

# Analisis Sistem Pengukuran Vibrasi pada Model Transformator di Gardu Induk

Ardianto Satriawan<sup>1</sup>, Yudi Satria Gondokaryono<sup>2</sup>

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung

Bandung, Indonesia

<sup>1</sup>satriawan@students.itb.ac.id, <sup>2</sup>ygondokaryono@stei.itb.ac.id

**Abstract**— Sebelum tahun 2006, PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali menggunakan *time-based maintenance* dalam perawatan transformator-transformator yang dimilikinya. Seiring berjalannya waktu, metode ini dirasa kurang efisien dari sisi biaya maupun sumber daya manusia sehingga mulai dikembangkan *condition-based maintenance* (CBM). Pada tahun 2006, dikembangkan sistem CBM yang didasarkan pada temperatur untuk mengetahui kondisi transformator. Sistem tersebut diberi nama *thermal monitoring system* (TMS). Selain temperatur sebagai parameter kondisi transformator, parameter lain yang berpengaruh pada kerusakan transformator adalah vibrasi. Vibrasi terjadi akibat fenomena *magnetostriksi* pada inti transformator. Faktor vibrasi adalah faktor yang paling banyak menyebabkan kerusakan pada transformator. Oleh karena itu, untuk melengkapi sistem CBM berdasarkan CMS, mulai tahun 2011 dikembangkan *vibration monitoring system* (VMS). Pada tesis ini, dilakukan analisis dan evaluasi terhadap sistem pengukuran vibrasi pada model transformator di gardu induk yang merupakan bagian dari VMS. Sistem pengukuran vibrasi pada model transformator terdiri dari sensor berupa akselerometer, modul master board, dan perangkat lunak untuk pengolahan data. Analisis dan evaluasi dilakukan terhadap metode *time difference of arrival* dan metode amplitudo untuk penentuan estimasi posisi sumber vibrasi pada model transformator.

**Kata kunci**— *vibrasi; condition-based maintenance; akselerometer*

## I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik atau *electrical power grid system*, adalah suatu sistem yang terdiri dari pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang membentuk suatu interkoneksi satu sama lain. Pada sistem ini, tenaga listrik dihasilkan oleh pembangkit-pembangkit kemudian disalurkan ke pelanggan melalui jaringan transmisi dan distribusi. Pada jaringan transmisi dan distribusi tersebut, komponen yang sangat vital adalah transformator.

Transformator berfungsi untuk mengubah tegangan rendah dari pembangkit ke tegangan ekstra tinggi untuk transmisi jarak jauh. Sebaliknya, transformator juga berfungsi untuk mengubah tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan yang siap digunakan oleh pelanggan. Selain fungsi transformator yang sangat penting, komponen ini juga merupakan komponen yang mahal dan riskan mengalami kegagalan dan kerusakan. Untuk itu, diperlukan usaha untuk mengurangi resiko kegagalan dalam pengoperasiannya.

Sebelum tahun 2006, PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali melakukan pemeliharaan dengan cara memonitor transformator berdasarkan *life expectancy* transformator, yaitu 25–40 tahun. Namun, cara ini memiliki kelemahan karena transformator tidak selalu mencapai atau mungkin melebihi *life expectancy*-nya. Pada tahun 2000 hingga 2010, PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali mencatat bahwa terjadi 113 kegagalan transformator selama masa pengoperasian. Dari 113 kegagalan tersebut, 75.22% memerlukan penggantian dan 14.47% dapat diperbaiki. Sisanya tidak dilaporkan [1]. Dari 113 buah transformator yang memerlukan penggantian, 43 unit berusia 0–5 tahun, 51 unit berusia 6–25 tahun, dan 19 unit berusia di atas 26 tahun [2].

Kegagalan transformator memiliki dampak teknis, ekonomis, maupun sosiologis. Untuk itu diperlukan usaha pemeliharaan dan pemantauan kondisi transformator. Jenis-jenis pemeliharaan yang dilakukan oleh PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yaitu *corrective maintenance*, *breakdown maintenance*, *time-based maintenance*, dan *condition-based maintenance* [3].

*Time-based maintenance* (TBM) adalah teknik pemeliharaan yang dilakukan secara berkala ditentukan berdasarkan analisa terjadinya kegagalan dalam kurun waktu tertentu. Dengan kata lain, umur peralatan diperkirakan berdasarkan data-data waktu terjadinya kerusakan pada transformator. TBM merupakan strategi utama PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali dalam melakukan pemeliharaan transformator. Namun, strategi ini memiliki kelemahan yaitu pada saat pemeliharaan dapat terjadi pemadaman yang tidak perlu, adanya potensi kecelakaan kerja, pemborosan waktu, biaya, dan sumber daya manusia, dan juga informasi mengenai kondisi transformator yang didapatkan sangat sedikit. Hal ini menyebabkan perlunya pendekatan pemeliharaan dengan cara melakukan pemantauan kondisi transformator secara otomatis.

*Condition-based maintenance* (CBM) adalah merupakan teknik pemeliharaan berbasis pada pemantauan dengan melakukan pengukuran parameter-parameter pada transformator dalam kondisi bekerja sehingga mampu mendeteksi terjadinya penurunan dari kinerja sistem dan mampu mengetahui terjadinya kegagalan secara dini.

PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali telah memulai melakukan teknik CBM dengan otomatisasi pengukuran untuk pemeliharaan pada tahun 2006 dengan mengembangkan sebuah sistem yang mampu mengetahui kondisi transformator

berdasarkan temperaturnya. Sistem ini disebut thermal monitoring system atau TMS [4].

Selain temperatur, faktor lain yang sangat berpengaruh terhadap kegagalan transformator adalah vibrasi yang terjadi karena fenomena magnetostriksi pada inti transformator. Vibrasi jenis ini memiliki frekuensi 120 Hz, 240 Hz, dan kelipatannya. Vibrasi yang terjadi secara excessive dan terus menerus dapat menyebabkan kegagalan secara mekanik pada transformator [5]. Untuk itu, sejak tahun 2011 mulai dikembangkan sistem untuk memantau vibrasi yang diberi nama vibration monitoring system (VMS).

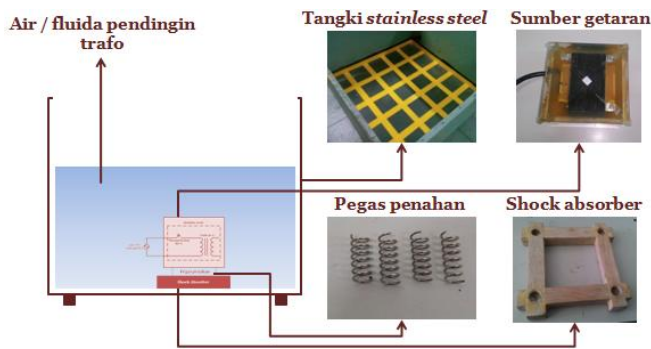
Perkembangan dari vibration monitoring system sejak tahun 2011 antara lain, melakukan estimasi posisi vibrasi dengan pemodelan berupa sinyal suara [6], perancangan tangki model trafo, filter digital, dan estimasi posisi vibrasi menggunakan akselerometer [7], implementasi fast fourier transform [8], perancangan sistem untuk akuisisi data [9], pemodelan fenomena magnetostriksi pada inti transformator [10], perancangan klasifikasi transformator [11], dan estimasi lokasi sumber vibrasi berdasarkan total signal energy [12].

Beberapa sub-sistem yang dibahas tersebut, terutama mengenai estimasi lokasi sumber vibrasi [6][7][12] masih belum sempurna. Sub-sistem tersebut masih memiliki kelemahan dalam hal pengambilan data maupun akurasi perhitungan. Untuk itu, masih diperlukan analisis dan evaluasi dalam hal estimasi posisi lokasi sumber vibrasi.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan perbandingan terhadap dua buah metode yang digunakan sebagai sistem pengukuran vibrasi, terutama pada bagian estimasi posisi sumber vibrasi yang dilakukan pada model transformator berupa tangki berisi air.

## II. PERANCANGAN DAN HASIL EKSPERIMEN

Pada penelitian ini dirancang 3 buah eksperimen dengan tujuan untuk memperoleh hubungan besaran-besaran dalam trafo dan mengetahui cara untuk mengetahui posisi pusat vibrasi. Alat dan bahan yang digunakan antara lain adalah trafo 20 A sebagai sumber getar, modul akselerometer dengan frekuensi sampling 12.8 kHz, dan tangki model trafo.

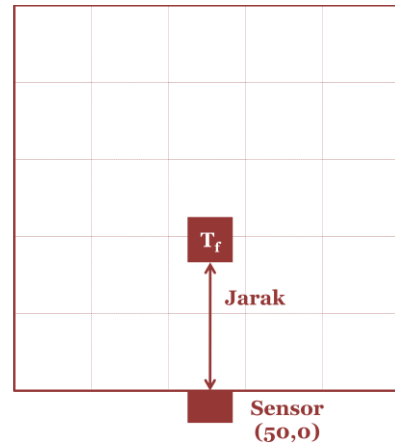


Gambar 1 Alat dan bahan eksperimen.

### A. Eksperimen 1: Menentukan Hubungan Amplitudo dengan Jarak

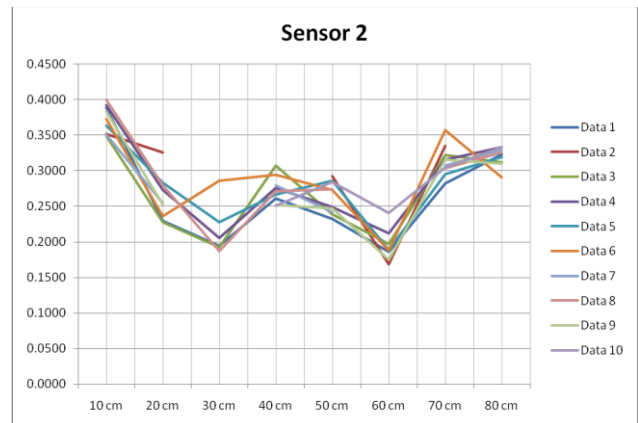
Tujuan dari eksperimen ini adalah mengetahui hubungan antara amplitudo dengan jarak sumber getar dari sensor.

Prosedur eksperimen ini adalah, trafo diletakkan pada jarak tertentu pada tangki, kemudian diplot kurva hubungan jarak dengan amplitudo yang diterima oleh sensor. Hipotesis awal dari eksperimen ini adalah, amplitudo berbanding secara linier terhadap jarak. Semakin jauh jarak, semakin kecil pula amplitudonya.



Gambar 2 Ilustrasi eksperimen 1.

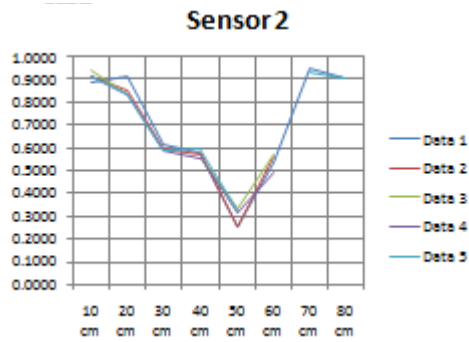
Setelah digambarkan plot kurva untuk beberapa sensor, ternyata hipotesis yang diajukan tidak terbukti. Kurva hubungan menunjukkan bahwa semakin dekat trafo ke dinding, semakin besar amplitudonya.



Gambar 3 Hasil kurva hubungan jarak dan amplitudo salah satu sensor.

Analisis awal dari hasil ini adalah, rambatan getaran lebih dominan melalui tangki baja dibandingkan dengan yang melalui air. Analisis ini tentu memerlukan bukti yang mendukung. Oleh karena itu, eksperimen 1 diulang kembali dengan prosedur yang sama, tetapi tidak menggunakan air.

Hasil yang diperoleh serupa dengan eksperimen dengan menggunakan air. Sehingga dapat disimpulkan bahwa analisis awal terbukti. Salah satu hasil kurva hubungan jarak dan amplitudo, dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4 Hasil kurva hubungan jarak dan amplitudo salah satu sensor tanpa air.

Sehingga dapat disimpulkan beberapa hal dari eksperimen pertama yang telah dilaksanakan sebagai berikut.

1. Getaran atau vibrasi yang terdeteksi oleh akselerometer adalah dari rambatan getaran melalui rantai model transformator, yang kemudian menggetarkan dinding. Getaran dinding inilah yang terdeteksi oleh akselerometer. Hal ini terjadi karena, rambatan yang melalui dinding lebih dominan dibanding yang melalui air.
2. Dapat diperhatikan bahwa amplitudo data tanpa air pada jarak yang sama menjadi lebih besar dibanding dengan menggunakan air. Ini berarti, air adalah peredam dari sinyal vibrasi pada model transformator. Semakin sedikit air, semakin besar amplitudo yang diterima oleh akselerometer.
3. Peredam getaran berupa pegas dan kayu, masih belum mampu menahan rambatan getaran melalui dinding model trafo.
4. Faktor lain yang belum terhitung dalam eksperimen ini adalah pantulan dari rambatan getaran dan peletakan sensor pada dinding.

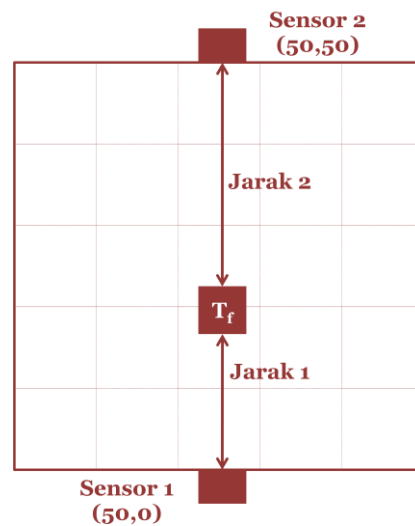
**B. Eksperimen 2: Menentukan Hubungan Selisih Jarak dengan Time Difference of Arrival**

Eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui hubungan selisih jarak dengan *time difference of arrival* (TDOA). Pada kondisi normal, *time difference of arrival* dapat digunakan untuk menentukan posisi suatu sumber sinyal. Contoh aplikasi dari penggunaan TDOA adalah penentuan posisi perangkat GPS terhadap satelit-satelit di sekitarnya [18], contoh lain adalah penentuan lokasi sumber suara tembakan lawan yang bermanfaat dalam perang, teknik tersebut benar-benar digunakan dalam Perang Dunia. [19]

Namun, teknik ini umumnya dilakukan bila selisih jarak masing-masing sensor dengan sumber berbanding linier dengan waktu tempuhnya. Artinya sinyal merambat dengan kecepatan konstan di medium dan frekuensi sampling sensor mampu menangkap selisih waktu sinyal tersebut.

Pada kenyataannya, pada kasus pemodelan ini, seperti telah dibuktikan pada eksperimen 1, sinyal tidak merambat melalui medium yang diasumsikan sebelumnya (air) melainkan melalui rantai baja dari model trafo. Sehingga,

hipotesis sebelum dilakukannya eksperimen ini adalah kemungkinan besar selisih jarak tidak berbanding linier dengan TDOA.



Gambar 5 Ilustrasi eksperimen 2.

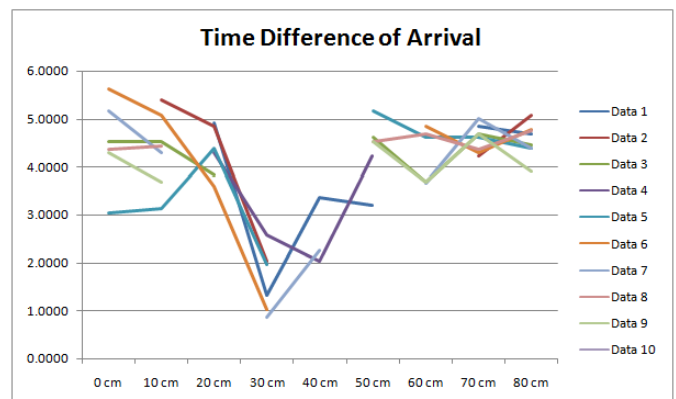
Persamaan dan fungsi yang digunakan untuk menghitung TDOA adalah fungsi korelasi silang dan fungsi maksimum yaitu

$$(f \star g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[n]g[n + m] \tag{1}$$

dan

$$\Delta t = \underset{t}{\operatorname{argmax}} |(f \star g)(t)| \tag{2}$$

Setelah dilakukan eksperimen dan pengambilan data, diperoleh hubungan kurva antara selisih jarak dengan TDOA. Salah satunya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Selisih jarak vs TDOA.

Berdasarkan hasil eksperimen tersebut, terbukti bahwa selisih jarak tidak berbanding linier dengan *time difference of arrival*. Beberapa analisis yang menyebabkan terjadinya hal ini adalah sebagai berikut.

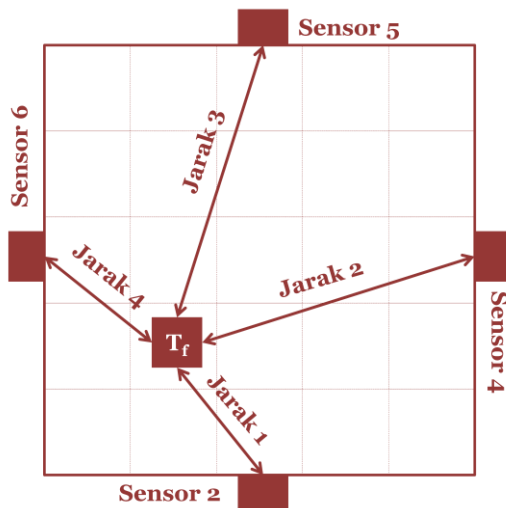
1. Rambatan getaran melalui rantai memiliki sifat yang berbeda dengan medium lain seperti udara. Pada

medium rambat udara, selisih jarak akan berbanding linier dengan time difference. [6]

- Seluruh dinding tangki model ikut bergetar secara hampir bersamaan akibat rambatan getaran melalui lantai tangki.
- Kecepatan rambat getaran melalui tangki yang berbahan baja, jauh lebih cepat dibanding melalui udara dan air. Kecepatan rambatan getaran pada baja adalah sekitar 5920 m/s [17], artinya dalam perbedaan waktu 1 ms saja, dapat menyebabkan selisih jarak sebesar 5.9 meter, sedangkan TDOA yang dibutuhkan dalam orde 0 hingga 100 cm. Akselerometer yang dipunyai tidak mampu menangkap perbedaan waktu dengan kecepatan tersebut.

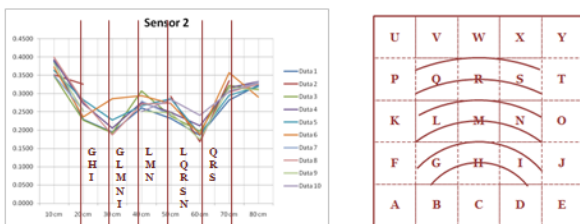
### III. PENENTUAN POSISI BERDASARKAN METODE AMPLITUDO DAN METODE TDOA

Setelah diperoleh data hubungan besaran-besaran terkait, dari eksperimen 1 dan eksperimen 2, dilakukan eksperimen 3 dengan tujuan untuk memanfaatkan data yang diperoleh untuk menentukan posisi dari sumber getar. Pada eksperimen ketiga, trafo diletakkan pada petak-petak tertentu dan dibuat sistem untuk menebak letak trafo.



Gambar 7 Ilustrasi eksperimen 3.

Terdapat 2 metode yang akan dibandingkan dalam penelitian ini, metode pertama adalah metode amplitudo, yaitu memanfaatkan kurva yang diperoleh dari eksperimen 1. Ilustrasi dari metode ini dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 Ilustrasi metode amplitudo.

Hal yang sama dilakukan untuk keempat sensor, sehingga dari keempat kemungkinan data, dihitung jumlah petak yang paling mungkin. Petak yang terbanyak hasil kemungkinannya adalah petak yang paling mungkin sebagai sumber vibrasi.

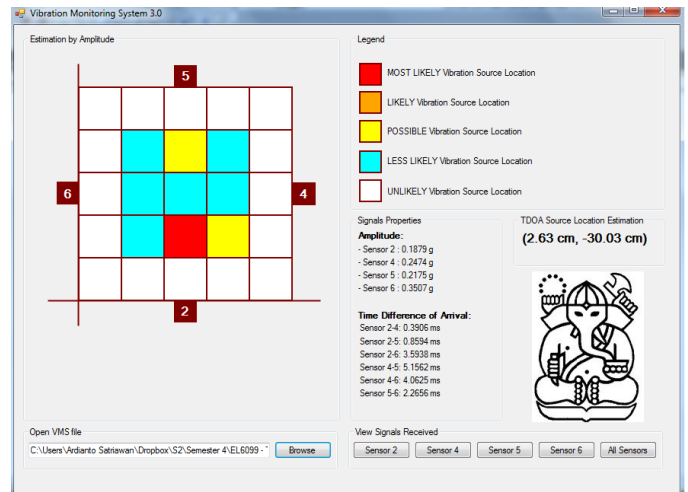
Metode kedua yang digunakan adalah metode TDOA. Metode ini menggunakan persamaan Mahajan-Walworth [16].

$$\begin{bmatrix} 2(x_a - x_b) & 2(y_a - y_b) & 2(\Delta d_{12}) \\ 2(x_a - x_c) & 2(y_a - y_c) & 2(\Delta d_{13}) \\ 2(x_a - x_d) & 2(y_a - y_d) & 2(\Delta d_{14}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a^2 - x_b^2 + y_a^2 - y_b^2 + \Delta d_{12}^2 \\ x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2 + \Delta d_{13}^2 \\ x_a^2 - x_d^2 + y_a^2 - y_d^2 + \Delta d_{14}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sedangkan dari selisih waktu menjadi selisih jarak, diturunkan dari kurva yang diperoleh dari eksperimen 2 sebagai berikut.

$$\Delta d = f(\Delta t) = 0.397\Delta t^3 - 2.234\Delta t^2 + 2.106\Delta t + 3.652 \quad (4)$$

Untuk mempermudah visualisasi dan perhitungan, dirancang sebuah antarmuka grafis (GUI). GUI dibuat dengan bahasa C# dengan framework .NET dan IDE Microsoft Visual Studio 2010.



Gambar 9 Tampilan GUI.

Setelah kedua metode tersebut diimplementasikan pada GUI dan dicoba pada 52 data eksperimen yang telah diambil, diperoleh data sebagai berikut.

#### Metode amplitudo

Metode ini tidak selalu menghasilkan posisi petak yang unik atau dapat menghasilkan lebih dari satu hasil. Pada eksperimen yang dilaksanakan, hanya 32 dari 52 data atau 65.38% yang menghasilkan hasil yang unik.

Metode amplitudo juga tidak selalu menghasilkan data yang benar. Pada eksperimen yang telah dilakukan, hanya 25

dari 52 data (48.08%) yang menghasilkan data yang benar (data dengan kemungkinan *most likely*).

Berdasarkan data tersebut, metode amplitudo kurang reliabel untuk digunakan karena hanya kurang lebih setengah dari data tersebut menghasilkan data yang benar.

Beberapa hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa metode ini adalah sebagai berikut.

1. Pada saat pengambilan data batas minimum dan maksimum range amplitudo, dilakukan dengan interval lebih kecil dari 10 cm. Tentunya hal ini akan meningkatkan akurasi dari metode ini.
2. Menambah jumlah grid dari penampang trafo. Pada eksperimen ini digunakan 25 grid dan yang digunakan hanya 9 buah. Semakin kecil ukuran grid, maka akan semakin akurat hasilnya.

### Metode *time difference of arrival*

Metode ini tidak reliabel untuk digunakan dalam menentukan posisi sumber vibrasi dalam kasus ini.

Pada hasil yang diperoleh, jarak hasil perhitungan TDOA dengan posisi sebenarnya memiliki rata-rata 8873.57 sentimeter atau 88.74 meter, sedangkan minimumnya adalah 64.44 cm. Sangat jauh dari posisi aslinya dan jauh melebihi margin error yang ditargetkan, yaitu 20 cm.

Dari eksperimen sebelumnya, telah dibuktikan bahwa metode ini memang tidak seharusnya digunakan. Namun, terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan agar metode ini dapat digunakan.

1. Memodelkan secara matematis rambatan getaran melalui dinding baja, yang kemudian menggetarkan seluruh dinding, dan terukur dengan akselerometer. Kemungkinan model matematisnya akan berbentuk persamaan differensial pada persamaan gelombang.
2. Meningkatkan frekuensi sampling dari sensor yang digunakan. Seperti yang telah dihitung pada bab sebelumnya, dengan frekuensi sampling yang ada, selisih jarak minimum adalah 4.61 meter dan maksimum adalah 5.92 meter.

### IV. KESIMPULAN DAN TINDAK LANJUT

Pada penelitian ini telah dilakukan beberapa eksperimen untuk membandingkan dua buah metode yang digunakan untuk mengukur atau mengestimasi posisi dari sumber vibrasi pada model transformator. Kedua metode tersebut adalah metode amplitudo dan metode *time difference of arrival* (TDOA).

Pada metode amplitudo, sistem mampu mengidentifikasi lokasi sumber vibrasi, namun masih belum memiliki akurasi yang baik. Pada eksperimen yang telah dilakukan, hanya 48.08% data yang mampu diidentifikasi lokasi sumber vibrasinya dengan baik. Kelemahan lain dari metode ini adalah, hanya mampu mengidentifikasi range lokasi dan bukan posisi akuratnya. Selain itu, kadangkala hasil yang dihasilkan oleh metode ini tidaklah unik.

Pada metode *time difference of arrival*, sistem tidak mampu mengidentifikasi lokasi sumber vibrasi pada model transformator. Hal ini disebabkan karena kesalahan asumsi awal yang menganggap bahwa getaran merambat melalui air, sedangkan kenyataannya getaran merambat melalui dinding. Selain itu, frekuensi sampling dari sensor yang dimiliki tidak cukup untuk mengambil *time difference* yang diperlukan oleh metode ini.

Untuk tindak lanjut dari penelitian ini, beberapa hal yang dapat dilakukan di masa yang akan datang adalah sebagai berikut.

1. Memodelkan secara matematis rambatan dari model trafo. Pada eksperimen dalam thesis ini, telah dibuktikan bahwa rambatan getaran melalui lantai model trafo jauh lebih dominan dibandingkan dengan rambatan melalui air.
2. Menggunakan metode lain selain amplitudo dan *time difference of arrival*. Salah satu metode yang dapat dicoba adalah menggunakan *frequency difference of arrival* (FDOA) yang memanfaatkan efek doppler.
3. Menggunakan sensor dengan frekuensi sampling yang lebih baik dibandingkan yang digunakan pada penelitian ini.

### REFERENSI

- [1] \_\_\_\_\_, "Transformer Failure Report 2000 – 2010", PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali, 2010.
- [2] B. Pharmasetiawan *et al.*, "Development of Transformer Monitoring System for Condition-Based Maintenance in PT. PLN Java-Bali Transmission and Load Dispatch Center.", 2012 *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 554-556.
- [3] \_\_\_\_\_, "Panduan Pemeliharaan Transformator Tenaga", Buku Panduan Instruksi Kerja P3B/O&M Transformator/001.01, PT. PLN (Persero) P3B Jawa Bali, 2003, pp. 2.
- [4] K.S. Wibawa, "Perancangan dan Implementasi Sistem Komunikasi Data On-Line Transformer Monitoring System Di Gardu Induk (GI)." M.Sc. thesis, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2013.
- [5] Y.D. Kim *et al.*, "A Study on the Vibration Phenomenon of a Power Transformer in Operation (154 KV/60 MVA/Single-phase).", *Technological Developments in Education and Automation*, 2010, pp. 519-522.
- [6] A. Satriawan, "Perancangan Estimasi Posisi Sumber Suara pada Bidang Dua Dimensi Berdasarkan *Time Difference Of Arrival*." Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2013.
- [7] A. Trianggada, "Perancangan dan Implementasi Filter Digital dan Metode Lokalisasi Sumber Sinyal untuk *Vibration Monitoring System* pada Trafo Gardu Listrik." Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2013.
- [8] M. Abduh, "Implementasi Algoritma Fast Fourier Transform dan Komunikasi Transmission Control Protocol serta Perancangan Antarmuka Grafis pada *Vibration Monitoring System*." Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2013.
- [9] H. Rizal, "Perancangan dan Implementasi Sistem Akuisisi Data untuk Vibration Monitoring System Pada Transformator Gardu Listrik." Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2013.
- [10] B. Wilie, "Pemodelan Magnetostriksi pada Inti Transformator - *Vibration Monitoring System v2.0*." Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2014.
- [11] S. Kharismawati, "Implementasi Discrete Cosine Transform dan Perancangan Klasifikasi Kondisi Transformator pada *Vibration*

- Monitoring System v2.0.*” Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2014.
- [12] A.R. Faradina, “Implementasi Estimasi Lokasi Sumber Vibrasi Menggunakan Algoritma *Total Signal Energy* Serta Modifikasi Antarmuka Grafis dan Penyimpanan Data pada *Vibration Monitoring System.*” Tugas Akhi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2014.
- [13] Conoco Lubricants, 76 Transformer Oil Material Safety Data Sheet, 2004.
- [14] T.G. Dvorkind and S. Gannot, “Time difference of arrival estimation of speech source in a noisy and reverberant environment”, *Signal Processing* 85, 2005, pp. 177-204.
- [15] \_\_\_\_\_, *Cross-correlation*, Wolfram Alpha, <http://mathworld.wolfram.com/Cross-Correlation.html>, diakses pada 21 Februari 2015, 22:00
- [16] Mahajan A., Walworth M., 3-D Position Sensing Using the Differences in the Time-of-Flights from a Wave Source to Various Receivers, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 91-94, 2001.
- [17] Class Instrumentation, Sound Velocity Table, [http://www.classltd.com/sound\\_velocity\\_table.html](http://www.classltd.com/sound_velocity_table.html), diakses pada 1 Juni 2015, 13:00.
- [18] J.S. Abel dan J.W. Chaffee, “Existence and uniqueness of GPS solutions.” *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Volume:27, Issue: 6.* 1991.
- [19] H. Bateman, Mathematical Theory of Sound Ranging., *Monthly Weather Review*, 1918, pp. 4–11.