

Pembuatan Sensor Getaran Berbasis MEMS Untuk Pemantauan Kondisi Mesin dan Struktur

A. Widodo, L. Rozaqi, I. Haryanto, dan Dj. Satrijo

Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH - Tembalang, Semarang, 50275
E-mail: awid@undip.ac.id

Abstrak

Pemantauan kondisi mesin dan struktur berbasis getaran adalah sebuah metode yang digunakan untuk menentukan kondisi suatu mesin atau struktur dengan memantau getaran yang terjadi. Paper ini membahas pembuatan sensor cerdas nirkabel yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi mesin atau struktur dengan cara memonitor parameter getarannya. Sensor cerdas nirkabel tersebut dirancang agar bisa secara terus menerus mengukur parameter getaran dari sistem secara *real time* dan mengirimkan data tersebut secara nirkabel menuju *server* komputer (*base station*) untuk proses pengolahan sinyal secara digital. Dari proses ini getaran akan dianalisis dan diplot dalam bentuk grafik yang digunakan untuk menentukan kondisi dari mesin atau struktur tersebut. Pengujian akuisisi sinyal getaran telah dilakukan pada simulator mesin untuk menguji kinerja dari sensor cerdas yang digunakan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor yang dibuat cukup baik dan berpotensi untuk digunakan sebagai alat pemantau getaran mesin dan struktur.

Keywords: Getaran, pemantauan kondisi mesin, sensor cerdas, nirkabel, MEMS sensor

Pendahuluan

Pada saat ini, sistem perawatan berbasis kondisi (PBK) mulai banyak digunakan karena memiliki tingkat efisiensi yang tinggi. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mengetahui dan memantau kondisi mesin tanpa harus menghentikan operasi dari sistem (Randall, dkk., 2011). Salah satu cara untuk mengetahui kondisi dari sistem yang sedang berjalan adalah dengan memantau dan menganalisa getaran yang terjadi pada sistem. Getaran dapat diukur dengan menggunakan beberapa macam sensor diantaranya *strain gauge*, *fiber optic*, *piezoelectric* dan akselerometer.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat sebuah prototipe alat untuk mengukur getaran pada sistem struktur atau mesin berbasis sensor nirkabel. Sensor dibuat dengan menggunakan sensor akselerometer MEMS 3-sumbu produksi dari *Analog Devices* tipe ADXL345 dengan beberapa alasan diantaranya adalah ukurannya yang kecil, sensitif, ringan dan relatif murah (Joel, dkk., 2010). ADXL345 dapat mendeteksi akselerasi baik statik maupun dinamik yang dihasilkan

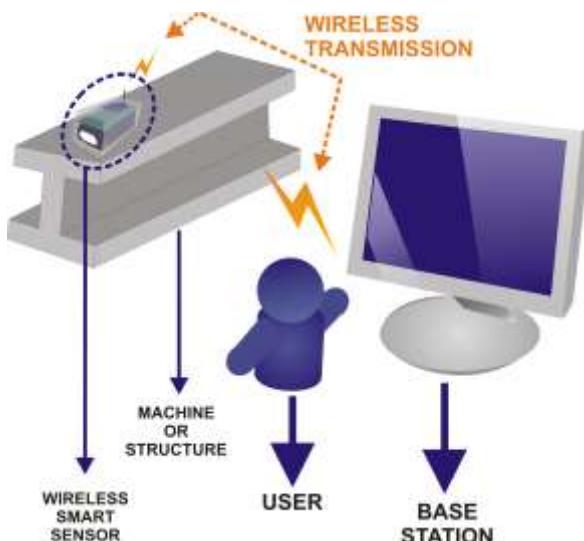
dari getaran (www.analog.com). Sensor ADXL345 merupakan sensor yang dibuat dengan teknologi *micromachining* dengan struktur *poly-silicon* yang dibuat diatas *silicon wafer*. Defleksi dari struktur di dalam MEMS akselerometer diukur menggunakan differensial kapasitor yang terdiri dari pelat-tetap yang bebas dan pelat yang dihubungkan dengan massa yang bergerak. Akselerasi memberikan defleksi pada pelat dan memberikan efek *unbalance* pada differensial kapasitor yang menghasilkan output sensor proporsional amplitudo terhadap akselerasi. Selain itu, sistem sensor nirkabel ini dilengkapi dengan sebuah mikroprosesor yang berfungsi sebagai pengatur jalannya pengambilan data dan eksekutor pada jalannya transmisi data dari sensor ke *base station*. Pengiriman data dari sensor ke *base station* dilakukan secara nirkabel karena mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan menggunakan kabel, yaitu apabila sebuah sistem pengukuran berada pada tempat yang terpisah jauh dengan sistem akuisisi data maka penggunaan kabel akan mengeluarkan biaya yang lebih besar untuk instalasi dan perawatannya (Mc Lean and Wolf, 2002; Ziani, dkk., 2000).

Keuntungan lain dari sensor nirkabel ini dibandingkan akselerometer konvensional adalah harganya murah, fleksibel dan memungkinkan

pemrograman pada perangkat lunak yang dipakai. Selain itu sensor nirkabel dapat dibuat menjadi kumpulan dari beberapa sensor cerdas yang saling terintegrasi dan membentuk sebuah jaringan yang disebut jaringan sensor cerdas nirkabel (*wireless smart sensor network*) sehingga pemantauan kondisi pada suatu sistem tidak hanya dilakukan pada satu titik tetapi dapat dilakukan pada beberapa *node* sehingga pengukuran parameter yang ada pada sistem dapat lebih akurat (Lewsi, 2005).

Konfigurasi Sistem

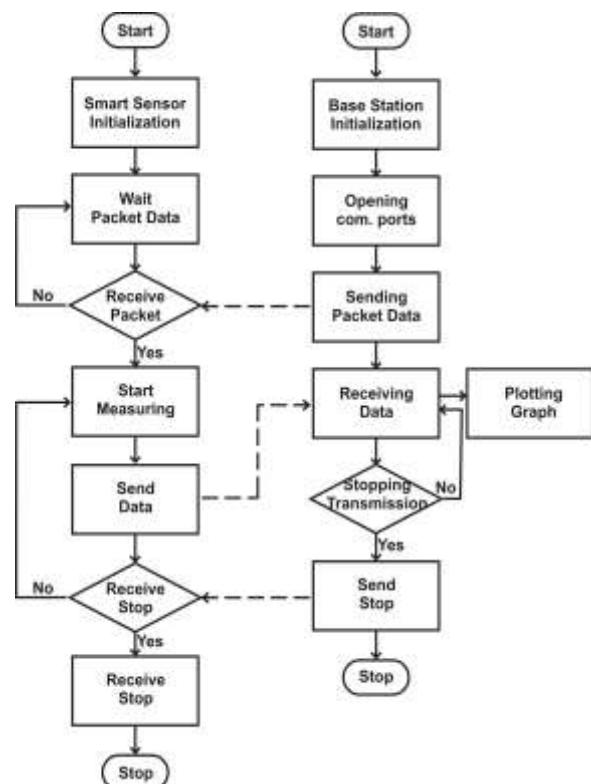
Prinsip kerja dari *sensor cerdas nirkabel* ditunjukkan pada Gambar 1, sensor dipasang pada struktur atau mesin kemudian sensor tersebut akan membaca getaran yang terjadi pada sistem dan mentransmisikannya ke *base station* sesuai dengan *setting* yang dilakukan pada *base station*. Komunikasi antara sensor dan *base station* dilakukan secara dua arah *half duplex* atau *full duplex* melalui jalur *wireless 2,4 GHz* dengan menggunakan modul komunikasi produksi Maxstream Xbee-Pro yang secara teoritis dapat mentransmisikan data sejauh 1,5 km *outdoor line of sight* (www.MaxStream.net).



Gambar 1. Skema Kerja *Sensor cerdas nirkabel* dan *Base Station*

Sistem komunikasi antara sensor cerdas nirkabel dengan *base station* sebagai penerima data getaran dimulai ketika sensor dihidupkan, kemudian sensor akan menerima paket data

dari *base station* yang berisi parameter-parameter yang harus diukur seperti *sampling rate*, *range pengukuran*, *resolusi pengukuran* dan lain-lain. Setelah menerima paket data dari *base station* yang berisi parameter-parameter yang harus dikirimkan, sensor kemudian memulai akuisisi data yang berjalan secara kontinyu, bersamaan dengan itu data yang didapatkan juga dikirimkan ke *base station* secara *realtime* sehingga kondisi getaran yang dipantau dapat diketahui sepanjang sensor masih aktif. Gambar 2 menunjukkan diagram sistem komunikasi antara *base station* dengan sensor cerdas nirkabel.

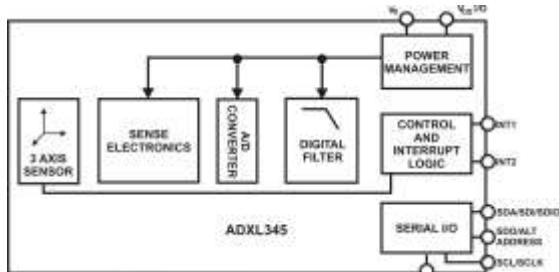


Gambar 2. Flowchart sistem komunikasi sensor cerdas nirkabel dengan *base station*

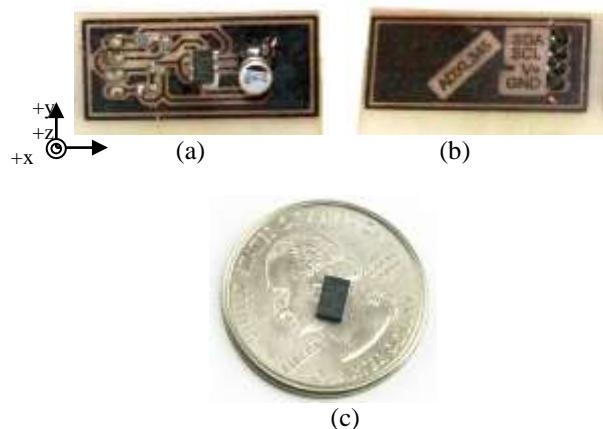
Desain Sistem

Sensor getaran yang digunakan pada sensor cerdas nirkabel ini adalah akselerometer MEMS produksi *Analog Devices* yaitu ADXL345, dimana *chip* ini merupakan *chip* yang kecil, tipis, ringan, murah serta dapat mendeteksi adanya akselerasi baik statik maupun dinamik yang dapat digunakan untuk membaca getaran arah 3-sumbu XYZ dan dapat mengeluarkan output digital dengan resolusi tinggi (13bit) secara langsung. Selain itu sensor ini dapat mengukur getaran dengan empat macam pilihan *range pengukuran* getaran yaitu ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g

melalui komunikasi serial SPI (*3 or 4 wire*) atau *two-wire interface* I2C. Blok diagram dari akselerometer MEMS ADXL345 dan modul sensor ditunjukkan oleh Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Blok Diagram ADXL345.

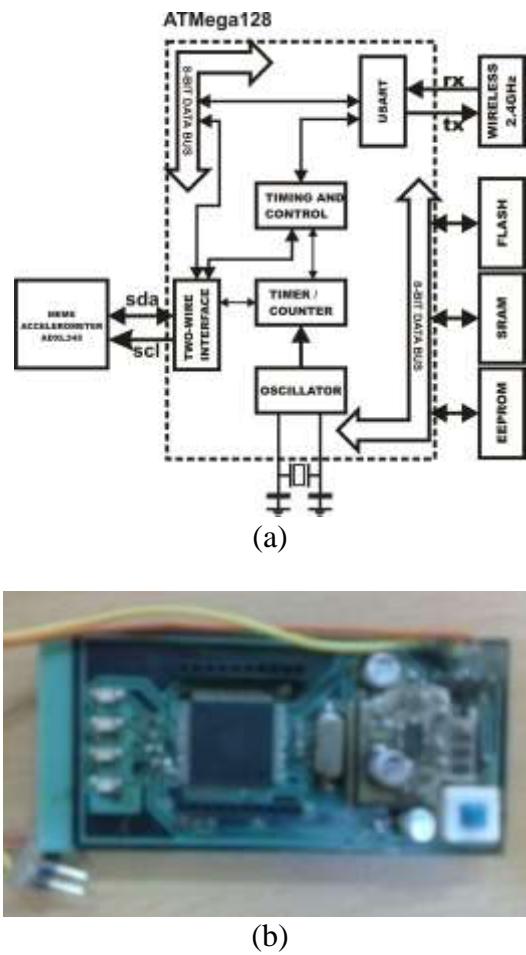


Gambar 4. Modul sensor akselerometer 3axis ADXL345; (a) Tampak Atas (b) Tampak Bawah (c) MEMS ADXL345 chip

Akselerometer dapat dibedakan berdasarkan output sensor yaitu digital dan analog. Pada akselerometer tipe analog keluaran sensor yang berupa akselerasi proporsional terhadap besarnya nilai tegangan yang dikeluarkan oleh akselerometer. Sedangkan akselerometer digital mengeluarkan output dengan modulasi panjang pulsa/*pulse width modulation* (PWM) yaitu sebuah pulsa persegi dengan frekuensi tertentu dan dalam bentuk data digital yang merupakan kombinasi dari beberapa bit yang merepresentasikan besarnya nilai pengukuran akselerometer. Keuntungan akselerometer tipe digital dibandingkan dengan akselerometer tipe analog adalah pada akselerometer digital sudah terdapat *signal conditioning* yang tertanam di dalam *chip* sehingga tidak diperlukan lagi rangkaian tambahan *signal conditioning* seperti pada akselerometer analog. Disamping itu pengaturan *range* pengukuran, resolusi pengukuran dan *bandwidth* tidak perlu

dilakukan dengan mengubah *hardware* seperti pada akselerometer tipe analog, pada akselerometer tipe digital hanya perlu dilakukan pengiriman data serial pada *chip* akselerometer.

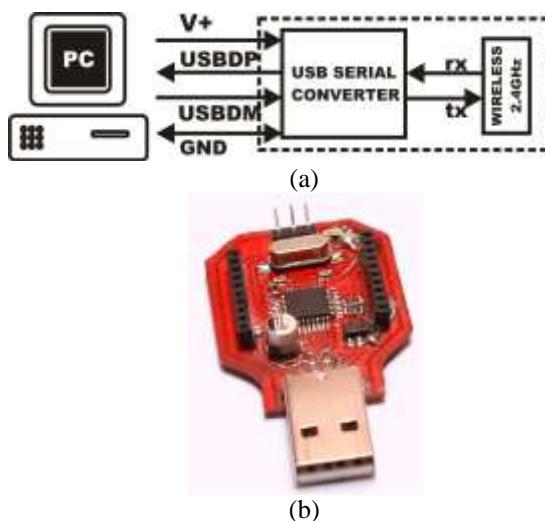
Sensor cerdas nirkabel tersusun atas tiga bagian yaitu modul sensor akselerometer, modul komunikasi *wireless* 2,4GHz dan sebuah mikroprosesor. Aktivitas sensor cerdas nirkabel ini sebagian besar dikendalikan oleh mikroprosesor ATmega128 seperti akuisisi data getaran dari akselerometer ADXL345 melalui komunikasi serial I2C, operasi aritmetika, serta komunikasi dan transmisi data dengan *base station* melalui jalur *wireless*. ATmega128 merupakan mikrokontroler 8 bit yang *powerfull* dengan fitur seperti 128Kbytes *programmable flash*, 4Kbytes EEPROM, 4Kbytes SRAM, 8channel 10bit ADC dan lain lain (www.atmel.com). Gambar 5a dan 5b menunjukkan blok diagram dari sensor cerdas nirkabel secara keseluruhan dan *board* utama sensor cerdas nirkabel.



Gambar 5. Sensor cerdas nirkabel; (a) Blok Diagram (b) Main Board

Base station merupakan sebuah stasiun penerima

data yang terdiri dari sebuah PC dan sebuah alat yang dapat berkomunikasi secara dua arah dengan sensor cerdas nirkabel. Pada perangkat keras *base station* juga dilengkapi dengan modul *wireless* 2,4 GHz sehingga dapat mengirim dan/atau menerima data dari sensor cerdas, data serial yang diterima melalui jalur *wireless* ini kemudian diubah menjadi paket USB oleh sebuah *chip* USB Serial *Converter* FT232BL. Blok diagram *base station* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Base Station; (a) Blok Diagram
(b) Hardware.

Sinyal Getaran

Amplitudo dapat ditentukan dari pembacaan data sensor akselerometer yang berbentuk bilangan digital yang mana tiap LSB dari data merepresentasikan besarnya akselerasi gravitasi sebesar $0,004g$ ($g = 9,81 \text{ m/det}^2$). Jadi amplitudo getaran dapat ditentukan dengan mudah.

Untuk keperluan analisis sinyal secara digital dalam kenyataannya sinyal dari domain waktu diubah kedalam bentuk domain frekuensi dengan menggunakan *fourier transform*. *Discrete Fourier Transform* (DFT) mengubah data *real* sejumlah N sampel x_0, \dots, x_{N-1} menjadi sejumlah bilangan kompleks X_0, \dots, X_{N-1} dalam domain frekuensi yang ditunjukkan dengan menggunakan formula DFT (Kreysig, 2011).

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-(\pi N i n k)/N} ; k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

Atau dalam bentuk matriks

$$X_k = \frac{1}{N} W_{kn} x_k ; X_k = [X_0, \dots, X_{N-1}] ; x_k = [x_0, \dots, x_{n-1}] \quad (2)$$

Namun penggunaan formula DFT untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi memiliki sebuah kendala, apabila data yang diubah ke dalam domain frekuensi berjumlah besar karena memerlukan operasi yang panjang yaitu melakukan perkalian vektor matriks $X\vec{x}$ membutuhkan $O(N^2)$ untuk sejumlah N sampel data. Untuk memecahkan masalah ini, DFT dapat dihitung menggunakan algoritma FFT yang dapat mereduksi operasi DFT yang semula $O(N^2)$ menjadi $O(N \log^2 N)$.

Hasil dan Pembahasan

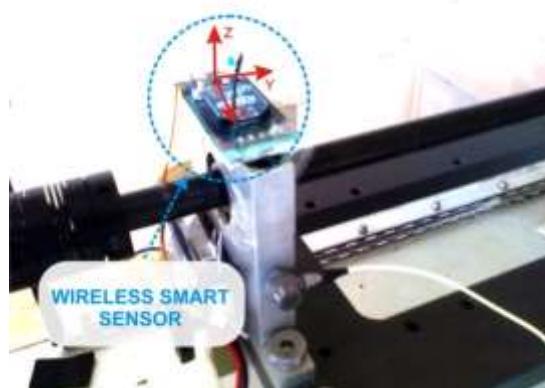
Pengujian sensor cerdas nirkabel untuk mengakuisisi data getaran mesin simulator sebagaimana terlihat pada Gambar 7. Ketika mesin dihidupkan, motor AC akan mengeluarkan getaran yang kemudian akan diukur oleh sensor dan kemudian data getaran tersebut akan ditransmisikan secara *wireless* ke *base station* yang berada terpisah di sisi lain mesin.

Gambar 8 menunjukkan hasil dari eksperimen, dimana sensor cerdas nirkabel dapat mendeteksi getaran dalam arah 3-sumbu XYZ. Data getaran yang didapat kemudian ditransmisikan ke *base station* dan kemudian ditampilkan pada PC sebagai plot sinyal domain waktu secara *realtime*.

Selain dengan cara tersebut data getaran juga dapat disimpan ke dalam format *text files* dan selanjutnya dapat dilakukan analisa secara *offline* dengan berbagai macam *software* seperti Matlab, LabView, atau bahkan dengan menggunakan Microsoft Excel. Gambar 8a dan 8b menunjukkan data getaran yang telah diubah menjadi *frequency domain* kemudian telah dilakukan *plot* menggunakan Matlab.



(a)

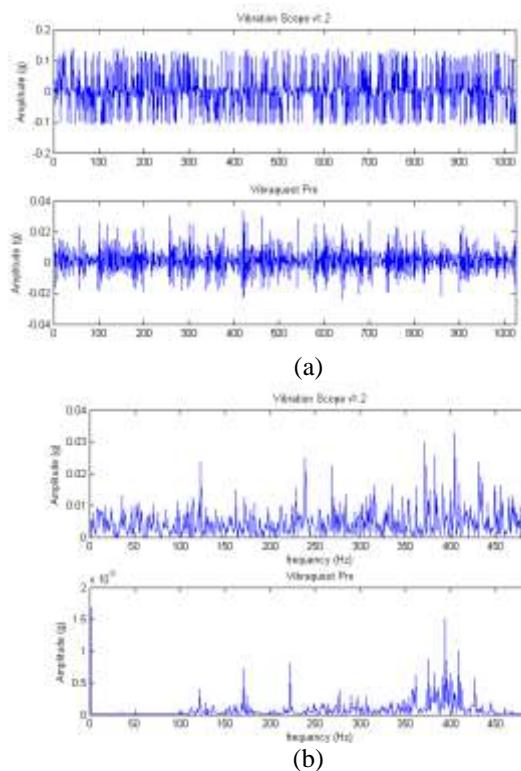


(b)

Gambar 7. (a) Pengujian sensor pada mesin; (b) Detail instalasi pengujian



Gambar 8. Data getaran yang di plot kedalam domain waktu



Gambar 8. Sinyal getaran; (a) domain waktu; (b) domain frekuensi

Kesimpulan

Pengembangan sensor cerdas nirkabel untuk mengukur getaran pada suatu sistem merupakan salah satu cara untuk mengimplementasikan metode pemantauan kondisi mesin secara efektif dan murah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor cerdas nirkabel dapat digunakan untuk mengukur getaran dalam arah 3-sumbu XYZ secara simultan dan dapat berkomunikasi secara *wireless* dengan *base station*. Sensor yang telah dibuat ini perlu dikembangkan lagi untuk mencapai *sampling rate* yang lebih tinggi. Validasi masih perlu dilakukan untuk mendapatkan data getaran yang handal seperti pada akselerometer konvensional.

Referensi

- Joel, R., William, L., Cleghorn., James, K.M., Design and Analysis of a low frequency MEMS vibration sensor for automotive fault detection, *International Journal of Vehicle Design.* 54(2): 93-110, 2010.
- Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics 9th Ed.*, USA: John Wiley & Sons Ltd. 2011.
- Lewis, F.L., *Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*, New York: John Wiley & Sons Ltd. 2005.

- McLean, C., and Wolfe, D., Intelligent wireless condition-based maintenance, in *Sensors*, 2002.
- Randall, R. B., *Vibration Based Condition Monitoring*, West Sussex: John Willey & Sons Ltd. 2011.
- Ziani, M., Bennouna, M., Amamou, M., and Barboucha, M., The Smart Sensor Design in Industrial Processes Applications, *In The 10th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 2000.

<http://www.analog.com>, Analog Devices, Accelerometer 3 axis ADXL345, diakses pada tanggal 5 Maret 2013.

<http://www.MaxStream.net>, XBee Series 2 OEM RF Modules, diakses pada tanggal 5 maret 2013.

<http://www.atmel.com>, 8bit microcontroller with 128Kbytes In-System Programmable Flash, datasheet ATmega128, diakses pada tanggal 5 Maret 2013.