

# Penentuan Lokasi Sumber Suara Menggunakan *Directional Microphone Array*

## Determination of Sound Source Location Using Directional Microphone Array

Annisa Firasanti<sup>1\*</sup>, Putra Wisnu Agung Sucipto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Fakultas Teknik Universitas Islam "45" Bekasi

Jl. Cut Meutia 83 Bekasi Timur 17113

adnis1210@gmail.com<sup>1\*</sup>, wisnuas@gmail.com<sup>2</sup>

**Abstrak** – Penentuan lokasi sumber akustik adalah persoalan yang sangat penting yang dibutuhkan dalam banyak bidang aplikasi praktis seperti telekonferensi, keamanan, navigasi, dan lainnya. Microphone array adalah tiruan dan pengembangan dari proses pendengaran manusia dengan dua telinga. Dalam penelitian ini dilakukan proses penentuan lokasi sumber suara dengan mengukur Time Difference of Arrival (TDOA), yaitu cross-correlation dari informasi yang diterima oleh sepasang atau beberapa mikrofon. Setelah itu dilakukan estimasi untuk mencari nilai delay yang dapat memaksimalkan cross-correlation tersebut. Nilai tersebut kemudian diproses dari persamaan geometri yang dapat menghasilkan sudut sumber suara yang dihitung dari mikrofon acuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suara yang mempunyai rentang frekuensi yang tinggi lebih mudah dideteksi daripada yang mempunyai frekuensi tunggal. Sudut yang terdeteksi mempunyai error rata-rata 2,78° dan MSE 2,776°. Jarak yang terdeteksi mempunyai selisih rata-rata 5,859 cm dan nilai MSE 5,71.

**Kata Kunci:** Penentuan lokasi sumber suara, microphone array, time difference of arrival (TDOA).

**Abstract** – Determining the location of acoustic sources is a very important issue that is needed in many fields of practical applications such as teleconferencing, security, navigation, and others. A microphone array is an imitation and development of the human hearing process with two ears. In this study, the process of determining the location of sound sources was carried out by measuring Time Difference of Arrival (TDOA), which is the cross-correlation of information received by a pair or several microphones. After that estimation is done to find the delay value that can maximize the cross-correlation. Furthermore, the value is processed from a geometry equation which can produce sound source angles calculated from the reference microphone. The results showed that sounds with a high-frequency range were easier to detect than sounds with a single frequency. The detected angle has an average error of 2.78° and MSE 2.776°. The detected distance has an average difference of 5.859 cm and MSE value of 5.71.

**Keywords:** Determination of Sound Source Location, microphone array, time difference of arrival (TDOA).

### 1. Pendahuluan

Selama beberapa tahun terakhir, topik pencarian sumber suara menjadi salah satu bidang peminatan populer di kalangan ilmuwan. Pencarian Lokasi Sumber atau *Sound Source Localization* (SSL) khususnya telah menjadi aplikasi yang penting karena pada umumnya sistem

pengenalan audio (baik itu percakapan, suara atau peristiwa tertentu) membutuhkan pengetahuan tentang posisi sumber itu sendiri.

Tujuan dari SSL adalah dapat mengetahui posisi atau koordinat dari sumber suara secara otomatis. Dalam dunia robotika, fungsi ini sangat berguna pada situasi tertentu misalnya untuk menemukan manusia yang berbicara untuk robot jenis pelayanan publik, dalam situasi penyelamatan dimana kontak visual tidak dapat lagi digunakan misalnya dalam asap tebal, atau untuk pemetaan lingkungan akustik. Kinerja dari SSL sangat berpengaruh untuk sistem robot yang lainnya karena estimasi tersebut seringkali digunakan dalam tahap pemrosesan selanjutnya seperti pemisahan sumber suara, klasifikasi sumber suara dan pengenalan suara otomatis[1].

Teknologi lokalisasi sumber suara menggunakan *microphone array* secara umum dapat dikategorikan ke dalam beberapa cara yaitu: teknologi *beamforming* yang dapat dikontrol berdasarkan kekuatan energi (daya) yang diterima [2], [3]; estimasi arah kedatangan (*Direction of Arrival*) [4], [5]; dan teknologi berdasarkan waktu tunda kedatangan (TDOA) [6]. Pendekatan yang telah dilakukan pun bervariasi mulai dari pendekatan secara geometris, yaitu meneliti tentang pengaruh posisi, susunan dan jumlah mikrofon *array* yang digunakan terhadap hasil estimasi sumber suara [6], pendekatan dari segi *bandwidth* suara yang diestimasi [7] dan pendekatan berbasis pembelajaran (*learning-based*) [4].

Dalam penelitian ini akan dilakukan penerapan *Time Difference of Arrival* (TDOA) yang didapatkan dari *microphone array*. Adapun sensor yang digunakan adalah *directional microphone* karena mempunyai sensitivitas yang tinggi terhadap suara pada arah tertentu saja, berbeda dengan *omni-directional microphone* yang mempunyai sensitivitas yang sama ke semua arah. Fitur ini tentunya merupakan sebuah nilai tambah untuk keperluan penentuan lokasi. Namun karena memiliki sensitivitas yang tinggi, maka suara-suara yang bukan berasal dari sumber (derau dan gema) juga akan ikut tertangkap dengan jelas. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah proses untuk menghilangkan derau tersebut sebelum data akustik digunakan untuk kepentingan lokalisasi. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari sudut dari sumber suara yang berasal dari suara terekam.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Time Difference of Arrival (TDOA)

Penentuan lokasi sumber suara ditentukan dari *delay* yang terjadi di antara sepasang mikrofon. Untuk menentukan *delay* dari sinyal yang tertangkap oleh dua mikrofon yang berbeda diperlukan untuk menetapkan pengukuran yang koheren dan yang paling umum dilakukan adalah korelasi silang (*cross-correlation*) sederhana antara sinyal yang diterima oleh dua mikrofon seperti pada (1),

$$R_{ij}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} x_i[n]x_j[n - \tau] \quad (1)$$

dengan  $x_i[n]$  adalah sinyal yang diterima oleh mikrofon  $i$  dan  $\tau$  adalah *correlation lag* pada sinyal suara.  $R_{ij}(\tau)$  akan bernilai maksimal apabila  $\tau$  sama dengan *offset* antara dua sinyal yang diterima[8]. Masalahnya formula (1) mempunyai kompleksitas yang tinggi sehingga salah satu solusinya adalah dengan menggunakan pendekatan dalam domain frekuensi dengan menghitung invers transformasi Fourier dari *cross-spectrum* seperti yang terdapat pada (2),

$$R_{ij}(\tau) \approx \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k)X_j(k)^* e^{t2\pi k\tau/N} \quad (2)$$

dengan  $X_i(k)$  adalah transformasi diskrit Fourier dari  $x_i[n]$  dan  $X_i(k)X_j(k)^*$  adalah *cross-spectrum* dari  $x_i[n]$  dan  $x_j[n]$ .

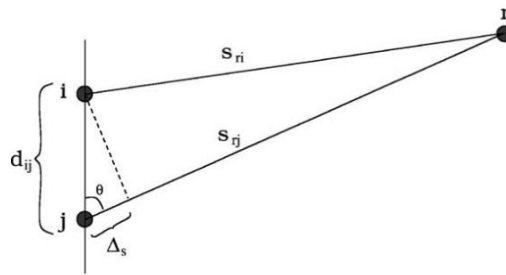
Namun pendekatan ini juga menimbulkan permasalahan lain karena korelasi tersebut sangat bergantung pada sifat statistik dari sinyal sumber. Hal ini disebabkan kebanyakan sinyal suara berfrekuensi rendah sehingga korelasi antara sampel yang berdekatan akan bernilai tinggi dan menghasilkan puncak yang lebar pada hasil *cross-correlation* nanti. Untuk mengatasinya proses *whitening* dapat dilakukan pada spektrum sinyal seperti pada (3) yang sesuai dengan invers dari transformasi Fourier dari *cross spectrum* yang telah dinormalisasi (*whitened*) [9],

$$R_{ij}^{(w)}(\tau) \approx \sum_{k=0}^{N-1} \frac{X_i(k)X_j(k)^*}{|X_i(k)||X_j(k)|} e^{\frac{t2\pi k\tau}{N}}. \quad (3)$$

## 2.2 Sound Source Localization (SSL)

Saat nilai *delay* sudah dapat ditemukan, maka langkah selanjutnya adalah mencari lokasi suara dengan menggunakan informasi tersebut. Misalnya ada rangkaian sederhana yang terdiri dari sumber akustik dan serangkaian *microphone array* seperti pada Gambar 1. Jika sumber akustik mengeluarkan sinyal suara  $r(t)$ , maka sinyal yang diterima oleh mikrofon ke- $i$  dapat dinyatakan dalam model matematis (4) dimana  $\alpha_i$  adalah faktor peredaman akibat propagasi sinyal akustik yang berjalan dari sumber suara ke mikrofon,  $\tau_i$  adalah waktu propagasi dan  $n_i(t)$  merupakan gabungan dari semua *noise* yang ada di dalam ruangan

$$s_i(t) = \alpha_i r(t - \tau_i) + n_i(t). \quad (4)$$

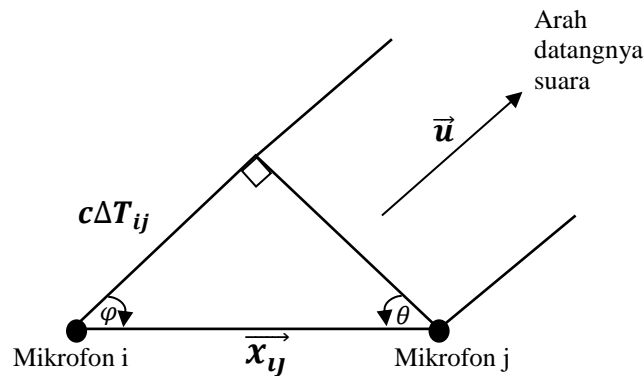


Gambar 1. Susunan geometri untuk persoalan penentuan sudut

Kemudian jika  $d_{ij}$  adalah jarak antara pasangan mikrofon  $i$  dan  $j$ , maka  $\delta_{ij} = \tau_j - \tau_i$  adalah *delay* waktu kedatangan sinyal akustik antara kedua mikrofon. Dibawah asumsi penyederhanaan yang pada dasarnya berasal dari teori *far-field* dimana jarak sumber suara diasumsikan jauh lebih besar daripada jarak *microphone array*, yaitu  $S_{rj}, S_{ri} \gg d_{ij} \gg \lambda$  dimana  $S_{ri}, S_{rj}$  adalah jarak antara sumber  $r$  dengan mikrofon  $i$  dan  $j$ ,  $\lambda$  adalah panjang gelombang dominan dari sinyal, maka dapat ditentukan sudut  $\theta$  kedatangan sumber akustik dari waktu tunda,

$$\Delta_s = d_{ij} \cos(\theta) \cong S_{rj} - S_{ri} = v(\tau_j - \tau_i) = v\delta_{ij}. \quad (5)$$

Ilustrasi akan hal ini dijelaskan pada Gambar 1, dimana  $v$  adalah kecepatan suara, sehingga sudut  $\theta$  dapat diestimasi. Dengan menggunakan persamaan geometris, maka koordinat  $(x, y)$  dapat diperkirakan dari nilai *delay* yang didapat [10].



Gambar 2. Susunan geometri untuk persoalan penentuan jarak

Selanjutnya untuk memperkirakan jarak digunakan persamaan geometri yang lain seperti Gambar 2. Jika  $\bar{\mathbf{u}}$  adalah sebuah vektor satuan yang menuju ke arah sumber suara dan  $\bar{\mathbf{x}}_{ij}$  adalah vektor yang berjalan dari mikrofon i ke j, maka berdasarkan hukum cosinus dapat dituliskan persamaan (6) dan (7) dimana  $c$  adalah kecepatan suara di udara.

$$\cos \varphi = \frac{\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{ij}}{\|\bar{\mathbf{u}}\| \|\bar{\mathbf{x}}_{ij}\|} = \frac{\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{ij}}{\|\bar{\mathbf{x}}_{ij}\|} \quad (6)$$

$$\cos \varphi = \sin \theta = \frac{c\Delta T_{ij}}{\|\bar{\mathbf{x}}_{ij}\|} \quad (7)$$

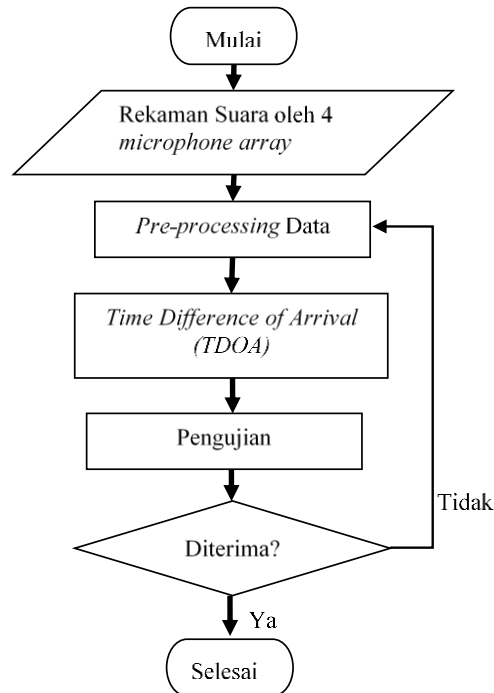
Jika persamaan (6) dan (7) digabungkan maka akan didapatkan (8) dimana nilai  $\bar{\mathbf{u}} = (u, v, w)$  dan  $\bar{\mathbf{x}}_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i)$ . Untuk  $N$  mikrofon, maka akan didapatkan persamaan untuk  $N-1$  (9). Namun untuk mikrofon berjumlah lebih dari 4 buah, sistem tersebut akan *over-constrained* dan hanya dapat dihitung sekali karena matriks bersifat konstan. Sistem ini akan stabil (artinya matriks bersifat non-singular sehingga determinannya tidak bernilai nol) selama semua mikrofon tidak berada di bidang yang sama [10].

$$\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{ij} = c\Delta T_{ij} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & (z_3 - z_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ (x_N - x_1) & (y_N - y_1) & (z_N - z_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\Delta T_{12} \\ c\Delta T_{13} \\ \dots \\ c\Delta T_{1N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah *file* rekaman suara dengan format mono berekstensi .wav. Sebelum data diproses, dilakukan pra pengolahan *file* suara agar hasil suara yang didapat lebih baik. Tahapan penentuan lokasi sumber yang akan dilakukan dalam penelitian ini terdapat pada Gambar 3.

Sinyal suara yang diterima oleh mikrofon merupakan penggabungan dari sinyal asli yang *ter-delay* karena proses propagasi dan juga semua derau dan gaung yang ada di dalam ruangan tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan *pre-processing* data sebelum data benar-benar digunakan yaitu dengan mengurangi atau bahkan menghilangkan *derau* tersebut. Pemodelan *derau* yang tepat sangat penting dalam proses ini.



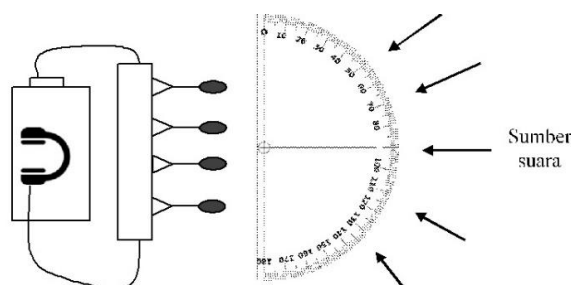
Gambar 3. Tahapan Penentuan Lokasi Sumber Suara

Setelah didapatkan suara yang telah difilter dilakukan proses TDOA yaitu *cross-correlation* antar dua mikrofon lalu dicari nilai *delay* yang akan memaksimalkan nilai *cross-corelation* ini. Nilai tersebut kemudian diproses dengan rumus geometri (5) sehingga menghasilkan sudut dari sumber. Adapun untuk jarak sumber, nilai *delay* yang dihasilkan dimasukkan ke dalam persamaan matriks (9).

### 3. Hasil dan Pembahasan

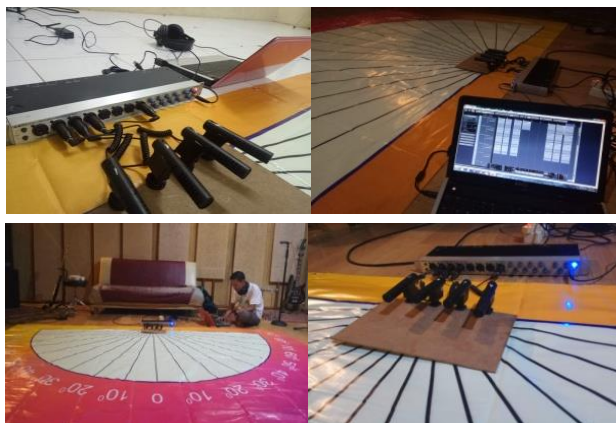
Pengambilan data dilakukan di 2 tempat yaitu di studio musik dan kelas berukuran sama yaitu 8 m x 4 m. Tujuannya adalah untuk membandingkan antara rekaman suara yang dilakukan di ruangan yang bersifat kedap suara dan yang tidak. Peralatan yang digunakan dalam pengambilan data ini adalah:

- 4 buah *directional microphone* Boya MV-01
- 1 buah *soundcard* Presonus FP 10
- 4 buah *converter* Rode VXL R
- 1 buah *studio headphones* Samson SR850
- Software* Cubase 7
- Laptop
- Express card*
- Busur derajat (dalam bentuk spanduk)



Gambar 4. Konfigurasi pemasangan alat rekaman

Alat-alat tersebut dipasang dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4 dengan konfigurasi mikrofon yang bervariasi. Data-data suara yang direkam adalah data suara jentikan jari, hentakan kaki, tepuk tangan, kunci terjatuh dan sebuah *tone* (nada) dengan frekuensi 440 Hz berdurasi 3 detik yang dihasilkan oleh aplikasi *smartphone*. Empat jenis suara tersebut (jentikan jari, hentakan kaki, tepuk tangan, kunci terjatuh) dipilih karena dianggap mempunyai rentang frekuensi yang tinggi sehingga lebih mudah dideteksi [7], sedangkan suara kelima (*tone*) dipilih sebagai pembanding karena suara ini mempunyai rentang frekuensi yang sedikit.



Gambar 5. Dokumentasi pengambilan data baik di kelas maupun studio

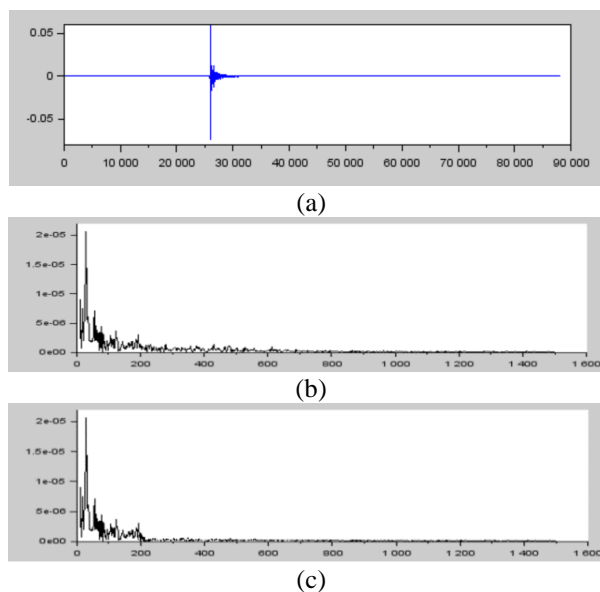
Masing-masing suara dilakukan percobaan sebanyak 3 kali dengan sudut dan jarak yang bervariasi. Jarak antara *microphone* adalah 6 cm karena itu adalah jarak terbaik untuk pendeteksian suara[11]. Proses pengambilan suara dapat dilihat pada Gambar 5 dan contoh hasil suara yang didapatkan diberikan pada Gambar 6. Adapun jarak dan sudut asli dari data yang diambil terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data pengambilan suara.

4 Jenis Suara	Sudut Asli (derajat)	Jarak Asli (cm)
Tepuk Tangan	0	150
	30	100
	60	200
Ketukan Kaki	10	100
	40	150
	80	200
Kunci Jatuh	20	100
	50	150
	70	200
Jentikan Jari	50	50
	0	30
	80	20
Nada 440 Hz	80	100
	40	150
	20	200

Pra-pengolahan suara dilakukan untuk mengurangi derau yang ada pada sinyal suara. Derau yang dapat dikurangi adalah derau yang tertangkap pada saat proses pengambilan data berlangsung, bukan derau yang diakibatkan oleh peralatan rekaman. Proses ini dilakukan pada domain frekuensi, sehingga langkah pertama adalah melakukan FFT (*Fast-Fourier Transform*) pada sinyal terekam. Kemudian dilakukan proses *filtering* pada sinyal suara sehingga

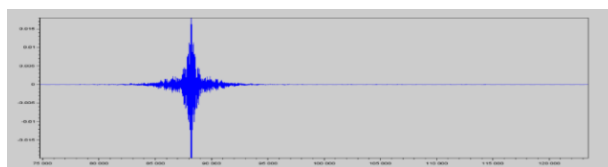
menghasilkan suara yang mempunyai lebih sedikit derau. Hasil pengambilan data suara dapat dilihat pada Gambar 6 (a), yaitu hasil rekaman suara tepuk tangan berdurasi 2 detik dengan *sampling frequency* 44100 Hz. Sinyal tersebut kemudian diubah kedalam domain frekuensi (Gambar 6(b)) untuk dicari frekuensinya dan kemudian diproses menggunakan filter untuk meminimalisir derau (Gambar 6(c)).



Gambar 6. Hasil suara terekam (tepu tangan) dalam domain waktu (a) dan frekuensi (b) dan hasil filtering (c)

Proses pendeteksian sudut suara dilakukan dengan melakukan *cross-correlation* antara 2 sinyal. Ada 4 buah *microphone* yang digunakan dalam pengambilan data, oleh karena itu terdapat 4 buah sinyal terekam untuk satu sampel suara.

Tahapan selanjutnya yaitu proses *cross-correlation* dari dua buah sinyal yang sebelumnya telah dilakukan proses *whitening* seperti pada Gambar 7. Indeks nilai yang menyebabkan terjadinya puncak itulah yang akan diambil sebagai nilai acuan yang dianggap sebagai nilai delay sinyal. Nilai indeks yang terdeteksi di *software* kemudian dibagi oleh frekuensi sampling yang akan menghasilkan nilai *delay* dalam satuan waktu. Nilai ini kemudian diproses dengan menggunakan persamaan (5) untuk mendapatkan sudut datang sumber suara. Adapun untuk mencari jarak, *delay* terukur dimasukkan ke dalam matrix (9) yang kemudian menghasilkan koordinat x, y dan z dari sumber. Untuk kepentingan ini, pengambilan data dilakukan 2 kali dengan konfigurasi mikrofon yang berbeda sehingga tidak semua mikrofon berada dalam satu bidang.



Gambar 7. Salah satu proses *cross-correlation*

Suara yang mempunyai rentang frekuensi yang lebar (tepu tangan, ketukan kaki dan jentikan jari) di studio mempunyai *error* yang lebih kecil daripada *tone*. Hal ini diakibatkan oleh proses *whitening* yang dilakukan di awal yang mengakibatkan setiap frekuensi mempunyai bobot yang sama terhadap proses korelasi. Artinya jika spektrum yang dianalisa adalah sebuah nada

tertentu, maka hanya sedikit sekali informasi yang dapat digunakan dalam mencari sudut sumber dan *cross-correlation* yang terjadi akan didominasi oleh derau.

Tabel 2. Hasil pencarian sudut dan jarak sumber suara

Jenis Suara	Selisih Sudut Terdeteksi (°)		Selisih Jarak Terdeteksi (cm)	
	Studio	Kelas	Studio	Kelas
Tepuk Tangan	4.3	1.4	6.6	4.3
	3.6	2.4	7.9	5.4
	2.9	4.5	9.2	7.8
Ketukan Kaki	3.8	4	3.8	1.2
	3.1	3.5	5.3	8.6
	3.7	4.1	3.3	8.6
Kunci Jatuh	1.2	2.1	2	6.5
	1.4	1.4	6.1	2.4
	1.1	2.5	7.4	4.4
Jentikan Jari	1.3	3.1	8.1	6.6
	1.9	2.1	8.1	2.6
	2.4	3.8	9.9	3.5
Nada 440 Hz	2.1	3.6	7.3	4
	2.8	3.5	8.8	9.2
	2	3.7	5.1	1.8
<b>Rata-rata</b>	2.506	3.046	6.593	5.126
<b>MSE</b>	1.018	0.918	4.925	6.495

Tabel 2 menunjukkan hasil dari pencarian sudut dan jarak sumber yang dihasilkan oleh sistem yang dirancang. Sudut yang terdeteksi mempunyai error rata-rata  $2,78^\circ$  dan MSE  $2,776^\circ$ . Kemudian jarak yang terdeteksi mempunyai selisih rata-rata  $5,859$  cm dan nilai MSE  $5,71$  cm.

Secara umum selisih yang dihasilkan relatif kecil, namun yang menjadi kendala di sistem ini adalah perangkat yang digunakan banyak, berukuran besar dan mahal, selain itu data yang dihasilkan tidak *real-time*.

#### 4. Kesimpulan

Dengan menggunakan *microphone array* yang terdiri dari 4 buah *microphone* dalam satu bidang planar peneliti telah berhasil membuat sistem yang dapat mendeteksi sudut dari sumber suara. Kesimpulan yang dapat diambil antara lain yaitu hasil deteksi dari suara yang mempunyai rentang frekuensi yang besar lebih baik daripada suara dengan frekuensi tunggal. Sudut yang terdeteksi mempunyai error rata-rata  $2,78^\circ$  dan MSE  $2,776^\circ$ . Kemudian jarak yang terdeteksi mempunyai selisih rata-rata  $5,859$  cm dan nilai MSE  $5,71$ .

Secara umum selisih yang dihasilkan relatif kecil, namun yang menjadi kendala di sistem ini adalah perangkat yang digunakan banyak, berukuran besar dan mahal, selain itu data yang dihasilkan tidak *real-time*, sehingga ke depannya perlu perbaikan dari segi perangkat sehingga sistem yang dihasilkan dapat diimplementasikan untuk membantu permasalahan yang ada di kehidupan sehari-hari.

Untuk penelitian selanjutnya, beberapa perbaikan yang dapat dilakukan adalah memvariasikan konfigurasi mikrofon dan memperbesar jarak antar sumber dan sensor serta memperkecil jarak antar mikrofon sehingga memenuhi asumsi *far-field*. Selain itu mencari/membuat alat alternatif yang lebih murah, kecil, dan *portable* sehingga sistem yang telah



dirancang ini dapat diimplementasikan dalam kehidupan sehari-hari seperti misalnya CCTV dan *video conference*.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah membiayai penelitian ini untuk skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) tahun anggaran 2018.

### Referensi

- [1] Rascon C, Meza I, "Localization of Sound Sources in Robotics: A Review," *Robotics and Autonomous System*, 96, 184-210, 2017.
- [2] Deng F, Chen J, "Energy-Based Sound Source Localization with Low Power Consumption in Wireless Sensor Network," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 64(4), 4894-4902, 2016.
- [3] Lei Z, Yang K, Duan R, Xiao P, "Localization of Low-Frequency Coherent Sound Sources with Compressive Beamforming-based Passive Synthetic Aperture," *Acoustical Society of America*, 137(4), 2015.
- [4] Xiao X, Zhao S, Zhong X, Jones DL, Chng ES, Li H, "A Learning-Based Approach to Direction of Arrival Estimation in Noisy and Reverberant Environment," *Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brisbane: 2814-2818, 2015.
- [5] Paulose S, Sebastian E, Paul B, "Acoustic Source Localization," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(2), 933-939, 2013.
- [6] Alameda-Pineda X, Horaud R, "A Geometric Approach to Sound Source Localization from Time-Delay Estimates," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 22(6), 1082-1095, 2014.
- [7] Yost WA, Zhong X, "Sound Source Localization Identification Accuracy: Bandwidth Dependencies," *Journal of the Acoustical Society of America*, 136(5), 2737-2746, 2014.
- [8] Gay SL, Benesty, J (Eds), "Acoustic Signal Processing For Telecommunication," USA: Springer Science, 2000.
- [9] Valin JM, Michaud F, Rouat J, Letomeau D, "Robust Sound Source Localization Using a Microphone array on a Mobile Robot," *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas: 1228-1233, 2003.
- [10] Mumolo, Enzo, et all, "Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics," *Journal Robotics and Autonomous Systems*, 42, 69-88, 2003.
- [11] Fausi, Naba, dkk, "Analisis Jarak Microphone array dengan Teknik Pemrosesan Sinyal Fast Fourier Transform Beamforming," *Jurnal EECCIS*, Vol. 9 No. 1, hal 85-90, Juni 2015.