

DESAIN AKSELEROMETER MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER ARDUINO DUE

ACCELEROMETER DESIGN USING ARDUINO DUE MICROCONTROLLER

Purwowibowo, Ninuk Ragil Prasasti

Puslit Metrologi LIPI, Kompleks Puspiptek Serpong, Tangerang, Banten 15314
Email: purwowibowo@kim.lipi.go.id; ninuk@kim.lipi.go.id

Abstrak

Pengembangan sistem pengukuran vibrasi memiliki dampak yang besar dalam sistem pengamatan kondisi dari jalan. Untuk memudahkan sistem pengamatan, dibutuhkan akselerometer yang terkalibrasi dan dikendalikan oleh mikrokontroler untuk merekam data vibrasi yang didapat dan disimpan secara otomatis untuk mengevaluasi hasil dari perekaman. Pembuatan akselerometer ini menggunakan *open source* Arduino sebagai mikrokontroler sehingga sangat mudah untuk dibuat dan dikembangkan lebih lanjut untuk memajukan teknologi pengukuran vibrasi. Hasil pengukuran dari akselerometer ini langsung ditampilkan dalam layar *liquid crystal display* (LCD) sehingga dapat dimonitor oleh pengamat. Akselerometer yang dibuat memiliki rentang ukur sampai dengan 16 g dan prototipe akselerometer ini dikalibrasi menggunakan *reference accelerometer* B&K tipe 8305 nomor seri 1499872 dari Laboratorium Akustik dan Vibrasi Pusat Penelitian Metrologi LIPI untuk rentang ukur sampai dengan 5 g dengan prosedur ISO 16063-21 sehingga nilai pengukurannya dapat terjamin kebenarannya. Hasil kalibrasi dalam rentang pengukuran sampai dengan 5 g dalam frekuensi sampai dengan 63 Hz menunjukkan bahwa sensor akselerometer ini memiliki kemungkinan deviasi sampai 0,34 g. Hasil perhitungan dan pengolahan data dari kalibrasi ini menghasilkan akurasi sebesar 98,4% pada frekuensi 31,5 Hz dan 40 Hz.

Kata kunci: akselerometer, mikrokontroler, arduino

Abstract

The development of vibration measurement system has a great impact in a street monitoring system. A calibrated accelerometer that is controlled by a microcontroller to record a data measured and save it automatically is needed to simplify the monitoring process. This accelerometer uses an open-source Arduino as a microcontroller to support a development of this system and to advance the vibration measurement technology. The recorded acceleration by the sensor is directly displayed on the liquid crystal display (LCD) in aim that can be monitored by the observer. This accelerometer is capable to measure 16 g of acceleration and calibrated in Acoustics and Vibration Laboratory of the Research Center for Metrology, Indonesian Institute of Sciences using a reference accelerometer B&K type 8305 sn 1499872 by comparison method according to ISO 16063-21. The calibration's results of 5 g acceleration and at frequency of 63 Hz give an evaluation result of the deviation value below 0.34 g. An accuracy of 98.4% is obtained through a calculation and data processing given by the calibration's results at specific frequency of 31.5 Hz and 40 Hz.

Keywords: accelerometer, microcontroller, arduino

1. PENDAHULUAN

Transportasi darat yang saat ini sering digunakan di Indonesia adalah mobil dan sepeda motor. Kedua transportasi ini adalah pengguna jalan raya, sedangkan kondisi jalan di Indonesia saat ini masih banyak yang memiliki kekurangan (Hakim, 2015). Perbaikan jalan membutuhkan waktu yang lama dikarenakan pemerintah harus melakukan survei terlebih dahulu sebelum melaksanakan perbaikan. Kondisi jalan yang rusak akan membuat pergerakan mobil tidak mulus dan memberikan getaran yang besar

terhadap kendaraan dan juga pengemudi atau pengendara sehingga vibrasi menjadi salah satu tanda adanya jalan rusak yang dilewati kendaraan tersebut.

Vibrasi memiliki peranan penting dalam hampir segala aktivitas yang ada. Berbagai mesin industri menghasilkan vibrasi dalam proses kerja. Pengukuran vibrasi telah dilakukan dan diterapkan dalam memonitor kondisi mesin industri (Albarbar, Mekid, Starr, & Pietruszkiewicz, 2008). Dalam berkendara, kendaraan akan menghasilkan vibrasi yang juga terpengaruh oleh keadaan jalan yang

dilewati. Salah satu contoh pengukuran vibrasi yang dilakukan dalam transportasi darat, yaitu kereta api, untuk mendeteksi rel putus (Wahono, 2013). Dalam pengukuran ini, dibutuhkan keakuratan alat ukur sehingga dapat meningkatkan keefisienan daya kerja manusia untuk memperbaiki kerusakan atau kesalahan (Albarbar dkk., 2008).

Penggunaan akselerometer yang telah disebutkan di atas telah berhasil dilakukan untuk memudahkan pekerjaan manusia, namun akselerometer di Indonesia masih sangat minim dan tidak dikenal oleh banyak masyarakat. Saat ini, akselerometer dapat dibuat perseorangan dengan segala kemudahan teknologi yang sudah banyak dan maju dengan menggunakan Arduino yang memiliki sistem *open-source*. Prototipe akselerometer ini dapat diaplikasikan bersama dengan *global positioning system* (GPS) untuk mendeteksi getaran dari sebuah kendaraan sebagai penanda kondisi jalan yang dilalui oleh kendaraan tersebut. Data dari setiap vibrasi yang didapatkan oleh kendaraan dapat dikumpulkan dan menjadi laporan kondisi jalan yang telah dilewati. Tujuan dari penelitian ini adalah pembuatan akselerometer menggunakan Arduino sebagai mikrokontroler dengan rentang ukur sampai dengan 5 g (49 m/s^2) dalam frekuensi dibawah 63 Hz yang terkalibrasi oleh sensor standar yang dimiliki oleh Laboratorium Akustik dan Vibrasi Pusat Penelitian Metrologi LIPI.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini akan menjelaskan mengenai definisi umum dari vibrasi, akselerometer ADXL345 yang akan digunakan dalam pengukuran vibrasi serta Arduino yang dimanfaatkan sebagai mikrokontroler.

2.1 Vibrasi

Vibrasi adalah suatu gerakan mengulang atau bolak-balik dengan kecepatan tinggi. Suatu vibrasi akan menghasilkan osilasi dengan amplitudo dan frekuensi yang berbeda-beda, tergantung dengan gaya yang diberikan. Gaya yang diberikan kepada suatu benda akan memberikan dampak kepada partikel di

dalam sehingga akan bertubrukan satu sama lain untuk mengimbangi gaya yang diberikan dan menghasilkan getaran dengan frekuensi tinggi. Frekuensi adalah banyaknya jumlah getaran penuh dalam satu detik dengan formula $f = 1/T$, di mana T adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu getaran penuh. Amplitudo adalah ukuran seberapa besar suatu getaran tersebut. Amplitudo yang besar menandakan besarnya gaya yang diberikan kepada benda tersebut. Maka dari itu, vibrasi dapat diukur untuk menentukan besaran dari gangguan yang diperoleh dari objek penelitian tersebut. Vibrasi memiliki tiga sumbu utama, yaitu sumbu X, Y, dan Z, di mana ketiga sumbu tersebut independen terhadap yang lain sehingga vibrasi memiliki tiga gaya, yaitu F_x , F_y , dan F_z . Besar dari gaya tergantung dari percepatan di sumbu setiap gaya. Formula untuk pengukuran gaya pada sumbu X, Y, dan Z ditunjukkan pada persamaan (1), (2), dan (3).

$$F_x = m \times a_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

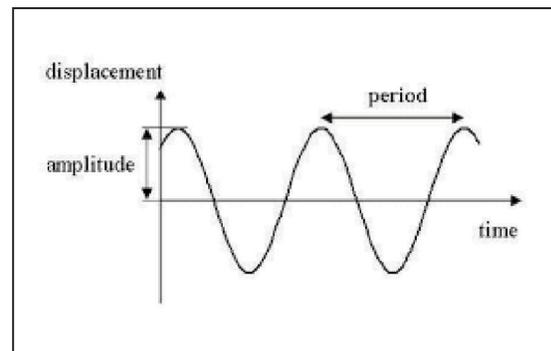
$$F_y = m \times a_y \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_z = m \times a_z \quad \dots\dots\dots (3)$$

di mana a adalah akselerasi yang terjadi di setiap sumbu dan m adalah massa dari objek penelitian. Massa dari objek penelitian adalah konstan sehingga akselerasi adalah satu-satunya variabel yang mempengaruhi besarnya gaya yang ditanggung oleh objek.

Gerakan vibrasi akan terbentuk menyerupai sebuah gelombang, salah satunya adalah gerakan harmonik sederhana pada Gambar 1.

Gerakan harmonik memiliki kecepatan yang konstan dalam sumbu yang lurus dan juga kecepatan sudut yang biasa disebut ω dan



Gambar 1. Gerakan Harmonik

perpindahan yang dinyatakan dengan persamaan (4) (Luis dkk., 2010).

$$x(t) = A \sin(\omega t) \dots\dots\dots (4)$$

Adalah amplitudo dari getaran dan t adalah waktu pengukuran. Gelombang harmonik selalu bergerak konstan dan berulang setiap 2π sehingga ω dapat diukur dengan persamaan (5).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \times f1 \dots\dots\dots (5)$$

Dalam unit radian per detik, T adalah period dengan unit detik dan f adalah frekuensi dengan unit Hertz. Persamaan (4) menunjukkan perpindahan dari pergerakan benda dan diketahui bahwa kecepatan adalah turunan dari perpindahan sehingga dapat dirumuskan dalam persamaan (6).

$$v(t) = x'(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega A \cos(\omega t) \dots\dots\dots (6)$$

Percepatan yang menjadi turunan dari kecepatan dalam persamaan di atas dirumuskan ke dalam persamaan (7).

$$a(t) = v'(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t) \dots\dots\dots (7)$$

Melalui persamaan (7), didapatkan tiga persamaan variabel yang dapat diketahui dalam pengukuran vibrasi dengan gravitasi dengan rumusan persamaan (8).

$$a(g) = \frac{a(t)}{g} \dots\dots\dots (8)$$

dengan $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

2.2 Akselerometer

Akselerometer digunakan untuk pengukuran akselerasi tiga sumbu X, Y, dan Z berdasarkan besar gravitasi (g) sehingga besar pengukuran akan berskala dengan g , seperti $\pm X g$, di mana X adalah skala pengukuran. Akselerometer tidak mengukur akselerasi dengan cara mengukur perubahan kecepatan, melainkan dengan mengukur gaya yang diberikan terhadap akselerometer dengan hubungan persamaan $F = m \times a$ sehingga didapatkan akselerasi. Hubungan persamaan (4), (5), dan (6) juga menghasilkan persamaan gelombang perpindahan yang diartikan sebagai gelombang vibrasi benda



Gambar 2. Triple Axis Accelerometer (ADXL345)

tersebut. Jenis akselerometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah ADXL345.

ADXL345 yang digunakan memiliki delapan pin, yaitu GND (*ground*), Vcc (*voltage*), CS (*chip select*), INT1 dan INT2 (*interrupt 1 dan 2 output*), SDO (*serial data output for SPI*), SDA (*serial data for I²C*), dan SCL (*serial communications clock*) (SparkFun, 2016).

ADXL345 adalah tiga axis akselerometer dengan spesifikasi resolusi tinggi (13 bit), pengukuran sampai $\pm 16 g$, dan dapat mengukur perubahan sampai dengan di bawah 1° . ADXL345 juga memiliki sensor inaktivitas yang akan membantu menghemat pemakaian daya dengan sangat baik. ADXL345 memberikan data *output* digital dalam format *16 bit two complement* (Wahono, 2013). Jika dibandingkan dengan ADXL335, ADXL345 memiliki spesifikasi yang lebih tinggi karena ADXL335 hanya dapat mengukur sampai $\pm 3 g$ dan dengan alasan tersebut ADXL345 dipilih sebagai sensor alat ukur dalam penelitian ini. Gambar 3 di bawah ini menunjukkan spesifikasi untuk resolusi dari ADXL345 (Wahono, 2013).

Resolusi *output* yang diberikan ADXL345 dapat mencapai $\pm 16 g$ sehingga terbagi menjadi lima bagian (*all g ranges*, $\pm 2 g$ range, $\pm 4 g$ range, $\pm 8 g$ range, dan $\pm 16 g$ Range) yang

OUTPUT RESOLUTION	Each axis
All g Ranges	10-bit resolution
±2 g Range	Full resolution
±4 g Range	Full resolution
±8 g Range	Full resolution
±16 g Range	Full resolution
SENSITIVITY	Each axis
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±2 g, 10-bit or full resolution
Scale Factor at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±2 g, 10-bit or full resolution
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±4 g, 10-bit resolution
Scale Factor at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±4 g, 10-bit resolution
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±8 g, 10-bit resolution
Scale Factor at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±8 g, 10-bit resolution
Sensitivity at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±16 g, 10-bit resolution
Scale Factor at X _{OUT} , Y _{OUT} , Z _{OUT}	±16 g, 10-bit resolution

Gambar 3. Spesifikasi Resolusi ADXL345

memiliki resolusi berbeda setiap bagiannya. *Output* ±2 g memiliki resolusi pengukuran 10 bit, ±4 g memiliki resolusi pengukuran 11 bit, ±8 g memiliki resolusi pengukuran 12 bit, dan ±16 g memiliki resolusi pengukuran 13 bit (SparkFun, 2016). ADXL345 akan dihubungkan dengan Arduino Due yang berperan sebagai mikrokontroler untuk ADXL345 saat membaca data yang di ukur (Wahono, 2013).

Sistem *Inter Integrated Circuit* (I²C) atau *Serial Peripheral Interface* (SPI) digunakan untuk serial komunikasi ADXL345, tergantung kebutuhan yang diperlukan. Mode I²C diaktifkan pada saat disambungkan kepada power (Vcc). tidak boleh dibiarkan tidak tersambung karena berguna untuk menentukan mode *default*. Dalam SPI, akan dikendalikan oleh *bus master* sehingga akan dikoneksikan dengan pin digital pada Arduino sebagai pengendali (Arduino, 2016a). Dari segi rangkaian, sistem I²C lebih menggunakan sedikit *wire* dalam koneksi terhadap mikrokontroler Arduino, sedangkan SPI memiliki *four wire configuration* yang akan menghubungkan setiap pin ADXL345 (\overline{CS} , SDO, SDA, dan SCL) kepada pin Arduino Due. Penelitian ini menggunakan komunikasi I²C karena dapat memaksimalkan tingkat efisiensi perangkat keras (*hardware*) dan merupakan rangkaian sederhana yang hanya menggunakan hanya dua *wire* (Arduino, 2016b). Jenis komunikasi I²C juga sangat menguntungkan dalam sistem ini karena kompatibilitas yang memungkinkan untuk terpasangnya lebih dari satu alat dalam satu master. Dalam komunikasi I²C, master dapat membedakan satu alat dengan

yang lain melalui setiap *address* sehingga tidak terjadi tabrakan dalam proses komunikasi.

2.3 LCD Display, SD Card, dan RTC

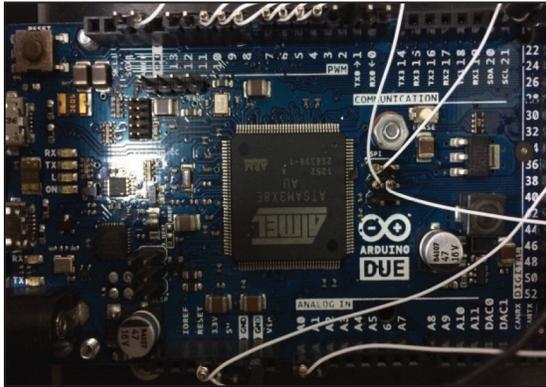
Layar tampil LCD adalah teknologi layar untuk menampilkan gambar atau tulisan yang diperintah untuk ditampilkan. Penelitian ini memilih layar LCD jenis 2004A tanpa *backlight* yang menggunakan empat *wire* dalam pengiriman data bus.

SD *card* adalah *memory card* yang memiliki kapasitas penyimpanan yang besar dengan ukuran kecil. Penelitian ini menggunakan SD *card* untuk menyimpan data pengukuran yang dilakukan oleh ADXL345. Proses ini disebut *data logging* dengan menggunakan modul SD *card* yang akan berkomunikasi dengan mikrokontroler secara SPI.

RTC adalah *real time clock* yang berfungsi sebagai penghitung waktu dengan waktu inisial yang telah ditentukan pada awalnya. Waktu yang dihasilkan oleh RTC ini berguna dalam membantu proses SD *card data logging* untuk membedakan *file* (berkas) satu dengan yang lain.

2.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler digunakan sebagai alat pemrograman untuk pengukuran yang akan dilakukan menggunakan ADXL345. Penelitian ini memilih untuk menggunakan Arduino sebagai mikrokontroler karena sistem pemrogramannya yang berbasis *open source* sehingga mudah untuk digunakan dan lebih bebas untuk berkarya sendiri. Arduino memiliki banyak tipe dan penelitian ini menggunakan papan Arduino Due yang merupakan jenis Arduino yang paling cocok untuk digunakan dari sisi kebutuhan pemrogramannya dan elektronisnya. Arduino Due memiliki spesifikasi yang pas untuk penelitian ini, yaitu menggunakan ATSAM3X8E AU yang memiliki 54 *digital* pin (12 pin digunakan untuk mengatur *output* PWM) dan 12 analog pin yang berguna sebagai *Analog to Digital Converter* (ADC) dengan *operating voltage* 3.3V, 84MHz *clock*, resolusi 32-bit, koneksi USB, colokan daya, ICSP dan SPI *headers* serta dua *Digital to Analog Converter* [6]. Dengan koneksi kabel USB, Arduino Due sangat mudah dihubungkan dengan komputer sehingga



Gambar 4. Arduino Due

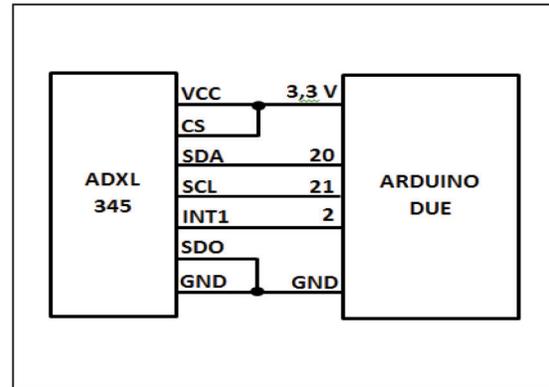
memudahkan proses pemrograman. Arduino Due juga dapat dinyalakan menggunakan colokan daya yang dihubungkan dengan baterai.

Arduino Due digunakan sebagai pengendali utama dalam pengukuran sensor ADXL345 dengan mikrokontroler ATSAM3X8E AU sebagai pusat pengendali dan pemrograman yang digunakan.

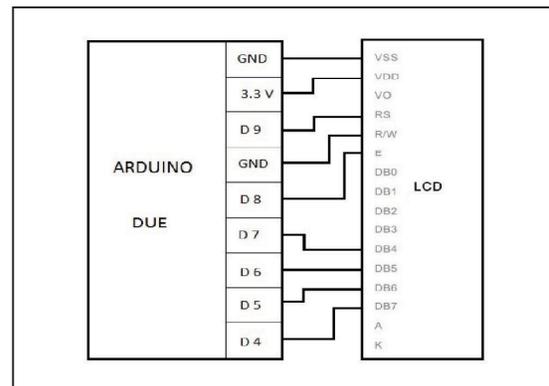
3. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN RANGKAIAN AKSELEROMETER

Proses perancangan sensor ADXL345 kepada Arduino memiliki berbagai cara komunikasi. Penelitian ini menggunakan cara I²C sehingga semua pin dalam ADXL345 akan dipasangkan kepada Arduino Due sudah ditentukan. Sensor ADXL345 yang digunakan dalam penelitian ini hanya memiliki enam pin, yaitu Vcc, Ground, SDA, SDO, SCL, dan CS. Dalam Arduino Due, pin SDA dan SCL untuk I²C terletak pada pin 20, pin 21, dan di bagian ujung atas kanan (Arduino, 2016c).

Arduino akan bertukar data dengan ADXL345 yang diatur dengan SCK sebagai sinkronisasi waktu pada transmisi data. *Output* yang diberikan oleh ADXL345 akan diproses kembali ke dalam Arduino sehingga menghasilkan angka dari akselerasi dan vibrasi yang diukur oleh ADXL34. Hasil dari proses yang didapatkan dari Arduino akan ditampilkan pada layar LCD dan disimpan di *memory* menggunakan *data logging* sehingga akan terdapat rekaman dari data yang telah diukur dan dikumpulkan dalam satu berkas (*file*).



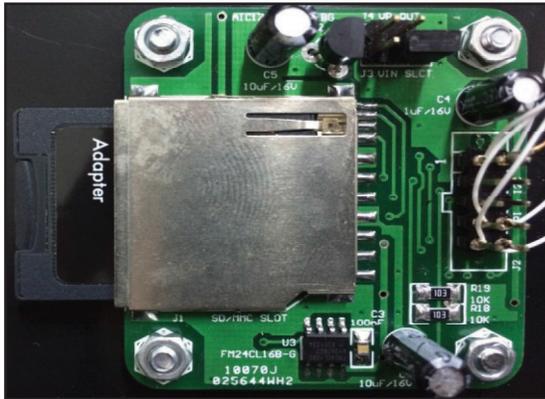
Gambar 5. Proses Diagram Penyampaian Data dari Akselerometer ADXL345



Gambar 6. Pemetaan Pin dalam Arduino Due menuju LCD *display*

Layar LCD akan digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran oleh sensor ADXL345 dan tipe layar LCD yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah EH002004A. Layar LCD berikut menyerupai tipe LCD 2004A, tetapi tanpa menggunakan *backlight* dan tidak diperlukan untuk mengatur kontras layar tersebut. Layar LCD ini memiliki 16 pin yang dapat terhubung dengan Arduino, yakni 1 pin untuk sumber daya, 1 pin untuk *ground*, 1 pin untuk kontras, 1 pin untuk *register signal*, 1 pin untuk *read/write*, 1 pin untuk *enable signal*, 8 pin untuk *data bus*, dan 2 pin untuk *backlight*. Sembilan pin akan dipasangkan ke dalam Arduino dengan urutan pemasangan seperti pada Gambar 6.

Ada tujuh pin yang tidak terpasang karena tipe LCD dalam penelitian ini tidak menggunakan pin untuk *backlight* dan kontras serta hanya menggunakan empat *wire* untuk data bus. Perekaman data yang dilakukan oleh ADXL 345 akan memasuki proses *data logging*



Gambar 7. Modul SD Card

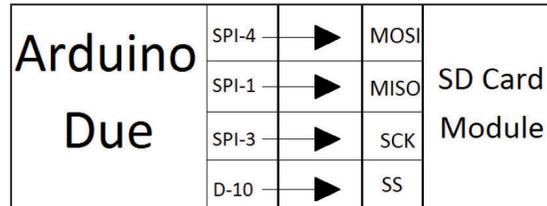
yang menggunakan modul SD *card* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Modul SD *card* ini digunakan untuk menyimpan rekaman data dari hasil pengukuran oleh ADXL 345 ke dalam *micro* SD. Proses komunikasi yang digunakan adalah SPI. Gambar 8 menunjukkan pemasangan dan konfigurasi pin dalam proses tersebut.

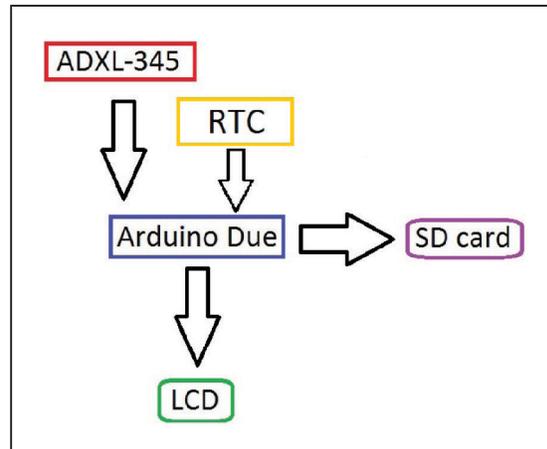
Dalam SPI, ada tiga jalur umum, yaitu *master out slave in* (MOSI), *master in slave out* (MISO), *serial clock* (SCK), dan satu jalur khusus untuk setiap alat, yaitu *slave select* (SS). MOSI berlaku sebagai *output* dari *master*, yaitu Arduino, menuju *slave* yang menerima *input*, yaitu SD *card module*. MISO adalah kebalikan dari MOSI, di mana Arduino akan menerima sinyal dari SD *card module*. SCK akan digunakan untuk sinkronisasi transmisi data menggunakan waktu. Pin SS membuat *master* dapat menentukan *slave* mana yang akan diaktifkan dan di nonaktifkan (Arduino, 2016a).

Sistem ini juga menggunakan *real time clock* (RTC) sebagai penentu waktu yang akan ditampilkan dalam LCD dan sebagai nama berkas (*file*) dalam proses *data logging*. RTC disambungkan dengan Arduino melalui koneksi I2C sehingga akan sama pemasangannya seperti sensor ADXL 345, pin SDA dengan pin 20 (SDA), dan SCL dengan pin 21 (SCL). Diagram blok dari sistem kerja akselerometer sampai *memory* digambarkan pada Gambar 9.

Cara kerja sensor akselerometer ADXL345 diatur oleh program yang diunggah ke dalam Arduino. Sebelum memasuki tahap pemrograman, pembuatan alur proses kerja



Gambar 8. Pemetaan Pin dalam Arduino Due menuju SD *Module*^[7]



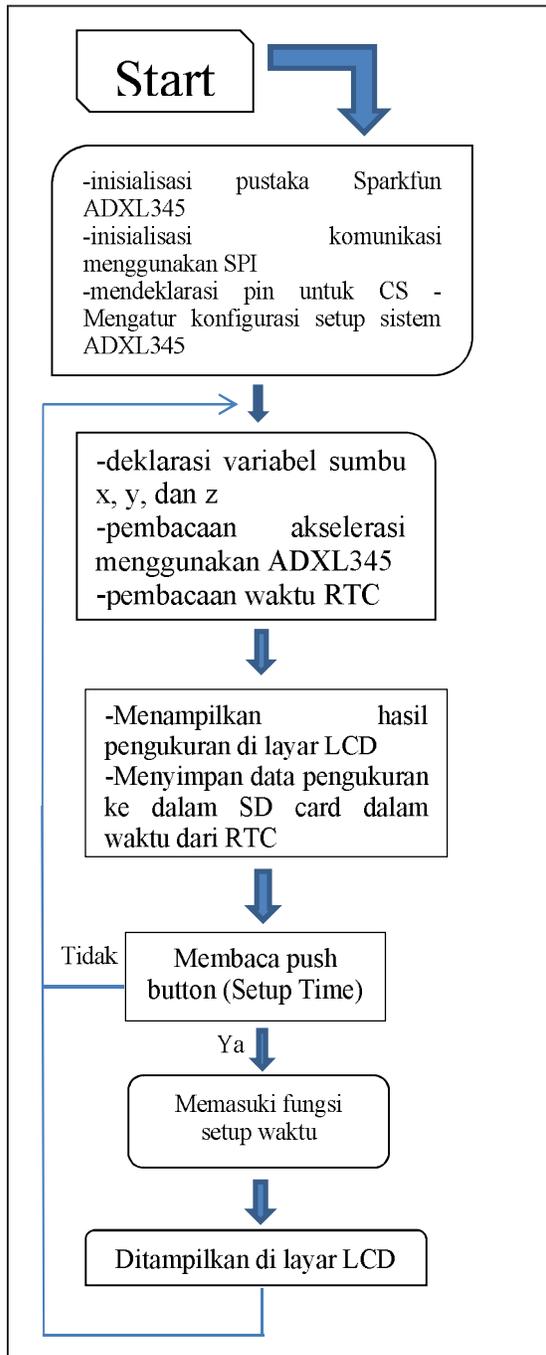
Gambar 9. Blok Diagram Sistem Kerja Akselerometer

sensor akselerometer ADXL345 berdasarkan algoritmanya dilakukan terlebih dahulu.

Proses diawali dengan menginisialisasikan *library* yang digunakan dan jenis komunikasi yang akan digunakan dalam sistem. Selanjutnya, pengaturan awal dari sensor akselerometer ADXL345 dilakukan karena proses dibutuhkan sebelum memulai pengukuran yang dilakukan oleh sensor. Kemudian, sensor akan memulai aktivitasnya untuk melakukan pembacaan akselerasi. Arduino memproses hasil yang dikirimkan oleh ADXL345 dikirimkan menuju layar LCD untuk menampilkan hasil pengukuran data dan juga disimpan dalam SD *card* menggunakan metode *data logging* untuk menyimpan rekaman data vibrasi dalam setiap jeda waktu tertentu.

Gambar 10 merupakan alur kerja Sensor ADXL345 berdasarkan logika dalam proses pengukuran akselerasi dalam penelitian ini.

Diagram ini digunakan untuk menjadi panduan terhadap pembuatan program dalam Arduino dalam segi tahap penulisan kode menurut alur kerja sensor ADXL345. Pembuatan program menggunakan perangkat lunak *Arduino* dari web <http://www.arduino>.



Gambar 10. Diagram Alur Kerja Akselerometer

cc/en/Main/software. Bahasa pemrograman yang digunakan dalam perangkat lunak *Arduino* untuk pembuatan mikrokontroler adalah bahasa C. Dalam perangkat lunak *Arduino*, program dapat langsung ditulis dan dibagi menjadi dua bagian, yaitu *setup()* dan *loop()*. Setelah penulisan program selesai, perangkat lunak tersebut memungkinkan untuk menyusun dan mengunggah program secara langsung ke

```

Akselerometer_ADXL345_Arduino | Ard...
File Edit Sketch Tools Help
Akselerometer_ADXL345_Arduino $
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SparkFun_ADXL345.h>

LiquidCrystal LCD(9, 8, 7, 6, 5, 4);
ADXL345 adxl = ADXL345();
int interruptpin = 2;
const int chipSelectSD = 10;

void setup() {
  LCD.begin(20, 4);
  SD.begin(chipSelectSD);
  adxl.powerOn();
  adxl.setRangeSetting(2);
}
  
```

Gambar 11. Program Seluruh Prototipe Akselerometer dalam Arduino

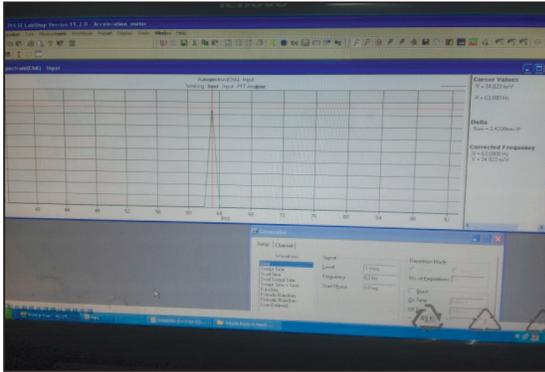


Gambar 12. Pemasangan Sensor ADXL345 dalam Proses Kalibrasi Bersama Sensor Standar

dalam Arduino yang disambungkan ke dalam komputer melalui *port* USB.

3.1 Metode Pengukuran

Lokasi pengukuran sensor vibrasi dilakukan di Laboratorium Vibrasi Puslit Metrologi LIPI pada 2–3 Februari 2017 dengan temperature kondisi ruangan (20,6–21,7)°C dan kelembaban (59–62)% menurut pengukuran *thermohygrometer* yang telah terkalibrasi oleh laboratorium. Proses



Gambar 13. Perangkat Lunak *Pulse Labshop Version 11.2.0*

kalibrasi dilakukan dengan pengukuran secara langsung bersama *reference accelerometer* B&K tipe 8306 sn 1499872 dengan sumber getaran *exciter* B&K 4808.

Hasil tampilan data dari pembacaan ADXL 345 ditampilkan dalam 10 bit dalam semua *range* sehingga harus dikonversikan lagi ke dalam *g*. Pembacaan akselerasi ADXL 345 terpengaruh oleh gravitasi bumi sebesar 1 *g* sehingga dalam kondisi diam tegak lurus, sensor ADXL 345 membaca sumbu Z sebesar 1 *g* sebagai nilai *offset* yang besarnya dalam 10 bit adalah 246 dalam range 2 *g*, 123 dalam range 4 *g*, dan 62 dalam range 8 *g*. Data yang didapat dalam kalibrasi pengukuran akselerasi ini harus dikurangi dengan nilai *offset* dan dibagi dengan nilai *offset* sehingga menghasilkan akselerasi dalam unit *g* dalam dua angka dibelakang koma.

$$a_{\text{uut}} = (b_{\text{uut}} - b_{\text{offset}}) / b_{\text{offset}}$$

Dikarenakan hasil data pengukuran ADXL 345 dalam bentuk 10 bit dan rentang pengukuran mulai dari ±2 *g* sampai dengan ±16 *g* maka 10 bit data terbagi menjadi dua bagian, yaitu 9 bit untuk nilai akselerasi positif dan 9 bit lainnya untuk nilai akselerasi negatif. Nilai akselerasi positif 9 bit ditampilkan dari nol sampai 511 (2⁹-1), sedangkan untuk nominal akselerasi negatif dimunculkan dengan cara -1 sebagai 16 bit dan terus turun sejumlah 9 bit jika nominalnya mengecil dari 65535 sampai 65024 sebagai nilai akselerasi minimum

Standar kalibrasi yang digunakan dalam proses ini adalah ISO 16063 bagian 21. Proses ini menggunakan perangkat lunak *Pulse*

Labshop version 11.2.0 untuk melakukan pengaturan frekuensi dan menampilkan hasil pengukuran oleh sensor standar.

Kalibrasi dilakukan dalam rentang ukur (0,3–5) *g* frekuensi (10–200) Hz yang dibagi dalam delapan pengukuran. Lima kali pengukuran dilakukan untuk setiap nominal *g*. Hasil dari pengukuran ADXL 345 langsung dibandingkan dengan pengukuran sensor standar sehingga didapatkan koreksi dari hasil pengukuran ADXL 345 menurut persamaan (9).

$$a_{\text{koreksi}} = a_{\text{standar}} - a_{\text{uut}} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- a_{koreksi} = koreksi pembacaan UUT dari standar (*g*)
- a_{uut} = rata-rata akselerasi pembacaan UUT (*g*)
- a_{standar} = data pembacaan akselerasi standar (*g*)

Menurut standar kalibrasi ISO 16063 bagian 21, ada sebelas sumber ketidakpastian yang akan diperhitungkan dalam proses kalibrasi ini. Ketidakpastian dalam kalibrasi ini ada dua tipe, yaitu tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A adalah pengulangan data dalam penelitian ini, yaitu *repeatability* dari sensor ADXL 345 sebagai *unit under test* (UUT). Ketidakpastian tipe A menggunakan persamaan matematika seperti persamaan (10) di bawah ini.

$$u_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

- u_a = ketidakpastian dari *repeatability*
- σ = standar deviasi
- n = jumlah data
- x_i = data ke-*i*
- \bar{x} = rata-rata data

Ada sepuluh ketidakpastian lainnya yang tergolong ke dalam tipe B, yaitu dari peralatan yang digunakan dan kondisi lingkungan. Pertama adalah nilai ketidakpastian dari sensor standar B&K 8305. Nilai ketidakpastian ini diperoleh dari data sertifikasi kalibrasi yang telah dilakukan oleh Puslit Metrologi LIPI dengan nilai sebesar 0,9%. Kedua adalah

penyimpangan sensor standar yang didapat dari spesifikasi alat dokumen B&K. Ketiga adalah *conditioning amplifier* yang terbagi menjadi tiga ketidakpastian, yaitu tegangan masuk, tegangan keluar, dan kapasitor, di mana data tersebut didapat dari dokumen B&K. Keempat adalah *pulse analyser* yang ketidakpastiannya sudah dikalibrasi oleh Laboratorium Kelistrikan Puslit Metrologi LIPI dengan nilai 0,42%. Kelima adalah daya baca alat ukur UUT (ADXL 345) yang diperoleh melalui kalkulasi persamaan (11).

$$S_{uut} = \frac{R/2}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

s_{uut} = ketidakpastian pembacaan alat

R = resolusi

Keenam adalah stabilitas sistem pengukuran. Hasil dari stabilitas tersebut sudah dilakukan eksperimen oleh Laboratorium Vibrasi Puslit Metrologi LIPI dengan hasil sebesar 0,033%. Ketidakpastian ketujuh sampai kesepuluh dipengaruhi oleh prosedur pemasangan dan lingkungan. Semua data tersebut telah diberikan dalam spesifikasi alat B&K.

Kesebelas macam ketidakpastian tersebut akan dikalkulasi menjadi ketidakpastian gabungan (u_c) dengan persamaan (12).

$$u_c = \sqrt{\sum c_i^2 \times u_a^2} \dots\dots\dots (12)$$

dengan c_i adalah koefisien sensitivitas yang didapat dari persamaan (1) melalui persamaan (13)

$$c_i = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \dots\dots\dots (13)$$

di mana:

C_i = koefisien sensitivitas

$\frac{\partial F(x)}{\partial x}$ = turunan dari persamaan (1)

sehingga akan didapatkan ketidakpastian gabungan dari berbagai sumber ketidakpastian yang sudah disebutkan di atas. Hasil ketidakpastian gabungan akan diolah menjadi

ketidakpastian bentangan dengan persamaan (14).

$$u_{ex} = k \times u_c \dots\dots\dots (14)$$

Keterangan:

U_{ex} = ketidakpastian bentangan

k = faktor cakupan

u_c = ketidakpastian gabungan

Setelah mendapatkan ketidakpastian bentangan, ketidakpastian yang akan diberikan untuk alat ukur ADXL 345 ini akan ditambahkan sebesar 0,3% sesuai dengan prosedur kalibrasi Laboratorium Vibrasi Puslit Metrologi LIPI untuk meningkatkan keyakinan dalam penentuan ketidakpastian.

4. HASIL DAN ANALISIS DATA

Kalibrasi sensor ADXL 345 dilakukan dalam frekuensi 1/3 oktav (10–200) Hz. Dalam satu kali pengukuran dilakukan seratus kali pengambilan data. Data yang diambil merupakan akselerasi selama pergerakan vibrasi yang dilakukan dalam proses kalibrasi sehingga akan berubah-ubah serta memiliki nilai maksimum dan minimum. Akselerasi yang akan diambil dalam pengolahan data ini adalah akselerasi pada saat perpindahan pada posisi nol menuju positif sehingga mendapatkan akselerasi maksimum. Data yang didapat dalam 10 bit akan diolah menjadi akselerasi dalam g dan dikalkulasi ketidakpastiannya sesuai dengan cara diatas dan dimuat dalam tabel berikut.

Frek. (Hz)	PEMBACAAN UUT						Pembacaan		Koreksi	SD	UNCERTAINTY (%)		
	L1	L2	L3	L4	L5	Rata-rata	STD	UA			U95	Stat-ed	
	Acceleration						(g-rms)						(g-rms)
10	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.300	0.14	0.007	0.682	2.3	2.5	
20	0.70	0.68	0.71	0.69	0.69	0.69	0.500	0.19	0.011	0.678	2.0	2.3	
31.5	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.000	0.08	0.000	0.000	1.4	1.6	
40	1.76	1.76	1.76	1.73	1.76	1.75	1.500	0.25	0.011	0.279	1.4	1.6	
50	2.15	2.12	2.11	2.15	2.15	2.14	2.000	0.14	0.018	0.369	1.4	1.7	
63	2.38	2.35	2.37	2.37	2.30	2.35	2.500	-0.15	0.032	0.614	1.6	1.9	
80	2.42	2.41	2.41	2.42	2.42	2.42	3.000	-0.58	0.004	0.082	1.0	1.3	
100	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	3.500	-1.13	0.000	0.000	1.0	1.3	
125	2.26	2.24	2.23	2.26	2.26	2.25	4.000	-1.75	0.014	0.287	1.2	1.5	
160	2.10	2.08	2.08	2.08	2.10	2.09	4.500	-2.41	0.009	0.189	1.2	1.4	
200	1.90	1.90	1.90	1.89	1.89	1.90	5.000	-3.10	0.009	0.208	1.2	1.4	

Berdasarkan hasil pengukuran dalam tabel di atas, hasil pengukuran akselerasi yang dilakukan dalam berbagai frekuensi (10–200) Hz menunjukkan bahwa sensor ADXL 345 hanya bekerja dengan baik pada frekuensi dibawah 80 Hz. Hasil rata-rata pembacaan sensor UUT dengan frekuensi diatas 63 Hz sangat jauh dengan hasil pembacaan sensor standar. Hasil koreksi akan terus meningkat jika frekuensi terus dinaikkan di atas 63 Hz sehingga, menurut

hasil data yang diperoleh, hasil pengukuran untuk (3–5) g tidak layak untuk digunakan sebagai acuan dalam kalkulasi untuk menarik kesimpulan. Maka dari itu, frekuensi yang digunakan untuk pengukuran 3 g sampai 5 g diubah agar tidak melewati 63 Hz. Tabel berikut adalah data pengukuran dengan frekuensi yang telah diubah.

Frek. (Hz)	PEMBACAAN UUT						Pembacaan		Koreksi	SD	UNCERTAINTY (%)		
	L1	L2	L3	L4	L5	Rata-rata	STD	UA			U95	Stat-ed	
	Acceleration						(g-rms)						(g-rms)
10	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.300	-0.14	0.007	0.682	2.2	2.5	
20	0.70	0.68	0.71	0.69	0.69	0.69	0.500	-0.19	0.011	0.678	2.0	2.3	
31.5	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.000	-0.08	0.000	0.000	1.3	1.6	
40	1.76	1.76	1.76	1.73	1.76	1.75	1.500	-0.25	0.011	0.279	1.3	1.6	
50	2.15	2.12	2.11	2.15	2.15	2.14	2.000	-0.14	0.018	0.369	1.4	1.7	
63	2.38	2.35	2.37	2.37	2.30	2.35	2.500	0.15	0.032	0.614	1.6	1.9	
63	2.86	2.83	2.81	2.85	2.85	2.84	3.000	0.16	0.020	0.321	1.1	1.4	
63	3.23	3.24	3.31	3.31	3.18	3.25	3.500	0.25	0.055	0.762	1.8	2.1	
50	4.24	4.21	4.27	4.19	4.26	4.24	4.000	-0.24	0.033	0.353	1.3	1.6	
50	4.79	4.79	4.81	4.84	4.69	4.78	4.500	-0.28	0.054	0.507	1.5	1.8	
50	5.32	5.32	5.40	5.27	5.35	5.34	5.000	-0.34	0.048	0.399	1.4	1.7	

Frekuensi (Hz)	Range (g)	Akselerasi (g)		
		Standar	UUT	Koreksi
20	2	1.000	1.08	-0.08
31.5	2		1.08	-0.08
40	2		1.08	-0.08
50	2		1.06	-0.06
63	2		0.94	0.06
80	2		0.78	0.22

Dengan dilakukannya pengukuran ulang dengan batas frekuensi maksimum 63 Hz, pengukuran yang dilakukan dalam jarak (3–5) g menjadi lebih baik dengan nilai koreksi yang serupa dengan nilai nilai yang lainnya. Dalam pengukuran ini, terdapat beberapa bagian yang memiliki frekuensi konstan dengan nominal akselerasi standar yang berbeda-beda sehingga dapat dianalisis dan dilihat pengaruhnya dari perubahan nominal akselerasi standar kepada kinerja sensor ADXL 345. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut, kenaikan dalam nilai koreksi dari pengukuran dihasilkan seiring naiknya nilai akselerasi yang diukur. Koreksi paling besar pada jarak (2,5–3,5) g dengan frekuensi yang stabil didapat pada akselerasi terbesar, yaitu 3,5 g. Koreksi terbesar juga diperoleh dengan frekuensi 50 Hz pada akselerasi 5 g. Tabel di bawah ini menunjukkan pengukuran pada akselerasi konstan 1 g dengan frekuensi yang berbeda-beda (20–80) Hz.

Pada pengukuran ini, frekuensi diterapkan sebagai variabel yang berubah dan nominal akselerasi standar sebagai variabel konstan. Berdasarkan tabel tersebut, sifat dari pengukuran sensor ADXL 345 sangat terlihat jelas. Nilai pengukuran dari UUT berkurang apabila frekuensi dari getaran bertambah. Bertambahnya frekuensi dari getaran akan menghasilkan pengukuran nilai koreksi yang tinggi. Pengaruh penambahan frekuensi dalam pengukuran ini sama seperti pengaruh dari penambahan nilai standar akselerasi dalam pengukuran ini yang menyebabkan naiknya nilai koreksi dari pengukuran.

Nilai ketidakpastian tertinggi diperoleh pada frekuensi terendah, yaitu 10 Hz, dengan akselerasi 0,3 g. Sumber ketidakpastian paling tinggi diperoleh dari U_a , yang artinya

repeatability pada frekuensi 10 Hz tidak stabil. Nilai ketidakpastian yang besar juga didapat pada 3,5 g dengan frekuensi 63 Hz. Nilai yang besar disebabkan oleh U_a yang tinggi menandakan ketidakstabilan pengukuran yang didapat pada pengukuran dalam kondisi tersebut.

5. KESIMPULAN

Pengukuran awal yang menggunakan frekuensi (10–200) Hz menghasilkan data yang tidak valid pada frekuensi di atas 63 Hz. Data ini menandakan bahwa sensor akselerometer ADXL 345 tidak dapat melakukan pengukuran akselerasi dengan baik pada frekuensi 80 Hz ke atas. Hal ini dibuktikan pada saat pengukuran kedua yang mengganti frekuensi tinggi dengan 63 Hz dan 50 Hz. Pada pengukuran ini, data yang dihasilkan dapat diterima dan memberikan koreksi yang serupa dengan beberapa data di atasnya.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa kenaikan frekuensi dan kenaikan nominal akselerasi yang diukur mempengaruhi kinerja daya baca sensor ADXL 345. Meskipun kedua faktor tersebut memiliki pengaruh terhadap daya kerja sensor ADXL 345, menurut perkumpulan data dan analisis di atas, peningkatan frekuensi memiliki pengaruh yang lebih kritis. Hal ini ditunjukkan dengan pengukuran sensor pada 5 g dengan frekuensi 50 Hz yang masih dapat menghasilkan data yang menunjukkan kinerja sensor masih dapat melakukan pembacaan data.

Sementara itu, pengukuran pada frekuensi 80 Hz dalam pengukuran 3 g sudah menghasilkan penyimpangan yang sangat besar sehingga data sudah tidak bisa diambil untuk diolah lebih lanjut. Ketidakpastian yang diperoleh juga menyimpulkan bahwa pengaruh peningkatan frekuensi lebih kritis daripada pengaruh kenaikan nominal akselerasi. Ketidakpastian pada 63 Hz memiliki nominal yang lebih besar jika dibandingkan dengan 50 Hz yang memiliki nominal akselerasi yang lebih tinggi.

Kemampuan pengukuran sensor ADXL 345 sangat bergantung pada kondisi pengukurannya, yaitu frekuensi dan nominal akselerasi yang

diukur. Kemampuan pengukuran ADXL 345 terbaik diperoleh pada frekuensi 31,5 Hz dan 40 Hz dengan nominal akselerasi 1 g dan 1,5 g. Pada titik tersebut, nilai ketidakpastian pengukuran yang diperoleh adalah 1,6%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Steven Jonathan, mahasiswa ID 11501067 Swiss German University, yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan juga kepada manajemen Pusat Penelitian Metrologi LIPI yang telah menyediakan fasilitas penelitian dan sistem kalibrasinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Albarbar, A., Mekid, S., Starr, A., & Pietruszkiewicz, R. (2008). Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study. *Sensors*, 8(2), 784–799. Diakses dari <http://dx.doi.org/10.3390/s8020784>
- Arduino. (2016a). *Arduino Due*. Diakses dari <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.
- Arduino. (2016b). *SPI Library*. Diakses dari <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>.
- Arduino. (2016c). *Wire Library*. Diakses dari <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>.
- Hakim, Muhamad Lukman AI. (2015). Studi evaluasi pelaksanaan kebijakan pemeliharaan jalan kota di Kota Surabaya. *Kebijakan dan Manajemen Publik*, 3(1), 229–239.
- Jacob, Alvin, Zakaria, W. N. W., & Tomari, M. R. B. M. Evaluation of I2C communication protocol in development of modular controller boards. *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*, 11(8), 4991–4996.
- Luis, F. M., Esther, R., Riley, J., Hart, J. M., Barkan, C. P. L., & Narendra, A. (2010). Condition monitoring of railway turnouts and other track components using machine vision. Dalam *Proceeding of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, 1442.
- SparkFun. (2016). *SparkFun Triple Axis Accelerometer Breakout – ADXL34*. Diakses dari <http://www.sparkfun.com/products/9836>.
- Wahono, D. (2013). Mendeteksi kondisi rel putus menggunakan akselerometer dan kamera visi. *Jurnal Instrumentasi*, 37(2), 83–91.