

Pengembangan Sensor Koil Datar 3-D untuk Deteksi Gempa Dini di Wilayah Lombok

Islahudin¹, Muhammad Nizaar²

Abstract—In this study, a flat coil application as a three-dimensional (3-D) vibration sensor for early detection of earthquake is designed to detect earthquakes in Lombok Island. Flat coil is a very thin winding wire and is used as an inductor. When inductance changes, frequency will change as well. The frequency can be converted into voltage to represent the distance. This effect is applied to the low frequency using three-dimensional pendulum (x,y,z) to detect the earthquake in Lombok, West Nusa Tenggara. Lombok Island is a territory that lies between the large plate of Asia and plate of Australia, thus, it belongs to earthquake belt territory. The software of 3-D vibration sensor for early detection of earthquakes uses Atmega 16 microcontroller vibration data acquisition program as a voltage data recorder. Meanwhile, Arduino Nano is used to display the waveform and to calculate the frequency of vibration. Based on the calibration, the frequency of vibrations which can be measured are around 0.468 Hz on the x-axis (source frequency is 0.46 Hz), around 0.55 Hz on the y-axis (source frequency is 0.5 Hz), and around 0.48 Hz on the z-axis (source frequency is 0.5 Hz).

Intisari—Aplikasi koil datar sebagai sensor getaran tiga dimensi (3-D) untuk deteksi gempa dini dirancang karena pulau Lombok termasuk dalam wilayah jalur gempa bumi di Indonesia. Koil datar adalah lilitan kawat yang sangat tipis dan bertindak sebagai induktor. Jika induktans berubah, frekuensi akan berubah juga. Frekuensi dapat diubah ke dalam bentuk tegangan untuk merepresentasikan jarak. Efek ini diterapkan pada frekuensi rendah menggunakan bandul tiga dimensi (x,y,z) untuk mendeteksi getaran gempa dini di wilayah Lombok, NTB. Pulau Lombok merupakan wilayah yang berada pada perbatasan antara lempeng besar Asia dengan lempeng Australia, sehingga masuk dalam wilayah jalur gempa. Perangkat lunak sensor getaran 3-D untuk mendeteksi getaran gempa dini menggunakan program akuisisi data getaran mikrokontroler Atmega 16 sebagai perekam data tegangannya. Adapun untuk menampilkan bentuk gelombang dan menghitung frekuensi getaran digunakan Arduino Nano. Berdasarkan kalibrasi yang sudah dilakukan, frekuensi getaran yang sudah bisa diukur yaitu frekuensi sensor arah sumbu-x sebesar 0,468 Hz (frekuensi sumber 0,46 Hz), arah sumbu-y sebesar 0,55 Hz (frekuensi sumber 0,5 Hz), dan arah sumbu-z sebesar 0,48 Hz (frekuensi sumber 0,5 Hz).

Kata Kunci— sensor, koil datar, 3-D, gempa dini, lombok

¹Dosen, Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Mataram, Jln. K.H. Ahmad Dahlan No. 1, Pagesangan, Mataram- 108 Mataram INDONESIA (Tlp: 0370-633723; fax: 0370-641906; e-mail: islahudin.ntb@gmail.com)

²Dosen, Pendidikan Geografi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Mataram, Jln. K.H. Ahmad Dahlan No. 1, Pagesangan, Mataram- 108 Mataram INDONESIA (Tlp: 0370-633723; fax: 0370-641906; e-mail: nijadompu@gmail.com)

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber gempa yang cukup banyak. Gempa bumi adalah getaran dalam bumi yang terjadi sebagai akibat terlepasnya energi yang terkumpul secara tiba-tiba dalam batuan yang mengalami deformasi [1].

Wilayah yang dilalui gempa biasanya mencakup wilayah yang sangat luas. Gempa sangat sulit dideteksi karena terjadi dalam waktu yang sangat cepat. Deteksi gempa yang dilakukan saat ini hanya mampu mengukur kekuatan getaran gempa tanpa diketahui arah getaran gempa. Selain itu, alat pengukur getaran gempa hanya dimiliki oleh BMKG dan memiliki harga yang sangat mahal. Evakuasi korban gempa biasanya dilakukan setelah gempa dengan kekuatan besar melanda masyarakat. Akibatnya, korban material dan korban jiwa kadang tidak dapat dihindarkan.

Salah satu wilayah yang berada pada jalur gempa adalah pulau Lombok, Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB). Pulau Lombok merupakan wilayah kecil yang berada pada perbatasan antara lempeng besar Asia dengan lempeng Australia. Gempa bumi yang pernah terjadi pada wilayah ini cukup meresahkan masyarakat, walaupun skalanya tidak begitu besar seperti yang terjadi pada daerah lain di Indonesia. Gempa bumi yang pernah melanda wilayah ini terakhir terjadi pada awal tahun 2013 silam. Guncangan akibat gempa bumi tersebut dirasakan oleh sebagian besar masyarakat Lombok khususnya, dan wilayah NTB pada umumnya. Adapun kerusakan yang cukup parah terjadi di wilayah Kabupaten Lombok Utara. Meskipun tidak menimbulkan korban jiwa, kerugian material akibat bencana alam tersebut ditaksir mencapai ratusan juta rupiah. Oleh sebab itu, diperlukan antisipasi secara cepat dan tepat untuk menghindari terulangnya kerugian yang lebih besar. Salah satu langkah preventif yang dapat dilakukan adalah meningkatkan kewaspadaan masyarakat terhadap gempa agar dapat terhindar dari kerugian, baik materi maupun jiwa, dengan cara memanfaatkan sensor koil datar tiga dimensi (3-D) untuk deteksi dini getaran gempa.

II. SENSOR KOIL DATAR TIGA DIMENSI

Pengembangan sensor koil datar 3-D untuk deteksi dini getaran gempa dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.

A. Deteksi Dini Gempa Menggunakan Sensor Getaran

Upaya untuk meningkatkan kewaspadaan masyarakat terhadap gempa agar dapat terhindar dari kerugian baik materi maupun jiwa dilakukan pada tahun 2013 melalui penelitian berjudul Sensor Getaran Berbasis Koil Datar Untuk Deteksi Dini Gempa Di Wilayah Lombok Nusa Tenggara Barat (PDP 2013). Penelitian yang dilakukan sudah menghasilkan produk

sensor untuk mendeteksi secara dini getaran gempa, khususnya getaran gempa pada frekuensi rendah. Bentuk sensor yang dibuat adalah bentuk sensor getaran satu dimensi (1-D). Sensor getaran 1-D adalah sensor getaran yang mendeteksi getaran suatu objek hanya pada satu arah yaitu x atau y .

Selain itu, pada tahun 2014 telah dilakukan penelitian berjudul Sensor Getaran Dua Dimensi (2-D) Berbasis Koil Datar untuk Mengukur Frekuensi Getaran Gempa di Wilayah Lombok Nusa Tenggara Barat (PDP 2014). Penelitian yang dilakukan sudah menghasilkan produk sensor untuk mengukur frekuensi getaran gempa, khususnya pada frekuensi rendah. Bentuk sensor yang dibuat adalah bentuk sensor getaran 2-D. Sensor getaran 2-D adalah sensor getaran yang mendeteksi getaran suatu objek pada dua arah yaitu x dan y .

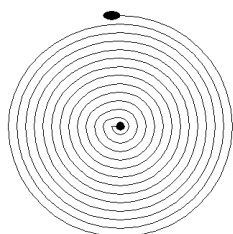
Pada tahun 2016, pengembangan lebih lanjut dari sensor koil datar 1-D dan 2-D adalah sensor koil datar 3-D. Sensor koil datar 3-D merupakan sensor yang dapat digunakan untuk mendeteksi besar dan arah getaran gempa dini pada tiga arah, yaitu arah x , y , dan z . Sensor koil datar 3-D ini dirancang untuk dapat mendeteksi getaran gempa dini dengan cara mengukur frekuensi getaran gempa pada arah x , y , dan z . Frekuensi getaran gempa yang dirancang pada penelitian ini adalah frekuensi rendah. Perbedaan dengan penelitian sebelumnya adalah adanya kemampuan sensor mendeteksi getaran pada arah z . Arah sumbu z merupakan arah vertikal sedangkan arah x dan y adalah arah horizontal.

Adanya tambahan sumbu z akan membuat sensor mampu mendeteksi getaran gempa lebih sensitif karena pada dasarnya getaran gempa menjalar ke segala arah. Dengan mengetahui arah getaran gempa ke segala arah, maka masyarakat dapat merancang bangunan rumah sesuai dengan karakteristik arah getaran gempa, sehingga rumah yang dibangun mampu meredam getaran gempa.

Selain hal-hal tersebut, sensor koil datar 3-D pada penelitian selanjutnya akan dihubungkan ke server internet sehingga data getaran gempa dapat diketahui secara luas baik oleh pemerintah maupun masyarakat. Dengan demikian, munculnya korban akibat gempa dapat dikurangi.

B. Prinsip Fisis Sensor Koil Datar

Elemen koil datar yang digunakan terbuat dari *epoxy* tipis dan perak campuran. Perak campuran ini dibentuk seperti spiral dengan jumlah lilitan dan diameter tertentu. Kedua parameter tersebut berkaitan erat terhadap sensitivitas koil datar yang dihasilkan. Bentuk koil datar tampak seperti pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Koil datar.

Prinsip fisis sensor koil datar pada Gbr. 1 tersebut berdasarkan perubahan induktansi koil datar karena adanya gangguan bahan konduktif. Induktansi elemen koil datar yang dialiri arus akan berubah jika suatu objek konduktif atau bahan pengganggu diletakkan dalam daerah medan magnetiknya. Hal ini disebabkan pada bahan tersebut terjadi arus pusar (*Eddy current*) [2]. Arus Eddy terjadi karena elektron-elektron bebas yang ada di bahan konduktor mengalami gaya magnet. Gaya magnet ini menyebabkan elektron-elektron bebas bergerak membentuk arus induksi. Arus inilah yang disebut dengan arus Eddy. Arus ini searah dan seirama dengan arus pada koil datar menyebabkan terjadinya medan magnet di sekitar bahan konduktor, yang memperkuat medan magnet koil datar. Akibatnya, medan magnet total berubah. Perubahan medan magnet total akan mengubah fluks magnetik, yang mengakibatkan pula perubahan induktansi total. Perubahan induktansi total elemen koil datar digunakan sebagai bagian resonansi suatu rangkaian osilator LC. Osilator adalah piranti elektronik yang menghasilkan keluaran berupa isyarat tegangan. Bentuk isyarat tegangan terhadap waktu ada bermacam-macam, yaitu bentuk *sinusoidal*, segitiga, gigi gergaji, atau denyut. Osilator berbeda dengan penguat, karena penguat memerlukan isyarat masukan untuk menghasilkan isyarat keluaran. Pada osilator tidak ada isyarat masukan, hanya ada isyarat keluaran saja, yang frekuensi dan amplitudanya dapat diatur/dikendalikan. Pada perancangan alat ini, digunakan osilator LC, yaitu rangkaian osilator yang menggunakan induktor L dan kapasitor C pada rangkaian umpan baliknya. Pada osilator LC, osilasi diperoleh melalui rangkaian osilator LC paralel.

Setiap putaran atau lilitan dari koil datar dianggap sebagai lingkaran koaksial dengan jari-jari kira-kira sama dengan jari-jari lilitan atau putarannya. Induktansi L dapat dihitung dengan menjumlahkan induktansi diri L (L_j) dan induktansi bersama M_{jk} .

Jika elemen koil datar tersusun atas beberapa lilitan konsentris, induktansi diri koil datar dapat dituliskan seperti pada (1) [3].

$$L_j = \frac{\mu_0}{2} \left(\sqrt{a_{1j} a_{2j}} \right) \left\{ \left(\frac{2}{k_j} - k_j \right) K(k_j) - \frac{2}{k} E(k_j) \right\} \quad (1)$$

$$\text{dengan, } k_j = a_{1j} \frac{\sqrt{a_{1j} a_{2j}}}{a_{1j} + a_{2j}}.$$

Untuk elemen koil datar yang tersusun atas beberapa lilitan yang konsentris, maka induktansi bersama dari elemen koil datar dengan jumlah lilitan tertentu adalah:

$$M_{jk} = \mu_0 \frac{\sqrt{a_{1j} a_{2k}}}{k_{jk}} \left\{ \left(2 - k_{jk}^2 \right) K(k) - 2E(k_{jk}) \right\} \quad (2)$$

$$\text{dengan } k_{jk} = 2 \sqrt{\frac{a_{1j} a_{2k}}{d^2 + (a_{1j} + a_{2k})^2}}.$$

Induktansi total dari sensor koil datar diperoleh dengan cara menjumlahkan induktansi diri L_j dengan induktansi bersama M_{jk} [4].

$$L = \sum_{j=1}^N L_j + \sum_{j,k=1}^N M_{jk}$$

dengan,

$$L_j = \frac{\mu_0}{2} \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(\frac{2}{k_j} - k_j \right) K(k_j) - \frac{2}{k_j} E(k_j) \right\}$$

$$M_{jk} = \frac{\mu_0 \sqrt{a_1 a_2}}{k_{jk}} \left\{ \left(2 - k_{jk}^2 \right) K(k_{jk}) - \frac{2}{k_{jk}} E(k_{jk}) \right\}$$

dengan K dan E adalah integral eliptik lengkap, yaitu:

$$K(k) = \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha$$

dengan:

- L_j = induktans diri koil datar
- M_{jk} = induktans bersama koil datar
- a_1 = jari-jari lingkaran
- a_2 = setengah lebar lintasan koil datar
- d = jarak antara koil datar dengan penghantar
- α = sudut antara dua lilitan yang berdekatan
- j = jumlah lilitan koil datar
- k = jumlah lilitan yang terbentuk pada membran pengganggu
- μ_0 = permeabilitas magnetik di ruang hampa

III. METODOLOGI

Berdasarkan tahapan-tahapan yang telah dikemukakan, metode yang dilakukan dapat digambarkan secara umum berdasarkan diagram alir seperti pada Gbr. 2.

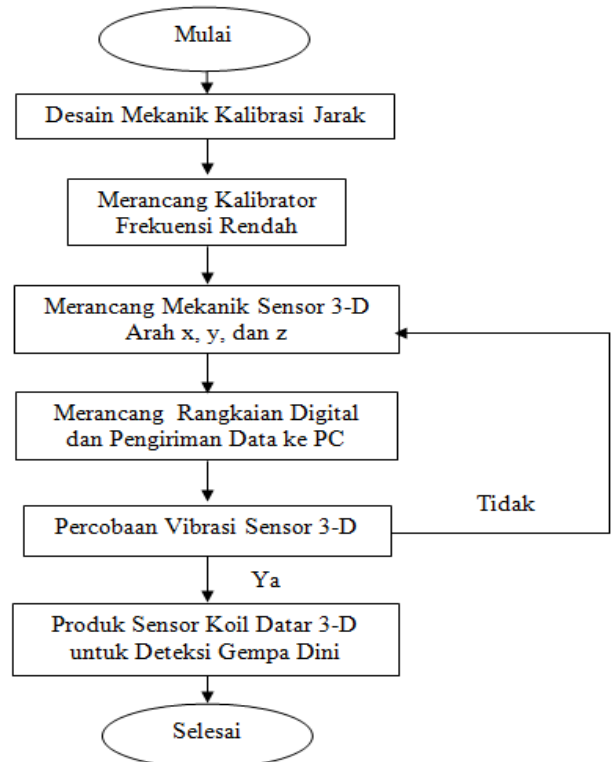
Hasil akhir perancangan berdasarkan Gbr. 2 adalah sensor koil datar 3-D yang digunakan untuk mendeteksi secara dini getaran gempa, khususnya di wilayah Lombok, NTB. Adapun penjelasan secara detail tahapan-tahapan tersebut adalah sebagai berikut.

A. Desain Kalibrasi Jarak

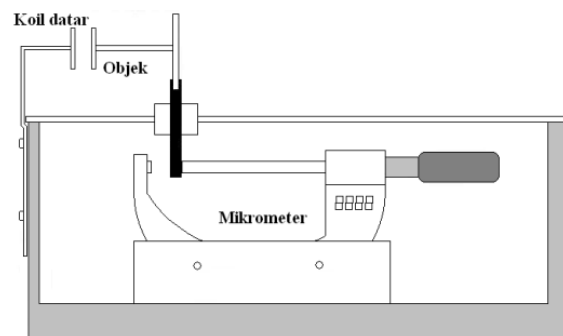
Getaran merupakan gangguan yang bergerak secara periodik dengan amplitude tertentu. Karena itu, agar koil dapat digunakan sebagai sensor getaran, maka harus dilakukan uji karakteristik statisnya. Koil datar yang digunakan adalah sebanyak tiga jenis koil yang memiliki diameter dan jumlah lilitan yang sama. Untuk keperluan ini, dibuat suatu objek yang dapat mengatur jarak massa pengganggu ke koil. Bagian mekanis ini terdiri atas mikrometer digital yang dapat diatur perubahannya jaraknya dengan ketelitian 1µm, bantalan objek yang dapat didorong oleh mikrometer sekrup, tempat meletakkan koil datar, dan keseluruhan bagian tersebut disatukan dengan bodi (*body*). Gambar bagian mekanis dari sistem ini dapat dilihat pada Gbr. 3.

Cara kerja alat ini berdasarkan Gbr. 3 adalah dengan cara menarik atau mendorong bantalan mikrometer sehingga objek dapat menjauhi atau mendekati koil datar. Sensor yang

dirancang adalah sensor getaran 3-D, sehingga digunakan tiga buah koil datar. Oleh Karena itu, pengkalibrasian kedua sensor koil datar dilakukan satu demi satu dengan melakukan pengaturan sedemikian rupa sehingga karakteristik statis ketiga sensor memiliki hasil yang sama (mendekati nilai yang sama). Kalibrasi dilakukan dengan terlebih dahulu memberikan jarak terjauh antara objek dengan koil datar sebesar 15 mm untuk masing-masing sensor, sehingga koil datar hanya memungkinkan mendekati objek. Jarak ini digunakan untuk menentukan daerah kerja masing-masing dari ketiga sensor koil datar.



Gbr. 2 Diagram alir langkah-langkah perancangan.

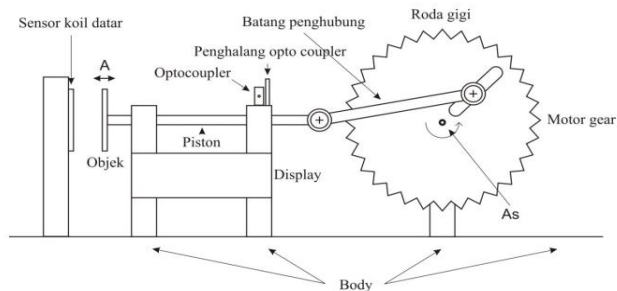


Gbr. 3 Bagian mekanis pengkalibrasi karakteristik statis sensor koil datar.

B. Desain Kalibrator Frekuensi Rendah

Sensor koil datar yang dirancang adalah untuk mendeteksi getaran dalam arah x, y, dan z pada frekuensi rendah. Karena itu, perlu dibuat rangkaian yang dapat menghasilkan getaran frekuensi rendah, khususnya di bawah 1 Hz. Selain frekuensi

1 Hz, dibuat juga kalibrator sampai 10 Hz dengan cara menambahkan gir konversi pada kalibrator 1 Hz. Tujuannya adalah untuk mengetahui frekuensi karakteristik sensor. Gambar sistem tersebut dapat dilihat pada Gbr. 4.



Gbr. 4 Sistem mekanis kalibrator frekuensi rendah.

Sistem ini, berdasarkan Gbr. 4, terdiri atas motor gir, batang penghubung, sensor *optocoupler*, objek, dan sensor koil datar. Kecepatan putaran motor gir ini dapat diatur dengan potensiometer yang kemudian diteruskan ke batang penghubung ke objek. Dapat dilihat dari gambar bahwa jika motor berputar maka objek akan bergerak bolak-balik secara horizontal. Pada batang penghubung dipasang *barrier* atau penghalang untuk sensor *optocoupler* sehingga frekuensi pergerakan batang dapat dihitung [5].

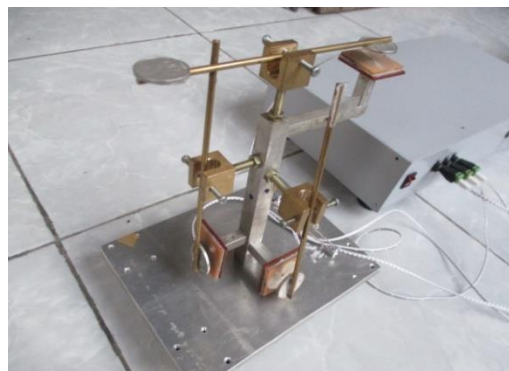
C. Perancangan Bagian Mekanis Sensor Getaran 3-D

Aplikasi akhir sensor koil datar adalah untuk mengukur frekuensi getaran gempa bumi pada arah tiga dimensi, yaitu arah x, y, dan z. Gempa bumi merupakan getaran yang selain memiliki besar, juga memiliki arah, karena pada dasarnya getaran gempa merambat ke segala arah. Oleh karena itu, pada makalah ini dirancang sensor getaran yang dapat mendeteksi getaran secara 3-D, dalam arah x, y, dan z. Bagian mekanis sensor tiga dimensi ini tersusun atas tiga buah sensor koil datar dan bandul yang dipasang sedemikian rupa sehingga masing-masing memiliki arah getaran dalam arah sumbu x, y, dan z. Adapun ketiga sensor koil datar tersebut dipasang pada tiga buah bandul yang saling tegak lurus satu sama lain, sehingga jika ada objek yang bergetar maka ketiga bandul akan bergetar saling tegak lurus. Bahan pengganggu pada koil datar dapat menjauh dan mendekati koil datar sesuai dengan gerakan harmonis bandul terhadap titik seimbangannya. Rancangan sistem sensor 3-D dengan bandul ditunjukkan pada Gbr. 5.

Berdasarkan Gbr. 5 tampak jelas bentuk sistem sensor 3-D, yaitu bandul x, y, dan z saling bergerak tegak lurus satu sama lain. Sistem ini digerakkan menggunakan kalibrator yang terdiri atas motor gir melalui tuas yang dihubungkan ke roda pada motor, sehingga terjadi konversi dari gerak putaran menjadi gerakan pada arah horizontal. Gerakan bolak balik arah horizontal ini terjadi karena pada alas bodi sensor diberikan roda. Adapun bagian-bagian dari sistem mekanis sensor 3-D adalah sebagai berikut.

1) *Bodi Sistem Sensor Koil Datar*: Bodi sensor koil datar 3-D dibuat dari bahan aluminium. Hal ini dimaksudkan agar

posisi bandul dan koil datar tetap dan tidak berubah. Pada tiang statif sebagai penyangga utama akan diberikan tiga buah penjepit statif. Pada masing-masing statif sebagai bandul diletakkan bahan pengganggu berupa uang logam pecahan Rp. 500 yang sudah dihaluskan permukaannya dalam arah sumbu x, y, dan z. Bodi mempunyai empat roda pada alas yang mempermudah gerakan bodi secara periodik.

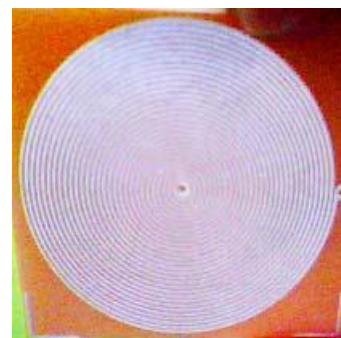


Gbr. 5 Rancangan sistem bandul mekanis sensor 3D.

2) *Tiang Penyangga*: Tiang penyangga berfungsi menyangga penjepit statif untuk meletakkan bandul dan sensor koil datar agar tetap berada dalam arah x, y, dan z. Tiang penyangga terbuat dari tiang statif. Pada bagian tengah dari tiang penyangga untuk arah x dan y terdapat pengunci untuk mengatur jarak antara sensor koil datar dengan bahan pengganggu, sedangkan dalam arah z ditaruh dalam posisi yang berbeda.

3) *Elemen Koil Datar*: Untuk membuat sensor koil datar 3-D, elemen koil datar yang akan digunakan adalah tiga buah koil datar. Masing-masing koil datar terbuat dari PCB yang dibuat jalur-jalur sebanyak 25 lilitan berdiameter 3 cm dengan nilai masing-masing induktans sebesar $7,8 \mu\text{H}$. Gbr. 6 menunjukkan salah satu elemen koil datar [5].

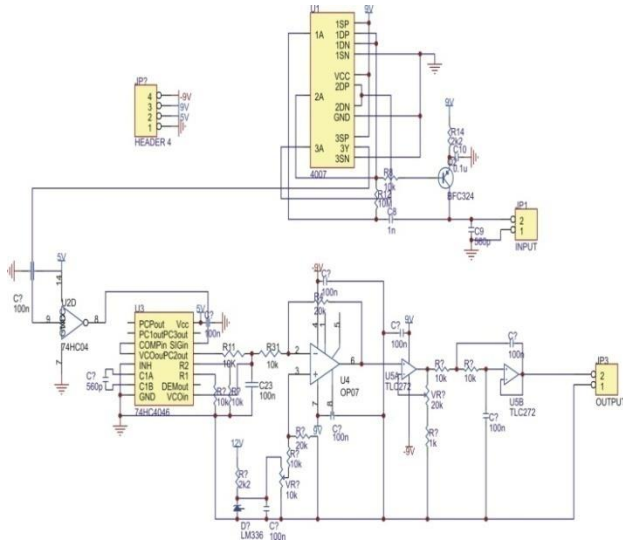
Berdasarkan Gbr. 6, koil datar terdiri atas jalur-jalur sebanyak 25 lilitan membentuk spiral. Bagian ujung tengahnya dihubungkan dengan kutub positif dan bagian ujung pinggirnya dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan, sehingga akan mengalir arus pada jalur tersebut, yang menginduksi arus Eddy pada permukaan logam pengganggu. Adapun logam pengganggu yang digunakan adalah uang logam pecahan Rp. 500 yang sudah dihaluskan pada kedua sisinya.



Gbr. 6 Elemen sensor koil datar.

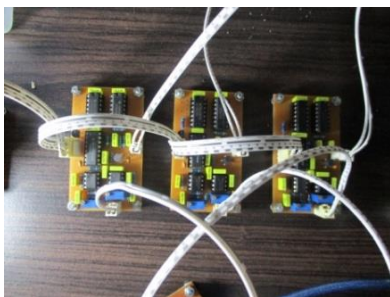
D. Perancangan Rangkaian Pengolah Isyarat Analog Sensor 3-D

Rangkaian pengolah isyarat analog terdiri atas pengolah isyarat sensor, filter, dan penguat diferensial. Untuk dapat mencatat secara elektronik diperlukan sensor atau *transducer* untuk mengubah besaran-besaran fisis menjadi tegangan listrik. Diagram blok rangkaian pengolah isyarat analog ini dapat dilihat pada Gbr. 7.



Gbr. 7 Diagram blok rangkaian pengolah isyarat analog.

Tegangan keluaran, berdasarkan Gbr. 7, harus bernilai negatif, karena tegangan negatif menunjukkan bahwa sensor memiliki respons yang baik terhadap logam pengganggu. Adapun konfigurasi komponen rangkaian pengolah isyarat ditunjukkan pada Gbr. 8.



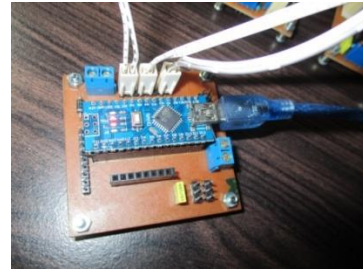
Gbr. 8 Pengolah isyarat analog arah x, y, dan z.

Pengolah isyarat, berdasarkan Gbr. 8, disusun menjadi tiga posisi untuk merepresentasikan arah x, y, dan z sedemikian rupa sehingga menghasilkan tegangan keluaran masing-masing dalam bentuk 3-D.

E. Perancangan Rangkaian Digital dan Pengiriman Data

Pada sistem ini, data hasil pengukuran dikirim secara serial ke komputer (PC). Pada prinsipnya, komunikasi serial ialah komunikasi dengan pengiriman data dilakukan per bit, sehingga lebih lambat dibandingkan komunikasi paralel seperti pada *port printer* yang mampu mengirim 8 bit sekaligus dalam sekali detak [6]. Adapun untuk pengiriman

secara serial ke PC digunakan Arduino Nano sebagaimana tampak pada Gbr. 9.



Gbr. 9 Sistem pengiriman serial ke PC menggunakan Arduino Nano.

Berdasarkan Gbr. 9, tegangan keluaran analog sensor dalam arah x, y, dan z dihubungkan ke mikrokontroler Arduino Uno. Tegangan keluaran analog dari sensor diubah menggunakan ADC menjadi tegangan digital yang kemudian diteruskan dan direkam di dalam PC.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

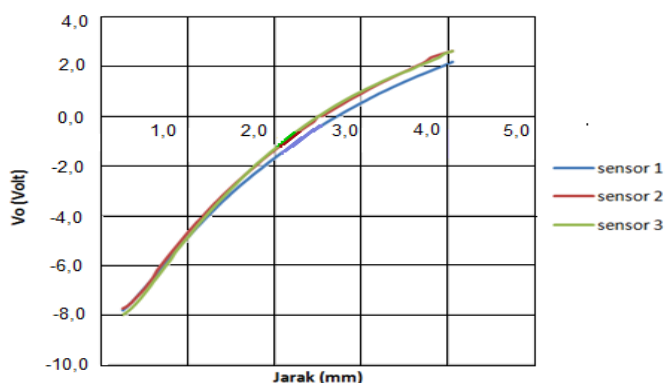
Dalam bagian ini akan dijelaskan hasil yang sudah didapatkan dari perancangan yang sudah dilakukan. Perancangan ini merupakan pengembangan dari penelitian tahun 2014. Penelitian sebelumnya pada tahun 2014 membahas sensor getaran berbasis koil datar 2-D untuk mengukur frekuensi getaran gempa secara dini di wilayah Lombok, NTB. Penelitian pada tahun 2014 memiliki tujuan untuk mengukur frekuensi getaran gempa pada arah x dan y, sedangkan perancangan kali ini adalah untuk mengukur frekuensi getaran gempa pada arah x, y, dan z serta dihubungkan ke *server internet*.

A. Karakteristik Statis Sensor

Hasil pengukuran jarak antara koil datar dan logam pengganggu diperoleh daerah tegangan keluaran sensor yang bernilai positif terjadi nilai tegangan keluaran yang cenderung konstan, yaitu pada jarak yang semakin jauh dengan koil datar (saturasi). Pada daerah ini perubahan tegangan keluaran akibat perubahan jarak tidak begitu sensitif. Sementara, pada tegangan keluaran negatif, tegangan keluaran cenderung linier terhadap jarak. Pada jarak yang cukup dekat antara koil datar dengan bahan pengganggu, terjadi perubahan tegangan secara drastis, yaitu tegangan tidak linier lagi. Daerah linier ini merupakan daerah yang dapat menggambarkan respons sensor terhadap objeknya. Daerah ini disebut dengan daerah kerja sensor. Daerah kerja diambil berdasarkan pola yang dibentuk dari kurva tersebut dapat didekati dengan suatu fungsi atau tidak. Fungsi yang paling sering digunakan adalah fungsi linier, tetapi untuk lebih mendapatkan hasil yang lebih baik dapat juga didekati dengan fungsi polinomial orde banyak dan fungsi lainnya.

Untuk sensor I, sensor II, dan sensor III, daerah kerja yang dapat diambil adalah antara 0,250 – 4,050 mm. Kurva pada daerah tersebut membentuk hasil yang kontinu, sehingga diperkirakan dapat didekati dengan suatu fungsi dengan baik. Daerah kurva yang lebih kecil dari 0,250 mm terlihat sudah mulai mengalami nilai yang tetap (saturasi), sehingga tidak

kontinu dengan data yang lainnya. Akibatnya, akan sulit untuk didekati dengan suatu fungsi. Daerah kerja ketiga sensor ditunjukkan oleh Gbr. 10.



Gbr. 10 Tegangan keluaran terhadap jarak pada jangkauan antara 0,20 – 4,05 mm.

Berdasarkan Gbr. 10, bentuk kurva ketiga sensor pada daerah kerja menunjukkan bahwa pada jarak yang semakin dekat, kurva mendekati linier, sehingga sensitivitas sensor semakin besar, sedangkan pada jarak maksimum sensitivitas sensor sangat kecil.

B. Karakteristik Dinamis Sensor

Karakteristik dinamis sensor (kalibrasi) dilakukan dengan memberikan masukan pada rangkaian antarmuka yang berasal dari keluaran sensor koil datar. Kemudian rangkaian antarmuka merekam dan menampilkan data hasil akuisisi data. Kalibrasi dilakukan untuk sensor I, II, dan III dengan menggunakan bandul pada arah x, y, dan z yang digetarkan menggunakan vibrator. Rangkaian sistem sensor 3-D tampak pada Gbr. 11.



Gbr. 11 Sistem sensor gempa dini 3D.

Kalibrasi sensor 3-D berdasarkan Gbr. 11 menghasilkan nilai tegangan keluaran sensor pada PC. Tegangan keluaran berubah terhadap waktu sebanding dengan adanya perubahan jarak logam pengganggu terhadap komponen lilitan koil datar, sehingga tegangan keluaran membentuk gelombang sinusoidal.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, satuan yang digunakan dalam mengukur getaran gempa adalah Hz. Hal ini tentu berbeda dengan satuan kekuatan gempa yang

menggunakan skala Richter sebagaimana yang digunakan saat ini. Namun, pada dasarnya satuan frekuensi dan skala Richter memiliki hubungan yang sebanding satu sama lain. Jika frekuensi getaran gempa tinggi (dalam satuan Hz) maka kekuatan gempa juga tinggi (dalam satuan skala richter). Selain dapat mengukur frekuensi getaran, sensor koil datar 3-D juga dapat mengukur nilai amplitude getaran dalam satuan volt. Nilai tegangan keluaran pada titik paling tinggi menunjukkan adanya amplitude getaran gempa pada nilai terbesar. Hal ini juga sangat sesuai dengan satuan skala Richter, yaitu semakin tinggi kekuatan getaran gempa, maka amplitude getaran gempa juga semakin besar.

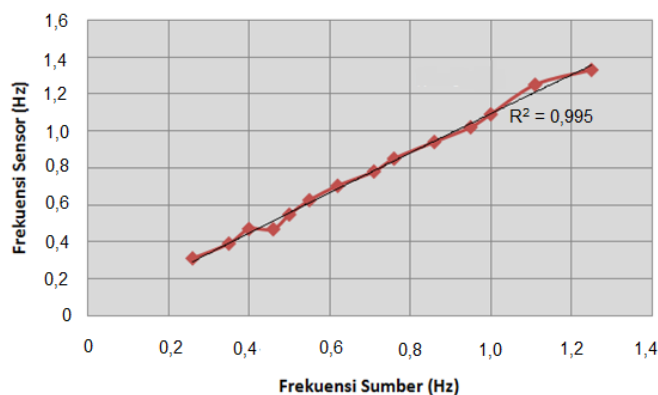
Kalibrasi pada masing-masing sensor koil datar memiliki prinsip yang sama, yaitu memberikan getaran dengan amplitude dan frekuensi tertentu dalam arah x, y, dan z. Hasil kalibrasi ketiga sensor dapat dijelaskan sebagai berikut.

1) *Kalibrasi sensor I (arah x):* Kalibrasi dilakukan dengan memberikan getaran pada sensor yang berasal dari sumber penggetar dengan amplitude tetap, yaitu 1 cm. Frekuensi sumber getaran dapat diatur nilai frekuensinya mulai dari 0 sampai frekuensi maksimum 1 Hz. Hasil kalibrasi sensor I (arah x) disajikan pada Tabel I.

TABEL I
HASIL KALIBRASI SENSOR I (ARAH X)

Frekuensi Sumber (Hz)	Frekuensi sensor (Hz)	Kesalahan Absolut (Hz)	Kesalahan Relatif (%)
0,26	0,31	0,014	0,945
0,35	0,39	-0,003	-0,204
0,4	0,469	0,019	1,259
0,46	0,468	-0,042	-2,776
0,5	0,547	-0,010	-0,630
0,55	0,625	0,012	0,813
0,62	0,703	0,014	0,952
0,71	0,78	-0,004	-0,274
0,76	0,85	0,011	0,737
0,86	0,94	-0,005	-0,305
0,95	1,02	-0,019	-1,282
1,0	1,09	-0,003	-0,214
1,11	1,25	0,039	2,572
1,25	1,33	-0,025	-1,632

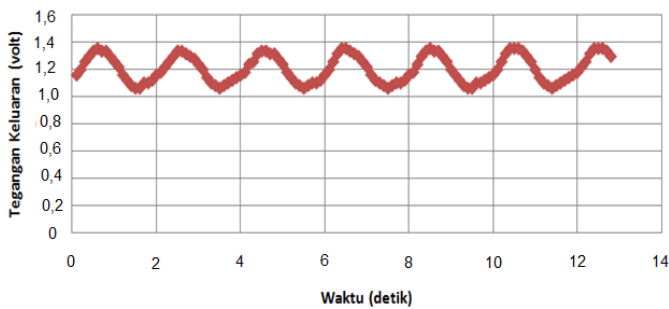
Berdasarkan Tabel I, dapat digambarkan grafik hubungan antara frekuensi yang dihasilkan sensor I dengan frekuensi sumber, seperti tampak pada Gbr. 12.



Gbr. 12 Hubungan antara frekuensi sensor I terhadap frekuensi sumber.

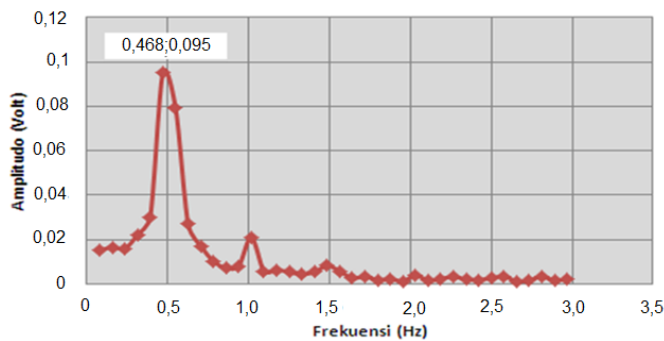
Berdasarkan Gbr. 12, tampak bahwa frekuensi yang dihasilkan oleh sensor I hampir sama dengan frekuensi sumber. Ketika frekuensi sumber bertambah, frekuensi sensor juga semakin besar. Jika didekati dengan kurva linier, hubungannya cukup linier dengan nilai $R^2 = 0,995$. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat respons yang sangat bagus antara frekuensi sumber dengan frekuensi yang dihasilkan sensor.

Dengan mengambil salah satu bentuk gelombang tegangan keluaran sensor I, yaitu pada frekuensi sumber 0,46 Hz, maka bentuk gelombang tegangan keluaran terhadap waktu tampak seperti Gbr. 13.



Gbr. 13 Kalibrasi tegangan keluaran sensor I frekuensi sumber 0,46 Hz.

Dengan menggunakan FFT, dari grafik pada Gbr. 13 dapat ditentukan frekuensi dan amplitude getaran sensor [7]. Grafik FFT untuk frekuensi sumber 0,46 Hz disajikan pada Gbr. 14.



Gbr. 14 Grafik FFT pada frekuensi sumber 0,46 Hz..

Berdasarkan Gbr. 14, frekuensi getaran sensor I adalah sebesar 0,468 Hz dengan amplitude 0,095 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi yang diukur oleh sensor I sangat mendekati frekuensi sumber 0,46 Hz.

2) *Kalibrasi sensor II (arah y)*: Kalibrasi dilakukan dengan memberikan getaran pada sensor yang berasal dari sumber penggetar dengan amplitude tetap, yaitu 1 cm. Frekuensi sumber getaran dapat diatur nilai frekuensinya mulai dari 0 sampai frekuensi maksimum 1 Hz. Hasil kalibrasi sensor II (arah y) ditampilkan pada Tabel II.

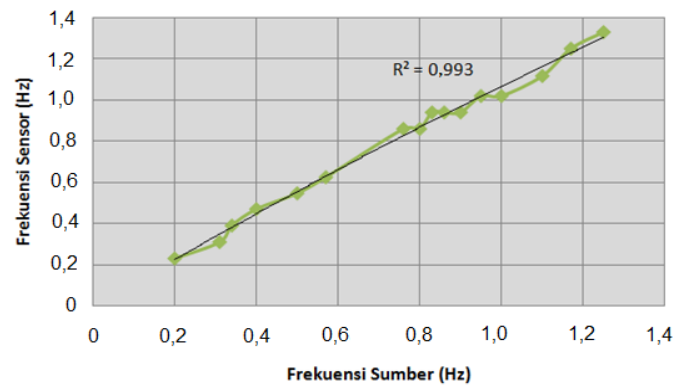
Berdasarkan Tabel II, dapat digambarkan grafik hubungan antara frekuensi yang dihasilkan sensor II dengan frekuensi sumber, seperti tampak pada Gbr. 15.

Berdasarkan Gbr. 15, tampak bahwa frekuensi yang dihasilkan oleh sensor II hampir sama dengan frekuensi sumber. Ketika frekuensi sumber bertambah, maka frekuensi

sensor juga semakin besar. Jika didekati dengan kurva linier, hubungannya cukup linier dengan nilai $R^2 = 0,993$. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat respons yang sangat bagus antara frekuensi sumber dengan frekuensi yang dihasilkan sensor. Hal ini berarti frekuensi sumber berbanding lurus (linier) dengan frekuensi yang diukur oleh sensor.

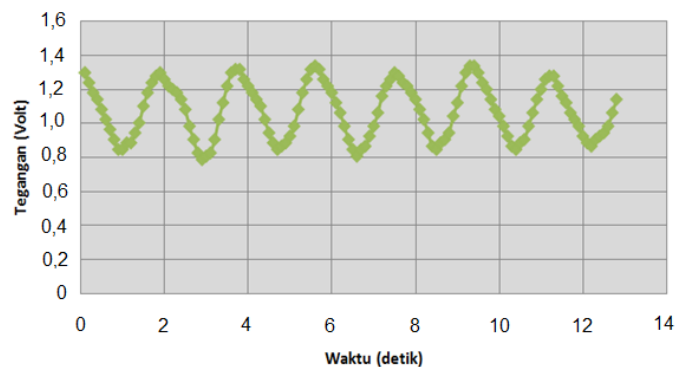
TABEL II
HASIL KALIBRASI SENSOR II (ARAH Y)

Frekuensi Sumber (Hz)	Frekuensi sensor (Hz)	Kesalahan Absolut (Hz)	Kesalahan Relatif (%)
0,2	0,23	-0,006	-0,432
0,31	0,31	-0,039	-2,699
0,34	0,39	0,008	0,552
0,4	0,47	0,025	1,733
0,5	0,5468	-0,001	-0,057
0,57	0,625	0,005	0,315
0,76	0,86	0,041	2,836
0,8	0,86	0,001	0,078
0,83	0,94	0,048	3,328
0,86	0,94	0,018	1,259
0,9	0,94	-0,022	-1,500
0,95	1,02	0,005	0,371
1,0	1,02	-0,045	-3,077
1,1	1,117	-0,051	-3,524



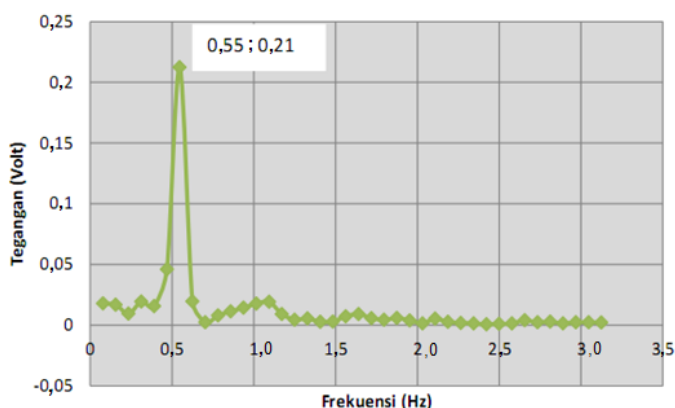
Gbr. 15 Hubungan antara frekuensi sensor II terhadap frekuensi sumber.

Dengan mengambil salah satu bentuk gelombang tegangan keluaran sensor II, yaitu pada frekuensi sumber 0,5 Hz, maka bentuk gelombang tegangan keluaran terhadap waktu tampak seperti Gbr. 16.



Gbr. 16 Kalibrasi tegangan keluaran sensor II frekuensi sumber 0,5 Hz.

Dengan menggunakan FFT, dari grafik pada Gbr. 16 dapat ditentukan frekuensi dan amplitude getaran sensor. Grafik FFT untuk fekuensi sumber 0,5 Hz tampak seperti Gbr. 17.



Gbr. 17 Grafik FFT pada frekuensi sumber 0,5 Hz..

Berdasarkan Gbr. 17, frekuensi getaran sensor II adalah sebesar 0,55 Hz dengan amplitude 0,21 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi yang diukur oleh sensor II sangat mendekati frekuensi sumber 0,5 Hz. Mendekati yang dimaksud dalam hal ini adalah untuk menggambarkan nilai frekuensi sumber getaran (vibrator) memiliki nilai yang hampir sama dengan frekuensi yang diukur oleh sensor.

3) Kalibrasi sensor III (arah z): Kalibrasi dilakukan dengan memberikan getaran pada sensor yang berasal dari sumber penggetar dengan amplitude, tetap yaitu 1 cm. Frekuensi sumber getaran dapat diatur nilai frekuensinya mulai dari 0 sampai frekuensi maksimum 1 Hz. Hasil kalibrasi sensor III (arah z) tampak pada Tabel III.

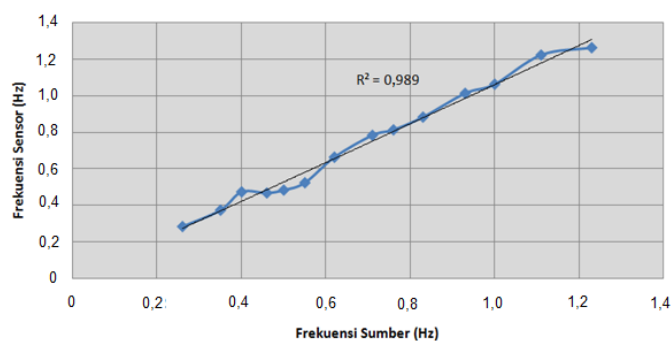
TABEL III
HASIL KALIBRASI SENSOR III (ARAH Z)

Frekuensi Sumber (Hz)	Frekuensi sensor (Hz)	Kesalahan Absolut (Hz)	Kesalahan Relatif (%)
0,26	0,28	0,014	0,945
0,35	0,37	-0,003	-0,204
0,4	0,47	0,019	1,259
0,46	0,464	-0,042	-2,776
0,5	0,48	-0,01	-0,63
0,55	0,52	0,012	0,813
0,62	0,66	0,014	0,952
0,71	0,78	-0,004	-0,274
0,76	0,81	0,011	0,737
0,83	0,88	-0,005	-0,305
0,93	1,01	-0,019	-1,282
1,0	1,06	-0,003	-0,214
1,11	1,22	0,039	2,572
1,23	1,26	-0,025	-1,632

Berdasarkan Tabel III, tampak bahwa nilai frekuensi sumber hampir sama dengan nilai frekuensi yang diukur oleh sensor. Dari nilai frekuensi pada Tabel III dapat digambarkan grafik hubungan antara frekuensi yang dihasilkan sensor III dengan frekuensi sumber, seperti tampak pada Gbr. 18.

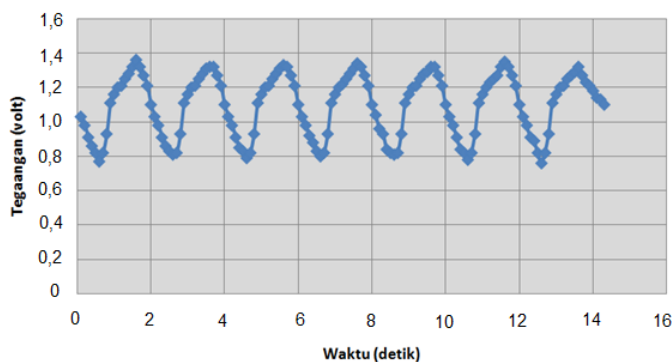
Berdasarkan Gbr. 18, tampak bahwa frekuensi yang dihasilkan oleh sensor III hampir sama dengan frekuensi

sumber. Ketika frekuensi sumber bertambah, maka frekuensi sensor juga semakin besar. Jika didekati dengan kurva linier, hubungannya cukup linier dengan nilai $R^2 = 0,989$. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat respons yang sangat bagus antara frekuensi sumber dengan frekuensi yang dihasilkan sensor.



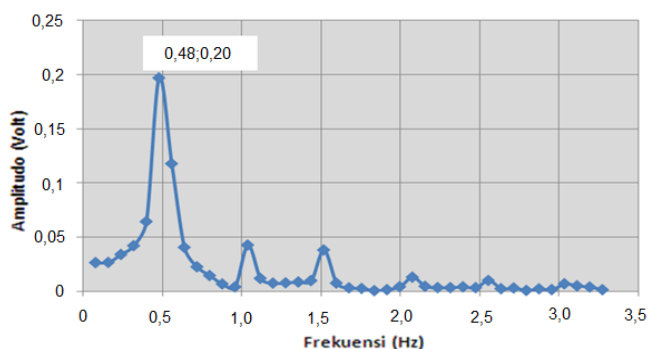
Gbr. 18 Hubungan antara frekuensi sensor III terhadap frekuensi sumber.

Dengan mengambil salah satu bentuk gelombang tegangan keluaran sensor III, yaitu pada frekuensi sumber 0,5 Hz, maka bentuk gelombang tegangan keluaran terhadap waktu tampak seperti Gbr. 19.



Gbr. 19 Kalibrasi tegangan keluaran sensor III frekuensi sumber 0,5 Hz.

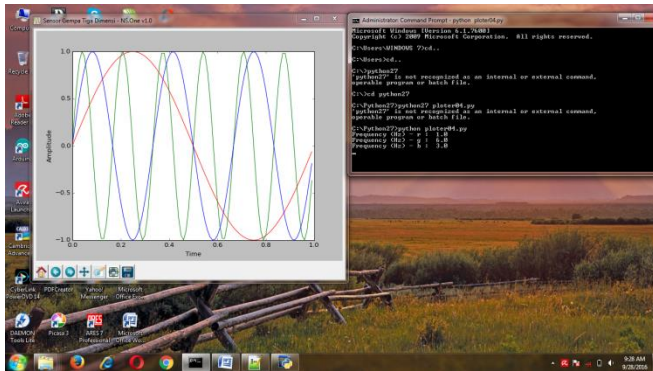
Dengan menggunakan FFT, dari grafik pada Gbr. 19 dapat ditentukan frekuensi dan amplitude getaran sensor. Bentuk gelombang *sinusoidal* terjadi karena adanya peristiwa mendekat dan menjauhnya logam pengganggu terhadap koil datar. Grafik FFT untuk fekuensi sumber 0,5 Hz tampak seperti Gbr. 20.



Gbr. 20 Grafik FFT pada frekuensi sumber 0,5 Hz.

Berdasarkan Gbr. 20 tampak frekuensi getaran sensor III sebesar 0,48 Hz dengan amplitude 0,21 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi yang diukur oleh sensor III sangat mendekati frekuensi sumber 0,5 Hz.

Kalibrasi sensor 3-D telah dilakukan dengan cara menguji masing-masing sensor arah x, y, dan z secara terpisah. Jika dikalibrasi secara bersamaan dengan bandul mekanis 3-D, maka tampilan bentuk gelombang beserta frekuensinya tampak seperti pada Gbr. 21.



Gbr. 21 Nilai frekuensi sensor 3-D beserta bentuk gelombang.

Berdasarkan Gbr. 21 dan dengan menggunakan program akuisisi data Arduino tampak bahwa bentuk gelombang getaran sensor arah x, y, dan z dapat ditampilkan. Selain itu, nilai frekuensi tiap sensor arah x, y, dan z dapat dihitung secara langsung (*real time*).

Adapun aplikasi secara praktis sensor koil datar 3-D untuk gempa dini dilakukan dengan meletakkan sensor pada lokasi yang jauh dari permukiman penduduk. Hal ini dilakukan dengan tujuan mencegah pengaruh adanya getaran yang muncul dari getaran selain gempa. Untuk melindungi bodi sensor dari gangguan akibat gejala alam atau gangguan hewan, bodi sensor ditutup menggunakan pengaman terutama berbentuk boks. Jika gempa terjadi, maka bandul arah x, y, dan z akan langsung bergetar sesuai dengan frekuensi getaran gempa. Jika frekuensi gempa besar maka akan mengakibatkan gerakan bolak balik uang logam (bandul) semakin cepat, begitu juga sebaliknya. Selain dapat merekam nilai tegangan keluaran sensor pada arah x, y, dan z sensor koil datar 3-D pada saat gempa terjadi, PC juga dapat menampilkan hasil perekaman data tegangan keluaran sensor berikut nilai frekuensinya. Sensor getaran berbasis koil datar ini dirancang untuk mendeteksi frekuensi getaran gempa pada frekuensi maksimum 1 Hz. Dengan demikian, pada saat frekuensi gempa dini sudah mencapai 1 Hz, maka alarm peringatan terhadap gempa dini menjadi aktif atau beroperasi sehingga masyarakat dapat lebih waspada untuk menghindari munculnya korban, baik korban materil maupun korban jiwa.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sensor koil datar 3-D, maka dapat diambil beberapa kesimpulan. Sensor getaran untuk mendeteksi getaran gempa dini sudah dirancang dan sudah mengalami proses kalibrasi. Rangkaian pengolah sinyal keluaran sensor getaran 3-D adalah sensor koil datar

arah x, y, dan z. Rumahan sensor getaran 3-D untuk mendeteksi gempa dini ini sudah dibuat dalam arah x, y, dan z namun masih dalam proses penyempurnaan. Perangkat lunak sensor getaran 3-D juga sudah berhasil dibuat. Perangkat lunak ini terdiri atas program sistem akuisisi data getaran menggunakan mikrokontroler Atmega 16 untuk merekam data tegangan dan Arduino Nano untuk menghitung frekuensi getaran. Berdasarkan kalibrasi yang sudah dilakukan, salah satu frekuensi getaran yang sudah bisa diukur adalah frekuensi sensor arah sumbu-x sebesar 0,468 Hz (frekuensi sumber 0,46 Hz), arah sumbu-y sebesar 0,55 Hz (frekuensi sumber 0,5 Hz), dan arah sumbu-z sebesar 0,48 Hz (frekuensi sumber 0,5 Hz).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan erima kasih dihaturkan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi RI yang telah mendanai penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Lembaga Penelitian (LEMLIT) Universitas Muhammadiyah Mataram, serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga penelitian ini dapat selesai dilaksanakan.

REFERENSI

- [1] Rahman, Muhammad Nurul, "Rancang bangun sistem alarm gempa bumi berbasis Mikrokontroler avr atmega 16 menggunakan sensor Piezoelektrik," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 4, no.4, ISSN:2302-8491, Oktober 2015.
- [2] Mitra Djamal, "Sensor, Teknologi dan Aplikasinya," *Prosiding Seminar Kontribusi Fisika, Seminar Kontribusi Fisika (SKF)*, Bandung, Indonesia, 1-2 Desember 2011, paper hal. 26 dari 216.
- [3] Islahudin, "Pengembangan Sensor Getaran Dua Dimensi Berbasis Koil Datar," Laporan Tesis S2, ITB, Bandung, Jawa Barat, Juni 2011.
- [4] Islahudin, "Sensor Getaran Berbasis Koil Datar untuk Deteksi Dini Gempa di Wilayah Lombok Nusa Tenggara Barat" *Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA (PRISMA SAINS)*, vol. 1, no. 2, ISSN 2338-4530, November 2013.
- [5] Islahudin, dan M. Firman Ramadhan, "Sensor Getaran Dua Dimensi (2-D) Berbasis Koil Datar Untuk Mengukur Frekuensi Getaran Gempa Di Wilayah Lombok Nusa Tenggara Barat," *Prosiding Seminar Nasional, Sains dan Inovasi Pembelajaran Berorientasi Kearifan Lokal, FPMIPA IKIP Mataram*, 22 November 2014, paper hal. 388.
- [6] Islahudin, dan Zulkarnain, "Sensor Getaran Berbasis Koil Datar Untuk Menghitung Frekuensi Getaran Bandul Matematis," *KONSTAN: Jurnal Fisika dan Pendidikan Fisika IAIN Mataram*, vol. 1. no.1, hal. 19-28, 2015.
- [7] Islahudin, "Analisis Daya Redam Vibrasi Pada Beberapa Struktur Tanah Keruk Pondasi Bangunan Menggunakan Sensor Getaran Berbasis Koil Datar di Kecamatan Batukliang Lombok Tengah Nusa Tenggara Barat," *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF), Kontribusi Fisika dan Pengajaran Fisika dalam Pengembangan Potensi Sumber Daya Lokal dan Lingkungan*, FMIPA Universitas Mataram-Lombok, 14-15 November 2015.