JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Vol. 5, No. 2, Desember 2020, Hal. 295-302
Terakreditasi "**Peringkat 3"** oleh Kemenristek/BRIN, Nomor SK: 85/M/KPT/2020
DOI: 10.31544/jtera.v5.i2.2020.295-302
p-ISSN 2548-737X
e-ISSN 2548-8678

Perancangan Sistem Lokalisasi Sumber Suara Berdasarkan Metode TDOA dan DTOF

Resti Fauziah[#], Carmadi Machbub, Egi Muhammad Idris Hidayat
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia
[#]resti.fauziah@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini dibahas perancangan sistem lokalisasi sumber suara dengan menggunakan metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan metode *Difference of Time of Flight* (DTOF). TDOA merupakan metode penentuan posisi sumber suara berdasarkan pada persamaan hiperbola pada bidang koordinat dan hubungan selisih titik fokus hiperbola dari sinyal-sinyal yang diperoleh pada beberapa sensor berupa mikrofon dengan waktu kedatangan yang menggunakan waktu mutlak tiba di mikrofon tertentu. DTOF merupakan metode penentuan posisi sumber suara yang diturunkan berdasarkan perbedaan waktu propagasi sinyal dari sumber suara ke setiap mikrofon saat mikrofon dipicu. Sebagai pembuktiannya dilakukan dengan dua cara. Pertama, simulasi dengan waktu setiap mikrofon ialah jarak mikrofon terhadap sumber suara dibagi dengan kecepatan suara. Kedua, eksperimen dengan waktu setiap mikrofon ialah hasil rekaman suara yang waktu tundanya diperoleh dengan membandingkan Korelasi Silang dan Korelasi Silang Umum. Berdasarkan simulasi dan eksperimen dapat disimpulkan bahwa metode TDOA menghasilkan akurasi yang lebih baik.

Kata kunci: *time difference of arrival, difference of time of flight*, lokalisasi sumber suara

Abstract

This research discussed about sound source localization system design using Time Difference of Arrival (TDOA) and Difference of Time of Flight (DTOF). TDOA is a method that determined the position of the sound source based on hyperbole equation on the coordinate plane and focus point gap of the hyperbole from the signals obtained from several sensors such as microphones used the absolute time that arrived at one of microphone. While DTOF is a method that the decision derived based on the gap of propagation time signal of the sound source to each microphone when the microphone is triggered. Verifications are made in two ways. First, using simulation, time of each microphone is the microphone distance from the sound source divided by sound speed. Second, a real experiment, time of each microphone is a sound recording which the delay time obtained by comparing Cross Correlation (CC) and Generalized Cross Correlation (GCC). Based on the simulation and real experiments can be concluded that TDOA method produces better accuracy.

Keywords*: time difference of arrival, difference of time of flight, sound source localization*

I. PENDAHULUAN

Lokalisasi sumber suara telah menjadi penelitian yang diminati dan menarik dalam penelitan ilmiah terutama pada bidang rekayasa pengolahan sinyal karena banyak berperan penting dalam aplikasi audio yang nyata. Metode lokalisasi sumber suara yang ada dapat dibagi menjadi tiga kategori yaitu, metode berdasarkan *steered beamforming*, metode yang didasarkan pada *high resolution spectral*, dan metode yang didasarkan pada estimasi waktu tunda [1]. Pada penelitian ini digunakan metode yang didasarkan pada estimasi waktu tunda yang memiliki akurasi yang relatif tinggi dan implementasi waktu sebenarnya mudah untuk dicapai [2].

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian lokalisasi sumber suara seperti [3] and [4]. Referensi [3] menghasilkan algoritma yang lebih baik dibandingkan interpolasi bola, dan memiliki ambang batas kebisingan yang lebih tinggi dibandingkan batas bawah Cramer-Rao serta memiliki solusi eksplisit yang tidak tersedia pada metode Taylor-series dan *Beamforming*. Referensi [4] menyajikan gagasan baru formulasi estimasi lokalisasi sumber suara untuk dua dimensi dan tiga dimensi menggunakan perbedaan waktu saat mikrofon dipicu

Diterima: 30 Oktober 2020; Direvisi: 8 Desember 2020; Disetujui: 14 Desember 2020
JTERA, Vol. 5, No. 2, Desember 2020

© 2020 JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Politeknik Sukabumi

yang dibandingkan dengan TOF sebenarnya yang memiliki banyak permasalahan. Dalam menentukan waktu tunda yang digunakan pada estimasi lokalisasi sumber suara dengan membandingkan metode CC dan GCC yang menyimpulkan bahwa metode GCC *Phase Transform* (PHAT) memiliki karakteristik fluktuasi kecil, puncak yang tajam dan kemampuan *anti-jamming* yang kuat [5]. Seperti pada referensi [6] dihasilkan metode GCC-PHAT berhasil mencapai hasil terbaik di bagian eksperimen dan metode CC memiliki hasil terburuk di bagian simulasi eksperimen serta dengan menambahkan mikrofon akurasi akan meningkat dan itu memiliki pengaruh terbesar ketika metode korelasi silang digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem lokalisasi sumber suara menggunakan metode TDOA dan DTOF. Kedua metode tersebut memiliki dua langkah penentuan. Langkah pertama ialah memperoleh estimasi waktu tunda dari masing-masing pasang mikrofon, yaitu perbedaan waktu perjalanan suara dari sumber ke sepasang mikrofon menggunakan Korelasi Silang dan Korelasi Silang Umum digunakan untuk mendapatkan presisi yang lebih baik [7]-[9]. Langkah kedua ialah menggunakan algoritma lokalisasi yang tepat untuk mengestimasi lokalisasi sumber suara berdasarkan estimasi waktu tunda dan posisi mikrofon. Untuk metode TDOA, digunakan algoritma Chan yang merupakan metode pemecahan kuadrat persamaan langsung yang membutuhkan tiga mikrofon pada bidang dua dimensi. Untuk metode DTOF, digunakan algoritma Walworth yang merupakan metode yang diturunkan berdasarkan perbedaan waktu propagasi sinyal dari sumber suara ke setiap mikrofon saat mikrofon dipicu yang membutuhkan empat mikrofon pada bidang dua dimensi. Penelitian ini bertujuan untuk memecahkan masalah pada estimasi posisi sumber suara yang disebabkan oleh ketidakakuratan posisi menggunakan TDOA dan DTOF lalu kedua metode tersebut dibandingkan berdasarkan tingkat akurasinya.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, sumber suara yang direkam berupa suara manusia berbahasa indonesia dengan kalimat “saya pelajar” dengan frekuensi yang berbeda yang memiliki durasi 4,5 detik, yang kemudian disimpan dalam format .wav.

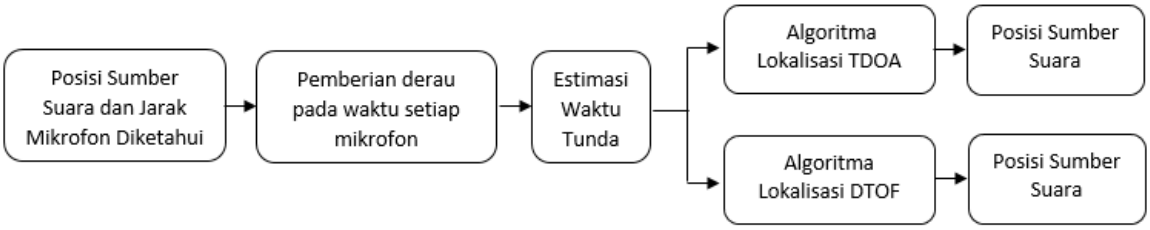
Perangkat yang digunakan untuk menangani masukan sinyal dalam penelitian ini ialah Line6 Toneport® UX8, sebuah antarmuka perekaman yang mampu menangani hingga 8 buah masukan mikrofon. Pada eksperimen-eksperimen yang terdapat dalam penelitian ini, digunakan empat unit mikrofon untuk pengambilan data [10]-[13]. Perangkat lunak perekaman yang digunakan ialah Adobe Audition 3.0 dan untuk keperluan menghitung TDOA dan koordinat posisi sumber suara, digunakan perangkat lunak MATLAB R2015b [14]. Penelitian dilakukan dengan simulasi dan eksperimen dalam mengestimasi lokasi sumber suara.

A. Perancangan Simulasi

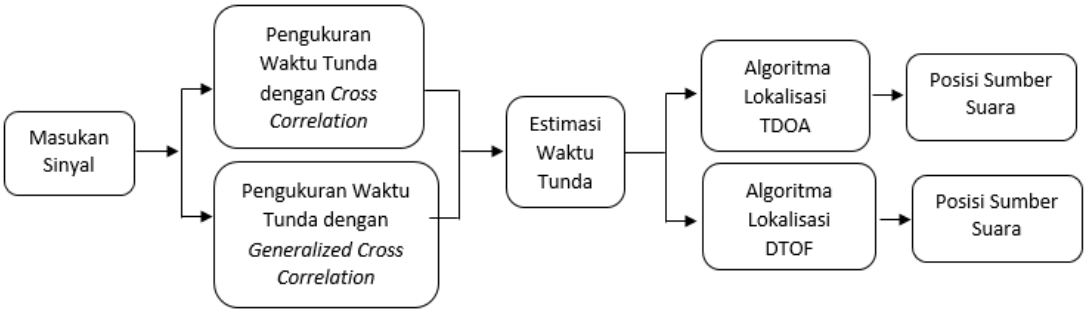
Pada simulasi seperti diagram blok pada Gambar 1. Lokasi sumber suara dan jarak mikrofon diketahui terlebih dahulu lalu derau diberikan pada waktu setiap mikrofon, hal ini dilakukan untuk menguji seberapa besar rentang derau yang dapat diberikan untuk memperoleh posisi sumber suara yang mendekati akurat [15]. Algortima TDOA dan algoritma DTOF diperbandingkan dalam menentukan posisi sumber suara yang paling mendekati dengan posisi sumber suara yang telah ditentukan diawal.

B. Perancangan Eksperimen

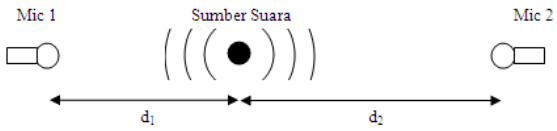
Pada eksperimen seperti diagram blok pada Gambar 2. Lokalisasi sumber suara dirancang dari masukan sinyal berupa rekaman suara dengan menggunakan sensor berupa mikrofon. Pengukuran estimasi waktu tunda diperoleh dari hasil rekaman suara dengan membandingkan metode korelasi silang dan beberapa metode yang termasuk klasifikasi korelasi silang umum. Estimasi waktu tunda yang mendekati akurat digunakan dalam perhitungan lokalisasi sumber suara dengan menggunakan algoritma TDOA [3] dan algoritma DTOF [4].



Gambar 1. Diagram blok lokalisasi sumber suara secara simulasi



Gambar 2. Diagram blok lokalisasi sumber suara secara eksperimen



Gambar 3. Desain eksperimen hubungan TDOA dan selisih jarak

Dalam menentukan waktu tunda, perhitungan korelasi silang dapat dikembangkan dengan berbagai macam metode, diantaranya ialah metode GCC-PHAT, GCC-ML, GCC-ROTH, dan GCC-SCOT yang termasuk ke dalam klasifikasi korelasi silang umum. Sehingga dilakukan perbandingan antara metode CC, GCC-PHAT, GCC-ML, GCC-ROTH, dan GCC-SCOT untuk mendapatkan waktu tunda yang mendekati akurat. Lalu dihitung *argmax* yang menyatakan nilai yang yang menyebabkan hasil fungsi tersebut menjadi maksimum [16]-[17].

C. Eksperimen Hubungan TDOA dan Selisih Jarak

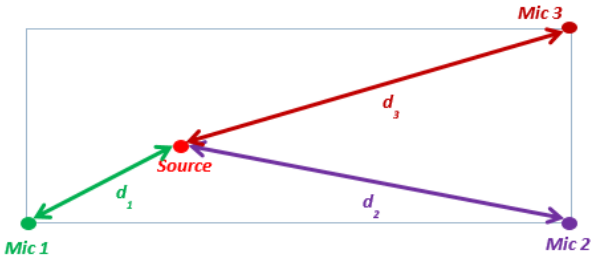
Waktu tunda antara dua sinyal Δt dapat diperoleh dengan mencari nilai t yang menyebabkan nilai korelasi silangnya maksimum.

$$\Delta t = \underset{t}{\operatorname{argmax}} (f \star g)(t) \qquad (1)$$

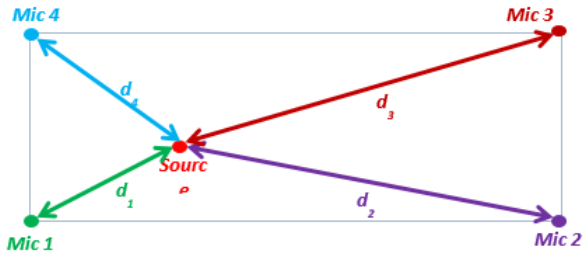
Waktu tunda ini dianggap berbanding lurus secara linier dengan selisih jarak dengan konstanta pembanding sebesar k, yang diperoleh dari eksperimen dan regresi linier. Dengan memperhitungkan faktor *intercept* dari regresi linier (e), hubungan TDOA dan selisih jarak dinyatakan sebagai berikut,

$$d_{i,1} = k\Delta t_{i1} + e, \; i = 1, 2, ..., M \qquad (2)$$

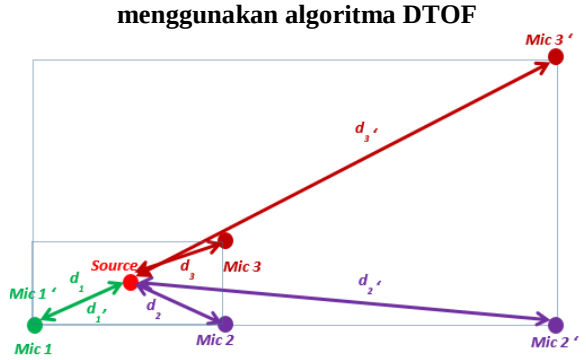
Tujuan dari eksperimen ini ialah memperoleh konstanta k dan e dalam persamaan (2) dengan dua buah mikrofon, satu buah perangkat keras perekaman, perangkat lunak perekaman, dan perangkat lunak untuk menghitung waktu tunda.



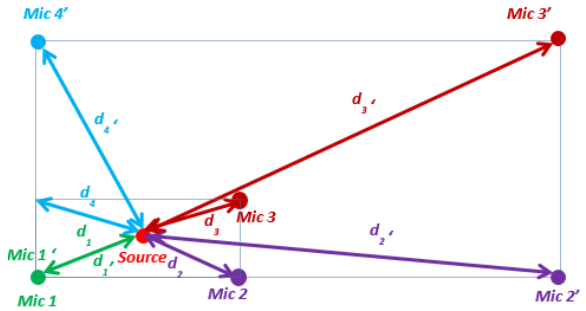
Gambar 4. Desain posisi mikrofon dan sumber suara menggunakan algoritma TDOA



Gambar 5. Desain posisi mikrofon dan sumber suara menggunakan algoritma DTOF



Gambar 6. Desain peletakan posisi mikrofon dan sumber suara menggunakan algoritma TDOA



Gambar 7. Desain peletakan posisi mikrofon dan sumber suara menggunakan algoritma DTOF

Jarak sumber suara d_1 dan d_2 ialah 5 cm – 55 cm, dengan interval 5 cm dan semua kombinasi yang mungkin yang dapat diubah-ubah. Pada setiap kombinasi jarak, dihitung waktu tunda antara sinyal yang diterima oleh setiap mikrofon. Setelah itu dilakukan regresi linier agar diperoleh hubungan antara selisih jarak dengan TDOA.

D. Eksperimen Posisi Sumber Suara

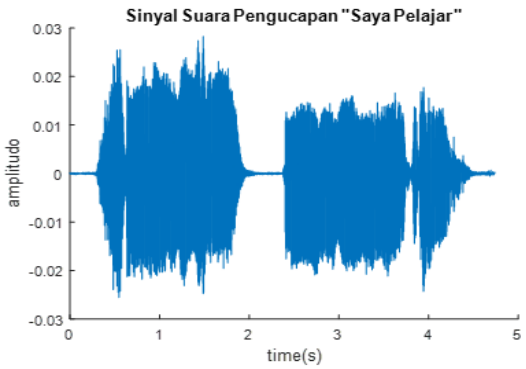
Tujuan dari eksperimen ini ialah melakukan estimasi posisi sumber suara berdasarkan algoritma Chan yang digunakan pada metode TDOA [3] dan algoritma Walworth yang digunakan pada metode DTOF [4].

Pada eksperimen ini, digunakan tiga buah mikrofon pada algoritma TDOA seperti pada Gambar 4 dan empat buah mikrofon pada algoritma DTOF seperti pada Gambar 5 dan sebuah sumber suara. Analisis terhadap peletakan posisi mikrofon dan sumber suara dilakukan menggunakan kedua algoritma tersebut yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Posisi dari masing-masing mikrofon ditetapkan pada (0,0), (55,0), (55,35), dan (0,35) untuk letak mikrofon yang berdekatan dan (0,0), (200,0), (200,150), dan (0,150) untuk letak mikrofon yang berjauhan.

Pada eksperimen ini, dihitung masing-masing TDOA antara mikrofon. Kemudian selisih jarak dihitung dengan hasil regresi linier pada percobaan sebelumnya, lalu posisi dihitung dengan menyelesaikan sistem persamaan linier.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil rekaman suara yang digunakan sebagai data pengujian dengan kalimat “saya pelajar” dengan durasi 4,5 detik dapat dilihat pada Gambar 8. Dalam menentukan waktu tunda dilakukan dengan membandingkan beberapa metode yaitu motode CC, GCC-PHAT, GCC-ML, GCC-ROTH, dan GCC-SCOT. Berikut hasil pengujian perbandingan metode tersebut yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 8. Hasil sinyal suara “saya pelajar”

Pada perbandingan metode penentuan waktu tunda, waktu tunda telah dirancang sebesar 243 dan derau diberikan secara acak pada masing-masing sinyal. Terlihat pada Gambar 9, seluruh metode menghasilkan waktu tunda sebesar 243. Namun, metode GCC-PHAT menghasilkan puncak yang tajam dibandingkan dengan metode lain. Hal itu dikarenakan metode GCC-PHAT berfungsi untuk memutlakan sinyal masukan campuran.

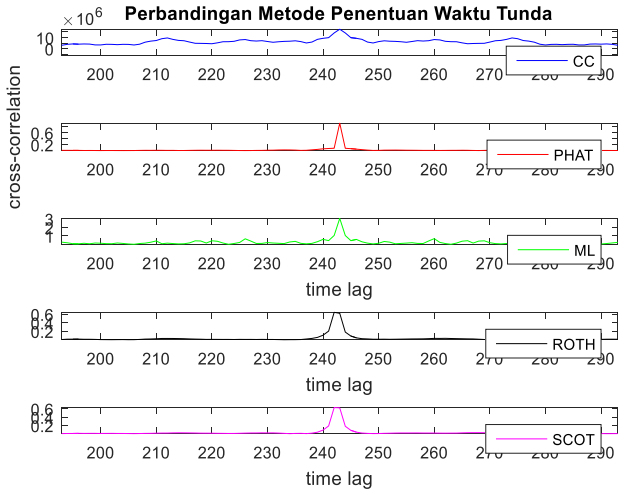
A. Hubungan TDOA dan Selisih Jarak

Setelah dilakukan percobaan dengan mengambil data untuk beberapa selisih jarak dan TDOA, dilakukan regresi linier untuk memperoleh konstanta k dan e yang. Hasil regresi linier dapat dilihat pada Gambar 10.

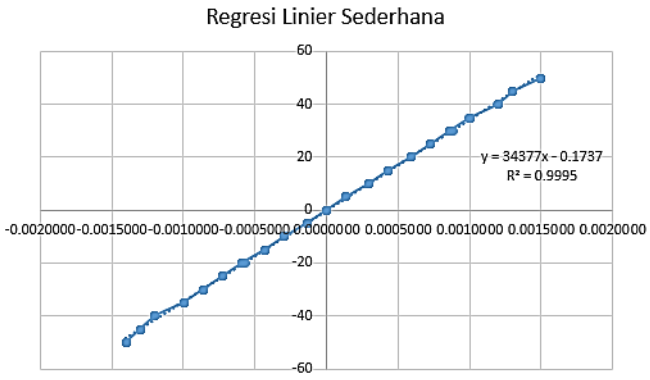
Persamaan yang dihasilkan oleh regresi linier untuk hubungan kedua peubah tersebut ialah:

$$\Delta d = 34377\Delta t - 0.1737 \qquad (3)$$

Persamaan (3) menjadi dasar untuk menghitung selisih jarak pada percobaan selanjutnya.



Gambar 9. Hasil perbandingan metode dalam penentuan waktu tunda



Gambar 10. Hasil regresi linier

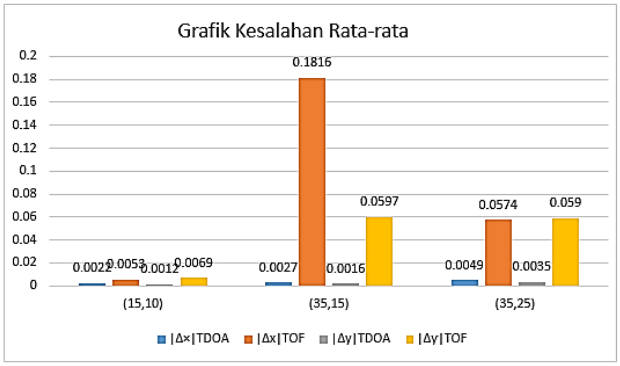
B. Estimasi Posisi Sumber Suara

Pada eksperimen ini dilakukan beberapa kali pengambilan data pada posisi sumber suara (15,10), (35,15), dan (35,25) untuk letak mikrofon yang berdekatan dan (45,20), (90,150), dan (160,55) untuk letak mikrofon yang berjauhan. Hasil pengambilan data pada posisi-posisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 11 sampai Gambar 14.

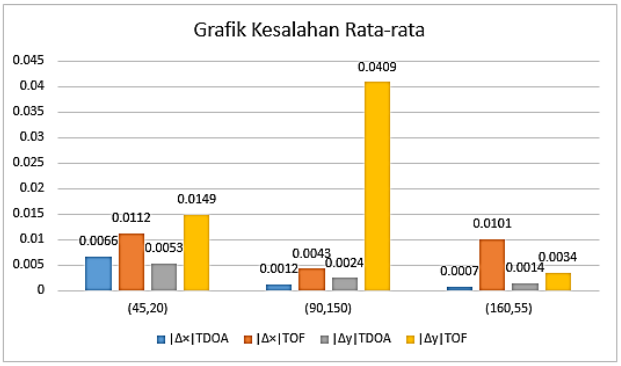
Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan kesalahan rata-rata secara simulasi yang kecil ketika menggunakan algoritma TDOA dengan letak mikrofon yang berdekatan dan mikrofon yang berjauhan.

Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan kesalahan rata-rata secara eksperimen yang kecil ketika menggunakan algoritma TDOA dengan letak mikrofon yang berdekatan dan mikrofon yang berjauhan.

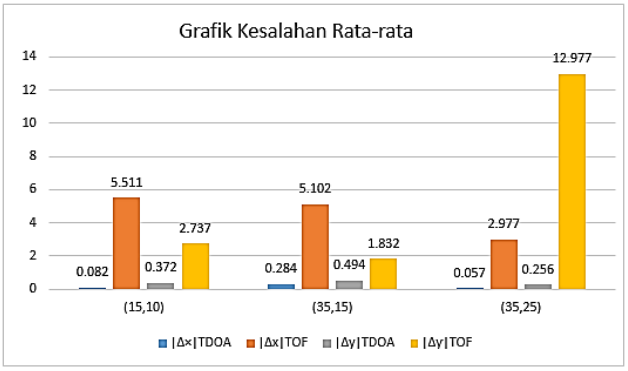
Eksperimen juga dilakukan dalam menganalisis peletakan posisi mikrofon dan sumber suara yang dilakukan pada posisi sumber suara (15,10), (25,20), (250,70), dan (550,70) seperti pada Gambar 15 sampai Gambar 18.



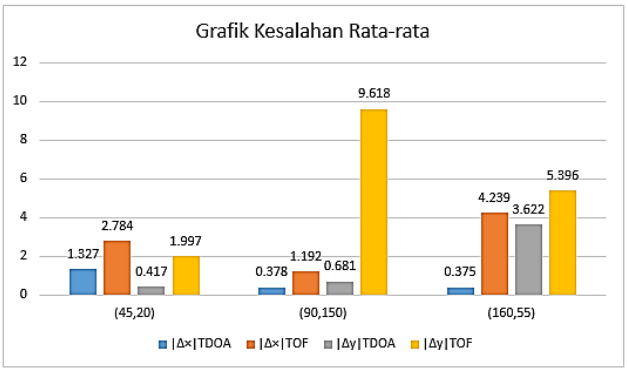
Gambar 11. Grafik kesalahan rata-rata secara simulasi dengan mikrofon berdekatan



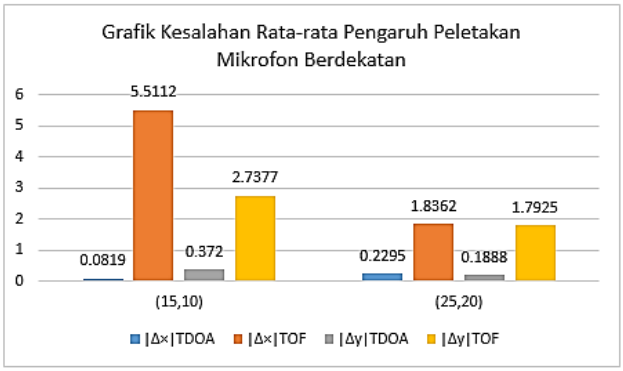
Gambar 12. Grafik kesalahan rata-rata secara simulasi dengan mikrofon berjauhan



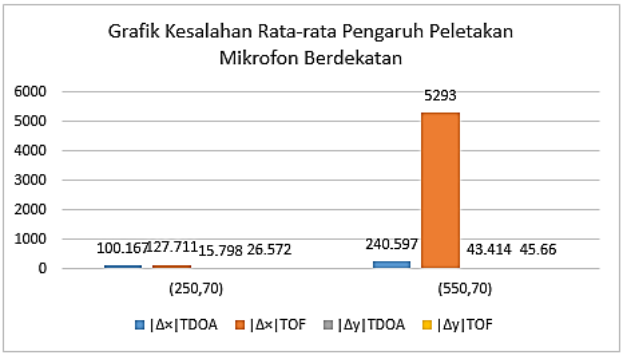
Gambar 13. Grafik kesalahan rata-rata secara eksperimen dengan mikrofon berdekatan



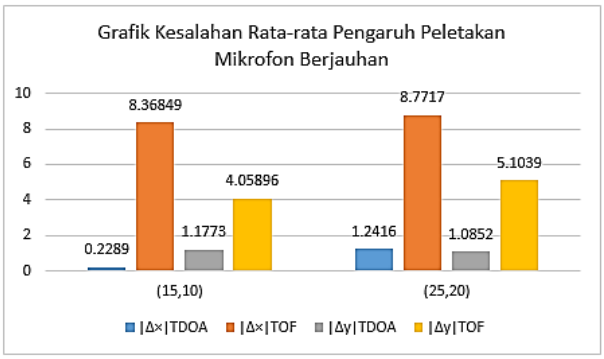
Gambar 14. Grafik kesalahan rata-rata secara eksperimen dengan mikrofon berjauhan



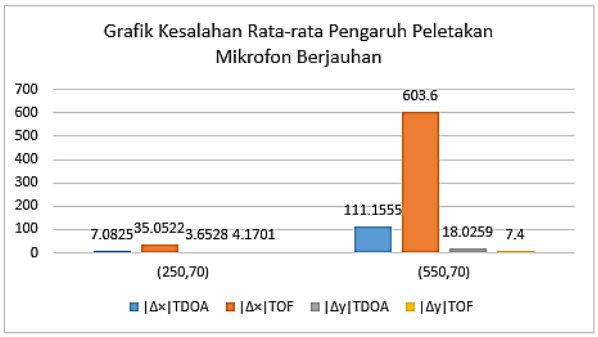
Gambar 15. Grafik kesalahan rata-rata pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berdekatan 1



Gambar 16. Grafik kesalahan rata-rata pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berdekatan 2



Gambar 17. Grafik kesalahan rata-rata pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berjauhan 1



Gambar 18. Grafik kesalahan rata-rata pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berjauhan 2

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berdekatan dengan kesalahan rata-rata yang kecil ketika menggunakan algoritma TDOA.

Gambar 17 dan Gambar 18 menunjukkan pengaruh peletakan posisi mikrofon yang berjauhan dengan kesalahan rata-rata yang kecil ketika menggunakan algoritma TDOA.

Setelah dilakukan penelitian perbandingan algoritma TDOA dan algoritma DTOF terbukti algoritma TDOA bekerja lebih baik dalam penentuan estimasi lokalisasi sumber suara baik secara simulasi maupun eksperimen dan dengan peletakan mikrofon secara berdekatan maupun secara berjauhan. Sama halnya seperti pada referensi [3] dihasilkan algoritma TDOA lebih baik dibandingkan interpolasi bola, batas bawah Cramer-Rao, metode Taylor-series dan *Beamforming* dalam penentuan posisi sumber suara khususnya ketika jumlah sensornya kecil yang pada penelitian ini sensor berupa mikrofon.

IV. KESIMPULAN

Dari seluruh pengujian dan eksperimen berbagai koordinat posisi sumber suara pada simulasi dan eksperimen menghasilkan hasil yang sama yaitu kesalahan rata-rata pada algoritma TDOA yang lebih kecil dibandingkan dengan kesalahan rata-rata pada algoritma DTOF di semua koordinat sumber suara yang diujikan terutama pada kasus penentuan posisi sumber suara menggunakan mikrofon dan sumber suara berupa suara manusia. Peletakan mikrofon juga berpengaruh terhadap hasil estimasi lokalisasi sumber suara. Apabila posisi sumber suara dekat dengan mikrofon maka hasil estimasi akan lebih baik dibandingkan dengan posisi sumber suara yang jauh dengan mikrofon dan apabila posisi sumber suara berada di dalam lingkup mikrofon dengan peletakan posisi mikrofon secara berdekatan maupun berjauhan menghasilkan kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan posisi sumber suara yang berada di luar lingkup mikrofon. Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan mikrofon lebih dari empat dan koordinat yang lebih bervariatif.

REFERENSI

[1] M. Brandstein and D. Ward, "Microphone Array," *Verlag, New York, Springer*, pp. 158-159, 2001.

[2] M. S. Brandstein, "A practical methodology for speech source localization with microphone arrays," *Computer Speech & Language*, vol. II, no. 2, pp. 91-126, April, 1997.

[3] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location, *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, 1994.

[4] M. Walworth and A. Mahajan, "3D position sensing using the difference in the time-of-flights from a wave source to various receivers. In*Advanced Robotics," ICAR'97. Proceedings., 8th International Conference on* (pp. 611-616), IEEE, 1997.

[5] L. Chen, Y. Liu, F. Kong and N. He, "Acoustic source localization based on generalized cross-correlation time-delay estimation," *Procedia Engineering*, *15*, 4912-4919, 2011.

[6] H. Khaddour, "A comparison of algorithms of sound source localization based on time delay estimation," *Electrotechnic magazine: elektrorevue* 2.1 (2011): 31-37, 2011.

[7] C. L. Aguilar, I. Mohino, and L. A. Perez, "A comparative study of time-delay estimation techniques for convolutive speech mixtures," *Advances in Computer Science*, 291-296, 2011.

[8] M. Azaria and D. Hertz, "Time delay estimation by generalized cross correlation methods," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 32, no. 2, pp. 280-285, 1984.

[9] S. Dhull, S. Arya and O. P. Sahu, "Comparison of time-delay estimation techniques in acoustic environment," *International Journal of Computer Applications*, vol. 8, no. 9, pp. 29-31, 2010.

[10] D. B. Haddad, W. A. Martins, L. W. Biscainho, M. D. V. Da Costa and K. H. Kim, "Choosing coherent times of flight for improved acoustic sensor localization," In *Telecommunications Symposium*

(ITS), 2014 International (pp. 1-5), IEEE, August, 2014.

[11] B. Kwon, Y. Park and Y. S. Park, (2010, October): Analysis of the GCC-PHAT technique for multiple sources. In *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on* (pp. 2070-2073). IEEE, October, 2010.

[12] S. Liu, C. Zhang and Y. Huang "Research on acoustic source localization using time difference of arrival measurements," In *Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference on* (Vol. 1, pp. 220-224), IEEE, May, 2012.

[13] J. S. Mwela, "Acoustic Speech Source Localization in a Constrained search Space, " Doctoral dissertation, Blekinge Institute of Technology, 2010.

[14] S. Potluri, "Hyperbolic position location estimator with tdoas from four stations," 2002.

[15] A. Satriawan, "Perancangan Estimasi Posisi Sumber Suara Pada Bidang Dua Dimensi Berdasarkan Time Difference of Arrival," *Jurnal Sarjana ITB bidang Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 2, no. 1, 2013.

[16] B. Woodacre, "TDOA positioning algorithms: Evaluation and implementation," 2003.

[17] Y. Zhang and W. H. Abdulla, "A comparative study of time-delay estimation techniques using microphone arrays," *Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Auckland, School of Engineering Report, 619*, 2005.