

# Sound Source Position Estimation by Four Microphones Array for Machine Condition Monitoring

Meifal Rusli\*, Hendra Silman, Lovely Son, dan Mulyadi bur

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Kampus Limau Manis – Padang 25163

\*Corresponding author: meifal@eng.unand.ac.id

**Abstract.** This paper will discuss about the sound source position estimation by line formation of four microphone array using beamformings. Firstly, the beamforming is applied by artificial sound signal generated by the load speaker, and the sound source positions are predicted by beamforming of the microphone array. The next acoustic signal from the rotor dynamics in case of unbalance mass are measured by a single microphone at many points closes to the system. The sound frequency and sound source positions are predicted from the highest magnitude of the signal at each frequency according to the microphone position. Then, the sound source localization is done using beamforming methods. It is found that some sound characteristic of unbalance and are predicted very well. However, the prediction still faces some problems when it is used to predict the sound source position with more than two sources.

**Abstrak.** Pada artikel ini akan didiskusikan perkiraan arah sumber suara dengan mikrofon jamak yang disusun segaris dengan menggunakan metode *beamforming*. Pertama, metode beamforming diterapkan untuk memperkirakan arah sumber suara buatan yang dihasilkan oleh pengeras suara. Selanjutnya sinyal suaranya dari system rotor yang berasal dari masa tak seimbang diukur dengan menggunakan mikrofon tunggal pada banyak titik di dekat system poros rotor. Setelah itu lokalisasi suara dilakukan dengan metode *beamforming*. Dari hasil pengukuran dan analisis ditemukan bahwa sumber suara yang muncul dari ketidakseimbangan dapat diprediksi dengan baik. Akan tetapi prediksi masih menghadapi kendala jika terdapat sumber suara lebih dari satu sumber secara bersamaan.

**Kata kunci:** *Sound source localization, beamforming, microphone array, unbalance*

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Salah satu teknologi yang digunakan untuk memonitor dan memprediksi kerusakan pada komponen mesin adalah analisis getaran. Beberapa teknik telah dikembangkan untuk pengolahan sinyal getaran ini, seperti Transformasi Fourier, Transformasi Hilbert-Huang, analisis wavelet, dan distribusi waktu-frekuensi [1,2]. Identifikasi kerusakan setiap komponen seperti roda gigi, bantalan, poros, motor listrik dan komponen lain dapat dilakukan dengan baik.

Sementara itu, setiap benda padat yang bergetar akan membangkitkan suara pada frekuensi sesuai dengan frekuensi getaran benda padat tersebut. Fenomena ini dimanfaatkan untuk penggunaan suara untuk mendeteksi adanya kerusakan. Beberapa kelebihan analisis melalui sinyal suara adalah mikrofon merupakan sensor non-kontak, dan dapat menerima sinyal suara yang merambat ke segala arah di udara. Dengan demikian, sensor ini dapat dipasang pada jarak yang tidak harus terlalu dekat dengan mesin yang akan dimonitor. Selain itu harga mikrofon dengan berbagai jenis dan spesifikasinya relatif lebih murah dibanding dengan sensor getaran.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan beberapa tahun terakhir dalam penggunaan analisis suara untuk monitoring kondisi peralatan antara lain adalah identifikasi kebocoran pada aliran pipa inlet reaktor nuklir [3] dengan memasang beberapa mikrofon di sekitar pipa. Pada kasus lain, sinyal suara digunakan untuk mendeteksi kebocoran pada pipa aliran udara bertekanan pada sistem perpipaan di industri [4]. Posisi kebocoran dapat diidentifikasi dengan baik dengan menggunakan *beamforming microphone array* yang menggunakan 25 mikrofon sekaligus.

Disamping itu investigasi awal mendeteksi kerusakan pada bilah (sudu) turbin angin dapat dilakukan dengan meletakkan mikrofon di dekat sudu yang dimonitor [5]. Sementara itu identifikasi kerusakan pada bantalan gelinding dan rodagigi dapat dilakukan dengan memanfaatkannya *near-field acoustic holography* (NAH). Dimana mikrofon jamak dalam jumlah yang cukup banyak digunakan untuk menyusun peta suara sehingga posisi sumber suara yang merupakan sumber kerusakan dapat diketahui [6].

Beberapa pengembangan metode identifikasi melalui sinyal suara juga mulai berkembang. Teknologi sensor ultrasonik untuk mendeteksi

bagian yang rusak pada komponen mesin yang berputar seperti bantalan, roda gigi dan sebagainya [7]. Pendeteksiannya dilakukan dengan menggunakan *decision tree algorithm* beberapa fitur-fitur statistik deskriptif. Pengukuran dilakukan dengan meletakkan mikrofon di dekat elemen yang hendak dimonitor [8]. Selain itu, pendeteksian terjadinya kerusakan struktur dalam skala makro dan mikro dengan menggunakan teknik *nonlinear acoustic vibro-modulation* juga sudah dikembangkan [9].

Identifikasi kerusakan dengan menggunakan sinyal suara menunjukkan hasil yang sangat baik. Deteksi kesehatan sepeda motor berdasarkan *discrete wave transform* dari sinyal suara menunjukkan keakuratan 98% [10]. Disamping itu, analisis sinyal suara juga memberikan hasil pendeteksian yang sama baiknya dengan analisis getaran [11]. Selain itu juga didapatkan bahwa mikrofon dapat mendeteksi kerusakan pada pompa air lebih baik dibanding akselerometer [12].

Teknik yang berkembang masih terbatas dengan memasang mikrofon di dekat komponen / elemen yang dimonitor, atau menggunakan mikropon jamak (*microphone array*) dengan jumlah yang sangat banyak dan prosedur pengukuran yang rumit. Untuk itu perlu dikembangkan sistem identifikasi dengan meminimalkan jumlah mikrofon yang digunakan dan memaksimalkan jumlah sumber suara yang dideteksi secara bersamaan.

Pada artikel ini akan dilakukan identifikasi kerusakan pada elemen mesin dengan menggunakan empat buah mikrofon yang berjejer dalam satu garis yang divariasikan pada jarak antara yang berbeda. Dalam hal ini bentuk kerusakan adalah ketidakseimbangan poros. Sebelum mendeteksi kerusakan elemen mesin, terlebih dahulu dilakukan penelitian terhadap sumber suara buatan untuk mengetahui kebenaran dari program yang telah dibuat.

### Lokalisasi Sumber Suara Dengan Mikrofon Jamak

Lokalisasi sumber suara (*sound source localization*) adalah teknik untuk mengidentifikasi sumber suara yang terdeteksi baik arah maupun jarak dari penerima. Pada awalnya dikembangkan untuk memodelkan kemampuan manusia dalam memperkirakan arah sumber suara untuk keperluan pengembangan robot. Identifikasi jarak dan arah sumber suara dilakukan dengan menggunakan mikrofon jamak (*microphone array*) yang jumlahnya dari beberapa sampai ratusan mikropon. Penggunaan mikrofon jamak ini telah banyak digunakan semenjak metode ini berkembang.

Untuk dua mikropon tersusun, aplikasi yang banyak digunakan adalah *binaural sound localization* untuk pengembangan sistem robotik, dengan memodelkan kemampuan pendengaran manusia [13,14]. Beberapa metode yang berkembang antara lain adalah *interaural level difference* (ILD). Gelombang suara akan memiliki tingkat kenyaringan yang secara gradual menurun dengan semakin jauhnya posisi penerima dari sumber suara. ILD mempunyai dua titik pengamatan yang berbeda lokasi untuk masing-masing pengamatan. Metoda yang lain adalah *interaural time difference* (TDOA).

Untuk aplikasi lokalisasi sumber suara pada monitoring kondisi mesin, suara muncul dari berbagai komponen secara bersamaan dengan karakteristik yang berbeda. Untuk mendeteksi sumber suara tersebut digunakan beberapa mikrofon secara bersamaan. Jika sejumlah M mikrofon jamak digunakan untuk mengidentifikasi sejumlah D sumber suara, maka sinyal yang diterima masing-masing mikrofon adalah akumulasi dari semua sumber ditambah dengan gangguan (noise) seperti pada persamaan berikut.

$$X_m(\omega, k) = \sum_{p=1}^d \alpha_{mp} S_p(\omega, k) e^{-j\omega \tau_{mp}} + N_m(\omega, k) \quad (1)$$

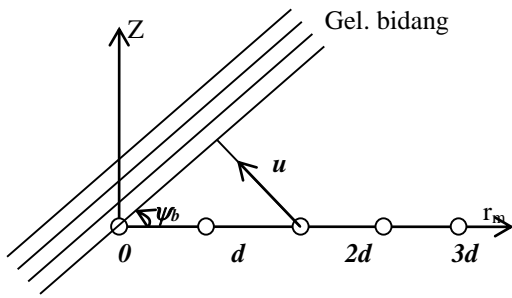
Dimana  $\alpha_{mp}$  adalah amplitudo suara sumber suara ke p pada mikrofon ke m,  $\tau_{mp}$  adalah waktu delay, dan  $N_m$  adalah suara gangguan (noise).

Sementara itu *beamforming* atau *spatial filtering* pada dasarnya adalah sebuah metode untuk mengamati sinyal pada arah yang diinginkan dan menghapuskan sinyal-sinyal pada arah yang lain. *Beamforming* dapat digunakan untuk pengindraan dalam 2 atau 3 dimensi. *Beamforming* secara fundamental dikembangkan pertama kali dalam kasus *beamforming* dalam ranah waktu dengan menggunakan sensor jamak dalam 1 dimensi atau tersusun dalam satu garis. Teori ini yang kemudian dikembangkan dalam susunan mikrofon 2 dimensi.

Mikrofon jamak dengan jumlah cukup banyak untuk memetakan sumber suara dalam 2 dimensi diperlihatkan pada Gambar 1. Sebuah datang gelombang dalam bidang pada arah  $u$  berkontak dengan mikrofon jamak ke  $r_m$  dengan jarak antar mikrofon  $d$ . Sebuah sinyal  $x_m(\omega t)$  mencapai mikrofon ke  $m$ , yang secara umum dimodelkan dengan sinyal sinusoidal yang dimodulasikan dengan sinyal pulsa yang datang pada sudut tertentu. Beda fasa dari sinyal yang datang memberikan informasi arah sumber suara.

Untuk mendapatkan arah sumber suara  $u_b$ , sebuah jangkang dibentuk dalam bentuk seperti kerucut dalam arah sudut  $\omega_b$  dengan menjumlahkan

sinyal  $x_m(\omega t)$  yang mengalami keterlambatan dari sinyal referensi.



**Gambar 1.** Proyeksi dari sebuah gelombang 2 dimensi pada susunan mikrofon jamak.

Untuk membentuk jangkar (*beam*) dalam arah  $\omega_b$ , setiap sinyal pada  $x_m(\omega t)$  mengalami keterlambatan (*delay*) sebesar :

$$t_{mb} = r_m \cdot u_b / c = m \frac{d}{c} \sin \psi_b \quad (2)$$

Dan jangkar luaran ke  $b$  dibentuk dalam bersamaan pembentuk jangkar (*beamforming*) sebagai berikut

$$y_b(t) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m x_m(\omega t - \omega t_{mb}) \quad (3)$$

Dimana  $a_m$  is adalah fungsi pemberat yang biasanya menggunakan fungsi jendela (*window function*)

Fungsi diskrit dari Persamaan 2 didapatkan dengan mengasumsikan sebuah frekuensi sampling  $f_s = 1/t_s$  dan  $\Omega = \omega t_s$  menggantikan  $t = nt_s$  sehingga Persamaan 3 menjadi:

$$y_b(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m x_m(\Omega(n - q_{mb})) \quad (4)$$

Dimana  $q_{mb} = t_{mb}/t_s$  adalah harga keterlambatan dalam bentuk integer (jumlah unit keterlambatan) dari sinyal yang sampai ke input  $m$ , dan arah jangkar  $b$ . Untuk menghitung sebuah jangkar  $y_b$  untuk mendapatkan arah  $\psi_b$ , luaran dari setiap sensor terlambat dalam bentuk perkalian integer dari sample dengan  $q_{mb}$ , dimana  $q_{mb}$  adalah

$$q_{mb} = m \delta_s \sin \psi_b \quad (5)$$

dimana  $\delta_s = \frac{d f_s}{c}$

Karena  $q_{mb}$  keterlambatan dalam bentuk diskrit, maka akan didapatkan bahwa  $\delta_s \sin \psi_b$  juga dalam bentuk diskrit. Dengan demikian arah sumber suara dapat dihitung. Salah satu struktur beamforming dalam ranah waktu adalah Delay-sum beamformer yang diterapkan menggunakan Persamaan 4 seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Struktur diulang sebanyak B kali dimana B adalah jangkar (*beam*) yang diinginkan.

## Metodologi

Proses penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap yaitu tahap awal adalah perkiraan arah sumber suara melalui suara buatan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan 4 buah mikrofon yang disusun dalam satu garis dengan memvariasikan jarak antar mikrofon dan jarak sumber suara terhadap mikrofon. Selanjutnya adalah penentuan arah suara yang dihasilkan oleh ketidakseimbangan rotor dengan massa *unbalance* pada piringan sebesar 9 gram.

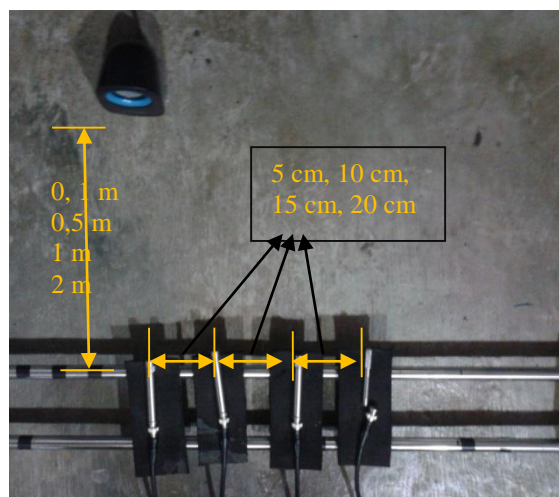
Untuk perangkat uji sumber suara buatan yaitu dua buah *speaker*. Dimana *Speaker* ini berfungsi sebagai sumber suara buatan yang akan ditentukan arah dan posisinya. Ada dua buah *speaker* yang dipakai pada pengujian sumber suara buatan ini dengan frekuensi yang berbeda. Pada tahap penelitian ini, sumber suara buatan dianalogikan berupa suara harmonik. Sedangkan data dari mikrofon dan penguat sinyal dicuplik melalui sebuah *oscilloscope* digital.

## Hasil dan Pembahasan

### Pendeteksian Sumber Suara Buatan

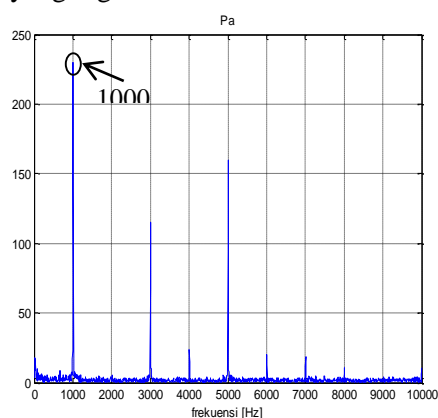
Dalam melakukan pengujian ini, sumber suara buatan dihasilkan oleh sebuah *speaker*. *Speaker* tersebut diletakkan berdekatan dengan beberapa mikrofon. Mikrofon berfungsi sebagai sensor yang menangkap sinyal suara yang dihasilkan oleh *speaker*. Mikrofon yang dipakai sebanyak 4 buah dengan sensitivitas yang berbeda-beda. Susunan alat pengujian dapat dilihat pada Gambar 2. Dari Gambar 2, dapat dilihat bahwa pengujian ini dilakukan beberapa variasi yaitu variasi jarak antar mikrofon dan variasi jarak mikrofon dengan sumber suara. Untuk variasi jarak antar mikrofon yaitu 5 cm, 10 cm, 15 cm dan 20 cm, sedangkan variasi sumber yang dilakukan adalah 0,1 m, 0,5 m, 1 m dan 2 m.

Tahap awal dilakukan penentuan posisi satu sumber suara. Frekuensi sumber suara yang dipakai pada pengujian ini adalah sebesar 1000 Hz. Pengujian ini dilakukan dengan menggeser mikrofon 2, 3, dan 4, sedangkan mikrofon 1 berada pada keadaan diam. Mikrofon 1 digunakan sebagai acuan dan berada tegak lurus dengan posisi sumber suara. Variasi jarak mikrofon terhadap sumber suara yang digunakan pada penentuan posisi satu sumber suara ini adalah 10 cm, 50 cm, 100 cm, dan 200 cm, sedangkan jarak antar mikrofon yang digunakan adalah 5 cm, 10 cm, 15 cm, dan 20 cm.



**Gambar 2.** Rangkaian alat pengujian sumber suara buatan

Sebagai contoh, spektrum suara yang ditangkap oleh mikrofon dapat dilihat pada Gambar 3. Dengan frekuensi sampling 25 kS/s. Pada Gambar terlihat terjadinya harmonik dari suara pada frekuensi 1000 Hz. Hal ini disebabkan oleh kualitas dari load speaker yang digunakan.



**Gambar 3.** Spektrum frekuensi satu sumber suara buatan

Untuk melihat posisi sumber suara terhadap mikrofon dapat ditunjukkan melalui diagram polar. Dimana hasil yang diperoleh dalam bentuk sudut seperti terlihat pada Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat bahwa jarak antar mikrofon ataupun jarak antara mikrofon dengan sumber suara sangat mempengaruhi besarnya sudut yang diperoleh pada eksperimen. Dimana pada jarak antar mikrofon yang semakin besar diperoleh sudut yang besar pula. Namun, pada jarak antara mikrofon dengan sumber suara berbanding terbalik dengan sudut yang diperoleh pada eksperimen. Dimana jarak antar mikrofon dengan sumber suara yang bertambah jauh, hasil sudut yang diperoleh pada eksperimen semakin kecil.

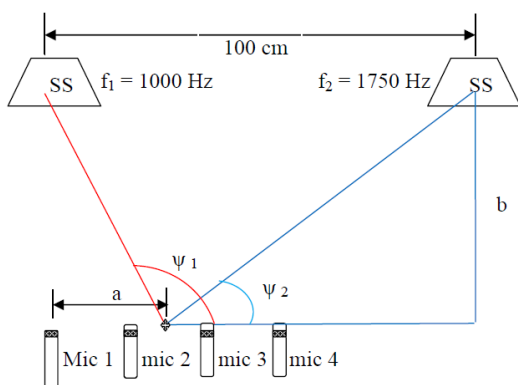
**Tabel 1** Perbandingan arah satu sumber suara teoritik dan eksperimen

No	Jarak antar mik (cm)	Jarak sumber suara (cm)	Sudut secara teoritis	Hasil eksperimen	Galat
1	5	10	126,87	126,62	-0,25
2		50	98,53	99,41	0,88
3		100	94,29	95,68	1,39
4		200	92,15	92,82	0,67
5	10	10	146,31	144,96	-1,35
6		50	106,70	103,71	-2,99
7		100	98,53	100,15	1,62
8		200	94,29	94,31	0,02
9	15	10	156,04	153,55	-2,48
10		50	114,23	110,87	-3,36
11		100	102,68	103,13	0,45
12		200	96,42	95,28	-1,14
13	20	10	161,57	156,99	-4,57
14		50	120,96	113,45	-7,52
15		100	106,70	104,12	-2,59
16		200	98,53	53,37	-5,16

Pada jarak antar mikrofon 5 cm, sudut terbesar diperoleh pada jarak mikrofon terhadap sumber suara 10 cm yaitu 126,62 derajat, sedangkan sudut terkecil diperoleh pada jarak mikrofon terhadap sumber suara 200 cm yaitu 92,82 derajat. Begitupun pada jarak antar mikrofon 10 cm, 15 cm, dan 20 cm yang menunjukkan hubungan antara besar sudut dengan jarak antar mikrofon berbanding lurus. Pada tabel tersebut terlihat bahwa semakin besar jarak antara mikrofon semakin besar kesalahan yang terjadi. Sebaliknya semakin dekat jarak mikrofon dengan sumber suara semakin besar juga kesalahan perkiraan posisi sumber suara.

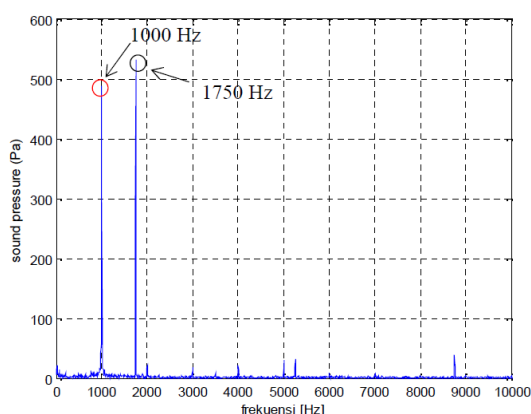
Berdasarkan Tabel 1, secara keseluruhan posisi sumber suara yang dideteksi oleh mikrofon pada saat pengujian sudah mendekati harga yang sebenarnya. Oleh karena itu, program matlab yang telah dibuat sudah bisa digunakan untuk pengujian dengan menggunakan alat uji.

Pada pengujian dua sumber suara buatan, digunakan dua sumber suara dengan frekuensi yang berbeda yaitu 1000 Hz dan 1750 Hz. Sumber suara pertama dengan frekuensi 1000 Hz berada tegak lurus dengan mikrofon 1, sedangkan untuk sumber suara kedua dengan frekuensi 1750 Hz berada sejajar di samping sumber suara pertama sejauh 100 cm seperti ditampilkan Gambar 4.



**Gambar 4.** Susunan pengujian dua sumber suara buatan

Cara pengambilan data untuk penentuan posisi dua buah sumber suara hampir sama dengan satu sumber suara. Frekuensi sumber suara yang dipakai adalah 1000 Hz dan 1750 Hz. Pada percobaan ini frekuensi sampling yang dipakai sama dengan pengujian satu buah sumber suara yaitu sebesar 25 kS/s. Gambar 5 yang menunjukkan spektrum suara yang ditangkap oleh salah satu mikrofon. Puncak tertinggi berada pada frekuensi 1750 Hz dan 1000.



**Gambar 5.** Spektrum frekuensi dua sumber suara buatan

Untuk melihat posisi dua sumber suara buatan secara teori dan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 2. Secara teori, pada sumber suara buatan dengan frekuensi 1750 Hz memiliki sudut yang berbeda pada setiap pengujian. Semakin besar jarak antar mikrofon, maka sudut yang diperoleh juga semakin besar. Sama halnya dengan jarak sumber suara terhadap mikrofon yang semakin besar, maka sudut sumber suara juga akan semakin besar. Sudut yang terbesar dihasilkan pada jarak antar mikrofon 20 cm dan jarak sumber suara dengan mikrofon 200 cm yaitu 70,71 derajat. Sedangkan sudut terkecil diperoleh dari jarak antar mikrofon 5 cm dan jarak sumber suara terhadap mikrofon 10 cm yaitu sebesar 6,17 derajat.

**Tabel 4** Posisi dua sumber suara buatan secara teori dan eksperimen

No	Jarak antar mikrofon	jarak sumber suara (cm)	sudut teori 1000Hz	sudut eksperimen ( $\psi_1$ )	sudut teori 1750Hz	Sudut eksperimen ( $\psi_2$ )
1	5 cm	10	126,87	126,62	6,17	-
2		50	98,53	102,10	28,39	-
3		100	94,29	-	47,23	47,10
4		200	92,15	-	65,18	74,89
5	10 cm	10	146,31	141,41	6,71	-
6		50	106,70	99,69	30,47	-
7		100	98,53	-	49,64	45,77
8		200	94,29	-	66,97	43,81
9	15 cm	10	156,04	144,61	7,35	-
10		50	114,23	109,15	32,83	-
11		100	102,68	138,43	52,22	53,37
12		200	96,42	-	68,82	69,84
13	20 cm	10	161,57	154,07	8,13	-
14		50	120,96	96,26	35,54	-
15		100	106,70	114,31	55,01	55,74
16		200	98,53	-	70,71	84,68

Secara eksperimen, posisi sumber suara buatan yang dideteksi oleh mikrofon tidak terlalu jelas pada setiap pengujian. Dimana cuma dua pengujian yang berhasil mendeteksi posisi sumber suara buatan yaitu pengujian pada jarak antar mikrofon 15 cm dan 20 cm dengan jarak sumber suara terhadap sumber suara 100 cm. Pada pengujian dengan jarak antar mikrofon 15 cm, sumber suara buatan dengan frekuensi 1000 Hz berada pada posisi 138,43 derajat, sedangkan sumber suara buatan dengan frekuensi 1750 Hz berada pada posisi 53,37 derajat. Untuk jarak antar mikrofon 20 cm, sumber suara buatan dengan frekuensi 1000 Hz berada pada posisi 114,31 derajat, sedangkan sumber suara buatan dengan frekuensi 1750 Hz berada pada posisi 55,74 derajat.

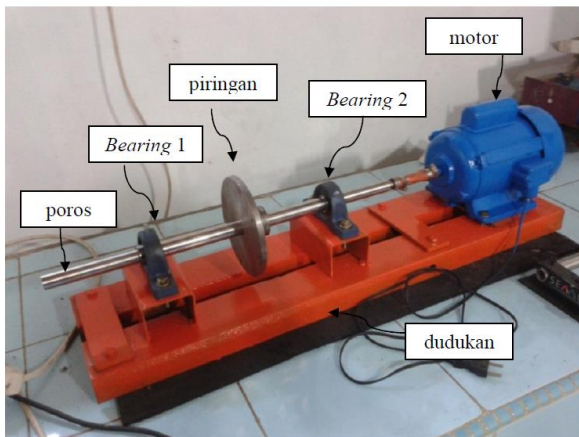
Secara umum pada jarak mikrofon dengan sumber suara 200 cm, sumber suara yang dideteksi oleh mikrofon berasal dari sumber suara 2 dengan frekuensi 1750 Hz. Sedangkan pada jarak mikrofon dengan sumber suara 10 cm dan 50 cm, sumber suara yang terdeteksi berada pada sumber suara yang memiliki frekuensi sebesar 1000 Hz. Hal ini disebabkan karena letak dari sumber suara dengan mikrofon sangat berdekatan, sehingga sumber suara yang terdeteksi cenderung berdekatan dengan mikrofon.

### Pendeteksian Sumber Suara Pada Alat Uji

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk menentukan posisi sumber suara pada alat uji yang telah ada. Alat uji terdiri dari *bearing*, piringan, poros, dudukan dan motor seperti pada Gambar 6. Dalam menentukan posisi sumber suara pada alat uji juga dilakukan hal yang sama dengan sumber suara buatan yaitu dengan memakai sensor dari 4 buah

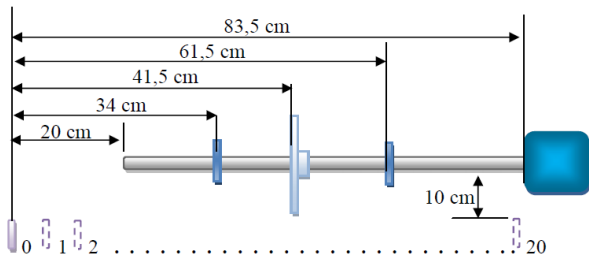


mikrofon. Akan tetapi sumber suara berada pada alat uji.



**Gambar 6.** Rangkaian alat uji

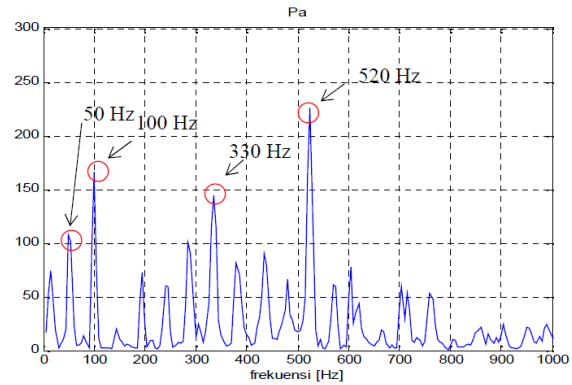
Pendeteksian menggunakan satu mikrofon berguna untuk menentukan posisi sumber suara pada alat uji di beberapa titik. Pengujian dilakukan sebanyak 20 titik di sepanjang alat uji. Titik awal berada pada jarak 20 cm dari alat uji. Varisai pengujian yang dilakukan yaitu pada mikrofon. Mikrofon digeser pada alat uji dengan jarak 4 cm. Mikrofon yang dipakai pada pengujian ini yaitu dengan sensitivitas 42,2 mV. Jarak alat mikrofon ke alat uji adalah 10 cm seperti terlihat pada Gambar 7.



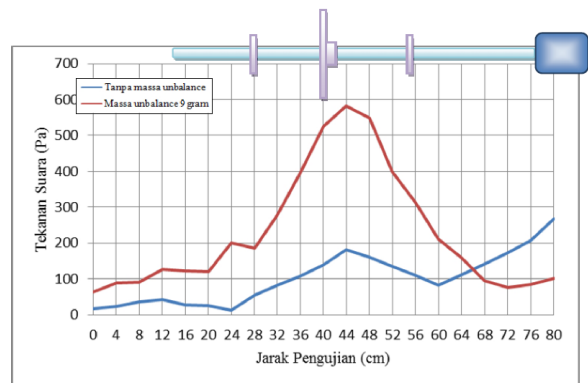
**Gambar 7.** Pengujian dengan satu mikrofon

Ada 2 buah pengujian yang dilakukan yaitu tanpa menggunakan massa *unbalance* dan menggunakan massa *unbalance* 9 gram. Putaran motor dan frekuensi sampling yang diberikan pada tiap-tiap pengujian sama yaitu 2836 rpm dan 25 kS/s. Beberapa frekuensi yang menunjukkan posisi kerusakan yang terjadi pada alat uji terlihat pada Gambar 8.

Berdasarkan Gambar 8, kerusakan yang terjadi pada alat uji adalah pada frekuensi 50 Hz, 100 Hz, 330 Hz dan 520 Hz. Dimana putaran motor yang diberikan pada pengujian ini sebesar 2836 rpm yang setara dengan 47,27 Hz. Untuk frekuensi 50 Hz dapat dilihat pada Gambar 9.

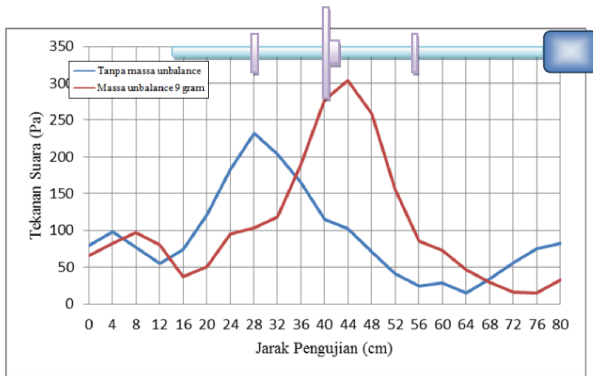


**Gambar 8.** Spektrum frekuensi pada alat uji dengan menggunakan satu mikrofon



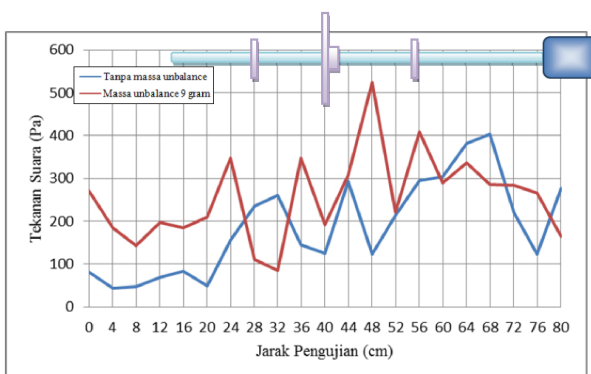
**Gambar 9** Grafik kerusakan elemen mesin pada frekuensi 50 Hz

Berdasarkan Gambar 9, kerusakan elemen mesin yang terjadi pada alat uji dengan frekuensi 50 Hz berada pada jarak pengujian 44 cm dari titik awal baik pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* maupun pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance*. Pada jarak pengujian ini, posisi kerusakan yang terjadi pada alat uji yaitu di sekitar piringan. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan yang terjadi pada alat uji adalah *unbalance* di sekitar piringan. Pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance*, tekanan udara yang dihasilkan pada titik tertinggi lebih kecil dibandingkan dengan titik tertinggi pada pengujian menggunakan massa *unbalance*. Dimana tekanan udara yang dihasilkan pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* hanya sebesar 180 Pa, sedangkan pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance* tekanan udara yang dihasilkan jauh lebih tinggi yaitu 580 Pa. Untuk melihat kerusakan yang terjadi pada frekuensi 100 Hz dapat dilihat pada Gambar 10



**Gambar 10.** Grafik kerusakan elemen mesin pada frekuensi 100 Hz

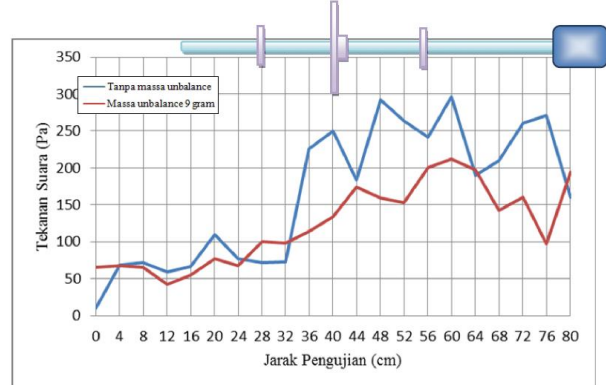
Berdasarkan Gambar 10, baik pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* maupun pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance* memiliki bentuk kurva yang sama. Akan tetapi, posisi kerusakan yang terdeteksi oleh mikrofon sangat berbeda. Posisi kerusakan elemen mesin yang terjadi pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* dengan frekuensi 100 Hz berada pada jarak 28 cm dari titik nol. Dimana pada jarak pengujian tersebut, memperoleh puncak tertinggi tekanan suara yang ditangkap oleh mikrofon yaitu sebesar 232,4 Pa. Posisi elemen mesin yang rusak berada di sekitar poros yang berdekatan dengan bantalan 1. Namun pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance*, puncak tekanan suara tertinggi berada pada jarak pengujian 44 cm dari titik nol yaitu sebesar 303,8 Pa. Pada jarak pengujian tersebut, kerusakan terjadi pada alat uji berada di sekitar piringan. Untuk melihat posisi kerusakan pada frekuensi 330 Hz dapat dilihat pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Grafik kerusakan elemen mesin pada frekuensi 330 Hz

Berdasarkan Gambar 11, posisi kerusakan elemen mesin yang terjadi pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* dengan frekuensi 330 Hz berada pada jarak 68 cm dari titik nol dengan puncak tertinggi tekanan suara yang ditangkap oleh

mikrofon yaitu sebesar 304,1 Pa. Posisi elemen mesin yang rusak berada di sekitar poros yang berdekatan dengan bantalan 2. Namun pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance* 9 gram, puncak tekanan suara tertinggi berada pada jarak pengujian 48 cm dari titik nol yaitu sebesar 52,37 Pa. Pada jarak pengujian tersebut, kerusakan terjadi pada alat uji berada di sekitar piringan. Untuk melihat posisi kerusakan pada frekuensi 520 Hz dapat dilihat pada Gambar 12.



**Gambar 12** Grafik kerusakan elemen mesin pada frekuensi 520 Hz

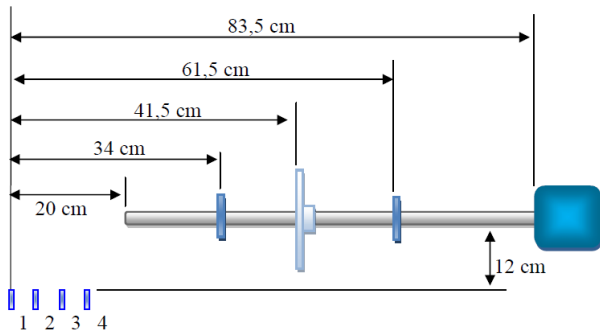
Berdasarkan Gambar 12, posisi kerusakan elemen mesin yang terjadi pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* dengan frekuensi 520 Hz berada pada jarak pengujian 48 cm dan 60 cm dari titik nol dengan puncak tertinggi tekanan suara yang ditangkap oleh mikrofon yaitu berturut-turut sebesar 292,6 Pa dan 229,5 Pa. Posisi elemen mesin yang rusak berada pada piringan dan bantalan 2. Namun pada pengujian dengan menggunakan massa *unbalance* 9 gram, puncak tekanan suara tertinggi berada pada jarak pengujian 48 cm dari titik nol yaitu sebesar 52,37 Pa. Pada jarak pengujian tersebut, kerusakan yang terdeteksi terjadi pada alat uji berada pada bantalan 2.

### Pendeteksian Sumber Suara dengan Menggunakan 4 Mikrofon

Pengujian ini menggunakan 4 buah mikrofon sebagai sensor yang memiliki sensitivitas yang berbeda. Mikrofon 1 dijadikan sebagai mikrofon acuan yang berada pada jarak 20 cm dari ujung poros alat uji dengan sensitivitas 44,2 mV. Sedangkan mikrofon 2, 3, dan 4 diletakkan sejajar dengan mikrofon 1 dengan variasi yang ditetapkan. Sensitivitas mikrofon 2, 3, dan 4 berturut-turut adalah 44,5 mV, 43,7 mV, dan 9,1 mV. Keempat mikrofon tersebut di letakkan dengan alat uji sejauh 12 cm seperti terlihat pada Gambar 13

Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan jarak dari mikrofon yaitu 2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm dan

10 cm. Jarak ini diambil berdasarkan pada pengujian sebelumnya yaitu pendeteksian sumber suara buatan. Dimana semakin kecil jarak mikrofon yang diberikan, maka posisi sumber suara yang dideteksi semakin mendekati harga sebenarnya.



**Gambar 13.** Pendeteksian posisi sumber suara dengan 4 mikrofon

Pengaturan putaran motor dan osiloskop dilakukan dengan hal yang sama dengan pengujian dengan satu mikrofon. Putaran motor yang bekerja pada alat uji yaitu sebesar 2836 rpm. Pada osiloskop, mikrofon 1 dihubungkan pada *channel* dan begitupun dengan mikrofon lain yang dihubungkan pada *channel* 2, 3 dan 4. Frekuensi sampling yang diberikan sebesar 25 kS/s dan data dibuat sebanyak 5000 data agar posisi sumber suara yang didapatkan lebih terlihat dengan jelas.

Pengujian juga dilakukan sebanyak 2 kali yaitu dengan menggunakan massa *unbalance* dan tanpa menggunakan massa *unbalance*. Hasil yang didapatkan pada pengujian berupa diagram polar yang memperlihatkan sudut. Sudut tersebut dapat kita gunakan untuk mengukur posisi sumber suara dengan menggunakan rumus trigonometri. Posisi sumber suara yang dideteksi mikrofon dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 4.** Posisi sumber suara dengan menggunakan 4 mikrofon pada alat uji

Jarak antar mikrofon (cm)	Tanpa massa <i>unbalance</i>	Massa <i>unbalance</i> 9 gram
2,5	18,27°	16,52°
5	18,6°	16,52°
7,5	38,6°	18,33°
10	45,77°	44,69°

Berdasarkan Tabel 4, pada pengujian tanpa menggunakan massa *unbalance* dengan jarak antar mikrofon 2,5 cm diperoleh sudut sebesar 18,27 derajat. Sudut tersebut diukur dari titik tengah susunan mikrofon terhadap alat uji. Sehingga posisi sumber suara yang terdeteksi kemungkinan berada

pada 43,75 cm dari mikrofon 1. Jarak tersebut menunjukkan bahwa posisi sumber suara dideteksi pada piringan. Jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan satu mikrofon, posisi sumber suara tersebut berada pada frekuensi 50 Hz. Hal yang sama juga ditunjukkan pada jarak antar mikrofon 5 cm. Dimana, posisi sumber suara yang terdeteksi berasal dari piringan yaitu pada jarak 43,84 cm dari posisi mikrofon 1. Akan tetapi, sudut yang diperoleh pada jarak antar mikrofon ini lebih besar dibandingkan dengan pengujian pada jarak antar mikrofon 2,5 cm. Sedangkan pada pengujian dengan jarak antar mikrofon 7,5 cm dan 10 cm, posisi sumber suara terdeteksi pada jarak yang hampir sama yaitu berturut-turut 6,28 cm dan 26,68 cm dari posisi mikrofon 1. Akan tetapi, sudut yang diperoleh agak berbeda yaitu berturut-turut 38,6 derajat dan 45,77 derajat.

Pada pengujian menggunakan massa *unbalance*, pada jarak antar mikrofon 2,5 cm diperoleh sudut sebesar 16,52 derajat. Maka dari itu, posisi sumber suara yang terdeteksi oleh mikrofon berada pada jarak 44,21 cm dari mikrofon 1. Dimana, jarak tersebut menunjukkan posisi sumber suara berada di dekat piringan. Jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan satu mikrofon, frekuensi yang terdeteksi pada mikrofon sebesar 50 Hz dan 100 Hz. Dimana, kerusakan elemen mesin yang terjadi yaitu *unbalance* pada piringan.

Pada pengujian dengan jarak antar mikrofon 5 cm, sudut yang diperoleh sebesar 16,52 derajat dan posisi sumber suara yang terdeteksi berada pada jarak 72,12 cm dari mikrofon 1. Jarak tersebut terletak pada poros di antara bantalan 2 dan piringan. Sedangkan pada jarak antar mikrofon 7,5 cm, sudut yang diperoleh sebesar 18,33 derajat dan posisi sumber suara yang terdeteksi berada pada jarak 47,46 cm dari mikrofon 1. Jarak tersebut menunjukkan bahwa posisi sumber suara berada di piringan. Jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan satu mikrofon, frekuensi yang terdeteksi oleh mikrofon sebesar 330 Hz dan 50 Hz. Namun, pada jarak antar mikrofon 10 cm, posisi sumber suara berada pada jarak 27,13 cm dari mikrofon 1 dengan sudut yang didapat sebesar 44,69 derajat. Jarak tersebut bersumber dari poros yang terletak berdekatan dengan bantalan 1.

## Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengujian satu sumber suara buatan yang dideteksi oleh mikrofon hasilnya lebih akurat dibandingkan dengan dua sumber suara buatan. Dimana pada pengujian satu sumber suara,



posisi sumber suara mendekati dengan hasil hitungan secara teori. Namun pada pengujian dua sumber suara, posisi sumber suara tidak bisa dideteksi dengan akurat.

2. Pada pengujian satu sumber suara buatan dengan frekuensi 1000 Hz, hubungan antara jarak mikrofon dengan sumber suara terhadap sudut sumber suara adalah berbanding terbalik. Dimana jarak yang terkecil mempunyai posisi sudut sumber suara yang terbesar. Akan tetapi, hubungan jarak antar mikrofon terhadap sudut sumber suara adalah sebanding. Dimana jarak antar mikrofon yang terbesar mempunyai sudut sumber suara yang terbesar pula.
3. Pada pengujian alat uji dengan menggunakan satu buah mikrofon, frekuensi suara yang dideteksi oleh mikrofon berada pada 50 Hz, 100 Hz, 330 Hz, dan 520 Hz. Pada pengujian alat uji dengan menggunakan empat buah mikrofon, posisi suara yang terdeteksi baik tanpa massa *unbalance* maupun dengan menggunakan massa *unbalance* berada di sekitar piringan.

## Referensi

- [1]. Peng, Z.K., Peter W.Tse, Chu. F.L., 2005, An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis, *Journal of Sound and Vibration* Vol. 286 No.1–2, pp 187–205.
- [2]. Zhou,J., Chen, J., 2004, A comparative study on time–frequency feature of cracked rotor by Wigner–Ville distribution and wavelet transform, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.276, No.1, pp.1–11.
- [3]. Shimanskiy,S., IIJIMA,T., And NAOI,Y., 2004, Development of Acoustic Leak Detection and Localization Methods for Inlet Piping of Fugen Nuclear Power Plant, *Journal Of Nuclear Science And Technology*, Vol. 41, No. 2, p. 183–195.
- [4]. Eret, P., and Meskeel,C., 2012, Microphone Arrays as a Leakage Detection Tool in Industrial Compressed Air Systems, *Advances in Acoustics and Vibration*, Vol. 2012,.
- [5]. Fazenda,B.M., 2011, Acoustic Based Condition Monitoring Of Turbine Blades, *18<sup>th</sup> International congress on sound and vibration*, Tio de Janeiro, Brazil.
- [6]. Lu, W., Jiang, W., Wu,H., Hou,J., 2012, A fault diagnosis scheme of rolling element bearing based on near-field acoustic holography and gray level co-occurrence matrix, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, pp. 3663–3674,
- [7]. Rezaei, A., Dadouche,A., Wickramasinghe,V., And Dmochowski, W., 2011, A Comparison Study Between Acoustic Sensors for Bearing Fault Detection Under Different Speed and Load Using a Variety of Signal Processing Techniques, *Tribology Transactions*,Vol 54: 179-186
- [8]. Amarnath, M., Sugumaran, V., Kumar,.H., 2013,Exploiting sound signals for fault diagnosis of bearings using decision tree, *Measurement*, Vol. 46, pp. 1250–1256
- [9]. Zagrai,A., Donskoy,D., Chudnovsky,A., 2008, Micro And Macroscale Damage Detection Using The Nonlinear Acoustic Vibro-Modulation Technique, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 19, pp. 104–128.
- [10]. Anami, B.S., Pagi, V.B., Magi, S.M., 2011, Wavelet-based acoustic analysis for determining health condition of motorized two-wheelers, *Applied Acoustics*, Vol.72, pp. 464–469,
- [11]. Raharjo, P., Tesfa, B., Gu, F. and Ball, A.D., 2012, A Comparative Study of the Monitoring of a Self Aligning Spherical Journal using Surface Vibration, Airborne Sound and Acoustic Emission, *Journal of Physics:ConferenceSeries*, Vol. 364
- [12]. Henríquez, P., Alonso, J. B., Ferrer, M. A., Travieso, C.M., and Gómez, G., 2012, Fault Diagnosis using Audio and Vibration Signals in a Circulating Pump, , Vol. 364.
- [13]. Hartmann, W.M., Rakerd,B., and Gaalaas, J.B., 1998, On the source identification method, *Journal Acoust Societ of America*, Vol.104, pp.3546-3557
- [14]. Sheng Hu, J., Chan, C.Y., Wang, C.K., Lee, M.T., Kuo, C.Y., 2011, Simultaneous Localization Of Mobile Robot And Multiple Sound Source Using A Microphone Array, *Advanced Robotics*, Vol. 25, pp. 135-152.
- [15]. Washio, T., Kitamura, M., 1994, Adaptive Microphone Array Technique For Remote Monitoring Of Components In Nuclear Power Plants, *Journal of nuclear Science and Technology*, Vol. 31, pp. 91-101