koil, diharapkan hasil pengukuran akan menunjukkan rancang bangun terbaik dari hasil uji.

3.1. Pengujian parameter awal

Hasil pembuatan koil dengan gulungan manual kemudian diukur menggunakan peralatan yang sama dengan pengukuran koil pembanding yaitu ESR Meter Digital tipe LCR-T4 Mega328. Paramater yang diukur adalah nilai resistensi dan induktansi. Sedangkan untuk pengukuran massa dilakukan dengan menggunakan timbangan digital. Adapun kegiatan pengujian koil ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Hasil percobaan yang dilakukan dalam mendapatkan nilai induktansi yang sejenis dengan geophone pembanding menghasilkan beberapa jumlah lilitan koil pada masing-masing rancang bangun.

Hasil percobaan yang dilakukan dalam mendapatkan nilai induktansi yang sejenis dengan geophone pembanding menghasilkan beberapa jumlah lilitan koil pada masing-masing rancang bangun. Adapun hasil pengukuran induktansi berdasarkan jumlah lilitan ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, diperoleh bahwa terdapat sepuluh rancang bangun koil magnetik yang berhasil diukur untuk mendapatkan nilai resitensi/hambatan (R) dalam ohm, induktansi (L) dalam mH dan massa inersianya (m) dalam gr. Berdasarkan hasil korelasi dengan data induktasi dan resistensi instrumen/sensor geophone pembanding, diketahui setidaknya ada 6 rancangan koil magnetik yang memperoleh nilai induktansi mendekati 23 mH. Massa terukur dari masing-masing koil magnetik

tersebut berada di bawah 10 gram atau secara rata-rata berada pada 8,5 gram.

3.2. Pengujian respon spektral

Berdasarkan hasil uji parameter awal pada rancang bangun koil geophone diperoleh 6 rancangan koil yang nilai induktansinya mendekati nilai geophone pembanding. Rincian dari koil-koil tersebut terdapat 3 koil dengan diameter dalam 10 mm, 2 koil dengan diameter 12 mm dan 1 koil dengan diameter 15 mm. Keenam koil ini kemudian diukur respon spektralnya menggunakan osiloskop. Pengukuran ini dilakukan dengan membandingkan respon spektral koil dengan respon spektral geophone pembanding.

Hasil pengujian spektral dibagi menjadi dua kategori yaitu pengujian tanpa pegas dan pengujian menggunakan pegas. Pembagian ini dilakukan untuk memisahkan pengaruh pegas pada respon spektral koil sebagai massa inersia dari geophone. Pengujian dilakukan hanya pada mode vertikal, karena pada mode horizontal posisi koil sulit untuk diletakkan tanpa casing. Sehingga hasil pengujian mode vertikal dianggap sama dengan pengujian mode horizontal dengan perbedaan azimuth 90°.

Hasil pengukuran respon spektral pada osiloskop menggambarkan bahwa noise pada koil dan geophone pembanding dapat terekam dengan baik, namun tidak semua koil mampu memunculkan respon getaran pada pengukuran event menggunakan ketukan. Kondisi ini dipengaruhi oleh sensitivitas koil terhadap magnet maupun posisi magnet relatif terhadap koil. Selain itu, dengan belum menerapkan pegas pada koil maka sinyal getaran yang muncul pada spektral koil hanya

disebabkan oleh getaran pada medium yang bergetar. Selain itu, koil yang mampu menghasilkan sinyal getaran mengindikasikan bahwa koil tersebut memiliki sensitivitas lebih baik dari koil yang tidak memunculkan sinyal.

Kemudian untuk karakteristik noise, dapat diamati bahwa noise dari rancangan koil lebih tinggi dari geophone pembanding. Secara rata-rata, Vpp noise dari koil kurang lebih 77 mV sedangkan pada geophone pembanding kurang lebih 15.64 mV. Hasil ini tentu menunjukkan bahwa potensi signal to noise rasio (S/N) dari koil lebih rendah dari geophone pembanding dengan perbandingan 1:5. Hasil ini tentu masih jauh dari harapan supaya perbandingan S/R menjadi sama atau setidaknya dekat dengan geophone pembanding. Kondisi ini diperkirakan dari proses pembuatan lilitan dan posisi magnet yang masih belum sempurna, karena dilakukan secara manual. Sedangkan untuk nilai Vrms noise dari koil secara rata-rata juga lebih tinggi dari geophone pembanding yaitu 10.85 mV dengan 2.39 mV atau 1:4. Adapun data tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian menggunakan pegas dengan rancang bangun berupa pegas dengan desain *Static Balancing* oleh Kuppens dkk., (2021). Desain ini dipilih karena memiliki kemudahan dalam proses pencetakan menggunakan print 3D. Selain itu tujuan perancangan ini adalah untuk membangun rancang bangun geophone dengan derajat bebas dari satu sumbu getaran. Sehingga salah satu

alternatif yang dipilih untuk rancang bangun pegas adalah model *Static Balancing*.

Setelah proses perancangan dan pencetakan pegas dilakukan beberapa kali hingga diperoleh dimensi dan ketebalan yang tepat sehingga keseimbangan inersia dari massa koil dengan stiffness dari pegas tercapai. Untuk mempermudah proses pengujian, sebuah platform sederhana dibuat sementara menggunakan pipa PVC untuk menghubungkan antara pegas dengan koil. Tujuan utama dari perancangan platform sederhana ini adalah untuk menemukan respon spektral koil terhadap event (menggunakan ketukan) dan dibandingkan dengan repson geophone pembanding dalam pengukuran paralel secara bersamaan. Adapun proses pengujian rancang bangun koil dengan menggunakan pegas ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 2. Pengukuran Vpp dan Vrms pada koil tanpa menggunakan pegas.

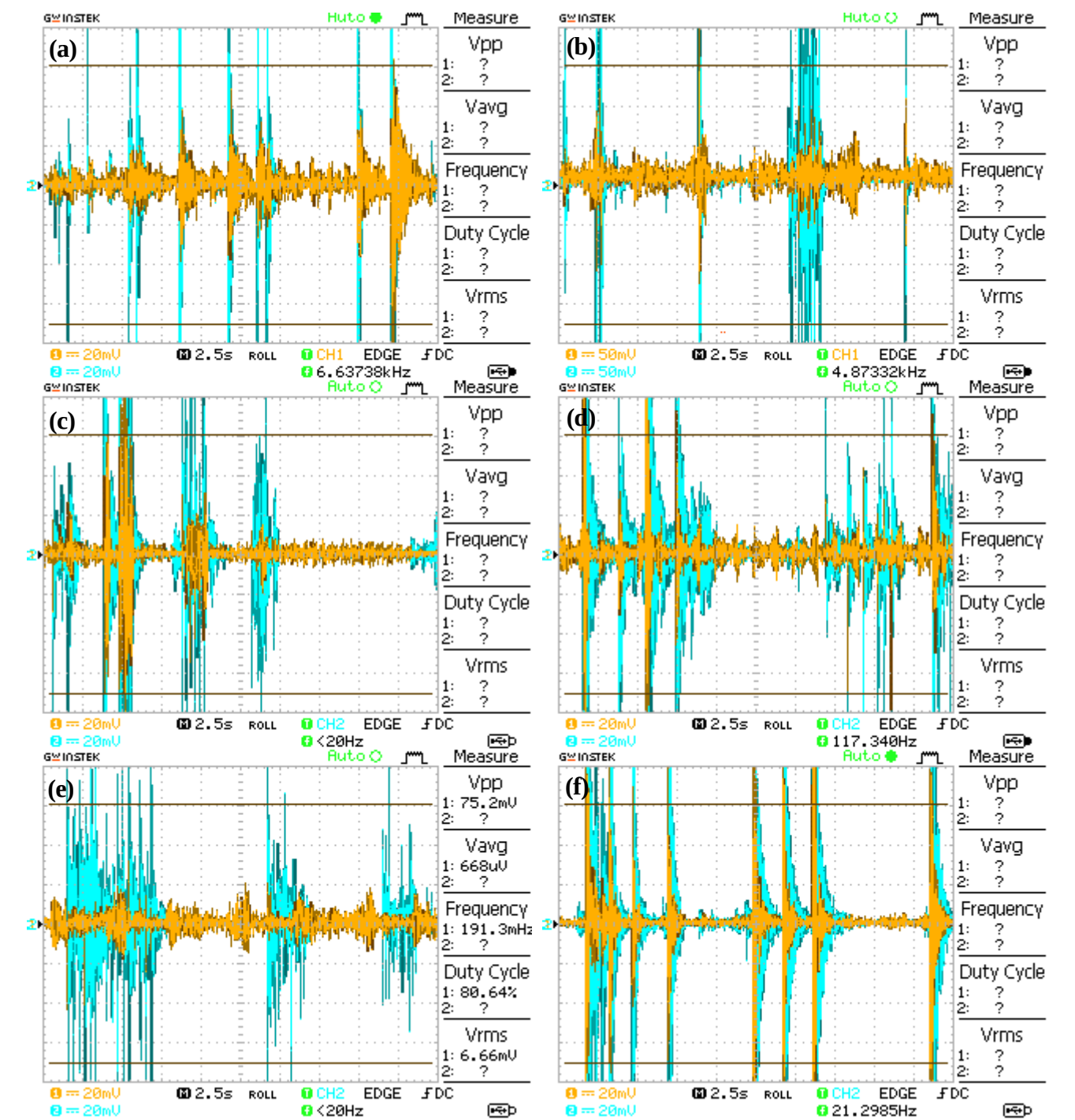
No. Koil	Diameter koil (mm)	Vpp (mV)		Vrms (mV)	
		Koil	Geo-phone	Koil	Geo-phone
1	10	72	20	10	3.54
2	10	78.4	17.6	9.57	2.08
3	10	79.2	14.4	10.8	1.78
6	12	94.4	1.02	12.6	1.98
7	12	84	18.4	14.2	2
10	15	57.6	22.4	7.94	2.95



Gambar 7. Pengujian rancang bangun koil dengan menggunakan pegas pada platform sederhana menggunakan osiloskop.

Berdasarkan hasil pengujian sederhana pada rancang bangun koil magnetik dengan massa inersia menggunakan pegas, diperoleh peningkatan hasil yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan pegas. Dari enam koil yang pada pengujian sebelumnya berhasil memunculkan respon spektral event, pada pengujian menggunakan pegas ini seluruhnya berhasil juga memunculkan respon spektral event. Berikut ini adalah Gambar 8 yang menunjukkan hasil perekaman osiloskop pada pengujian koil

magnetik dengan massa inersia menggunakan pegas pada rancang bangun geophone yang direkam secara paralel bersamaan dengan geophone pembanding. Dari hasil pengujian koil dengan pegas yang ditunjukkan pada tabel di atas, diperoleh karakteristik respon spektral pada event (ketukan) yang berbeda-beda pada tiap koil. Pada koil dengan diameter dalam 10 mm dan 12 mm nampak bahwa noise masih jauh lebih tinggi dari noise pada geophone pembanding. Artinya bahwa baik menggunakan pegas maupun tidak, noise pada koil



Gambar 8. Hasil pengujian koil magnetik dengan massa inersia menggunakan pegas pada koil nomor (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 6, (e) 7, dan (f) 10.

dengan diameter 10 mm dan 12 mm masih memiliki perbandingan yang tinggi terhadap geophone pembanding. Sedangkan pada koil dengan diameter 15 mm, rasio noise dengan geophone pembanding sudah rendah bahkan cenderung hampir sama mendekati 1:1. Hasil ini tentu menjadi temuan menarik bahwa semakin besar diameter koil maka semakin kecil respon noise atau Signal to Noise Ratio (S/N) semakin kecil/baik.

Temuan lainnya yang juga cukup menarik adalah sensitivitas koil terhadap event getaran yang juga cenderung meningkat pada koil dengan diameter lebih besar. Hal ini ditunjukkan pada rasio Vpp antara koil magnetik dengan geophone pembanding yang semakin kecil pada diameter 15 mm. Sedangkan pada diameter 10 mm dan 12 mm, rasio Vpp masih lebih besar dari pada rasio pada diameter 15 mm. Selain itu, jika diperhatikan efek dumping dari pegas berdasarkan atenuasi gelombang pada respon spektral menunjukkan bahwa efek dumping di semua koil lebih tinggi dari pada geophone pembanding. Ini mengindikasikan bahwa desain pegas *Static Balancing* memiliki efek peredaman yang lebih tinggi dari geophone pembanding. Temuan ini menunjukkan bahwa potensi pegas dengan desain ini lebih unggul dari sisi dumping sehingga sinyal dengan frekuensi lebih tinggi akan terekam dengan lebih baik. Namun untuk mengkarakterisasi respon tersebut lebih jauh tentu diperlukan pengujian yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, rancang bangun sensor geophone ini masih perlu dikembangkan lagi, terutama realisasi menjadi prototipe agar proses uji dan kalibrasinya dapat dilakukan pada tingkatan kesiapan teknologi (TKT) yang lebih tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kegiatan penelitian ini, rancang bangun koil magnetik berhasil dibuat sebanyak 10 koil yang terdiri dari 5 koil dengan diameter dalam 10 mm, 3 koil dengan diameter dalam 12 mm dan 2 koil dengan diameter dalam 15 mm. Hasil uji parameter awal pada rancang bangun koil geophone diperoleh 6 rangangan koil yang nilai induktansinya mendekati nilai geophone pembanding yaitu ± 23 mH dengan rincian terdapat 3 koil dengan diameter dalam 10 mm dengan rentang jumlah lilitan (N) antara 745 – 750 dan massa (m) 8 – 8.3 gram, 2 koil dengan diameter 12 mm dengan rentang jumlah lilitan (N) antara 675 – 680 dan massa (m) 8.5 – 9 gram serta 1 koil dengan diameter 15 mm dengan rentang jumlah lilitan (N) 640 dan massa (m) 8.9 gram.

Noise dari rancangan koil tanpa pegas menunjukkan nilai yang lebih tinggi dari geophone pembanding yaitu secara rata-rata, Vpp noise dari koil kurang lebih 77 mV sedangkan pada geophone pembanding kurang lebih 15.64 mV. Hasil ini tentu menunjukkan bahwa potensi signal to noise rasio (S/N) dari koil lebih rendah dari geophone pembanding dengan perbandingan 1:5.

Sedangkan untuk nilai Vrms noise dari koil secara rata-rata juga lebih tinggi dari geophone pembanding yaitu 10.85 mV dengan 2.39 mV atau 1:4.

Pengujian koil dengan pegas menghasilkan karakteristik respon spektral event (ketukan) pada koil dengan diameter dalam 10 mm dan 12 mm memiliki noise jauh lebih tinggi dari noise pada geophone pembanding. Sedangkan pada koil dengan diameter 15 mm, rasio noise dengan geophone pembanding sudah rendah bahkan cenderung hampir sama mendekati 1:1. Hasil ini tentu menjadi temuan menarik bahwa semakin besar diameter koil maka semakin kecil respon noise atau Signal to Noise Ratio (S/N) semakin kecil/baik. Sensitivitas koil terhadap event getaran yang juga cenderung meningkat pada koil dengan diameter lebih besar. Hal ini ditunjukkan pada rasio Vpp antara koil magnetik dengan geophone pembanding yang semakin kecil pada diameter 15 mm. Sedangkan pada diameter 10 mm dan 12 mm, rasio Vpp masih lebih besar dari pada rasio pada diameter 15 mm.

Efek dumping dari pegas berdasarkan atenuasi gelombang pada respon spektral menunjukkan bahwa efek dumping di semua koil lebih tinggi dari pada geophone pembanding. Ini mengindikasikan bahwa desain pegas *Static Balancing* memiliki efek peredaman yang lebih tinggi dari geophone pembanding.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik, Universitas Lampung yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian DIPA FT Tahun 2024.

Daftar Pustaka

- Arosio, D., Longoni, L., Papini, M., & Zanzi, L. (2013). Seismic characterization of an abandoned mine site. *Acta Geophysica*, 61(3). <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0090-0>
- Brotopuspito, K. S., Prasetya, T., & Widigdo, F. M. (2006). Percepatan Getaran Tanah Maksimum Daerah Istimewa Yogyakarta 1943-2006. *Jurnal Geofisika*, 7(1), 19–22. <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=81696>
- Cadet, H., Macau, A., Benjumea, B., Bellmunt, F., & Figueras, S. (2011). From ambient noise recordings to site effect assessment: The case study of Barcelona microzonation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.07.005>
- Chaput, J. A., Zandomenighi, D., Aster, R. C., Knox, H., & Kyle, P. R. (2012). Imaging of Erebus volcano using body wave seismic interferometry of Strombolian eruption coda. *Geophysical Research Letters*, 39(7). <https://doi.org/10.1029/2012GL050956>
- Dai, K., Li, X., Lu, C., You, Q., Huang, Z., & Wu, H. F. (2015). A low-cost energy-efficient cableless geophone unit for passive surface wave surveys. *Sensors*

- (Switzerland), 15(10).
<https://doi.org/10.3390/s151024698>
- Haridhi, H. A., Sianipar, D., Purnawan, S., Setiawan, I., & Huang, B.-S. (2022). Current state of the seismic broadband network of Indonesia: Is it possible for the early warning system from a subaerial source-induced tsunami? *E3S Web of Conferences*, 340, 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234001016>
- Hong, J., & Park, K. (2010). Design and control of six degree-of-freedom active vibration isolation table. *Review of Scientific Instruments*, 81(3). <https://doi.org/10.1063/1.3298605>
- Hopp, C., Taira, T., Robertson, M., Farrugia, J. J., Layland-Bachmann, C., & Majer, E. (2022). Low-Noise Optical Accelerometers: Bridging the Gaps among Geophones, Accelerometers, and Broadbands in a Deep Borehole. *Seismological Research Letters*, 93(4). <https://doi.org/10.1785/0220210340>
- Husna.K.R. (2019). Identifikasi Bahaya Gempa Bumi dengan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) di Sulawesi Tengah dan Sekitarnya. Dalam *Jurnal-Universitas Brawijaya Malang* (Vol. 6, Nomor 3).
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L., & Sunarjito. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Karastathis, V. K., Karmis, P., Novikova, T., Roumelioti, Z., Gerolymatou, E., Papanastassiou, D., Liakopoulos, S., Tsombos, P., & Papadopoulos, G. A. (2010). The contribution of geophysical techniques to site characterisation and liquefaction risk assessment: Case study of Nafplion City, Greece. *Journal of Applied Geophysics*, 72(3). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.09.003>
- Ma, K., Wu, J., Ma, Y., Xu, B., Qi, S., & Jiang, X. (2023). An Effective Method for Improving Low-Frequency Response of Geophone. *Sensors*, 23(6). <https://doi.org/10.3390/s23063082>
- Manakou, M. V., Raptakis, D. G., Chávez-García, F. J., Apostolidis, P. I., & Pitilakis, K. D. (2010). 3D soil structure of the Mygdonian basin for site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.027>
- Mufid Kusuma, M. F., Faizah, R., & Nugroho, G. (2021). Pengaruh Penggantian Agregat Halus dengan Serbuk Ban Bekas pada Campuran Beton Terhadap Daya Redam Getaran. *Bulletin of Civil Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.18196/bce.v1i1.11051>
- Muhtar, & Alihudien, A. (2015). Indek Kerentanan Dan Amplifikasi Tanah Akibat Gempa di Wilayah Universitas Muhammadiyah Jember. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 12(2). <https://doi.org/10.22219/jmts.v12i2.2287>
- Nazarian, S., Stokoe, K. H., & Hudson, W. R. (1983). Use of Spectral Analysis of Surface Waves Method For Determination of Moduli and Thicknesses of Pavement Systems. *Transportation Research Record*.
- Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1970). On the Propagation Characteristics of Microtremor. *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.)*, 23(4). https://doi.org/10.4294/zisin1948.23.4_264
- Nurhandoko, B. E. B., Wely, W., Setiadi, H., & Riyanto, E. (2015). Passive seismic tomography application for cave monitoring in DOZ underground mine PT. Freeport Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 1656. <https://doi.org/10.1063/1.4917149>
- Okada, H., & Suto, K. (2003). *The Microtremor Survey Method*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801740>
- PDDIKTI. (2023). *PDDikti - Pangkalan Data Pendidikan Tinggi*. <https://pddikti.kemdikbud.go.id/search/geofisika>
- Peterson, J. (1993). Observations and modelling of seismic background noise. Open-File Report 93-322. Dalam *Seismological Research Letters* (Vol. 79, Nomor 2).
- PSG. (2022). *Profil Laboratorium dan Sarana Penyelidikan di Pusat Survei Geologi – Pusat Survei Geologi*. <https://psg.geologi.esdm.go.id/index.php/sample-page/>
- Putratama, R. (2021). *BMKG Pasang Seismograf, Pertajam Kecepatan dan Akurasi* | BMKG. <https://www.bmkg.go.id/press-release/?p=36913&tag=press-release&lang=ID>
- Richart Jr., F. E., Hall Jr., J. R., & Woods, R. D. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. Dalam *Prentice-Hall*.
- Ringler, A. T., Sleeman, R., Hutt, C. R., & Gee, L. S. (2014). Seismometer Self-Noise and Measuring Methods. Dalam *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_175-1
- Siswadi, A., & Persada, S. (2019). *PVMBG Buka Alasan Seismograf Tak Deteksi Letusan Gunung Kerinci - Nasional* *Tempo.co*. <https://nasional.tempo.co/read/1230862/pvmbg-buka-alasan-seismograf-tak-deteksi-letusan-gunung-kerinci>
- Sungkowo, A. (2018). Perhitungan Nilai Percepatan Tanah Maksimum Berdasar Rekaman Sinyal Accelerograph di Stasiun Pengukuran UNSO Surakarta. *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 8(1). <https://doi.org/10.13057/ijap.v8i1.14326>
- Tallavó, F., Cascante, G., & Pandey, M. (2009). Experimental and numerical analysis of MASW tests for detection of buried timber trestles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.01.011>
- Zhang, Y., Zou, Z., & Zhou, H. W. (2012). Estimating and recovering the low-frequency signals in geophone data. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82nd Annual Meeting 2012, SEG 2012*. <https://doi.org/10.1190/segam2012-1178.1>
- Zou, Z., Zhou, H. wei, Jiang, F., & Liu, H. (2010). Assessing the reliability of low frequencies in geophone records. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 80th Annual Meeting 2010, SEG 2010*. <https://doi.org/10.1190/1.3513064>