

# **PENENTUAN BESAR KECEPATAN BUNYI DI UDARA MENGGUNAKAN METODE *TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL* (TDOA) DAN METODE *ECHOBASED SPEED OF SOUND DETERMINATION***

## ***DETERMINING THE SPEED OF SOUND IN AIR USING TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) AND ECHO-BASED SPEED OF SOUND DETERMINATION METHODS***

Oleh: Nila Narumsari dan Agus Purwanto, Prodi Fisika, Jurusan Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta. E-mail: Nnarumsari@gmail.com

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai besar kecepatan bunyi di udara menggunakan metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* serta mengetahui perbandingan hasil pengukuran yang diperoleh dari kedua metode. Pada metode TDOA, *loudspeaker* digunakan sebagai sumber bunyi dan *microphone* berfungsi sebagai *receiver* yang diberi variasi jarak. Variasi jarak menghasilkan *time delay* yang akan ditampilkan di layar *oscilloscope*. Metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* menggunakan sumber bunyi diskrit yang dibangkitkan *software* Matlab R2008a dan *loudspeaker*. *Microphone* yang sebidang dengan *loudspeaker* menangkap gelombang bunyi yang dipantulkan papan pemantul dan selanjutnya ditampilkan oleh *personal computer* yang telah ter-*install software* Audacity 2.1.2. Metode TDOA menghasilkan nilai besar kecepatan bunyi di udara dan ketidakpastian sebesar  $(346.1 \pm 0.3)$  m/s, sedangkan pada metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* diperoleh nilai sebesar  $(346.5 \pm 0.6)$  m/s.

Kata kunci: besar kecepatan bunyi di udara, TDOA, *Echo-Based Speed of Sound Determination*

### **Abstract**

*This research aimed to know the speed of sound in air by using Time Difference of Arrival (TDOA) method and Echo-Based Speed of Sound Determination method and to compare the measurement results produced by both methods. In TDOA method, loudspeaker was used as sound source and microphone as a receiver at various distances. Distance variations produced time delay that would be displayed in oscilloscope's screen. Echo-Based Speed of Sound Determination method was using discrete sound source generated by Matlab R2008a software and loudspeaker. Microphone placed in the same plane with loudspeaker received sound waves reflected by a reflector wall and then displayed by a personal computer with installed Audacity 2.1.2 software. The speed of sound in air resulted by TDOA method was  $(346.1 \pm 0.3)$  m/s and  $(346.5 \pm 0.6)$  m/s by Echo-Based Speed of Sound Determination.*

Keywords: The Speed of sound on air, TDOA, *Echo-Based Speed of Sound Determination*

## **PENDAHULUAN**

Menurut Halliday dan Resnick (1994:672) pengukuran besar kecepatan gelombang bunyi di udara dapat dilakukan dengan menggunakan metode resonansi. Pengukuran besar kecepatan gelombang bunyi di udara dengan menggunakan metode resonansi kolom udara sering terjadi kesalahan (*human error*), yakni saat mendengarkan intensitas bunyi maksimal. Saat bunyi yang bukan merupakan

intensitas bunyi maksimal dianggap sebagai intensitas bunyi maksimal, maka penentuan posisi terjadinya resonansi tidak akan tepat, sehingga nilai besar kecepatan gelombang bunyi yang diperoleh tidak akurat.

Dari uraian diatas, maka perlu dikembangkan metode pengukuran besar kecepatan gelombang bunyi di udara yang dapat menghasilkan nilai yang akurat dengan ketidakpastian kecil. Metode pengukuran besar

kecepatan bunyi di udara yang dikembangkan dapat menampilkan bentuk gelombang bunyi itu sendiri, sehingga gelombang bunyi dapat dianalisis dengan ketelitian yang lebih baik. Metode yang dikembangkan menggunakan gelombang bunyi yang dihasilkan oleh *loudspeaker*, sedangkan sebagai penerima gelombang bunyi digunakan *dynamic microphone*; keduanya dihubungkan dengan *oscilloscope* pada dua *channel* yang berbeda. Saat *dynamic microphone* digerakkan menjauhi sumber bunyi sepanjang sumbu-x maka layar *oscilloscope* akan menampilkan perbedaan fase gelombang antara gelombang bunyi yang diterima *dynamic microphone* pada *channel 2* dengan gelombang bunyi dari *loudspeaker* yang dihubungkan pada *channel 1*. Perbedaan waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi untuk sampai pada *dynamic microphone* dikenal dengan *Time Difference of Arrival (TDOA)*. Perbedaan waktu yang diperoleh selanjutnya dapat digunakan untuk perhitungan besar kecepatan bunyi di udara (Tellakula, 2007:14).

Hasil pengukuran besar kecepatan bunyi di udara dengan metode *Time Difference of Arrival (TDOA)* akan dibandingkan dengan hasil metode lain. Pada metode pembandingan, sumber bunyi yang digunakan berasal dari *loudspeaker*. Bunyi dibangkitkan dengan menggunakan program yang dibuat di *software Matlab R2008a* yang telah ter-*install* di *personal computer*; *output* yang dihasilkan berupa bunyi diskrit yang terdiri dari 3 frekuensi berbeda yang diberi jeda di setiap frekuensinya. Sumber bunyi diletakkan sebidang dengan *microphone* di salah satu ujung pipa dan pada ujung lainnya ditempelkan papan pemantul. *Microphone* akan menerima

gelombang bunyi yang selanjutnya akan ditampilkan oleh *software Audacity 2.1.2* yang telah ter-*install* di *personal computer* lainnya. Papan pemantul menyebabkan gelombang bunyi dipantulkan, diserap dan diteruskan (Ruijgrok, 1993:100). Hal ini dapat dilihat setelah grafik gelombang bunyi di *zoom-in*; grafik gelombang bunyi hasil pantulan memiliki amplitudo yang lebih kecil dari gelombang bunyi yang langsung diterima dari *loudspeaker* tanpa dipantulkan terlebih dahulu. Selisih waktu antara kedua gelombang saat diterima *microphone* merupakan waktu yang diperlukan gelombang bunyi menjalar dari *loudspeaker* ke papan pemantul dan kembali lagi ke *microphone* yang posisinya sebidang dengan *loudspeaker*. Nilai besar kecepatan bunyi di udara diperoleh dengan membagi dua kali panjang pipa dengan waktu penjalaran gelombang. Metode yang digunakan disebut dengan metode *Echo-Based Speed of Sound Determination*.

## **METODE PENELITIAN**

### **Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Gelombang, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA UNY dari bulan April 2016 hingga Agustus 2016.

### **Instrumen Penelitian**

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: *loudspeaker*, *microphone*, AFG (*Audio Frequency Generator*), CRO (*Cathode Ray Oscilloscope*), dan *personal computer*.

### **Teknik Pengambilan Data**

## 1. Metode *Time Difference of Arrival* (TDOA)

### a. Perancangan alat

Sumber bunyi *loudspeaker* dihubungkan dengan *amplifier*, selanjutnya *amplifier* dihubungkan dengan AFG (*Audio Frequency Generator*) yang diberi pembagi tegangan. *Loudspeaker* ditempatkan di ujung pipa PVC. *Dynamic microphone* dipasang pada ujung *stick* besi guna melakukan variasi jarak. *Loudspeaker* dihubungkan dengan *channel 1* pada *oscilloscope*, sedangkan *dynamic microphone* dihubungkan dengan *channel 2*.

### b. Pembacaan data dengan *oscilloscope*

Posisi awal gelombang atau  $t_1$  diletakkan pada puncak gelombang yang berasal dari *loudspeaker* dengan cara memilih tombol *select* dan  $t_2$  merupakan gelombang bunyi yang ditangkap oleh *dynamic microphone*. *Oscilloscope* akan menampilkan waktu yang dibutuhkan oleh gelombang bunyi dari *loudspeaker* untuk sampai ke *dynamic microphone*. Selanjutnya mencatat jarak dari puncak gelombang bunyi pada *loudspeaker* dengan puncak gelombang bunyi yang ditangkap *dynamic microphone*. Percobaan diulang dengan menentukan nilai  $\Delta t$  yang diinginkan dengan menggeser garis vertikal  $t_2$  pada nilai *div* tertentu. Selanjutnya menggeser *stick* besi hingga puncak gelombang bunyi yang sebelumnya diamati pada *channel 2* bergeser hingga  $t_2$  yang telah ditentukan. Puncak gelombang yang diamati pergeserannya setelah dilakukan variasi jarak harus selalu sama.

## 2. Metode *Echo-Based Speed of Sound Determination*

### a. Perancangan alat

Sumber bunyi yang digunakan adalah *loudspeaker* yang dihubungkan dengan *personal computer* yang telah ter-*install software* Matlab R2008a yang menghasilkan keluaran bunyi diskrit yang terdiri dari 3 frekuensi berbeda dan diberi jeda waktu di setiap frekuensinya. Sumber bunyi diletakkan sebidang dengan *microphone* di salah satu ujung pipa dan ujung lainnya ditempelkan papan pemantul. *Microphone* akan menerima gelombang bunyi dan selanjutnya ditampilkan oleh *software* Audacity 2.1.2 yang telah ter-*install* di *personal computer* lainnya.

### b. Pembacaan data dengan *software* Audacity 2.1.2.

Memilih *tools zoom-in* yang ada pada *software* Audacity 2.1.2. Selanjutnya memilih gelombang bunyi saat pertama ditangkap *microphone* sampai gelombang bunyi hasil pemantulan pertama yang ditangkap *microphone*. Nilai rentang waktu yang telah ter-*select* dapat ditentukan dengan menu *Analyze* lalu memilih *Regular interval label* dan *Debug* dan nilai waktu yang di-*select* akan langsung muncul. Langkah yang sama dilakukan untuk nilai frekuensi yang lain pada setiap variasi panjang pipa.

## Teknik Analisis Data

### 1. Perhitungan besar kecepatan bunyi di udara dari data penelitian

Data yang diperoleh dari proses pengambilan data dengan kedua metode berupa selisih waktu ( $\Delta t$ ). Pada metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi dari *loudspeaker* sampai ke *microphone* pada jarak tertentu dalam satuan *div*. Agar diperoleh nilai besar kecepatan bunyi di udara, maka nilai  $\Delta t$  harus diubah ke dalam

satuan *second*. Nilai posisi yang merupakan jarak dari *loudspeaker* ke *microphone* dibagi dengan nilai waktu yang telah dianalisis, sehingga akan diperoleh nilai besar kecepatan bunyi di udara pada setiap variasi frekuensi. Sedangkan pada metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* nilai selisih waktu ( $\Delta t$ ) sudah dalam satuan *second*, sehingga besar kecepatan bunyi di udara dapat langsung diperoleh dengan membagi dua kali jarak *loudspeaker* dengan papan pemantul dengan  $\Delta t$  yang diperoleh dari gelombang bunyi pada tampilan layar *personal computer* yang ter-*install software Audacity* 2.1.2.

## 2. Membandingkan hasil pengukuran

Membandingkan hasil besar kecepatan bunyi di udara dengan metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* serta dengan data referensi yang ada.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 1. Metode *Time Difference of Arrival* (TDOA)

Pergeseran posisi *dynamic microphone* menjauhi *loudspeaker* menyebabkan gelombang bunyi yang ditampilkan *Oscilloscope OS-3020* 20MHz pada *channel 2* yang terhubung dengan *dynamic microphone* tampak sebagai gelombang bergerak yang menjauhi gelombang bunyi *loudspeaker* pada *channel 1*.

Tabel 1. Pergeseran gelombang bunyi dengan variasi jarak *dynamic microphone*.

1500 Hz		1600 Hz		1700 Hz	
Pergeseran (div)	s(cm)	Pergeseran (div)	s(cm)	Pergeseran (div)	s(cm)
0.40	6.9	0.44	7.6	0.52	9.0
0.52	9.0	0.56	9.7	0.64	11.1
0.64	11.1	0.68	11.8	0.76	13.1

0.76	13.1	0.8	13.8	0.88	15.2
0.88	15.2	0.92	15.9	1.00	17.3
1.00	17.3	1.04	18.3	1.12	19.4
1.12	19.3	1.16	20.1	1.24	21.5
1.24	21.4	1.28	22.1	1.36	23.5
1.36	23.5	1.44	24.9	1.48	25.6
1.48	25.6	1.56	27.0	1.60	27.6
1.60	27.7	1.72	29.7	1.72	29.7
1.72	29.7	1.84	31.8	1.84	31.9
1.84	31.9	1.96	33.8	1.96	33.9
1.96	33.9	2.08	36.0	2.08	36.0
2.08	36.2	2.20	38.0	2.2	38.1
2.20	38.1	2.32	40.1	2.32	40.3
2.32	40.1	2.44	42.2	2.44	42.1
2.44	42.2	2.56	44.3	2.56	44.2
2.56	44.3	2.68	46.3	2.68	46.4
2.68	46.3	2.80	48.4	2.8	48.3

Mengubah satuan *div* dari pergeseran gelombang ke dalam satuan *second* menggunakan persamaan berikut ini:

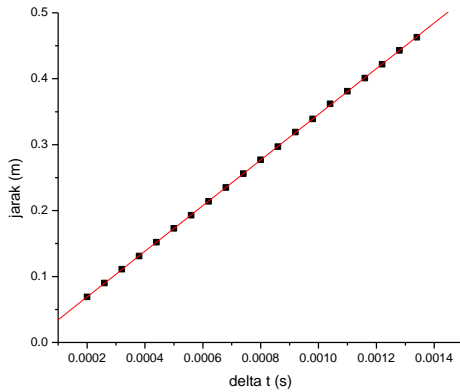
$$\text{Time delay} = \frac{\Delta t(\text{div}) \times \text{Nilai time/div(ms)}}{1000}$$

Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai pergeseran gelombang dalam satuan *second*.

1500 Hz		1600 Hz		1700 Hz	
s (cm)	$\Delta t$ (s)	s (cm)	$\Delta t$ (s)	s (cm)	$\Delta t$ (s)
6.9	0.00020	7.6	0.00022	9	0.00026
9.0	0.00026	9.7	0.00028	11.1	0.00032
11.1	0.00032	11.8	0.00034	13.1	0.00038
13.1	0.00038	13.8	0.0004	15.2	0.00044
15.2	0.00044	15.9	0.00046	17.3	0.0005
17.3	0.00050	18.3	0.00052	19.4	0.00056
19.3	0.00056	20.1	0.00058	21.5	0.00062
21.4	0.00062	22.1	0.00064	23.5	0.00068
23.5	0.00068	24.9	0.00072	25.6	0.00074
25.6	0.00074	27.0	0.00078	27.6	0.0008
27.7	0.00080	29.7	0.00086	29.7	0.00086
29.7	0.00086	31.8	0.00092	31.9	0.00092
31.9	0.00092	33.8	0.00098	33.9	0.00098
33.9	0.00098	36.0	0.00104	36	0.00104
36.2	0.00104	38.0	0.00110	38.1	0.0011
38.1	0.00110	40.1	0.00116	40.3	0.00116
40.1	0.00116	42.2	0.00122	42.1	0.00122
42.2	0.00122	44.3	0.00128	44.2	0.00128
44.3	0.00128	46.3	0.00134	46.4	0.00134
46.3	0.00134	48.4	0.00140	48.3	0.0014

Nilai besar kecepatan bunyi di udara dapat diketahui dengan melakukan plot grafik. Sumbu-x merupakan data  $\Delta t$  dan sumbu-y merupakan data dari jarak antara *dynamic microphone* dengan *loudspeaker*. Grafik dan analisis *fit linier* yang diperoleh adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Grafik *fit linier* metode TDOA untuk frekuensi 1500 Hz

Parameter	Value	Error
A	2.63158E-4	3.4757E-4
B	346.31579	0.41174

R	SD	N	P
0.999996	3.7062E-4	20	<0.0001

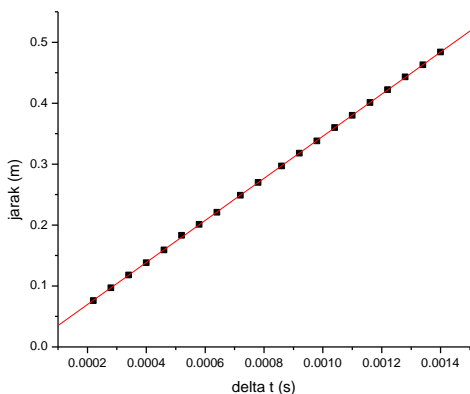
Dari data di atas diperoleh fungsi jarak:

$$s = s_0 + v * \Delta t$$

$$s = 2.63158E - 4 + 346.31579 * \Delta t$$

Nilai besar kecepatan bunyi dan ketidakpastiannya adalah:

$$(v \pm \Delta v) = (346.3 \pm 0.4)m/s$$



Gambar 2. Grafik *fit linier* metode TDOA untuk frekuensi 1600 Hz

Parameter	Value	Error
-----------	-------	-------

A	5.34047E-4	4.36419E-4
B	345.27827	0.49065

R	SD	N	P
0.999987	9.96655E-4	20	<0.0001

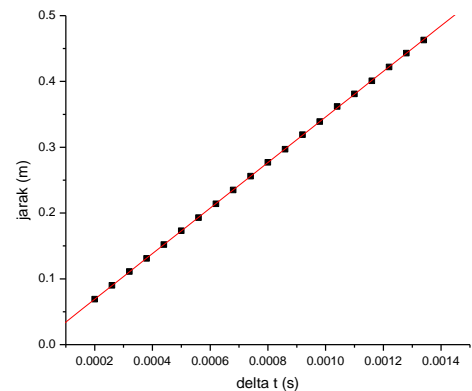
Dari data di atas diperoleh fungsi jarak:

$$s = s_0 + v * \Delta t$$

$$s = 5.34047E - 4 + 345.27827 * \Delta t$$

Nilai besar kecepatan bunyi dan ketidakpastiannya adalah:

$$(v \pm \Delta v) = (345.3 \pm 0.5)m/s$$



Gambar 3. Grafik *fit linier* metode TDOA untuk frekuensi 1700 Hz

Parameter	Value	Error
A	1.57143E-4	4.07018E-4
B	345.71429	0.45263

R	SD	N	P
0.999987	0.0034E-4	20	<0.0001

Dari data di atas diperoleh fungsi jarak:

$$s = s_0 + v * \Delta t$$

$$s = 1.57143E - 4 + 345.71429 * \Delta t$$

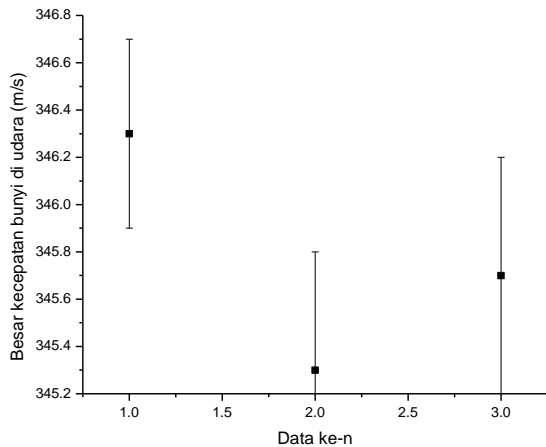
Nilai besar kecepatan bunyi dan ketidakpastiannya adalah:

$$(v \pm \Delta v) = (345.7 \pm 0.5)m/s$$

Besar nilai kecepatan bunyi yang dihasilkan dari analisis *fit linier* bervariasi, oleh karena itu perlu dilakukan analisis rata-rata berbobot agar

didapatkan satu nilai besar kecepatan bunyi di udara.

Berikut ini adalah grafik analisis uji diskripsi:



Gambar 4. Uji diskripsi hasil analisis *fit linier*

Setelah dilakukan uji diskripsi dapat dilihat bahwa data ke-2 harus dibuang karena tidak saling tumpang tindih. Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan rata-rata berbobot dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$W_i = \frac{1}{\Delta v_i^2}$$

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i \cdot W_i}{\sum W_i}$$

Sedangkan untuk ketidakpastian dapat diketahui dari rumus berikut:

$$\Delta \bar{v} = \sqrt{\frac{1}{\sum W_i}}$$

Berdasarkan persamaan analisis rata-rata berbobot, diperoleh nilai  $(v \pm \Delta v) = (346.1 \pm 0.3) \text{m/s}$

### 2. Metode *Echo-Based Speed of Sound Determination*

Berikut adalah hasil penelitian yang diperoleh dari perhitungan rentang waktu yang diamati pada *software* Audacity 2.1.2 serta panjang pipa yang ujungnya terdapat papan pemantul:

Tabel 4. Rentang waktu penjaran gelombang bunyi di dalam pipa dengan papan pantul.

Panjang pipa (m)	$\Delta t$ (s)		
	1500 Hz	1600 Hz	1700 Hz
2.05	0.0118367	0.0118821	0.0118367
	0.0118141	0.0118821	0.0119048
	0.0118367	0.0119048	0.0118141
	0.0118594	0.0119048	0.0118821
	0.0118141	0.0118367	0.0118821
2.60	0.0150567	0.0149206	0.0150567
	0.0149206	0.0150567	0.0150567
	0.0150567	0.0150113	0.0149206
	0.0150340	0.0149206	0.0150113
	0.0150113	0.0150113	0.0150113
3.00	0.0172789	0.0172109	0.0172109
	0.0172336	0.0173243	0.0173696
	0.0173243	0.0172789	0.0173243
	0.0172789	0.0173696	0.0172109
	0.0172336	0.0172562	0.0173243

Analisis selanjutnya dilakukan dengan melakukan rata-rata biasa dengan menggunakan persamaan:

$$\bar{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}{N}$$

$$\Delta(\bar{\Delta t}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}{N - 1}}$$

Dari persamaan diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 5. Hasil rata-rata biasa rentang waktu penjaran gelombang bunyi

Frekuensi (HZ)	s(m)	$\bar{\Delta t}$ (s)	$\Delta(\bar{\Delta t})$ (s)
1500	2.05	0.0118322	0.0000189
	2.6	0.0150158	0.0000564
	3	0.0172698	0.0000379
1600	2.05	0.0118821	0.0000278
	2.6	0.0149841	0.0000608
	3	0.0172879	0.0000612
1700	2.05	0.0118639	0.0000372
	2.6	0.0150113	0.0000555
	3	0.0172880	0.0000727

Nilai besar kecepatan bunyi di udara diperoleh menggunakan persamaan dibawah ini

$$v = \frac{2s}{\Delta t}$$

Persamaan untuk mencari nilai ketidakpastian adalah sebagai berikut:

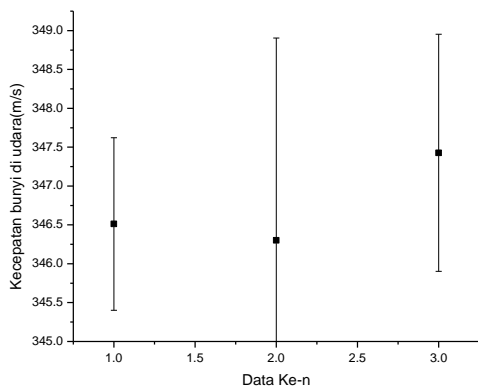
$$\begin{aligned} \Delta v &= \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 (\Delta t)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)^2 (\Delta s)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-2s}{t^2}\right)^2 (\Delta t)^2 + \left(\frac{2}{t}\right)^2 (\Delta s)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-2s}{\Delta t}\right)^2 [\Delta(\overline{\Delta t})]^2 + \left(\frac{2}{\Delta t}\right)^2 (\Delta s)^2} \end{aligned}$$

Setelah dilakukan analisis diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 6. Nilai besar kecepatan bunyi di udara dan ketidaktastiannya.

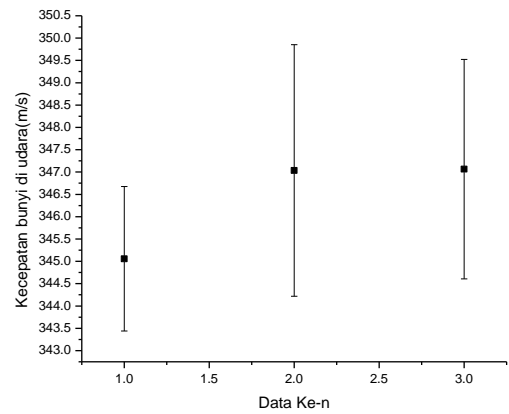
Panjang pipa (m)	$(v \pm \Delta v)$ m/s		
	1500 Hz	1600 Hz	1700 Hz
2.05	$346.5 \pm 1.1$	$345.1 \pm 1.6$	$345.6 \pm 2.2$
2.60	$346.3 \pm 2.6$	$347.0 \pm 2.8$	$346.4 \pm 2.6$
3.00	$347.4 \pm 1.5$	$347.1 \pm 2.5$	$347.1 \pm 3.0$

Hasil uji diskripsi untuk rata-rata berbobot

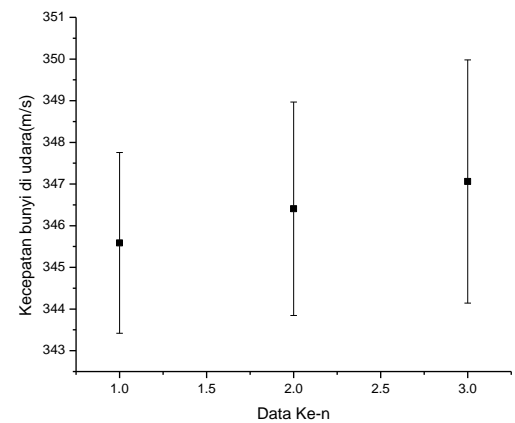


adalah sebagai berikut:

Gambar 5. Uji diskripsi pada metode *echo-based* untuk frekuensi 1500 Hz



Gambar 6. Uji diskripsi pada metode *echo-*

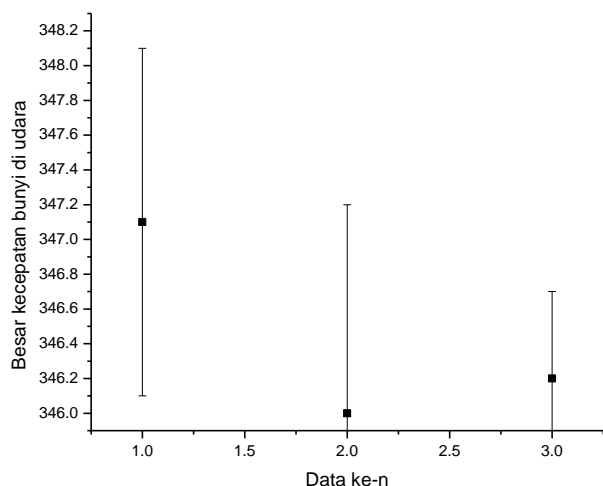


*based* untuk frekuensi 1600 Hz

Gambar 7. Uji diskripsi pada metode *echo-based* untuk frekuensi 1700 Hz

Dari analisis rata-rata berbobot yang telah disebutkan, maka diperoleh nilai besar kecepatan bunyi di udara dan ketidaktastiannya sebesar  $(346.8 \pm 0.8)$  m/s untuk frekuensi 1500 Hz,  $(346.0 \pm 1.2)$  m/s untuk frekuensi 1600 Hz dan  $(346.2 \pm 1.4)$  m/s untuk frekuensi 1700 Hz.

Nilai besar kecepatan bunyi di udara berbeda pada setiap variasi frekuensi, untuk itu perlu dilakukan rata-rata berbobot untuk mendapatkan satu nilai besar kecepatan bunyi di udara. Berikut ini adalah hasil uji diskripsi dari ketiga nilai besar bunyi di udara dari tiga variasi frekuensi:



Gambar 8. Uji diskripansi metode *Echo-Based Speed of Sound Determination* pada tiga variasi frekuensi

Dari hasil uji diskripansi dapat dilihat bahwa semua pasangan data *y-error* atau nilai ketidakpastian besar kecepatan bunyi di udara semuanya saling tumpang tindih, sehingga semua data pada masing-masing frekuensi saling cocok. Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan rata-rata berbobot. Diperoleh nilai kecepatan dan ketidakpastian ( $v \pm \Delta v$ ) =  $(346.5 \pm 0.6)$  m/s. Menurut referensi besar kecepatan bunyi di udara adalah sebagai berikut:

Tabel 9. Besar kecepatan bunyi di udara berdasarkan referensi (Bohn, 1988:36)

Referensi		
Suhu (°C)	$v$ (m/s)	
	Tabel	Persamaan
24.0	345.71	346.0
24.5	-	346.3
25.0	346.29	346.6

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Nilai besar kecepatan bunyi di udara dapat diketahui dengan menggunakan metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan metode *Echo-Based Speed of Sound Determination*.

2. Penentuan besar kecepatan bunyi di udara dengan menggunakan metode *Time Difference of Arrival* (TDOA) menghasilkan nilai ketidakpastian pengukuran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan metode *Echo-Based Speed of Sound Determination*. Pada metode TDOA diperoleh nilai besar kecepatan bunyi di udara dan ketidakpastian sebesar  $(346.1 \pm 0.3)$  m/s. Pada metode *Echo-Based Speed of Sound* diperoleh nilai besar kecepatan bunyi di udara dan ketidakpastian sebesar  $(346.5 \pm 0.6)$  m/s.

### Saran

Metode pengukuran besar kecepatan bunyi di udara yang dibuat dalam penelitian ini masih banyak kekurangan, sehingga perlu perbaikan agar hasil pengukuran besar kecepatan bunyi di udara menghasilkan nilai yang lebih baik. Perbaikan yang perlu dilakukan adalah:

1. Pengembangan desain alat pengukuran besar kecepatan bunyi di udara yang dapat digunakan untuk melakukan variasi suhu.
2. Pengembangan sistem pengolahan data yang dapat meminimalkan ketidakpastian pengukuran yang disebabkan oleh *human error*.

### DAFTAR PUSTAKA

- Bohn, Dennis A. 1988. Environmental Effect on the Speed of Sound. *Journal Audio Engineering* (No.4). Hlm 36.
- Tellakula, Ashok Kumar. 2007. *Acoustic Source Localization Using Time Delay Estimation*. Thesis. Bangalore: Indian Institute of Science.



Halliday dan Resnick. 1994. *Fisika Jilid 2*, diterjemahkan oleh Silaban, P & Sucipto, E. Jakarta: Erlangga.

Rujigrok, G.J.J. 1993. *Elements of Aviation Acoustic*. Delft: Delft University Press-III.