

Pendeteksian Lokasi Sumber *Noise (Partial Discharge)* secara Tiga Dimensi menggunakan *Antenna Array*

NUR IBRAHIM

Teknik Telekomunikasi Universitas Telkom

Email: nuribrahim@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi teknik pendeteksian lokasi sumber noise berupa partial discharge (PD) pada peralatan tegangan tinggi, dengan menggunakan susunan antena yang terdiri dari empat buah antena monopole sebagai sensor untuk mendeteksi gelombang elektromagnetik (EM) yang dipancarkan dari partial discharge (PD). Algoritma yang digunakan mengacu kepada time difference of arrival (TDOA) dari sinyal yang diterima antar antena (dengan menjadikan salah satu antena sebagai antena referensi). Metode yang digunakan untuk menentukan TDOA adalah metode Akaike Information Criterion, metode Energy Criterion, metode Gabor Centroid, metode threshold detection, metode peak detection, dan metode cross-correlation. Sistem pendeteksian lokasi sumber noise ini menggunakan konfigurasi susunan antena membentuk Y. Jarak antar antena diatur sejauh 2 meter dan 4 meter. Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis, konfigurasi susunan antena membentuk Y memiliki tingkat akurasi 97.67%. Metode yang paling akurat untuk menentukan TDOA adalah metode cross-correlation.

Kata kunci: PD, TDOA, susunan antena.

ABSTRACT

This paper presents a simulation of locating noise source (Partial Discharge) on high-voltage apparatuses, by using antenna array that consisted of four monopole antennas as sensor to record the electromagnetic waves (EM) emitted from Partial Discharge (PD). The detection algorithm is based on the time difference of arrival (TDOA) of the signals received between antennas (by using one of four antennas as reference antenna). The methods to determine TDOAs are Akaike Information Criterion method, Energy Criterion method, Gabor Centroid method, threshold detection method, peak detection method, and/or cross-correlation method. These system use Y-shaped array configuration. The adjusted distance between antennas are 2 meter and 4 meter. From the observation and analysis results, Y-shaped array antenna configuration has accuracy 97.76%. The best method to get TDOA is the cross-correlation method.

Keywords: PD, TDOA, antenna array.

1. PENDAHULUAN

Partial Discharge (PD) adalah salah satu sumber *noise* impulsif *broadband* yang mengakibatkan interferensi gelombang elektromagnetik (EM) pada televisi dan siaran radio. PD yang berasal dari cacat pada sistem perkabelan dan peralatan pembangkit listrik bertegangan tinggi dapat menjadi sumber *noise* yang berkesinambungan untuk seluruh lingkungan. Sedangkan *noise* yang timbul pada *vehicle ignition system*, *microwave ovens*, dan sistem lainnya, hanya bersifat sementara. Selain itu, spektrum frekuensi *noise* impulsif dari kabel pembangkit listrik, sebagian besar berada pada rentang nilai puluhan hingga ratusan megahertz (Steiner, 1992; Quak, 2003).

Untuk mendapatkan lingkungan dengan EM yang lebih baik, dibutuhkan cara untuk menemukan lokasi sumber *noise* impulsif tersebut. Dengan menemukan lokasi sumber *noise* tersebut, dapat dilakukan tindakan yang tepat untuk menghilangkan sumber *noise* tersebut. Teknik untuk mencari lokasi *noise* EM yang berasal dari muatan listrik, telah dijelaskan 50 tahun yang lalu (Kreuger, 1964) dengan menggunakan pengukuran dari fenomena gelombang elektromagnetik berjalan. Beberapa penelitian telah mengenalkan teknik menentukan lokasi sumber *noise* dengan akurasi dan sensitivitas yang lebih baik (Steiner, 1992; Quak, 2003; Mashikian, 2002).

Pada pembangkit listrik, relatif telah ada kemajuan pada sistem mencari lokasi sumber *noise*, dimana secara umum, telah dapat diaplikasikan dalam suatu lingkup kecil dari pembangkit listrik, dibandingkan sistem sebelumnya yang diaplikasikan pada sebuah komponen di pembangkit listrik. Dalam konteks ini, penggunaan frekuensi untuk penginderaan jarak jauh, memegang peranan penting karena mudah diinstalasi, tidak membutuhkan kontak langsung serta dapat diaplikasikan kepada semua komponen bermuatan pada pembangkit listrik.

Dalam penelitian ini akan dikembangkan metode pendeteksian lokasi sumber *noise* impulsif (dalam bentuk tiga dimensi) dengan menggunakan *antenna array* (Mashikian, 2002). *Antenna array* ini terdiri dari empat buah antena *monopole*. Algoritma lokalisasi didasarkan pada TDOA dari pulsa EM yang diterima antena-antena yang terpisah secara spasial. TDOA dapat ditentukan dengan menggunakan beberapa metode, yaitu metode *Akaike Information Criterion*, metode *Energy Criterion*, metode *Gabor Centroid*, metode *threshold detection*, metode *peak detection*, dan metode *cross-correlation* (Knapp, 1976).

Challa dan Shamsunder (Challa, 1998) mengusulkan pendekatan *subspace* resolusi tinggi untuk lokalisasi sumber EM medan dekat (*near-field*) dalam bentuk *three-dimensional space*. Namun, pendekatan ini terbatas pada lokalisasi sumber dengan *band* yang sempit (*narrow-band*). Peck dan Moore (Tungkanawanich, 2001) menunjukkan penerapan algoritma HT (Knapp, 1976) untuk estimasi TDOA. Hal ini menunjukkan peningkatan performansi dari estimasi *direction-of-arrival* (DOA). Pada penelitian sebelumnya, estimasi untuk sumber *noise* ini kebanyakan fokus pada pengukuran, dengan teori sederhana. Pada model teoritis, gelombang datar dianggap sebagai sumber gelombang. Dengan kata lain, medan EM yang dipancarkan dari sumber *noise* impulsif diasumsikan sebagai medan jauh (*far-fields*). Namun, *magnitude* dari gelombang EM yang dipancarkan dari kabel transmisi dan peralatan pembangkit listrik tidak besar. Dengan demikian, jarak antara antena dan sumber *noise* terbatas hanya maksimal sejauh beberapa puluh meter. Inilah alasan utama pendekatan medan dekat (*near-field*) akan lebih tepat, dan oleh karena itu, skema lokalisasi secara tiga dimensi untuk sumber *noise broadband* dapat direalisasikan.

Dengan *antenna array* dan metode yang digunakan pada penelitian ini, lokasi sumber *noise* impulsif dapat ditemukan dari jarak jauh tanpa harus kontak langsung ke area pembangkit listrik, dengan tingkat akurasi yang tinggi.

2. METODOLOGI

2.1 Radiasi Impulsif

Initial rise-time dari *current waveform* yang dihasilkan dari *partial discharge* (PD) akan menyebabkan peluang terjadinya pelebaran spektrum frekuensi menjadi ke dalam *region* frekuensi radio. Konsekuensi dari fenomena ini adalah, sebagian energi dari PD akan teradiasi ke ruang hampa udara, sehingga PD dapat dideteksi posisinya menggunakan *radiometry*.

Telah banyak dilakukan pengukuran *radiometric* menggunakan peralatan penerima radio *narrowband down-converting*. Seiring dengan pengembangan pada teknologi *digital sampling* saat ini, memungkinkan untuk merekam *waveform* dari radiasi PD dengan resolusi tinggi (**Cavallini, 2003**). Pengukuran ini memiliki beberapa karakteristik, antara lain:

a. *Directly-sampled*

Sinyal yang diterima antena, langsung di-*sampling*, tanpa di-*down-converted* terlebih dahulu, sehingga terjadi peningkatan dalam validasi sinyal.

b. *Wideband*

Lebar pita analog berada pada rentang 1 GHz, dengan frekuensi *sampling* dalam rentang *Giga-Samples* per detik.

Hasil dari pengukuran yang dilakukan dengan teknologi digital ini adalah berupa *wideband, radiative partial discharge* (WRPD) *waveforms*. Jika dibandingkan dengan pengukuran konvensional, WRPD *waveforms* ini menunjukkan peningkatan dalam konten informasi.

2.2 Karakteristik Lingkungan Gardu

Bahan metal di sekitar sumber PD dan antena penerima akan mempengaruhi karakteristik sinyal WRPD yang disebabkan dari *scattering* dan *reflection*. *Reflection* menyebabkan *multipath propagation impulse* WRPD dan hasil pengukuran sinyal di antena merupakan penjumlahan *direct-path signal* dari PD ke antena, dan beberapa sinyal yang direfleksikan. Karena banyaknya permukaan dan benda yang dapat merefleksikan sinyal pada lingkungan gardu, karakteristik dari bentuk gelombang WRPD lebih banyak dipengaruhi oleh lingkungan sekitar dan posisi pengukuran, dibandingkan dengan sifat dielektrik yang menyebabkan PD.

2.3 Prinsip Dasar

Pada bagian sebelumnya telah ditegaskan bahwa lingkungan propagasi memiliki dampak terbesar pada bentuk gelombang WRPD. Meskipun demikian, lokasi sumber PD dapat ditemukan dengan menganalisis bagian awal dari gelombang WRPD yang merepresentasikan *direct-path signal* dari sumber PD sebelum terjadi refleksi. Setelah gelombang langsung, efek pantulan akan menyebabkan perbedaan bentuk sinyal yang diterima (ini adalah *multipath region*).

Pendeteksian lokasi sumber *noise* secara tiga dimensi dapat ditentukan dengan menggunakan *antenna array* pasif yang terdiri dari empat buah antena *monopole*. Pandangan konseptual dari proses ini dapat dilihat pada Gambar 1. Empat buah antena disusun membentuk Y dengan jarak antar antena d . Lokasi sumber *noise* P diasumsikan sebagai variabel yang belum diketahui $[x, y, z]$. Empat buah antena diberi label 1, 2, 3, dan

4, serta koordinat masing-masing antenna adalah $[x_1, y_1, z_1]$, $[x_2, y_2, z_2]$, $[x_3, y_3, z_3]$, dan $[x_4, y_4, z_4]$ meter. Perlu dicatat bahwa tiga nilai TDOA yang independen, dapat diperoleh dari keempat konfigurasi antenna ini. Sinyal yang diterima oleh antenna 1 (berada di tengah, dengan koordinat $[0,0,1]$) dipilih sebagai sinyal referensi. Hubungan antara koordinat antenna dan TDOA adalah persamaan non-linier sebagai berikut:

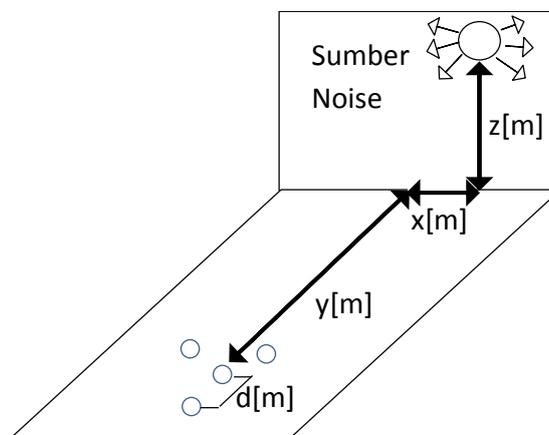
$$c.\Delta t_{12} = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (1)$$

$$c.\Delta t_{13} = \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (2)$$

$$c.\Delta t_{14} = \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (3)$$

dimana Δt_{ij} menunjukkan TDOA antara antenna i dengan antenna j , dan c adalah kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa udara ($c = 3 \times 10^8$ m/sec). Lokasi sumber *noise* $P[x, y, z]$ dapat diperkirakan jika semua nilai TDOA diperoleh. Solusi persamaan non-linier diatas dapat diperoleh dengan menggunakan teknik iterasi Newton-Raphson.

Gambar 1 menunjukkan gambaran geometri dari susunan antenna membentuk Y dan lokasi sumber *noise* secara tiga dimensi.



Gambar 1. Geometri dari metoda pendeteksian lokasi secara tiga dimensi

2.4 Model Sinyal Sumber *Noise*

Sinyal sumber *noise* dari PD dimodelkan dengan persamaan berikut:

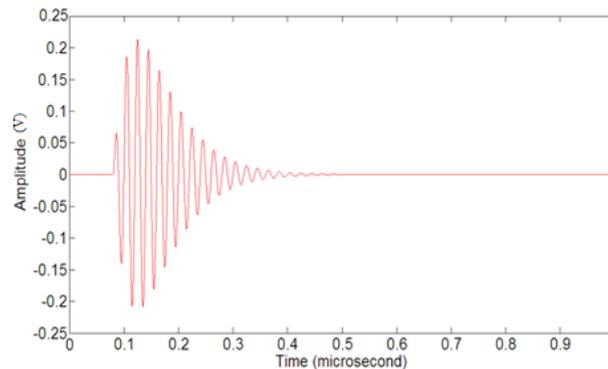
$$S(t) = A_0 \sin(2\pi f t) \left(-\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad (4)$$

Parameter dari model sumber *noise* (persamaan 4) adalah seperti pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Parameter model sumber *noise*

A_0	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)	c (m/s)	f (MHz)
2.6	40	50	3×10^8	50

Gambar 2 menunjukkan model sinyal sumber *noise* untuk periode 1 microsecond. Pada simulasi yang dijalankan, ditambahkan *noise Gaussian* dengan *signal-to-noise ratio* (SNR) sebesar 10 dB pada model sumber sinyal (**Oussalah, 2007**). Perlu dicatat bahwa perhatian lebih dilakukan pada pita frekuensi antara 25 dan 150 MHz, dimana pada pita frekuensi tersebut mayoritas terjadi sinyal PD. Pada pita frekuensi ini, siaran radio FM dioperasikan.

**Gambar 2. Bentuk gelombang dari model sinyal sumber *noise***

2.5 Estimasi TDOA

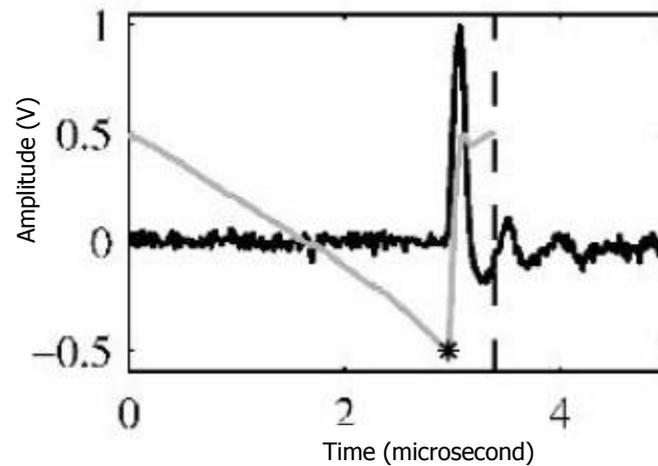
Metode *Akaike Information Criterion*

Akaike Information Criterion (AIC) adalah ukuran kebaikan fit dari model statistic untuk satu set pengamatan. Metode ini dapat digunakan untuk mengestimasi *Time Of Arrival* (TOA) sinyal PD yang diterima pada masing-masing antena, sehingga didapatkan empat nilai TOA.

Persamaan (5) mendefinisikan kurva AIC_k :

$$AIC_K = k \cdot \ln(\sigma_{1,k}^2) + (N - k - 1) \cdot \ln(\sigma_{k+1,N}^2) \quad (5)$$

dimana $\sigma_{k+1,N}^2$ adalah nilai *variance* sinyal S_k (sinyal yang diterima antena, dengan k adalah nilai indeks dari 1 hingga M). N adalah jumlah sampel sinyal. Nilai AIC_K dihitung untuk tiap sampel pada sinyal S_k . TOA adalah nilai minimum dari keseluruhan nilai AIC_K . Untuk mencegah hasil yang ambigu, sinyal dipotong sedemikian rupa sehingga pulsa *onset* terjadi pada pertengahan sinyal, seperti yang disarankan oleh Tungkanawanich (**Tungkanawanich, 2001**).



Gambar 3. Contoh sinyal PD dengan mengaplikasikan metoda AIC untuk menentukan TOA (Wagenaars, 2008)

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara sinyal PD (kurva yang berwarna hitam) dan AIC (kurva yang berwarna abu-abu) yang telah digeser dan dinormalisasi. Waktu (*time*) saat nilai amplituda pada kurva AIC bernilai minimum, yang diambil sebagai nilai TOA (ditandai dengan tanda * pada kurva AIC).

Dengan menjadikan antenna satu sebagai antenna acuan, maka didapatkan tiga nilai TDOA dengan mencari selisih antara masing-masing TOA dengan TOA antenna 1. Persamaan (6), (7), dan (8) menunjukkan persamaan matematis untuk mendapatkan nilai TDOA

$$TDOA_{12} = TOA_2 - TOA_1 \quad (6)$$

$$TDOA_{13} = TOA_3 - TOA_1 \quad (7)$$

$$TDOA_{14} = TOA_4 - TOA_1 \quad (8)$$

Dimana TOA_1 adalah TOA pada antenna 1, TOA_2 adalah TOA pada antenna 2, TOA_3 adalah TOA pada antenna 3, dan TOA_4 adalah TOA pada antenna 4. $TDOA_{12}$ adalah TDOA antara antenna 2 dengan antenna 1, $TDOA_{13}$ adalah TDOA antara antenna 3 dengan antenna 1, dan $TDOA_{14}$ adalah TDOA antara antenna 4 dengan antenna 1. Ketiga nilai TDOA yang didapat dari persamaan (6), (7), dan (8) akan dimasukkan ke persamaan (1), (2), dan (3), sehingga akan didapatkan nilai koordinat lokasi sumber *noise*.

Metode *Energy Criterion*

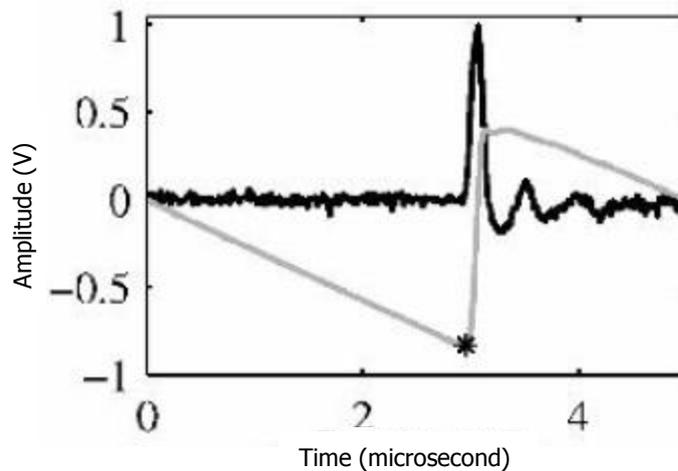
Metode *Energy Criterion* (EC) menggunakan energi yang terkandung pada sinyal. Metode ini menggabungkan energi sinyal parsial dengan tren negatif (**Challa, 2008**).

Sinyal EC_K didefinisikan dengan persamaan (9) berikut:

$$EC_K = \sum_{i=1}^k s_i^2 - k \cdot P_s \quad (9)$$

dimana P_s adalah *mean power* dari s_k . Nilai EC_K dihitung untuk *ranging* k dari 1 sampai N .

Nilai minimum dari keseluruhan nilai EC_K adalah TOA.



Gambar 4. Contoh sinyal PD dengan mengaplikasikan metoda EC untuk menentukan TOA (Wagenaars, 2008)

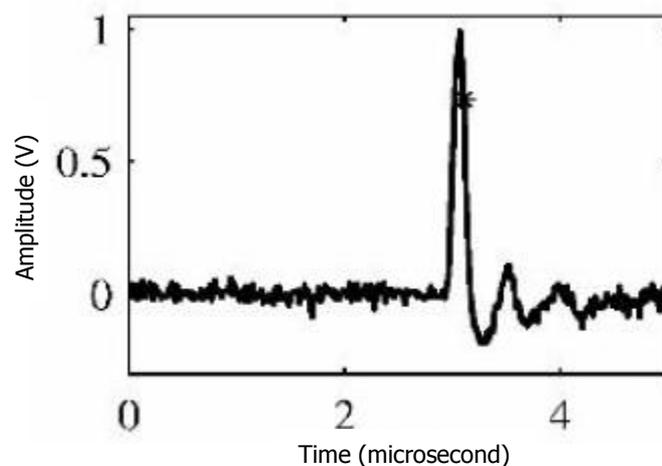
Gambar 4 menunjukkan hubungan antara sinyal PD (kurva yang berwarna hitam) dan EC (kurva yang berwarna abu-abu) yang telah digeser dan dinormalisasi. Waktu (*time*) saat nilai amplituda pada kurva EC bernilai minimum, itulah yang diambil sebagai nilai TOA (ditandai dengan tanda * pada kurva EC).

Metode Gabor Centroid

Gabor mendefinisikan "waktu" orde 1 dari sinyal (Mardiana, 2000). Dengan mengasumsikan bahwa sinyal tersebut adalah *real*, kemudian mengkonversinya menjadi bentuk *time-discrete* dan menambahkan dua persamaan untuk menghilangkan *noise-dependency*, maka "waktu" ini didefinisikan seperti ditunjukkan pada persamaan (10) :

$$TOA_g = \frac{\sum_{k=1}^N t_k s_k^2 - P_n \sum_{k=1}^N t_k}{\sum_{k=1}^N s_k^2 - P_n \cdot N} \quad (10)$$

t_k adalah nilai waktu yang menyesuaikan dengan indeks k. P_n adalah *mean power* dari n_k .



Gambar 5. Contoh sinyal PD dengan mengaplikasikan metoda Gabor Centroid untuk menentukan TOA (Wagenaars, 2008)

Gambar 5 menunjukkan sinyal PD yang akan diproses menggunakan persamaan (10), sehingga didapatkan nilai TOA, dimana posisi nilai TOA hasil dari persamaan (10) ditunjukkan dengan tanda * pada Gambar 5.

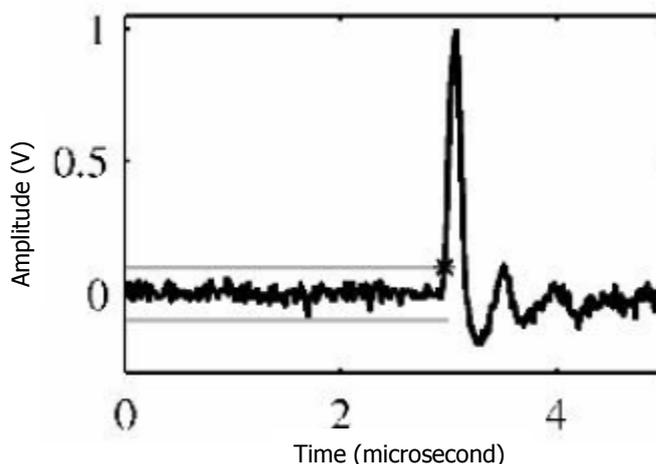
Metode *Threshold Detection*

Metode *threshold detection* mendefinisikan nilai TOA pada saat sinyal s_k melebihi nilai ambang batas tertentu s_{thres} . Ini adalah metode langsung yang dapat diimplementasikan dengan mudah sehingga telah digunakan pada banyak sistem deteksi PD.

Nilai ambang batas dipilih relatif terhadap tingkat kebisingan, sehingga nilai ambang batas akan selalu bernilai rendah, sesuai dengan tingkat kebisingan yang diperbolehkan, tanpa terlalu banyak *false trigger*. Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan nilai ambang batas :

$$s_{thres} = m \cdot \sqrt{P_n} \quad (11)$$

dimana m adalah nilai parameter yang dipilih oleh *user*. Pada penelitian ini, digunakan nilai $m=5$ untuk mengatasi noise Gaussian dengan signal-to-noise ratio (SNR) sebesar 10 dB, yang ditambahkan pada model sumber sinyal.

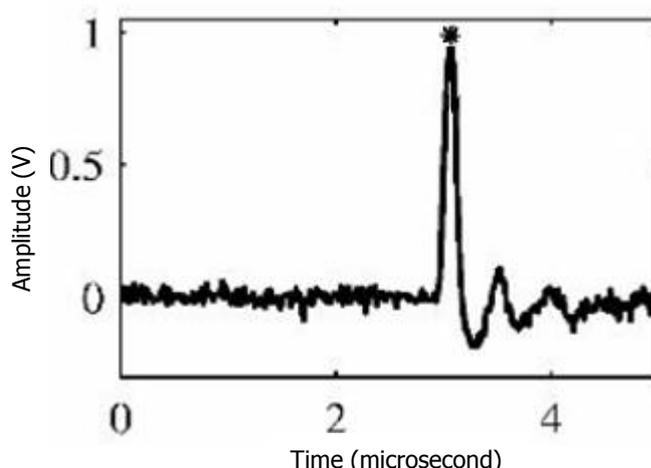


Gambar 6. Contoh sinyal PD dengan mengaplikasikan metoda *Threshold Detection* untuk menentukan TOA (Wagenaars, 2008)

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara sinyal PD (kurva yang berwarna hitam) dan nilai ambang batas (kurva yang berwarna abu-abu) yang didapatkan dari hasil persamaan (11). Tanda * pada Gambar 6 menunjukkan waktu (*time*) saat pertama kali nilai amplituda sinyal PD mulai melebihi nilai ambang batas, yang diambil sebagai nilai TOA.

Metode *Peak Detection*

Metode ini digunakan untuk memperkirakan TOA dengan mendeteksi waktu saat gelombang sinyal yang diterima bernilai maksimum.



Gambar 7. Contoh sinyal PD dengan mengaplikasikan metoda *Peak Detection* untuk menentukan TOA (Wagenaars, 2008)

Gambar 7 menunjukkan bahwa waktu (*time*) saat nilai amplituda sinyal PD bernilai maksimum, itulah yang diambil sebagai nilai TOA (ditandai dengan tanda * pada kurva EC).

Metode *Cross Correlation*

Sinyal yang diterima pada dua antena yang terpisah secara spasial, dapat dimodelkan dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$s_1(t) = S(t) + n_1(t) \quad (12)$$

$$s_2(t) = \alpha S(t - \Delta t_{21}) + n_2(t) \quad (13)$$

Dimana $S(t)$ adalah sumber sinyal impulsif yang asli, $n_1(t)$ dan $n_2(t)$ adalah sumber *noise* tambahan yang tidak saling berkorelasi dan memiliki *zero mean values*, α adalah faktor redaman, dan Δt_{21} adalah TDOA antar sinyal yang diterima. Ukuran kesamaan antara sepasang sinyal energi, $s_1(t)$ dan $s_2(t)$, dapat didefinisikan oleh urutan *cross correlation* $r_{s_1 s_2}(t)$, yang didefinisikan dalam persamaan berikut:

$$r_{s_1 s_2}(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t - \Delta t_{21}) . d\Delta t \quad (14)$$

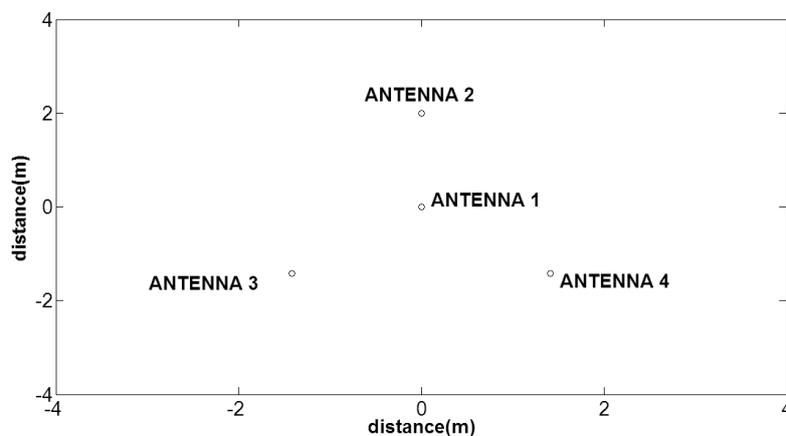
Δt disebut *time-lag* dan menunjukkan pergeseran waktu antara pasangan sinyal. Metode *cross correlation* ini digunakan untuk memperkirakan *time delay* dengan mendeteksi waktu saat fungsi tersebut bernilai maksimal. *Time lag* yang memberikan nilai maksimum pada fungsi *cross correlation* adalah TDOA yang diperkirakan.

3. HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

Pada penelitian ini digunakan satu buah laptop yaitu:

1. Tipe : Notebook
2. Prosesor : 2.0 GHz Intel Core 2 Duo T6400
3. Memori : 2 GB DDR2
4. *Media Storage* : Western Digital 160 GB
5. *Operating System* : Windows XP Service Pack 3

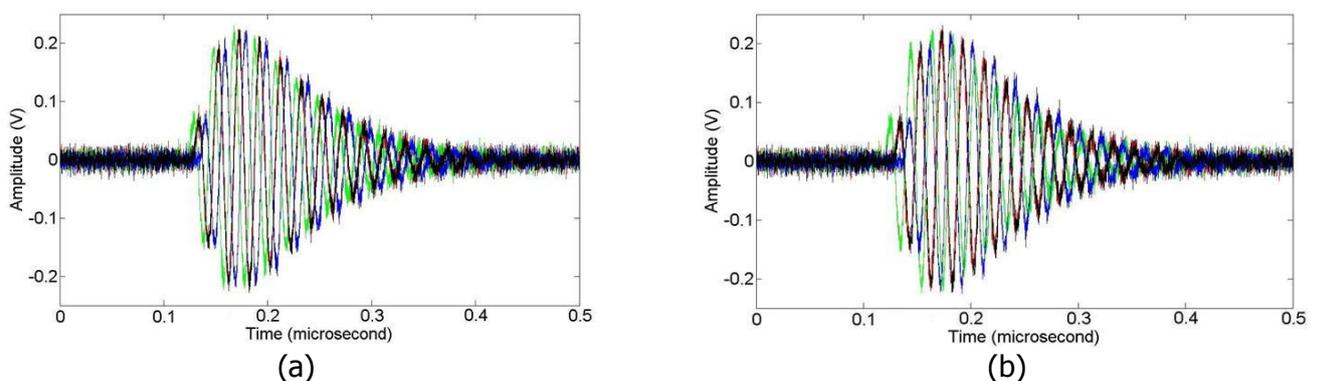
Dalam simulasi ini, digunakan empat buah antenna dengan koordinat antenna 1 $[0,0,1]$, antenna 2 $[0,2,1]$, antenna 3 $[-\sqrt{3},-1,1]$, dan antenna 4 $[\sqrt{3},-1,1]$ (untuk jarak antar antenna $d = 2\text{m}$), serta satu sumber *noise* dengan koordinat $[10,10,1]$. Susunan antenna membentuk huruf Y, seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Susunan antenna membentuk Y dengan jarak antar antenna $d = 2$ meter

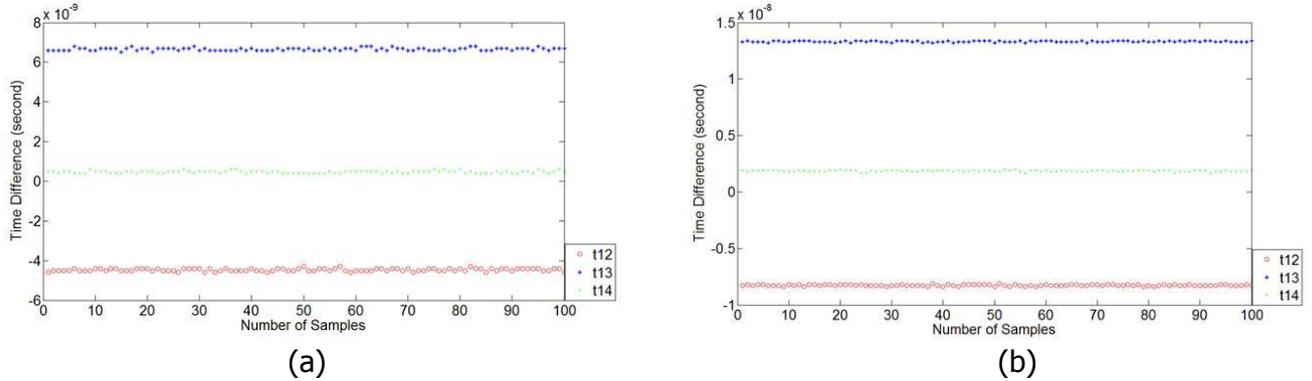
Dilakukan juga simulasi dengan jarak antar antenna $d = 4$ meter. Pengujian dilakukan dengan melakukan pengambilan sampel sinyal sumber *noise* sebanyak 100 kali. *Noise Gaussian* dengan *signal-to-noise ratio* (SNR) sebesar 10 dB ditambahkan pada sinyal sumber *noise*.

Gambar 9 menunjukkan sinyal yang diterima masing-masing antenna, dimana Gambar 9(a) menggunakan konfigurasi susunan antenna membentuk Y dengan jarak antar antenna $d = 2$ meter, dan Gambar 9(b) menggunakan konfigurasi susunan antenna membentuk Y dengan jarak antar antenna $d = 4$ meter.



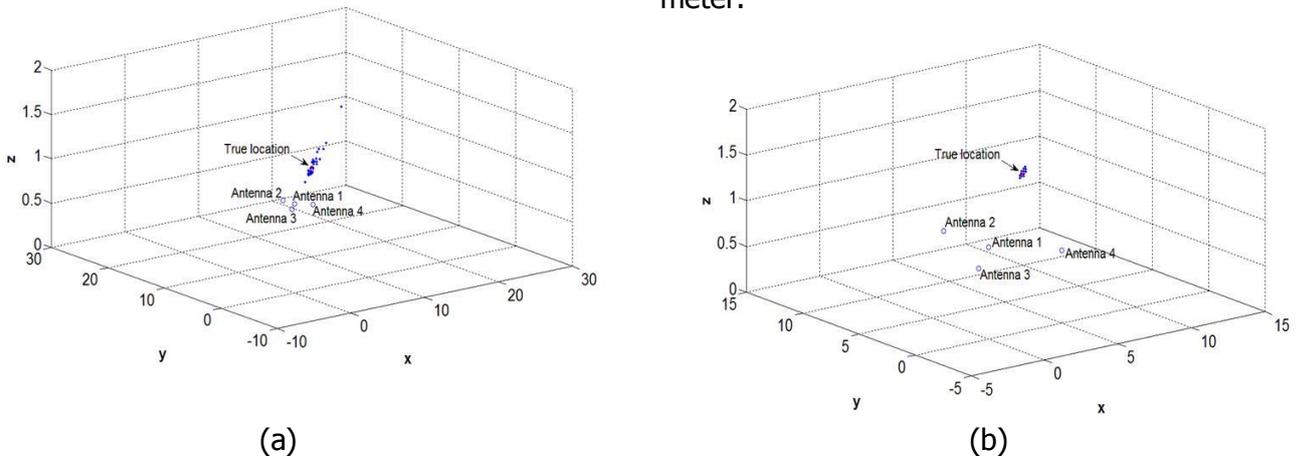
Gambar 9. Sinyal dari sumber *noise* yang diterima masing-masing antenna dengan jarak antar antenna: (a) $d = 2$ meter, (b) $d = 4$ meter

Gambar 10 menunjukkan TDOA₁₂, TDOA₁₃, dan TDOA₁₄ yang didapatkan dari hasil pengambilan sampel sinyal sumber *noise* sebanyak 100 kali, dimana Gambar 10(a) merupakan TDOA₁₂, TDOA₁₃, dan TDOA₁₄ untuk jarak antar antenna $d = 2$ meter, dan Gambar 10(b) merupakan TDOA₁₂, TDOA₁₃, dan TDOA₁₄ untuk jarak antar antenna $d = 4$ meter.



Gambar 10. TDOA antar antenna (antenna 1 sebagai antenna referensi), hasil perhitungan metode *cross-correlation*, dengan jarak antar antenna: (a) $d = 2$ meter, (b) $d = 4$ meter

Gambar 11 menunjukkan estimasi lokasi sumber *noise*, hasil dari persamaan (1), (2), dan (3), dimana Gambar 11(a) merupakan hasil estimasi lokasi sumber *noise* dengan jarak antar antenna $d = 2$ meter, dan Gambar 11(b) merupakan hasil estimasi lokasi sumber *noise* dengan jarak antar antenna $d = 4$ meter.



Gambar 11. Hasil estimasi lokasi sumber *noise*, menggunakan metode *cross-correlation*, dengan jarak antar antenna: (a) $d = 2$ meter, (b) $d = 4$ meter

Berikut adalah tabel nilai ideal TDOA untuk jarak antar antenna $d = 2$ meter dan $d = 4$ meter.

Tabel 2. Nilai TDOA ideal

d (m)	t_{12} (ns)	t_{13} (ns)	t_{14} (ns)
2	-4.45	6.67	0.47
4	-8.27	13.33	1.85

Dari hasil pengujian, terlihat pada Gambar 10 bahwa tiap metode menghasilkan nilai TDOA yang berbeda-beda namun mendekati nilai TDOA ideal. Berikut adalah tabel nilai rata-rata dan standar deviasi TDOA dari tiap metode dengan jarak antar antenna $d = 2$ meter dan $d = 4$ meter.

Tabel 3. Nilai *mean* TDOA tiap metode

d (m)	\bar{t}	Metode					
		AIC	EC	<i>Gabor</i>	<i>peak</i>	<i>threshold</i>	<i>cross-corr</i>
2	t_{12} (ns)	-4.80	-4.41	-4.63	-4.83	-4.40	-4.46
	t_{13} (ns)	5.75	6.69	6.67	6.38	6.68	6.66
	t_{14} (ns)	9.22	0.43	0.28	0.48	0.50	0.47
4	t_{12} (ns)	-8.75	-8.27	-8.26	-7.77	-8.38	-8.27
	t_{13} (ns)	14.14	13.37	13.39	13.43	13.31	13.33
	t_{14} (ns)	1.61	1.90	1.88	2.08	1.84	1.85

Tabel 4. Nilai standar deviasi tiap metode untuk $d = 2$ meter

Parameter	Metode					
	AIC	EC	<i>Gabor</i>	<i>peak</i>	<i>threshold</i>	<i>cross-corr</i>
e_x (m)	161.73	6.85	40.24	15.89	14.33	0.91
$stdev_{e_x}$ (m)	382.83	11.49	104.25	36.21	27.35	1.25
e_y (m)	98.91	6.96	39.28	16.26	14.46	0.96
$stdev_{e_y}$ (m)	210.79	11.67	93.73	35.67	27.35	1.31
e_z (m)	0	0	0	0	0	0
$stdev_{e_z}$ (m)	0	0	0	0	0	0
e_r (m)	193.27	9.77	56.63	22.56	20.37	1.31
$stdev_{e_r}$ (m)	423.36	16.37	3.43	49.58	38.65	1.81

Tabel 5. Nilai standar deviasi tiap metode untuk $d = 4$ meter

Parameter	Metode					
	AIC	EC	<i>Gabor</i>	<i>peak</i>	<i>threshold</i>	<i>cross-corr</i>
e_x (m)	95.79	1.72	14.31	25.48	2.39	0.23
$stdev_{e_x}$ (m)	228.08	2.22	28.89	216.25	3.12	0.28
e_y (m)	72.65	1.81	15.14	16.07	2.61	0.24
$stdev_{e_y}$ (m)	198.96	2.34	30.65	121.67	3.54	0.31
e_z (m)	0.01	0	0	0	0	0
$stdev_{e_z}$ (m)	0.11	0	0	0	0	0
e_r (m)	127.42	2.49	20.87	30.23	3.53	0.33
$stdev_{e_r}$ (m)	299.41	3.22	1.66	248.06	4.71	0.41

(b)

Keterangan :

- e_x = nilai *error* pada koordinat x (m)
- $stdev_{e_x}$ = standar deviasi koordinat x (m)
- e_y = nilai *error* pada koordinat y (m)
- $stdev_{e_y}$ = standar deviasi koordinat y (m)
- e_z = nilai *error* pada koordinat z (m)
- $stdev_{e_z}$ = standar deviasi koordinat z (m)
- e_r = nilai *error* pada jarak dari (0,0,1) ke lokasi sumber *noise* (m)
- $stdev_{e_r}$ = standar deviasi pada jarak dari (0,0,1) ke lokasi sumber *noise* (m)

Pada Gambar 11, terlihat bahwa estimasi lokasi yang didapatkan menunjukkan beberapa titik yang jauh dari lokasi sumber *noise* yang sebenarnya. Hal ini disebabkan oleh faktor metode penentuan TDOA yang digunakan serta sifat divergensi dari persamaan Newton-Raphson untuk menentukan lokasi sumber *noise*.

Kemudian, kita dapat melihat dari Tabel 3 bahwa metode estimasi nilai TDOA yang paling mendekati nilai TDOA ideal adalah metode *cross-correlation*, dan susunan antenna konfigurasi $d = 4$ meter lebih akurat dibandingkan dengan susunan antenna konfigurasi $d = 2$ meter. Perlu diingat bahwa nilai tanda negatif pada nilai t_{12} menunjukkan bahwa sinyal yang diterima antenna 2 datang terlebih dahulu dibandingkan dengan sinyal yang diterima antenna 1

Dengan melihat Tabel 4 dan Tabel 5, maka metode yang paling baik adalah metode *cross-correlation* untuk $d = 4$ meter, dengan galat $0 - 0.33$ meter. Galat dan nilai *error* pada koordinat z adalah 0 meter. Hal ini menunjukkan tingkat akurasi yang baik untuk deteksi sumber *noise* yang sejajar dengan tinggi antenna.

Dari Gambar 11, maka kita dapat menentukan tingkat akurasi dengan tahapan sebagai berikut:

1. Mencari nilai *error* (ε) untuk tiap pencuplikan, dengan $\varepsilon = (|r - r_{true}|)/r_{true} \cdot r_{true}$ adalah jarak dari lokasi $(0,0,1)$ ke lokasi sumber *noise* yang sebenarnya ($P = [10,10,1]$ meter).
2. Menjumlahkan semua nilai ε tersebut, lalu membaginya dengan jumlah pencuplikan yang dilakukan (ini adalah nilai ε rata-rata).
3. Dengan memasukkan nilai ε rata-rata yang didapatkan, ke dalam rumus efisiensi ($\eta = 1 - \varepsilon$), maka didapatkan nilai tingkat akurasi sebesar 97.67 %.

Tingkat akurasi yang didapatkan dengan susunan antenna membentuk Y (97.67%) lebih besar dari penelitian sebelumnya yang menggunakan susunan antenna membentuk persegi (95.87%) (Ibrahim, 2014).

4. KESIMPULAN

Dari pengujian dan analisis simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Metode TDOA cukup efektif digunakan untuk pendeteksian sumber *noise*, dengan tingkat akurasi 97.67 %.
2. Dari beberapa metode yang digunakan untuk menentukan nilai TDOA, metode yang memiliki tingkat akurasi 97.67 % adalah metoda *cross-correlation* dengan galat $0 - 0.33$ meter.
3. Tingkat akurasi estimasi lokasi sumber *noise* akan lebih baik untuk deteksi sumber *noise* yang sejajar dengan tinggi antenna, karena nilai *error* untuk koordinat sumbu z (jarak sumber *noise* dari permukaan bumi) adalah 0 .
4. Susunan antenna membentuk Y memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi (97.67%) dibandingkan dengan susunan antenna membentuk persegi (95.87%).

DAFTAR RUJUKAN

- Kreuger, F. H. (1964). *Discharge Detection in High Voltage Equipment*. London: Temple Press.
- Steiner, J. P., Reynolds, P. H., and Weeks, W. L. (1992). Estimating the location of partial discharges in cables: *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 1, pp. 44–59.
- Quak, B., Gulski, E., Wester, F. J., and Seitz, P. N. (2003). Advanced PD site location in distribution power cables: *Proc. 7th Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 1, pp. 183–186.
- Mashikian, M. S. (2002). Preventive maintenance testing of shielded power cable systems: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 736–743.
- Knapp, C. H., and Carter, G. C. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay: *IEEE Trans. on Acoustic, Speech, Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, 320–327.
- Challa, R. N., and Shamsunder, S. (1998). Passive near-field localization of multiple non-Gaussian sources in 3-D using cumulates: *Signal Proc.*, Vol. 65, 39–53.
- Tungkanawanich, A., Kawasaki, Z., and Matsuura, K. (2001). Analysis of VHF-wideband impulsive electromagnetic noises on power distribution lines: *Trans. IEE Japan*, Vol. 120-B, No. 11, 1538–1544.
- Cavallini, A., *et al.* (2003). A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference: *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 19, no. 2, pp. 23–30.
- Oussalah, N., Zebboudj, Y., and Boggs, S. A. (2007). Partial Discharge Pulse Propagation in Shielded Power Cable and Implications for Detection Sensitivity: *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 23, no.6, pp. 5–10.
- Wagenaars, P., Wouters, P.A.A.F., Wielen, P.J.C.M van der, and Steennis, E.F. (2008). *Algorithms for Arrival Time Estimation of Partial Discharge Pulses in Cable Systems*. Vancouver: ISEI.
- Mardiana R., and Kawasaki, Z. (2000). Broadband Radio Interferometer Utilizing a Sequential Triggering Technique for Locating Fast-Moving Electromagnetic Sources Emitted from Lightning: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, No.2.
- Ibrahim, Nur. (2014). *3D Localization Technique for Broad Band Impulsive Noise Source*. Bandung: IC3INA.