

Design and Implementation of The Earthquake Catcher Network

A Network of Low-Cost Strong Motion Sensors to Detect and Analyze Earthquakes

Kevin Shidqi^{1,a}, Ary Setijadi Prihatmanto^{2,b}, and Aciek Ida Wuryandari^{2,c}

¹*Teknik Elektro, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia.*

²*Laboratory of Control and Computer Systems, School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia.*

^aEmail: kevinshidqi@students.itb.ac.id, kev.prakoso95@gmail.com

^bEmail: asetijadi@lskk.ee.itb.ac.id,

^cEmail: aciek@lskk.ee.itb.ac.id

Abstract—The Earthquake Catcher Network (ECN) is a system to detect and analyze earthquakes, utilizing a network of low-cost earthquake sensors, connected via the internet to a central server to obtain seismic data, in addition to utilizing other data sources such other sensor networks. The sensors consist of an accelerometer to detect vibrations, a GPS receiver to obtain location data, and a Wi-Fi module to send the data via the internet, more specifically through the GSM network. The sensors are also equipped with a solar-based power system, which allows them to operate independently without external power sources. A central server then collects data from these sensors, and by combining said data with other sensor networks, will then detect whenever a strong vibration is detected by multiple sensors. It then determines whether or not an earthquake has happened, and if so, will calculate details about the earthquake such as its magnitude, location, and depth. Before giving a warning however, the system will cross-validate the detected earthquake event with other sources, including the USGS website and Indonesia's own sensor network. Then, if a warning is indeed needed, it will also give such a warning in several ways, some of which utilize social media. ECN also includes 2 software, one intended for the general public with a simpler appearance, and another intended for seismologists which includes advanced analysis interfaces.

Keywords—Earthquake Analysis Software; Seismic Waveform Data; Sensor Network; Server; Strong Motion Sensors

I. INTRODUCTION

Indonesia is located along the border of two large tectonic plates, namely, the Eurasian Plate and the Indo-Australian Plate. As fault lines between plates are often unstable, earthquakes are a familiar disaster in Indonesia, particularly for people living on the western coast of Sumatra or the southern coast of Java. These earthquakes also frequently occur under the sea, causing tsunamis when the massive disturbances in the ocean reaches the land. The damage and casualties inflicted by these disasters are often considerable, and in a few cases, catastrophic. Between 1991 and 2009, there have been a total of 30 damaging earthquakes and a total of 14 tsunamis, with the total casualties exceeding 300 thousand lives in Indonesia

alone. Therefore, on average there are 30 thousand people who lose their lives every year due to earthquakes and tsunamis.

Due to these disasters, in particular the catastrophic Sumatra-Andaman Earthquake of 2004 in which more than 230.000 lives were lost, Indonesia has constructed an early warning system consisting of several seismometers along the coasts near the Great Sunda Fault. The system, named InaTEWS, is not only limited to these seismometers however, but also includes buoys in the Indian Ocean, satellite communication systems, and an observation center. Since going into operation, the warning system has successfully registered thousands of earthquakes and more than ten tsunamis in Indonesia. Earthquake news and tsunami warnings are issued less than five minutes after a quake, followed by updates or an all-clear.

However, of the total 160 seismometers in InaTEWS, only 100 of them belong to the government of Indonesia. Furthermore, along the coasts nearest to the Great Sunda Fault, there are only 20 seismometers, which is lacking for a coastline that long. Seismometers are also costly and require a large installation to properly operate. ECN aims to complement these shortcomings, with a large network of independent and low-cost sensors, in order to increase the effectiveness of the early warning system.

II. DESIGN

A. Top-Level System

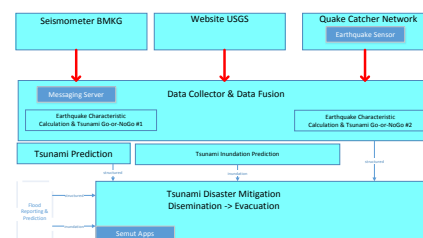


Fig. 1. Top-Level Design

ECN utilizes three data sources, namely, its own network of low-cost strong motion sensors, the website of the United States Geological Survey (USGS), and the already established network of Indonesian seismometers. Data from the sensors, which are seismic waveforms, are then collected in a single server and stored in database. If an earthquake happens, the system will detect it by measuring a strong wave in multiple sensors. The system will also analyze the seismic waves to determine important details about the earthquake, such as its magnitude, location, and depth. From these information, it will also determine whether or not there is a potential for a tsunami caused by said earthquake. Depending on the results of the analysis, it will then issue a warning through several media, such as Twitter and smart city applications.

The low-cost network of ECN is modeled after the Quake Catcher Network (QCN) [1] [2]. QCN, developed at Stanford University, is also a network of strong motion sensors, however, it depends on volunteer computers to send data to their servers whereas ECN sensors can operate independently. These sensors utilize an accelerometer to detect vibrations in the earth, which are then sent to the server via a GSM network. On the other hand, the data from the seismometers are sent directly from the central server of InaTEWS, and data from both sources are then used to analyze earthquakes. Information of the earthquake from the USGS website is then used to cross-validate the result of the analysis. Multiple data sources are used to ensure that the analysis is as accurate as possible, to prevent the risk of a false alarm.

B. Sensor Design

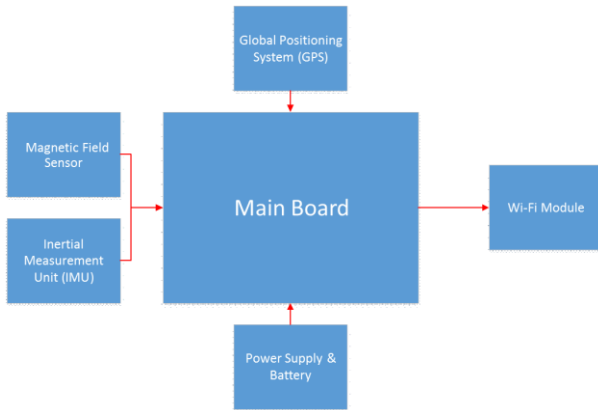


Fig. 2. Block Diagram of Sensors

The design of the sensor is as follows. The main board (A NodeMCU ESP8266) receives data from two sensors, the inertial measurement unit (IMU), and the GPS receiver. The IMU consists of an accelerometer and a magnetometer. The accelerometer will function as a seismograph, whereas the magnetometer will determine the orientation of the sensor. The GPS receiver will provide the location of the sensor, which is crucial in determining the location of a detected earthquake. The sensor is powered by a solar-based power system, consisting of a solar panel, a battery, and a charge controller to allow independent operation. The main board already includes a Wi-

Fi module, which allows it to send data via the GSM network to the server, with help of a modem.

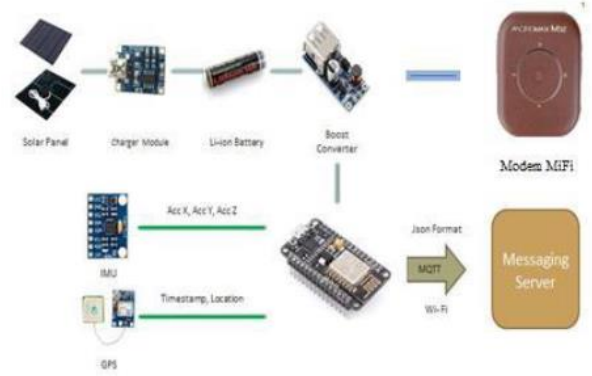


Fig. 3. Component Diagram of Sensors

The IMU, an MPU9255, includes a 16-bit, 3 axis accelerometer, to serve as the seismograph [3]. The accelerometer is configured with a range of 2g, which is the typical range in which earthquakes usually occur [4]. It also includes a 3-axis silicon monolithic Hall-effect magnetic sensor with a magnetic concentrator, to determine the deflection of the X axis of the accelerometer with the direction of the north. However, the magnetometer is used only when the first placement of the sensor is being done, to ensure that the sensor faces the north, in order to ease calculations of the seismic data. Both are connected to the main board via an I2C connection. A Ublox Neo-6M receiver is used as a GPS receiver, which is accurate to 2m. This receiver is connected via the UART port.

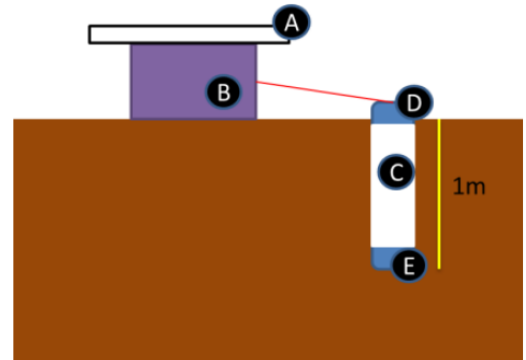


Fig. 4. Installation of Sensors

The IMU is placed underground in part (E) with a depth of about 1M so that the sensor is insensitive to noises such as a nearby pedestrian and connected through a PVC pipe (C) closed with (D) at the top. The IMU sensor is connected to the main module (B) with using a long cable through the PVC pipe (C). In the main module (B) there is a PCB Board that is already connected with the main NodeMCU board, while the GPS module is connected directly to ensure a strong signal. The MiFi module, and the power system, particularly the solar panel (A) is placed above the main module to get maximum sunlight intensity.

C. Communication Design

The communication protocol used in the ECN network is the Advanced Query Messaging Protocol (AMQP), mainly because its support of queueing messages. This protocol is used by a messaging vendor named RabbitMQ. RabbitMQ functions as a messaging broker, so that all data sent from the sensors are sent via the RabbitMQ. Any data not immediately received by the server will stay at the messaging broker as a “Queue”, so that when the server is down or otherwise not active, the data sent by the sensors are not lost. Furthermore, AMQP includes a message verification system, so that distorted messages are automatically discarded. This is important, because any distorted message may contain rogue data which may affect the analysis of said data. It is also very convenient to organize a large network using AMQP. [5]

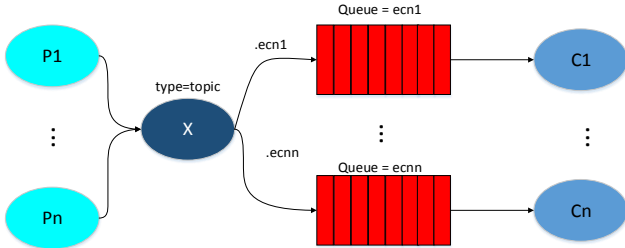


Fig. 5. Messaging Schematic

The design of the ECN also considers the possibility of having more than one client needing the sensors data. Therefore, AMQP is utilized to construct an architecture such as the one in the figure above. A central messaging server is used, which holds the data from all sensors temporarily. Then, the messaging server transmits the data to any requesting party, as long as the data is not expired yet. Note that Pn in this case may mean any data source, such as another earthquake sensor network, not necessarily of those belonging to the ECN network. The data is transmitted every second, each packet containing 40 samples of seismic data, as well as the position of the sensor. This is due to the 40 Hz sampling rate of the accelerometer. The GeoJSON format is used to transmit the data in order to ease the subsequent parsing and processing.

D. Software Design

The software to analyze the seismic data obtained from the aforementioned sources is based on several existing, open-source software. These software include Seiscomp3 [6] and Earthworm [7]. Many of the functions to determine details about the earthquake are directly imported from their respective libraries. The software was designed to provide a small but powerful tool to monitor the sensors as well as detect and analyze earthquakes, for both the general public or experienced seismologists. Therefore, there are several modes of display provided.

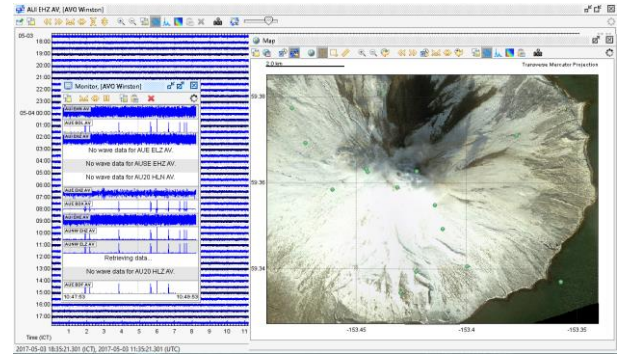


Fig. 6. Monitoring View

The figure above shows the software in its “Monitoring” mode. Such display allows easy monitoring of a special area such as a volcano. It shows a local map of a region which is being monitored, with the green dots denoting the locations of the currently active sensors. One can view different areas on the map by clicking the mouse and dragging it. The maps are provided by the USGS [8]. On the left side is a real-time display of the seismic waveforms being transmitted by the sensors. Sensors that are registered but are currently not active are also denoted by a light grey dot on the map, and a simple text on the real time display. Behind the real-time display is the helicorder display of a single sensor. The helicorder is designed to look like a traditional seismograph.

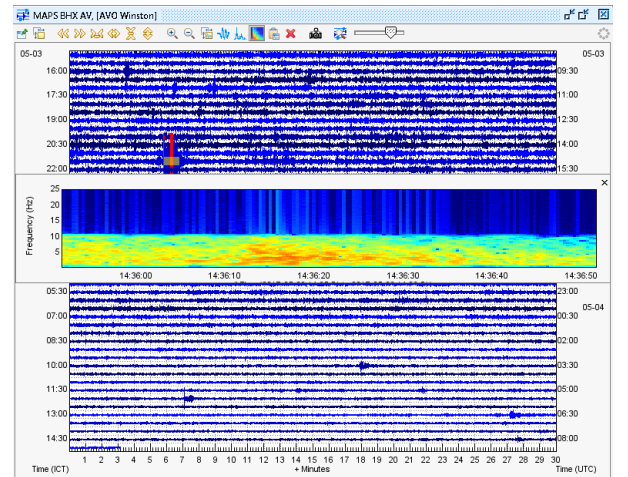


Fig. 7. Helicorder View

The helicorder view such as in the figure above allows one to analyze the seismic waveforms in detail, with the waveforms of over a day being displayed in the background. The waves are also color-coded by their amplitude, with colors going from light blue for weak waves to dark blue for strong vibrations. Red denotes a detected event, which if also detected at other sensors in a relatively short time interval, may indicate an earthquake happening. It is also possible to focus on a certain part of the wave. The highlighted display also shows the

frequency spectrum of the highlighted part of the wave. The display shows the frequency spectrum from 0 – 20 Hz, for every second, which is then color coded. Blue represents a weak frequency, while red represents a strong vibrations happening at that frequency.

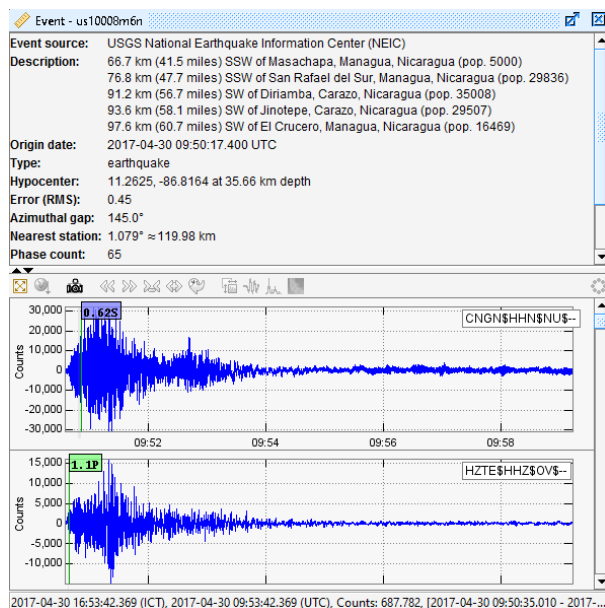


Fig. 8. Earthquake Analysis

If an earthquake is detected, it will subsequently be analyzed, and the resulting information will be shown in a display such as the one above. An earthquake is determined to have happened, if an event of the same frequency is detected by at least 3 sensors that are located nearby. This is because the algorithm requires 3 sensors to determine the epicenter of a quake. The average waveform at the exact time of the earthquake will be displayed as above. If possible, the primary wave and the secondary wave will be denoted. More will be explained in the following section.

The information provided is as follows. First, the event source, which denotes the network that detected the event. Then comes the description, which informs when and where the event was detected, including the distance of the sensors from both the epicentrum of the quake and the nearest population centers. Next, the location of the earthquake is informed, along with the depth of the earthquake measured from the ground level. The maximum error, azimuthal gap, and the nearest station to the epicentrum are also denoted.

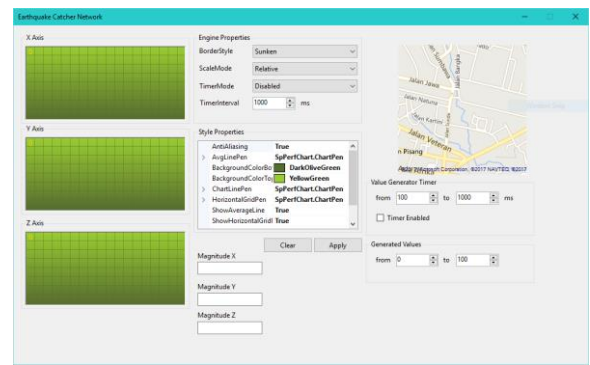


Fig. 9. General-Purpose GUI

The display above is the part of the software designed for the general public interested in simple earthquake sensor monitoring. The tabs on the left show the waves from each axes of the accelerometer on a single sensor. On the right, a map can be seen, which denotes the location of the sensors on local map. The map here is provided by Google Maps. It can also provide an alarm if more than one sensor indicate a strong vibration. The alarm will then be provided via the speakers of the computer, as well as through social media, although currently only twitter is supported.

E. Algorithms to Analyze Seismic Waves

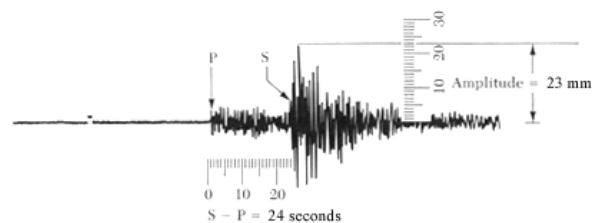


Fig. 10. Example of a seismic wave

The following will present the simplified method of determining the epicenter and magnitude of an earthquake from a seismograph reading. One minute intervals are marked by the small lines printed just above the waves made by the seismic activity (the time may be marked differently on some seismographs). The distance between the beginning of the first P wave and the first S wave tells you how many seconds the waves are apart. P waves denote the primary wave, which is the fastest component of a seismic wave, and will foretell another, more powerful secondary wave incoming. The distance between the P and S waves will be used to tell you how far your seismograph is from the epicenter of the earthquake.[9]

As a first step, we should measure the distance between the first P wave and the first S wave. In this particular case, the first P and S waves are 24 seconds apart. Then we should find the point for 24 seconds on the left side of the chart below and mark

that point. According to the chart, this earthquake's epicenter was 215 kilometers away. Then we should measure the amplitude of the strongest wave. The **amplitude** is the height (on paper) of the strongest wave. On this seismogram, the amplitude is 23 millimeters. Using the scale below, we can determine the magnitude of the earthquake, by using the distance and amplitude. This is primarily because the further away an earthquake happens, the weaker it is measured. Using a model of a chart below, we can find out the magnitude of an earthquake with ease.

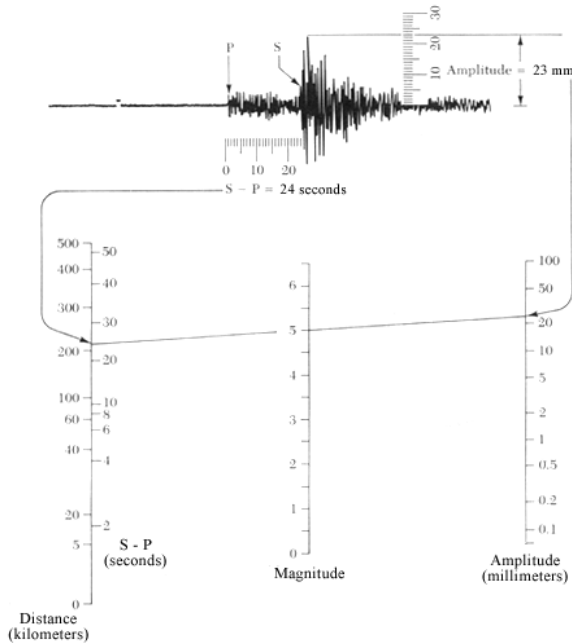


Fig. 11. Example of magnitude and location estimation

We have just figured out how far the seismograph is from the epicenter and how strong the earthquake was, but we still don't know exactly where the earthquake occurred. This is where the maps, the locations of the sensors sent by the GPS receivers, and records from the other sensor come in. The following technique is known as triangulation. One should first look at the scale of the map, and then draw a circle with the sensor as the center, and with a radius of the known distance from the calculation above. From the example above, we should draw a circle with a radius of 215 kilometers.

By doing the same thing for the distances to the epicenter that the other seismograms recorded (with the location of those seismographs at the center of their circles), all of the circles should overlap. The point where all of the circles overlap is the approximate epicenter of the earthquake. However, the depth of the quake is yet to be determined. The most obvious indication on a seismogram that can point to the depth of the earthquake is the small amplitude, or height, of the recorded surface waves and the uncomplicated character of the P and S waves. Although the surface-wave pattern does generally indicate that

an earthquake is either shallow or may have some depth, the most accurate method of determining the focal depth of an earthquake is to read a depth phase recorded on the seismogram. The depth phase is the characteristic phase pP-a P wave reflected from the surface of the Earth at a point relatively near the hypocenter. At distant seismograph stations, the pP follows the P wave by a time interval that changes slowly with distance but rapidly with depth. This time interval, pP-P (pP minus P), is used to compute depth-of-focus tables. Using the time difference of pP-P as read from the seismogram and the distance between the epicenter and the seismograph station, the depth of the earthquake can be determined from published travel-time curves or depth tables.[10]

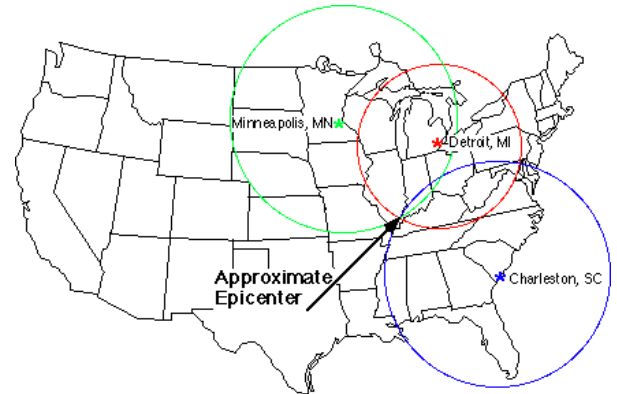


Fig. 12. Example of an epicenter estimation

III. IMPLEMENTATION AND TESTING

This section will show the implementation and subsequent testing of the sensors and the software.

A. Sensors

GPS accuracy testing is done by measuring GPS readings at a certain point by using the Ublox Neo-6m GPS module and compared to Google Maps longitude and latitude data readings at the same point. GPS testing is done at several points in the labtek VIII ITB, Labtek VII ITB, East GKU ITB, and ITB Doping Laboratory area.

The error obtained from the latitude reading in the Neo 6M GPS module is 0,000049 and the error of the longitude reading on the Neo 6M GPS module is 0,000048. On the equator, 1 degree of latitude is proportional to 110.57 km and 1 degree longitude is proportional to 111.32 km. So it can be concluded that latitude and longitude error of reading the GPS module Neo 6M is 5.41793 m and 5.34336 m. With known error and seismic wave velocity data range between 2-8 km / h, the time error is in the range of 2.385 - 9.72 s. Therefore, the uncertainty in determining the epicenter of the earthquake is around 100m.

The accelerometer calibration of MPU9255 is done by comparing the MPU9255 accelerometer reading results with vibration wave data from earthquake exciter. Here is the MPU9255 accelerometer calibration scheme.

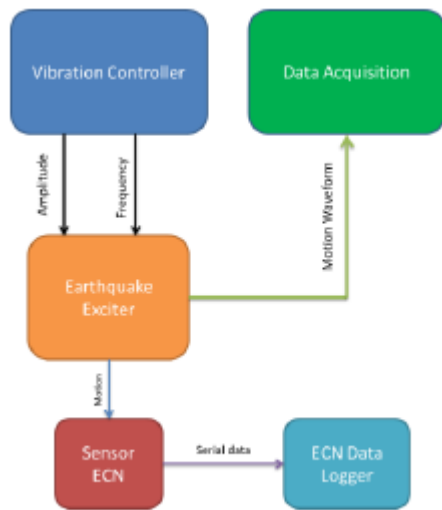


Fig. 13. Testing Schematic

Vibration controller is used to set the earthquake exciter frequency and magnitude wave and validated by data acquisition. The ECN seismic sensor is placed on an earthquake exciter and data readings recorded by the ECN data logger GUI. From the results of these readings, the sinusoidal interpolation in the data that has been obtained is performed so sensitivity sensors on certain amplitude and frequency is obtained. Interpolated data will be compared at 0.5G, 1.0G, and 1.5G amplitude at 5 Hz, 10 Hz, and 15 Hz frequencies. After interpolation it can be concluded that the reading relationships at different amplitude and in same frequency is linear, whereas reading at the same amplitude at different frequencies does not result different reading interpolation results. The sensitivity data obtained is implemented on the processing system using SeisComp3.

B. Software

The software is tested using the following method. Data from a network of earthquake sensors in Alaska are used to perform an analysis, particularly at times when an earthquake happened. The results of these analysis are then compared with the conclusions reached by the USGS as displayed on their website.

No.	Time	Coordinates	USGS	Analysis
1	2017-04-26 07:02:28 (UTC)	53.828°N 160.645°E	4.9	4.8765
2	2017-04-26	51.817°N 179.367°W	2.9	3.5638

	15:01:49 (UTC)			
3	2017-04-26 09:14:23 (UTC)	58.548°N 153.567°W	2.9	3.3653
4	2017-04-27 02:12:44 (UTC)	59.750°N 153.179°W	2.5	3.3673
5	2017-04-27 05:08:39 (UTC)	63.532°N 148.976°W	3.3	3.6563

Table 1 :Earthquake Testing

Due to the limited frequency of earthquakes, only 5 earthquakes were analyzed. From the table above, it can be inferred that the algorithm is reasonably accurate for earthquakes stronger than magnitude 4.

IV. CONCLUSION

Designed sensors is meet the price specification because it only takes cost of Rp2.280.000,00 to create an ECN sensor. Sensors can detect earthquakes with magnitude above 4 within 100 km radius because the IMU sensors used already meet the required specification resolution and sensor readings have been calibrated. The power sensor can work for 24 hours by implementing a power system design with a Li-ion battery configuration of 13600 mAh capacity and a total power supplied is 5 Wp from solar panels. Sensors can not perform seismic data sampling with 40 Hz frequency without interruption due to single-task programming algorithm, but the missing sampling time can be reduced by converting the float representation into a char representation on the message that sent to the server.

Reference

- [1] Ai Thinker Team (2015). ESP8266 WROOM WiFi Module Datasheet
- [2] http://nodemcu.com/index_en.html, diakses pada tanggal 9 Mei 2017 pada pukul 16.49
- [3] InvenSense (2014). MPU-9255 Product Specification DS-000007
- [4] U-blox (2011).U-blox 6 GPS Modules Data Sheet GPS.G6-HW-09005-E
- [5] Banks, Andrew & Gupta, Rahul (2014). MQTT Version 3.1.1, OASIS Standard
- [6] Chester Simpson (2011).Charateristics of Rechargeable Batteries SNVA533
- [7] Winter, M. & Brodd, J. (2004). "What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?"
- [8] NanJing Top Power ASIC Corp .TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8
- [9] Oswal, Mehul dkk. (2010). A comparative study of Lithium-Ion Batteries
- [10] Evans, J.R., Allen, R.M., Chung, A.I., Cochran, E.S., Guy, R., Hellweg, M., Lawrence, J.F., Performance of Several Low-Cost Accelerometers, Seism. Res. Letts., 85, 147-158, 2014.

Desain dan Implementasi Earthquake Catcher Network

Jaringan Sensor Gerak Kuat dengan Biaya Rendah untuk Mendeteksi dan Menganalisis Gempa Bumi

Kevin Shidqi^{1,a}, Ary Setijadi Prihatmanto^{2,b}, and Aciek Ida Wuryandari^{2,c}

¹Teknik Elektro, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia.

²Laboratorium Sistem Komputer dan Kendali, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia.

^aEmail: kevinshidqi@students.itb.ac.id, kev.prakoso95@gmail.com

^bEmail: asetijadi@lskk.ee.itb.ac.id,

^cEmail: aciek@lskk.ee.itb.ac.id

Abstrak— The Earthquake Catcher Network (ECN) adalah sebuah sistem untuk mendeteksi dan menganalisa gempa bumi, memanfaatkan jaringan sensor gempa berbiaya rendah, terhubung melalui internet ke server pusat untuk mendapatkan data seismik, selain memanfaatkan sumber data lain seperti jaringan sensor lainnya. Sensor terdiri dari accelerometer untuk mendeteksi getaran, penerima GPS untuk mendapatkan data lokasi, dan modul Wi-Fi untuk mengirim data melalui internet, lebih khusus lagi melalui jaringan GSM. Sensor juga dilengkapi dengan sistem tenaga surya berbasis, yang memungkinkan mereka untuk beroperasi secara independen tanpa sumber daya eksternal. Server sentral kemudian mengumpulkan data dari sensor ini, dan dengan menggabungkan data tersebut dengan jaringan sensor lainnya, kemudian akan mendeteksi kapan getaran kuat terdeteksi oleh beberapa sensor. Ini kemudian menentukan apakah gempa telah terjadi, dan jika demikian, akan menghitung rincian tentang gempa seperti besarnya, lokasi, dan kedalamannya. Namun sebelum memberikan peringatan, sistem akan menyahkan validasi kejadian gempa yang terdeteksi dengan sumber lain, termasuk situs web USGS dan jaringan sensor Indonesia sendiri. Kemudian, jika sebuah peringatan memang dibutuhkan, maka akan memberikan peringatan semacam itu dengan beberapa cara, beberapa di antaranya memanfaatkan media sosial. ECN juga mencakup 2 perangkat lunak, yang ditujukan untuk masyarakat umum dengan tampilan yang lebih sederhana, dan satu lagi ditujukan untuk ahli seismologi yang mencakup antarmuka analisis lanjutan.

Kata Kunci—Perangkat Lunak Analisis Gempa; Data Gelombang Seismik; Jaringan Sensor; Server; Sensor Gerak Kuat

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak di sepanjang perbatasan dua lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia. Karena garis patahan antara lempeng sering tidak stabil, gempa bumi merupakan bencana yang umum terjadi di Indonesia, terutama bagi orang-orang yang tinggal di pesisir barat Sumatra atau pantai selatan Jawa. Gempa bumi ini juga sering terjadi di bawah laut, menyebabkan tsunami saat terjadi gangguan besar di lautan. Kerusakan dan korban yang ditimbulkan oleh bencana ini seringkali cukup banyak, dan

dalam beberapa kasus, bencana. Antara 1991 dan 2009, telah ada total 30 gempa yang merusak dan total 14 tsunami, dengan total korban melebihi 300 ribu orang tinggal di Indonesia saja. Karena itu, rata-rata ada 30 ribu orang yang kehilangan nyawa setiap tahun akibat gempa bumi dan tsunami. Karena bencana ini, khususnya bencana gempa Sumatera-Andaman tahun 2004 yang menyebabkan lebih dari 230.000 nyawa hilang, Indonesia telah membangun sebuah sistem peringatan dini yang terdiri dari beberapa seismometer di sepanjang pantai-pantai di dekat Great Sunda Fault. Sistem yang dinamai InaTEWS, tidak hanya terbatas pada seismometer ini, namun juga mencakup pelampung di Samudra Hindia, sistem komunikasi satelit, dan pusat pengamatan. Sejak beroperasi, sistem peringatan berhasil mendaftarkan ribuan gempa bumi dan lebih dari sepuluh tsunami di Indonesia. Peringatan gempa bumi dan tsunami dikeluarkan kurang dari lima menit setelah gempa, diikuti oleh pembaruan atau yang serba jelas. Namun, dari total 160 seismometer di InaTEWS, hanya 100 di antaranya milik pemerintah Indonesia. Selanjutnya, di sepanjang pantai yang paling dekat dengan Great Sunda Fault, hanya ada 20 seismometer, yang kurang memiliki garis pantai sepanjang itu. Seismometer juga mahal dan memerlukan instalasi besar untuk dioperasikan dengan benar. ECN bertujuan untuk melengkapi kekurangan ini, dengan jaringan sensor independen dan berbiaya rendah yang besar, untuk meningkatkan keefektifan sistem peringatan dini..

II. DESAIN

A. Sistem Secara Umum

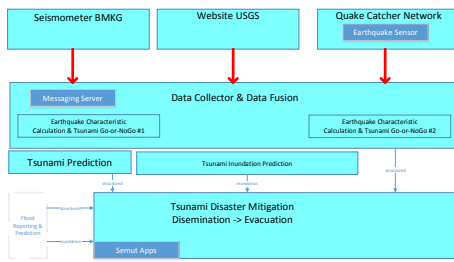


Fig. 1. Example of a figure caption. (figure caption)

ECN menggunakan tiga sumber data, yaitu jaringan sensor gerak murah berbiaya rendah lainnya, situs Survei Geologi Amerika Serikat (USGS), dan jaringan seismometer Indonesia yang sudah mapan. Data dari sensor, yaitu bentuk gelombang seismik, kemudian dikumpulkan di satu server dan disimpan dalam database. Jika terjadi gempa, sistem akan mendeteksi dengan mengukur gelombang kuat pada beberapa sensor. Sistem ini juga akan menganalisis gelombang seismik untuk mengetahui rincian penting tentang gempa, seperti besarnya, lokasi, dan kedalamannya. Dari informasi tersebut, juga akan menentukan apakah ada potensi tsunami yang disebabkan oleh gempa tersebut atau tidak. Bergantung pada hasil analisis, maka akan mengeluarkan peringatan melalui beberapa media, seperti aplikasi Twitter dan smart city.

Jaringan ECN berbiaya rendah dimodelkan setelah Quake Catcher Network (QCN) [1] [2]. QCN, yang dikembangkan di Stanford University, juga merupakan jaringan sensor gerak yang kuat, namun bergantung pada komputer relawan untuk mengirim data ke server mereka, sedangkan sensor ECN dapat beroperasi secara independen. Sensor ini memanfaatkan accelerometer untuk mendeteksi getaran di bumi, yang kemudian dikirim ke server melalui jaringan GSM. Di sisi lain, data dari seismometer dikirim langsung dari server pusat InaTEWS, dan data dari kedua sumber tersebut kemudian digunakan untuk menganalisa gempa bumi. Informasi gempa dari situs USGS kemudian digunakan untuk cross-validate hasil analisis. Beberapa sumber data digunakan untuk memastikan analisisnya seakurat mungkin, untuk mencegah risiko alarm salah.

B. Desain Sensor

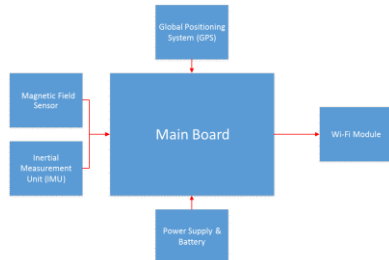


Fig. 2. Example of a figure caption. (figure caption)

Desain sensornya adalah sebagai berikut. Papan utama (A NodeMCU ESP8266) menerima data dari dua sensor, unit pengukuran inersia (IMU), dan penerima GPS. IMU terdiri dari accelerometer dan magnetometer. Accelerometer akan berfungsi sebagai seismograf, sedangkan magnetometer akan menentukan orientasi sensor. Penerima GPS akan menyediakan lokasi sensor, yang sangat penting dalam menentukan lokasi gempa yang terdeteksi. Sensor ini didukung oleh sistem tenaga surya, terdiri dari panel surya, baterai, dan pengendali biaya untuk memungkinkan operasi independen. Papan utama sudah termasuk modul Wi-Fi, yang memungkinkannya mengirim data melalui jaringan GSM ke server, dengan bantuan modem.

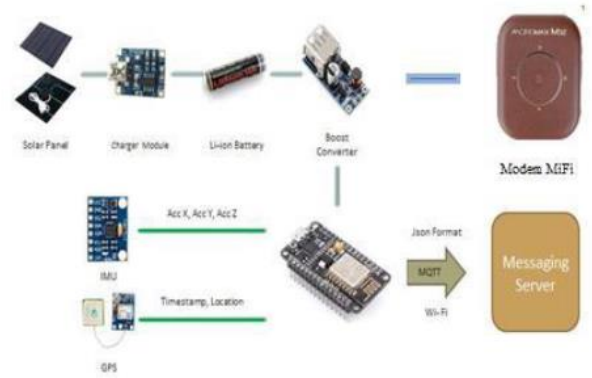


Fig. 3. Example of a figure caption. (figure caption)

IMU, MPU9255, mencakup accelerometer sumbu 16 bit, 3, untuk dijadikan seismograf [3]. Accelerometer dikonfigurasi dengan kisaran 2g, yang merupakan rentang khas di mana gempa biasanya terjadi [4]. Ini juga mencakup sensor magnet efek monolitik berbentuk sumbu 8 sumbu dengan konsentrator magnetik, untuk menentukan defleksi sumbu X dari accelerometer dengan arah utara. Namun, magnetometer hanya digunakan saat penempatan sensor pertama dilakukan, untuk memastikan bahwa sensor menghadap ke utara, untuk memudahkan perhitungan data seismik. Keduanya terhubung ke papan utama melalui koneksi I2C. Receiver Ublox Neo-6M digunakan sebagai penerima GPS, yang akurat sampai 2m. Penerima ini terhubung melalui port UART.

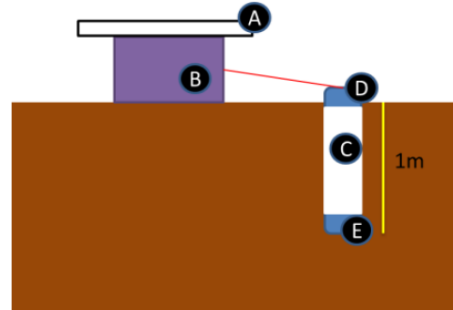


Fig. 4. Example of a figure caption. (figure caption)

IMU ditempatkan di bawah tanah di bagian (E) dengan kedalaman sekitar 1M sehingga sensor tidak sensitif terhadap suara seperti pejalan kaki terdekat dan terhubung melalui pipa PVC (C) yang ditutup dengan (D) di bagian atas. Sensor IMU terhubung ke modul utama (B) dengan menggunakan kabel panjang melalui pipa PVC (C). Pada modul utama (B) ada PCB Board yang sudah terhubung dengan papan utama NodeMCU, sedangkan modul GPS terhubung secara langsung untuk memastikan sinyal yang kuat. Modul MiFi, dan sistem tenaga, terutama panel surya (A) ditempatkan di atas modul utama untuk mendapatkan intensitas sinar matahari maksimal.

C. Desain Sistem Komunikasi

Protokol komunikasi yang digunakan dalam jaringan ECN adalah Advanced Query Messaging Protocol (AMQP), terutama karena dukungannya terhadap pesan antrian. Protokol ini digunakan oleh vendor messaging bernama RabbitMQ. RabbitMQ berfungsi sebagai perantara pesan, sehingga semua data yang dikirim dari sensor dikirim via RabbitMQ. Data apapun yang tidak segera diterima oleh server akan tinggal di messaging broker sebagai "Antrian", sehingga bila server sedang down atau tidak aktif, data yang dikirim oleh sensor tidak hilang. Selanjutnya, AMQP menyertakan sistem verifikasi pesan, sehingga pesan terdistorsi secara otomatis dibuang. Ini penting, karena pesan terdistorsi mungkin mengandung data nakal yang dapat mempengaruhi analisis data tersebut. Hal ini juga sangat mudah untuk mengatur jaringan besar menggunakan AMQP. [5]

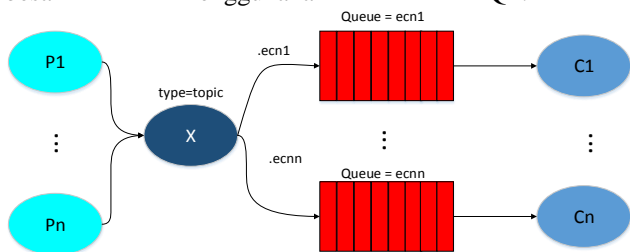


Fig. 5. Example of a figure caption. (figure caption)

Desain ECN juga mempertimbangkan kemungkinan memiliki lebih dari satu klien yang membutuhkan data sensor. Oleh karena itu, AMQP digunakan untuk membangun arsitektur seperti yang ada pada gambar di atas. Server pesan tengah digunakan, yang menyimpan data dari semua sensor untuk sementara. Kemudian, server pesan mentransmisikan data ke pihak yang meminta, selama data belum kadaluarsa. Perhatikan bahwa Pn dalam kasus ini mungkin berarti sumber data, seperti jaringan sensor gempa lainnya, yang tidak harus dimiliki oleh jaringan ECN. Data ditransmisikan setiap detik, masing-masing paket berisi 40 sampel data seismik, serta posisi sensor. Hal ini disebabkan laju sampling 40 Hz dari accelerometer. Format GeoJSON digunakan untuk mentransmisikan data untuk memudahkan penguraian dan pemrosesan selanjutnya.

D. Desain Software

Perangkat lunak untuk menganalisis data seismik yang diperoleh dari sumber yang disebutkan di atas didasarkan pada beberapa perangkat lunak open source yang ada. Perangkat lunak ini termasuk Seiscomp3 [6] dan Earthworm [7]. Banyak fungsi untuk menentukan rincian tentang gempa yang langsung diimpor dari perpustakaan masing-masing. Perangkat lunak ini dirancang untuk menyediakan alat kecil namun ampuh untuk memantau sensor serta mendeteksi dan menganalisis gempa bumi, baik untuk masyarakat umum atau ahli seismologi berpengalaman. Karena itu, ada beberapa mode tampilan yang disediakan.

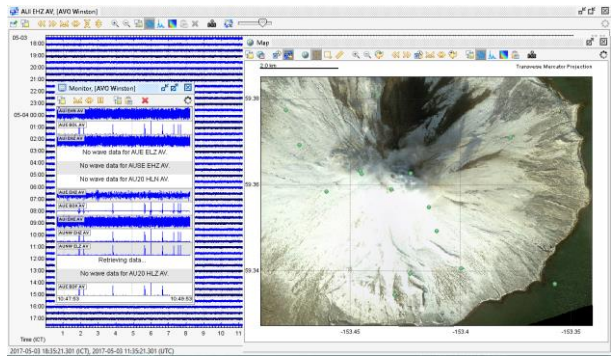


Fig. 6. Example of a figure caption. (figure caption)

Gambar di atas menunjukkan perangkat lunak dalam mode "Monitoring" nya. Tampilan semacam itu memudahkan pemantauan area khusus seperti gunung berapi. Ini menunjukkan peta lokal wilayah yang sedang dipantau, dengan titik hijau yang menunjukkan lokasi sensor aktif saat ini. Seseorang dapat melihat area yang berbeda pada peta dengan mengklik mouse dan menyeretnya. Peta disediakan oleh USGS [8]. Di sisi kiri adalah tampilan real-time dari bentuk gelombang seismik yang ditransmisikan oleh sensor. Sensor yang terdaftar namun saat ini tidak aktif juga dilambangkan dengan titik abu-abu terang di peta, dan teks sederhana pada tampilan real time. Di balik layar real-time adalah tampilan helicorder sensor tunggal. Helicorder dirancang agar terlihat seperti seismograf tradisional.

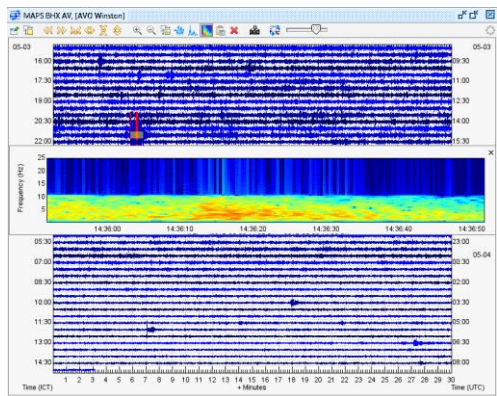


Fig. 7. Example of a figure caption. (figure caption)

Tampilan helicorder seperti pada gambar di atas memungkinkan seseorang untuk menganalisis bentuk gelombang seismik secara rinci, dengan bentuk gelombang lebih dari satu hari ditampilkan di latar belakang. Gelombang juga diberi kode warna dengan amplitudonya, dengan warna berubah dari biru muda karena gelombang lemah ke biru gelap untuk getaran yang kuat. Merah menunjukkan kejadian yang terdeteksi, yang jika juga terdeteksi pada sensor lain dalam interval waktu yang relatif singkat, dapat mengindikasikan terjadinya gempa. Hal ini juga memungkinkan untuk fokus pada bagian tertentu dari gelombang. Tampilan yang disorot juga menunjukkan spektrum frekuensi bagian yang disorot dari wave. Layar menunjukkan spektrum frekuensi dari 0 - 20 Hz, untuk setiap detik, yang kemudian diberi kode warna. Biru mewakili frekuensi yang lemah, sedangkan merah mewakili getaran kuat yang terjadi pada frekuensi tersebut.

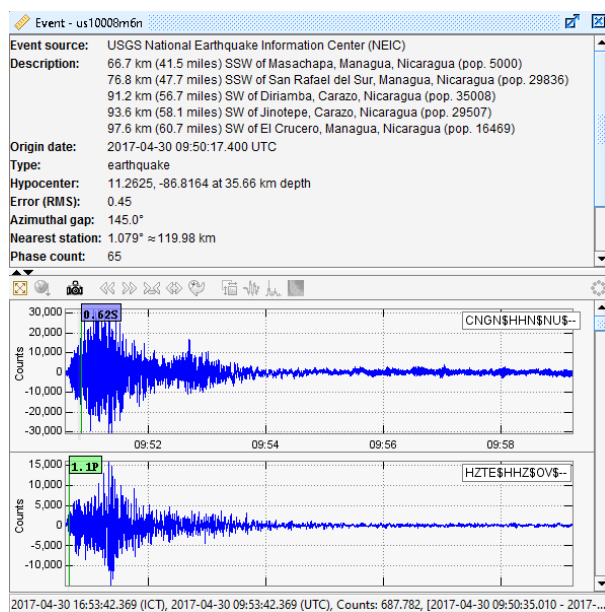


Fig. 8. Example of a figure caption. (figure caption)

Jika gempa terdeteksi, selanjutnya akan dianalisis, dan informasi yang dihasilkan akan ditampilkan dalam tampilan seperti di atas. Gempa bumi pasti terjadi, jika suatu kejadian dengan frekuensi yang sama terdeteksi oleh setidaknya 3 sensor yang berada di dekatnya. Ini karena algoritma ini membutuhkan 3 sensor untuk menentukan episentrum sebuah gempa. Bentuk gelombang rata-rata pada saat yang tepat gempa akan ditampilkan seperti di atas. Jika memungkinkan, gelombang utama dan gelombang sekunder akan dilambangkan. Lebih banyak akan dijelaskan pada bagian berikut. Informasi yang diberikan adalah sebagai berikut. Pertama, sumber acara, yang menandakan jaringan yang mendeteksi kejadian tersebut. Lalu muncullah deskripsi, yang menginformasikan kapan dan dimana kejadian tersebut terdeteksi, termasuk jarak sensor dari episentrum gempa dan

pusat populasi terdekat. Selanjutnya, lokasi gempa diinformasikan, bersamaan dengan kedalaman gempa yang diukur dari permukaan tanah. Kesalahan maksimum, celah azimuthal, dan stasiun terdekat ke episentrum juga dilambangkan.

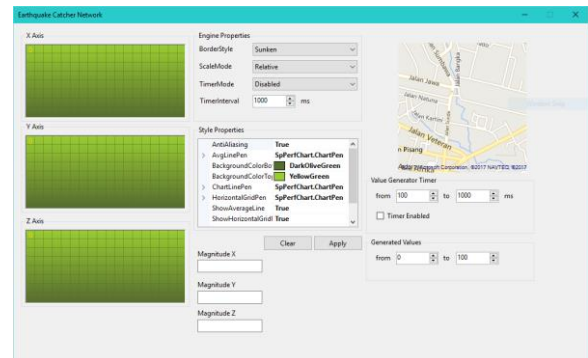
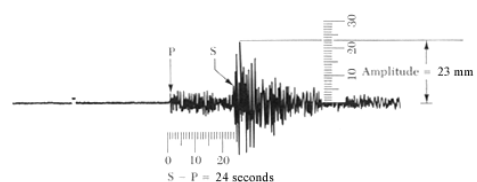


Fig. 9. Example of a figure caption. (figure caption)

Tampilan di atas adalah bagian dari perangkat lunak yang dirancang untuk masyarakat umum yang tertarik dengan pemantauan sensor gempa sederhana. Tab di sebelah kiri menunjukkan gelombang dari masing-masing sumbu akselerometer pada sensor tunggal. Di sebelah kanan, peta bisa dilihat, yang menunjukkan lokasi sensor pada peta lokal. Peta di sini disediakan oleh Google Maps. Ini juga bisa memberi alarm jika lebih dari satu sensor menunjukkan getaran yang kuat. Alarm kemudian akan diberikan melalui speaker komputer, begitu juga melalui media sosial, meski saat ini hanya twitter yang didukung.

E. Algoritma Analisis Gelombang Seismik

Fig. 10. Example of a figure caption. (figure caption)



Berikut ini akan menyajikan metode sederhana untuk menentukan episentrum dan besarnya gempa dari pembacaan seismograf. Selang satu menit ditandai dengan garis kecil yang dicetak tepat di atas ombak yang dibuat oleh aktivitas seismik (waktu dapat ditandai secara berbeda pada beberapa seismograf). Jarak antara awal gelombang P pertama dan gelombang S pertama memberi tahu Anda berapa detik gelombangnya terpisah. Gelombang P menunjukkan

gelombang utama, yang merupakan komponen tercepat dari gelombang seismik, dan akan meramalkan gelombang sekunder lain yang lebih kuat yang masuk. Jarak antara gelombang P dan S akan digunakan untuk memberi tahu Anda sejauh mana seismograf Anda berasal dari pusat gempa. [9] Sebagai langkah awal, kita harus mengukur jarak antara gelombang P pertama dan gelombang S pertama. Dalam kasus ini, gelombang P dan S pertama terpisah 24 detik. Kemudian kita harus menemukan titik selama 24 detik di sisi kiri grafik di bawah ini dan tandai titik itu. Menurut grafik, pusat gempa ini berjarak 215 kilometer. Lalu kita harus mengukur amplitudo gelombang terkuat. Amplitudo adalah tinggi (di atas kertas) dari gelombang terkuat. Pada seismogram ini, amplitudonya adalah 23 milimeter. Dengan menggunakan skala di bawah ini, kita bisa menentukan besarnya gempa, dengan menggunakan jarak dan amplitudo. Hal ini terutama karena semakin jauh terjadi gempa, semakin lemah ukurannya. Dengan menggunakan model bagan di bawah ini, kita bisa mengetahui besarnya gempa dengan mudah.

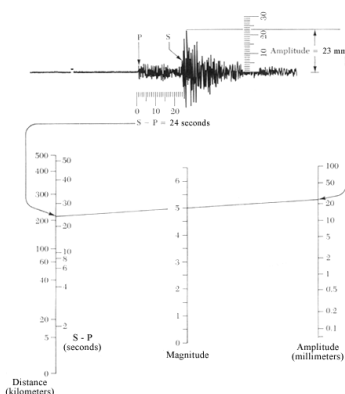


Fig. 11. Example of a figure caption. (figure caption)

Kami baru tahu seberapa jauh seismografnya dari pusat gempa dan seberapa kuat gempa itu, tapi kita masih belum tahu pasti dimana gempa tersebut terjadi. Di sinilah peta, lokasi sensor yang dikirim oleh penerima GPS, dan catatan dari sensor lainnya mengambil peran. Teknik berikut dikenal sebagai triangulasi. Orang pertama-tama harus melihat skala peta, lalu menggambar lingkaran dengan sensor sebagai pusatnya, dan dengan radius jarak yang diketahui dari perhitungan di atas. Dari contoh di atas, kita harus menggambar lingkaran dengan radius 215 kilometer. Dengan melakukan hal yang sama untuk jarak ke episenter yang dicatat seismogram lainnya (dengan lokasi seismograf di pusat lingkaran mereka), semua lingkaran harus tumpang tindih. Titik di mana semua lingkaran saling tumpang tindih adalah perkiraan episentrum gempa. Namun, kedalaman gempa masih harus ditentukan. Indikasi yang paling jelas pada seismogram yang dapat menunjukkan kedalaman gempa adalah amplitudo, atau tinggi kecil, dari gelombang permukaan yang terekam dan karakter gelombang P dan S yang tidak rumit. Meskipun pola gelombang permukaan umumnya menunjukkan bahwa gempa

dangkal atau dangkal, metode yang paling akurat untuk menentukan kedalaman fokus gempa adalah membaca fase kedalaman yang terekam pada seismogram. Fase kedalaman adalah fase karakteristik pP-gelombang P yang dipantulkan dari permukaan Bumi pada titik yang relatif dekat dengan hypocenter. Pada stasiun seismograf yang jauh, pP mengikuti gelombang P dengan interval waktu yang berubah perlahan dengan jarak namun dengan cepat dengan kedalaman. Interval waktu ini, pP-P (pP minus P), digunakan untuk menghitung tabel fokus kedalaman. Dengan menggunakan perbedaan waktu pP-P seperti yang telah dibaca dari seismogram dan jarak antara pusat gempa dan stasiun seismograf, kedalaman gempa dapat ditentukan dari kurva waktu terbang atau tabel kedalaman yang diterbitkan. [10]

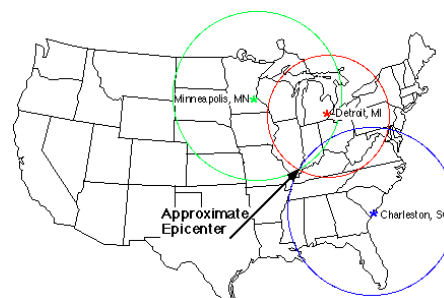


Fig. 12. Example of a figure caption. (figure caption)

III. IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN

Bagian ini akan menunjukkan implementasi dan pengujian selanjutnya dari sensor dan perangkat lunak.

A. Sensor

Pengujian keakuratan GPS dilakukan dengan mengukur pembacaan GPS pada titik tertentu dengan menggunakan modul GPS Neo-6m Ublox dan dibandingkan dengan data garis bujur dan lintang Google Maps pada titik yang sama. Pengujian GPS dilakukan di beberapa titik di laboratorium VIII ITB, Labtek VII ITB, GKU ITB Timur, dan Laboratorium Laboratorium Doping ITB.

Kesalahan yang didapat dari pembacaan garis lintang pada modul GPS Neo 6M adalah 0,000049 dan kesalahan pembacaan bujur pada modul GPS Neo 6M adalah 0,000048. Pada garis ekuator, 1 derajat garis lintang sebanding dengan 110,57 km dan 1 derajat bujur sebanding dengan 111,32 km. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kesalahan lintang dan bujur pembacaan modul GPS Neo 6M adalah 5.41793 m dan 5.34336 m. Dengan kecepatan error dan seismik kecepatan gelombang yang diketahui antara 2-8 km / jam, kesalahan waktu berada pada kisaran 2.385 - 9.72 s. Karena itu, ketidakpastian dalam menentukan episentrum gempa sekitar 100m. Kalibrasi accelerometer MPU9255 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan accelerometer MPU9255 dengan data gelombang getaran dari exciter gempa. Berikut

adalah skema kalibrasi accelerometer MPU9255.

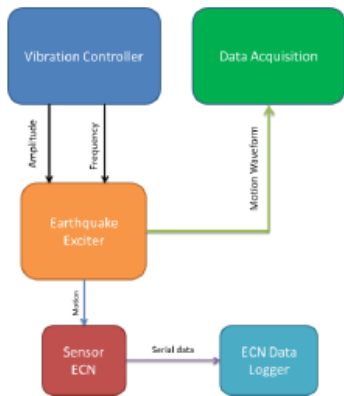


Fig. 13. Example of a figure caption. (figure caption)

Pengontrol getaran digunakan untuk mengatur frekuensi exciter gempa dan gelombang magnitudo dan divalidasi oleh perolehan data. Sensor seismik ECN ditempatkan pada exciter gempa dan pembacaan data yang dicatat oleh data logger ECN data. Dari hasil pembacaan ini, interpolasi sinusoidal pada data yang telah diperoleh dilakukan sehingga sensor sensitivitas pada amplitudo dan frekuensi tertentu diperoleh. Data yang diinterpolasi akan dibandingkan pada amplitudo 0.5G, 1.0G, dan 1.5G pada frekuensi 5 Hz, 10 Hz, dan 15 Hz. Setelah interpolasi dapat disimpulkan bahwa hubungan membaca pada amplitudo yang berbeda dan pada frekuensi yang sama adalah linier, sedangkan pembacaan pada amplitudo yang sama pada frekuensi yang berbeda tidak menghasilkan hasil interpolasi bacaan yang berbeda. Data sensitivitas yang diperoleh diimplementasikan pada sistem pengolahan dengan menggunakan SeisComp3.

B. Software

Perangkat lunak ini diuji dengan menggunakan metode berikut. Data dari jaringan sensor gempa di Alaska digunakan untuk melakukan analisis, terutama pada saat terjadi gempa. Hasil analisis ini kemudian dibandingkan dengan kesimpulan yang dicapai oleh USGS seperti yang ditampilkan di situs mereka.

No.	Time	Coordinates	USGS	Analysis
1	2017-04-26 07:02:28 (UTC)	53.828°N 160.645°E	4.9	4.8765
2	2017-04-26 15:01:49 (UTC)	51.817°N 179.367°W	2.9	3.5638

3	2017-04-26 09:14:23 (UTC)	58.548°N 153.567°W	2.9	3.3653
4	2017-04-27 02:12:44 (UTC)	59.750°N 153.179°W	2.5	3.3673
5	2017-04-27 05:08:39 (UTC)	63.532°N 148.976°W	3.3	3.6563

Karena keterbatasan frekuensi gempa bumi, hanya 5 gempa yang dianalisis. Dari tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa algoritma ini cukup akurat untuk gempa yang lebih kuat dari pada magnitude 4.

IV. CONCLUSION

Sensor yang dirancang memenuhi spesifikasi harga karena hanya membutuhkan biaya sebesar Rp2.280.000,00 untuk membuat sensor ECN. Sensor dapat mendeteksi gempa bumi dengan magnitude di atas 4 dalam radius 100 km karena sensor IMU yang digunakan sudah memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan dan pembacaan sensor telah dikalibrasi. Sensor daya dapat bekerja selama 24 jam dengan menerapkan desain sistem tenaga dengan konfigurasi baterai Li-ion berkapasitas 13600 mAh dan daya total yang diberikan adalah 5 Wp dari panel surya. Sensor tidak dapat melakukan pengambilan data seismik dengan frekuensi 40 Hz tanpa gangguan karena algoritma pemrograman satu tugas, namun waktu pengambilan sampel yang hilang dapat dikurangi dengan mengubah representasi float menjadi representasi char pada pesan yang dikirim ke server.

REFERENSI

- [1] Ai Thinker Team (2015). ESP8266 WROOM WiFi Module Datasheet
- [2] http://nodemcu.com/index_en.html, diakses pada tanggal 9 Mei 2017 pada pukul 16.49
- [3] InvenSense (2014). MPU-9255 Product Specification DS-000007
- [4] U-blox (2011). U-blox 6 GPS Modules Data Sheet GPS.G6-HW-09005-E
- [5] Banks, Andrew & Gupta, Rahul (2014). MQTT Version 3.1.1, OASIS Standard
- [6] Chester Simpson (2011). Characteristics of Rechargeable Batteries SNVA533
- [7] Winter, M. & Brodd, J. (2004). "What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?"
- [8] NanJing Top Power ASIC Corp .TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8
- [9] Oswal, Mehl dkk. (2010). A comparative study of Lithium-Ion Batteries
- [10] Evans, J.R., Allen, R.M., Chung, A.I., Cochran, E.S., Guy, R., Hellweg, M., Lawrence, J.F., Performance of Several Low-Cost Accelerometers, Seism. Res. Letts., 85, 147-158, 2014.