

# ANALISIS DATA DOMAIN WAKTU DAN WAVELET TRANSFORM PIPA YANG MENGALAMI SUMBATAN DAN KEBOCORAN

Willy Hartino Siregar<sup>1\*</sup>, Feblil Huda<sup>2</sup> dan Nazaruddin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kampus Bina Widya, Jalan H.R. Soebrantas Km. 12,5 Panam, Pekanbaru 28293

<sup>2</sup>Laboratorium Konstruksi Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kampus Bina Widya, Jalan H.R. Soebrantas Km. 12,5 Panam, Pekanbaru 28293

\*E-mail: willy.hartinosiregar@student.unri.ac.id

## ABSTRAK

Pada penelitian ini disusun metode untuk mendeteksi kerusakan pada pipa menggunakan sinyal suara. Pendeteksian kerusakan pada pipa dilakukan dengan menggunakan sinyal suara dan empat mikrofon. Metode sinyal suara merupakan *smart structural health monitoring* yang dapat mendeteksi kerusakan dengan biaya yang lebih murah. Eksitasi suara diberikan dengan menggunakan *loudspeaker* dan respon sinyal suara dicuplik menggunakan empat mikrofon yang dihubungkan dengan *PC-Oscilloscope* yang berfungsi untuk mengkonversi sinyal analog hasil rekaman suara menjadi sinyal digital berupa nilai domain waktu dan kemudian menggunakan *Continous Wavelet Transform (CWT)* untuk menentukan letak kerusakan yang terjadi pada selubung pipa. Untuk mendeteksi letak kerusakan pipa di berbagai posisi kerusakan dapat dicari dengan membandingkan *wavelet coefficient* dari keempat mikrofon. Kerusakan yang diberikan berupa sumbat dan bocor dengan jarak dan posisi polar yang berbeda-beda. Dari hasil eksperimen diperoleh dengan kondisi kebocoran pada jarak 0,7 meter dengan arah 90°, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 2 sebesar 0,02534 dan kebocoran pada jarak 1,2 meter dengan arah 90°, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 2 sebesar 0,05038 sesuai dengan letak kerusakan yang terjadi pada sudut 90° dan untuk sumbatan pada jarak 1 meter, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 4 sebesar 0,2001 serta sumbatan pada jarak 1,4 meter, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 4 sebesar 0,176 sesuai dengan bentuk sumbatan yang diberikan berada dasar pipa.

Kata Kunci : Sinyal Suara, Sumbatan, Kebocoran, Continous Wavelet Transform, Wavelet Coefficient

## ABSTRACT

*In this study, a method was developed to detect damage to pipes using sound signals. The detection of damage to the pipe is done by using a signal sounds and four microphones. Methods of signal noise is a smart structural health monitoring that can detect damage at the cost of the more inexpensive. Excitation the sound is given by using a loudspeaker and the response signal noise is sampled using four microphones that are connected to the PC-Oscilloscope which serves to convert the signal analog results of recording sound into a signal of digital form of the value of domains of time and then use a Continous Wavelet Transform (CWT) to determine the location of the damage that occurs in the pipe sheath. To detect the location of pipe damage in various positions of damage, it can be searched by comparing the wavelet coefficient of the four microphones. Damages are awarded in the form of plug and leaked to the distance and position of polar vary. From the experimental results obtained with the leakage conditions at a distance of 0.7 meters with a direction of 90°, the highest wavelet coefficient occurs at microphone 2 at 0.02534 and leakage at a distance of 1.2 meters with the 90° direction, the highest wavelet coefficient occurs at microphone 2 of 0.05038 according to the location of the damage that occurs at an angle of 90° and for blockages at a distance of 1 meter, the highest wavelet coefficient occurs at microphone 4 at 0.200 and a blockage at a distance of 1.4 meters, the highest wavelet coefficient occurs at microphone 4 at 0.176 in accordance with the form of blockage that is given is the base pipe.*

Keywords : Sound Signal, Blockage, Leakage, Continous Wavelet Transform, Wavelet Coefficient

## PENDAHULUAN

Kebocoran adalah salah satu masalah yang paling penting terkait dengan sistem perpipaan. Deteksi dini dan lokalisasi kebocoran sangat penting bukan hanya karena mengurangi kerugian tetapi juga karena keselamatan untuk mencegah berbagai efek bahaya yang disebabkan oleh kebocoran.

Sumbatan pada pipa juga merupakan masalah yang sering ditemui pada sistem perpipaan. Sumbatan dapat terjadi akibat adanya endapan pada pipa yang berlangsung dalam kurun waktu tertentu, atau adanya material kasar yang masuk ke dalam sistem pipa. Jika dibiarkan akan berakibat pada rendahnya efisiensi transportasi fluida atau bahkan dapat mengakibatkan rusaknya beberapa komponen pendukung sistem pipa akibat *overload* karena sumbatan.

Pencegahan terhadap kerusakan baik itu kebocoran ataupun sumbatan sangat penting karena dapat menekan angka kerugian baik ekonomi, lingkungan alam, bahkan kehilangan nyawa. Pada penelitian ini disusun metode untuk mendeteksi kerusakan pada pipa menggunakan sinyal suara.

Suara merupakan getaran dari suatu benda. Selama bergetar, perbedaan tekanan terjadi di udara sekitarnya. Pola osilasi yang terjadi dinamakan sebagai gelombang. Gelombang mempunyai pola sama yang berulang pada interval tertentu yang disebut sebagai periode (Hanggarsari, dkk, 2012). Gelombang suara memiliki lembah dan bukit, satu buah lembah dan bukit akan menghasilkan satu siklus atau periode.

Siklus ini berlangsung berulang-ulang yang membawa pada konsep frekuensi. Frekuensi merupakan jumlah getaran yang terjadi per satuan waktu. Frekuensi diukur dalam *Hertz* atau siklus per satuan waktu, dimana semakin cepat getaran gelombang suara, maka frekuensinya semakin tinggi.

Deteksi kebocoran pada pipa dapat dilakukan secara manual yaitu dilihat secara langsung apabila terdapat genangan fluida yang berada diatas saluran pipa atau dari laporan masyarakat tentang adanya kebocoran. Akan tetapi cara ini tidak dapat mendeteksi sumbatan karena sifatnya berada didalam pipa dan cara ini juga memakan waktu yang lama, karena suatu jaringan perpipaan bisa saja mencakup area yang cukup luas dan kompleks.

Pendeteksian kebocoran dan sumbatan pada jaringan pipa telah dikembangkan dengan berbagai metode. Salah satu metode yang telah digunakan adalah metode beda tekanan oleh Santoso, dkk (2013) yang menggunakan teknologi *Differential Pressure Transducer* (DPT) yang ditempatkan sebelum dan sesudah titik kebocoran untuk mengukur beda tekanan. DPT dihubungkan dengan peralatan pengkondisi sinyal dan ADC (*Analog to Digital Converter*) yang menghasilkan data beda tekanan yaitu dengan menutup salah satu dari ujung pipa dan kemudian tekanan dalam pipa tersebut dinaikkan. Apabila tekanan dalam pipa tersebut tetap, maka tidak terjadi kebocoran, sedangkan apabila tekanan dalam pipa berubah, maka dapat dideteksi telah terjadi kebocoran, kelemahan pada metode ini tidak dapat dideteksi posisi dari kebocoran tersebut.

Sadeghioon, dkk (2014) telah melakukan pengujian dengan mengembangkan sensor bawah tanah (*Underground Wireless Sensor 3 Network/UWSN*) berbasis *Force Sensitive Resistor* (FSR) yaitu memantau kebocoran pipa menggunakan jaringan nirkabel. Prinsip pengujian ini hampir sama dengan penelitian Santoso, dkk. Perbedaannya pada deteksi beda tekanan sebelum dan sesudah titik kebocoran digunakan teknologi *Force Sensitive Resistor* (FSR) dan pemantauan kebocoran pipa menggunakan jaringan nirkabel.

Adnan, dkk (2014) melakukan penelitian dengan mendeteksi pada pipa gas menggunakan *Continous Wavelet Transform* (CWT) dengan menggunakan nilai kurtosis dimana nilai kurtosis dibandingkan pada saat pipa dalam kondisi normal dan kebocoran. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini ialah nilai kurtosis untuk pipa yang mengalami kebocoran lebih besar dibandingkan dengan pipa normal. Penelitian ini hanya mendeteksi apakah pipa telah terjadi kebocoran atau tidak dan tidak bisa mendeteksi letak dari kebocoran tersebut. *Structural Health Monitoring* menghabiskan banyak anggaran, sehingga penggunaan mikrofon sederhana dengan biaya yang lebih kecil perlu diselidiki untuk menemukan solusi atas instrumen yang mahal (Huda, F, dkk. 2019).

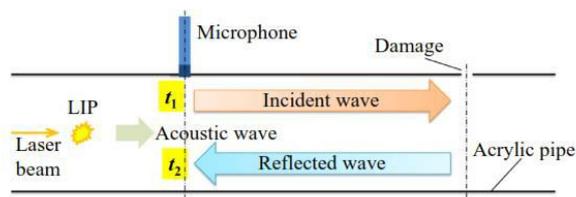
Riedho (2018) mendeteksi kebocoran dan sumbatan pada pipa menggunakan suara sebagai eksitasi dan mikrofon sebagai sensor penangkap sinyal suara untuk mendeteksi kebocoran dan sumbatan pada jaringan pipa. Mikrofon dihubungkan ke PC menggunakan DAQ (*soundcard*) yang mengkonversi sinyal analog hasil rekaman suara menjadi sinyal digital berupa nilai domain waktu.

Gelombang suara yang disuntikan ke dalam pipa akan menjalar sepanjang pipa dengan kecepatan rambat udara sebesar 340 m/s. Apabila terjadi diskontinuitas dari permukaan dalam pipa tersebut, maka akan muncul nilai amplitudo yang tinggi pada daerah kebocoran dan sumbatan, semakin besar diameter lubang dan sumbatan maka semakin besar pula nilai amplitudo yang dihasilkan. Kelemahan dari penelitian ini tidak dapat mendeteksi posisi sisi selubung permukaan pipa yang mana terjadi kebocoran dan sumbatan.

Penelitian lain dilakukan Hariadi (2019) dimana menggunakan suara berupa impuls sebagai sumber eksitasi dan dual mikrofon yang dihubungkan kepada DAQ (*Oscilloscope*) yang berfungsi untuk mengkonversi sinyal analog hasil rekaman suara menjadi sinyal digital berupa nilai domain waktu dan kemudian menggunakan *Continous Wavelet Transform* (CWT) untuk menentukan letak kerusakan yang terjadi pada selubung pipa. Lokasi kerusakan ditentukan oleh puncak dominan dari *wavelet coefficient* yang dapat dilihat secara jelas dengan menerapkan perlakuan batas dan konsep permukaan *wavelet coefficient* (F. Huda, dkk. 2014).

## BAHAN DAN METODE

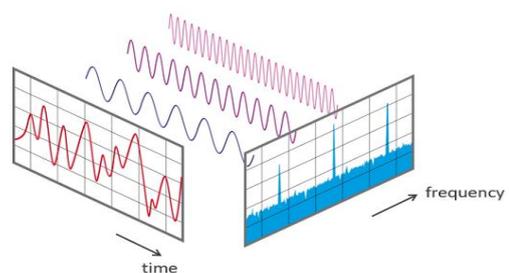
Waktu saat gelombang akustik pertama kali diterima oleh mikrofon adalah  $t_1$ . Selanjutnya gelombang disebarkan dalam bentuk aslinya hingga mencapai kerusakan. Setelah itu gelombang terbagi menjadi gelombang pantulan yang disebabkan oleh kerusakan dan dilanjutkan kembali. Gelombang pantulan kembali diterima oleh mikrofon pada  $t_2$ . Dengan demikian jarak dari mikrofon dengan kerusakan dapat dihitung dengan mengalikan selisih waktu terhadap cepat rambat suara seperti yang disajikan pada **Gambar 1**. Namun efek pantulan gelombang suara yang disebabkan oleh kerusakan akan lebih kecil dibandingkan gelombang akustik yang pertama kali dihasilkan dari pantulan gelombang suara pada ujung pipa (Kajiwara, Itsuro et al, 2017).



**Gambar 1. Skema Pemantulan Gelombang pada Posisi Kerusakan**

Suara yang telah dieksitasi ke dalam pipa kemudian direkam untuk diolah agar dapat dilihat dengan jelas karakteristiknya dan fitur yang dapat menyajikannya lebih jelas adalah *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Wavelet Transform*.

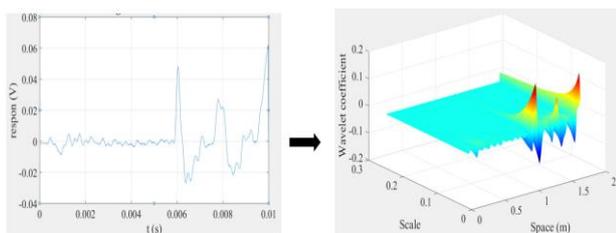
Analisis *Fourier* dapat merepresentasikan sinyal dalam domain waktu (*time vs amplitude*) menjadi sinyal dalam domain frekuensi (*frequency vs amplitude*). Artinya sumbu  $x$  mewakili frekuensi dan sumbu  $y$  mewakili nilai amplitudonya. Seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2**.



**Gambar 2. Time Domain Signal menjadi Frequency Domain Signal**

Transformasi *Fourier* terdiri atas dua buah jenis yaitu, *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan *Fast Fourier Transform* (FFT). Prinsip dari DFT adalah mentransformasikan sinyal awal berupa analog menjadi diskrit dalam bentuk domain waktu yang kemudian diubah ke dalam bentuk domain frekuensi, sedangkan prinsip dari FFT adalah membagi sinyal hasil pencuplikan menjadi beberapa bagian yang kemudian tiap bagian diselesaikan dengan algoritma yang sama, dan hasilnya akan dikumpulkan kembali.

*Wavelet Transform* merupakan perbaikan dari FFT. FFT hanya dapat menangkap informasi apakah suatu sinyal memiliki frekuensi tertentu atau tidak, tapi tidak dapat menangkap dimana frekuensi itu terjadi (Iwan, 2012). Transformasi *Fourier* hanya bisa mengatakan apakah suatu nada tertentu muncul, tapi tidak dapat mengatakan kapan nada itu muncul dan berapa kali. Jika transformasi *Fourier* hanya memberikan informasi tentang frekuensi suatu sinyal, maka *Wavelet Transform* memberikan informasi tentang kombinasi skala dan frekuensi. *Wavelet Transform* akan mempunyai tiga koordinat yakni amplitudo, translasi dan skala seperti pada **Gambar 3** berikut.

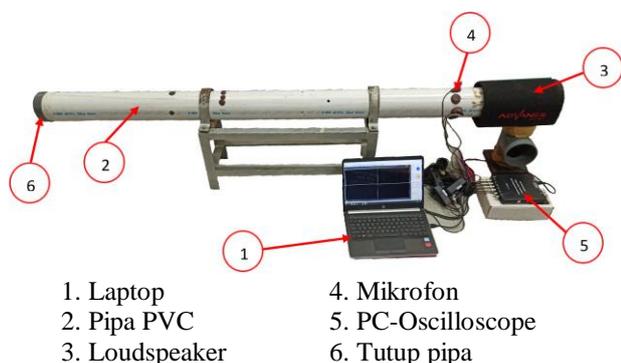


**Gambar 3. Analisis Wavelet**

Ada berbagai jenis *Wavelet Transform*, pada penelitian kali ini penulis menggunakan jenis *Wavelet* yaitu *Continous Wavelet Transform (CWT)*. Cara kerja transformasi ini adalah dengan menghitung konvolusi sebuah sinyal dengan sebuah jendela modulasi pada setiap waktu dengan tiap skala yang diinginkan. Jendela modulasi yang mempunyai skala fleksibel inilah yang biasa disebut induk *Wavelet* (Silalahi, 2010).

Analisis *Wavelet* merupakan sebuah teknik penjendelaan variabel (*variable windowing technique*) dan mengizinkan penggunaan interval waktu yang panjang dimana kita menginginkan informasi frekuensi rendah yang lebih tepat, dan daerah atau wilayah yang lebih pendek dimana kita menginginkan komponen-komponen frekuensi yang lebih tinggi (Caraka, 2016).

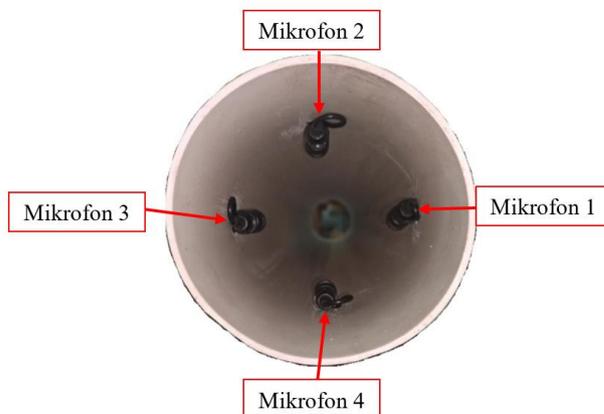
Pada penelitian ini, sinyal respon diperoleh dalam empat arah pada selubung dalam pipa. Untuk meletakkan mikrofon di dalam pipa maka dibuat empat buah lubang yaitu untuk mikrofon 1 sampai mikrofon 4 yaitu pada arah 0°, 90°, 180° dan 270°. Untuk mengetahui arah kerusakan pada selubung pipa. Dalam melakukan pengujian ini penting untuk diambil beberapa data dan kemudian dirata-ratakan karena dalam kondisi yang sama dapat menghasilkan perbedaan kecil sehingga dibutuhkan beberapa data. *Set up* pengujian dan komponen-komponen pengujian ditampilkan pada **Gambar 4** berikut.



1. Laptop
2. Pipa PVC
3. Loudspeaker
4. Mikrofon
5. PC-Oscilloscope
6. Tutup pipa

**Gambar 4. Set up Pengujian**

*Loudspeaker* dengan posisi setiap mikrofon tegak lurus terhadap mikrofon setelahnya. Pada **Gambar 5** menunjukkan posisi mikrofon yang terletak didalam pipa dengan jarak 0.12 m dari *loudspeaker* dan juga posisi serta urutan dari mikrofon.



**Gambar 5. Posisi mikrofon**

Analisis sinyal suara dilakukan menggunakan *Wavelet Transform* dan FFT dengan menggunakan *software matlab* yang menghubungkan pendekatan kecepatan rambat suara, sehingga karakteristik suara akibat kebocoran dan sumbatan dapat diketahui dan posisinya dapat dideteksi dengan baik.

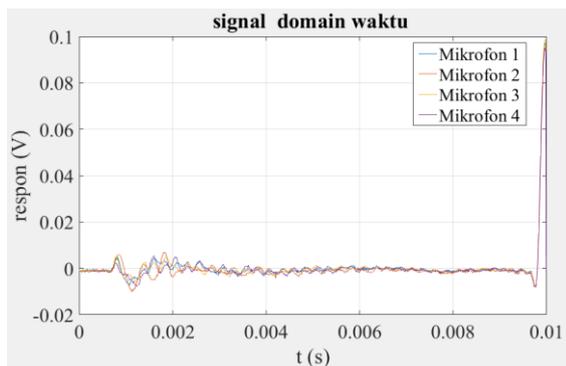
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pipa yang digunakan adalah pipa PVC yang telah ditentukan bentuk jaringan pipanya dengan ukuran 4 inchi dengan panjang 1,7 meter, sehingga untuk mengetahui pengambilan waktu sesuai dengan panjang pipa yaitu:

$$\text{Waktu pencuplikan} = \frac{\text{panjang pipa}}{\text{cepat rambat suara}} \times 2 = \frac{1,7 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} \times 2 = 0,01 \text{ s}$$

Semua pengujian dilakukan dengan menggunakan waktu pencuplikan selama 0,01 detik. Waktu tersebut merupakan karakteristik sinyal yang muncul di sepanjang pipa yang digunakan pada penelitian.

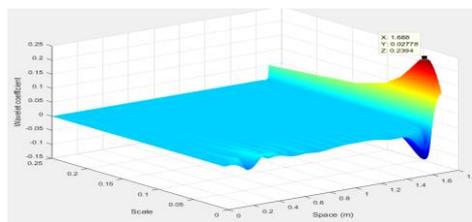
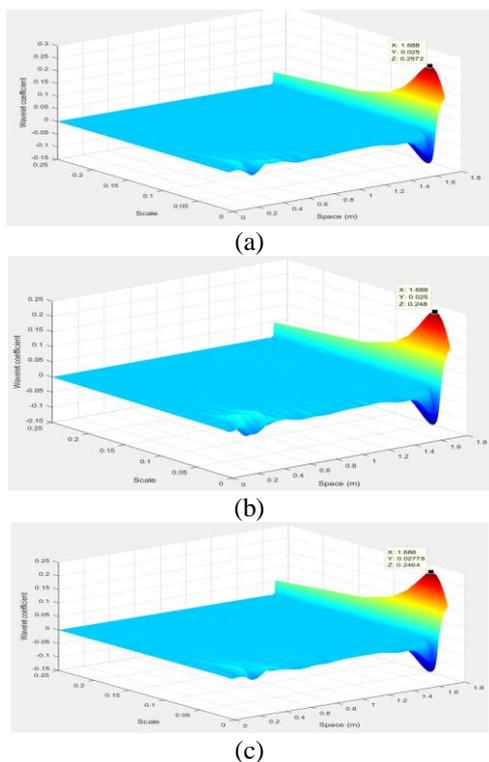
Pada kondisi pipa ini didapatkan hasil pencuplikan grafik sinyal suara dalam selang waktu dan selang frekuensi. Grafik sinyal selang waktu dapat dilihat pada **Gambar 6** yang merupakan hasil pengkonversian dari sinyal impuls menjadi bentuk spektrum domain waktu. Sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam satuan detik (s) sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai respon dengan satuan Volt (v).



**Gambar 6. Sinyal Domain Waktu Pipa Normal**

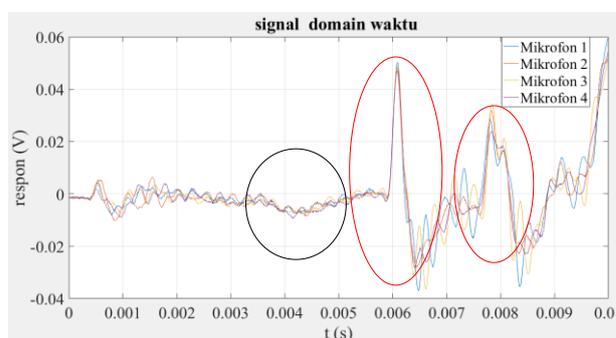
Grafik sinyal diatas merupakan sinyal normal dengan waktu pengambilan 0,01 detik dan diolah sehingga mendapatkan grafik sinyal domain waktu dan sinyal domain frekuensi yang telah dianalisis dengan menggunakan metode FFT.

Metode FFT saja tidak cukup untuk melihat bentuk dan lokasi karakteristik sinyal sehingga dibutuhkan metode *wavelet Transform* yang terdapat dalam *software* MATLAB pengolah numerik. Grafik sinyal selang waktu dapat memberikan informasi jarak (*Space*) dengan cara mengalikan dengan cepat rambat udara. Pada metode *Wavelet Transform* ini didapatkan grafik tiga sumbu yaitu X (*space* (m)), Y (*Scale*), dan Z (*CWT coefficient*). Hasil metode *Wavelet* pada kondisi normal dapat dilihat pada **Gambar 7**.



**Gambar 7. Wavelet Transform Pipa Normal (a) Mikrofon 1, (b) Mikrofon 2, (c) Mikrofon 3 dan (d) Mikrofon 4**

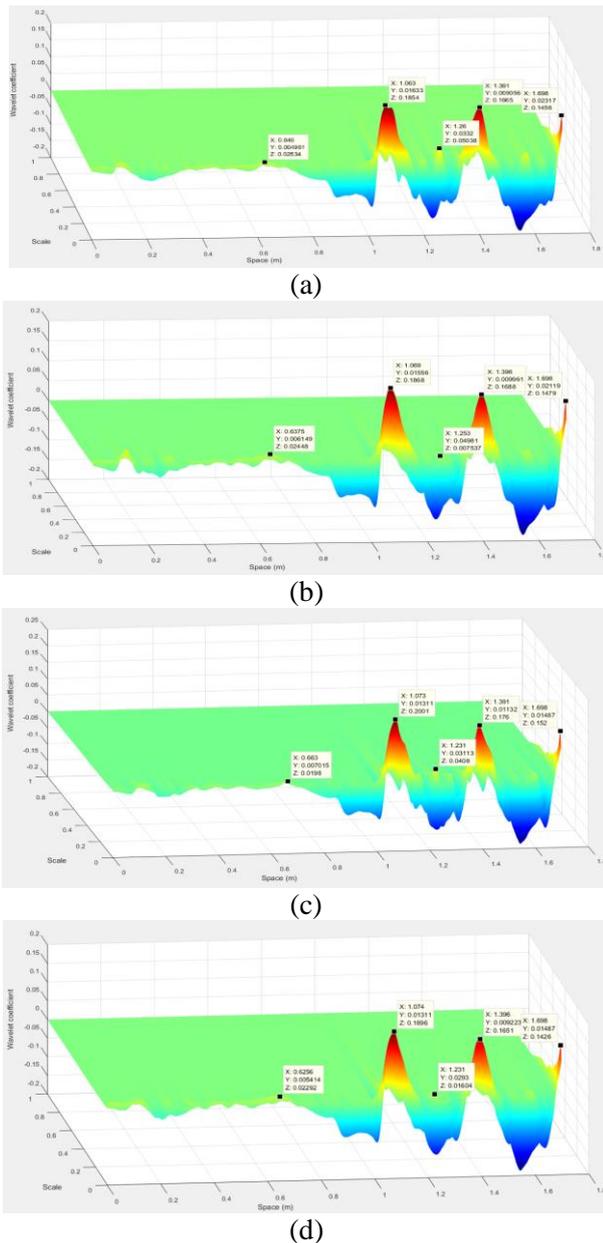
Untuk kondisi ini diberikan kerusakan Sumbat jarak 1m dan 1,4m dan Bocor jarak 0,7m arah 90° dan 1,2m arah 90°. Sinyal domain waktu seperti **Gambar 8**.



**Gambar 8. Sinyal Domain Waktu Pipa Kondisi Kerusakan**

**Gambar 8** dapat terlihat jelas perbedaan antara kerusakan bocor seperti pada lingkaran hitam dan juga kerusakan sumbat yang ditunjuk dengan lingkaran merah. Pada kerusakan bocor respon dari sinyal yang ditangkap akan berkurang karena adanya lubang pada selubung pipa, dan semakin banyak bocor yang terjadi pada pipa dalam satu jarak yang sama maka respon dari sinyal akan semakin besar. Seperti pada **Gambar 8**, hanya terdapat satu sinyal bocor sebelum sumbatan terjadi dan untuk kebocoran yang terjadi setelah sumbatan pertama tidaklah terlihat dikarenakan gelombang dari sumbatan menutupi sinyal dari bocor tersebut. Sedangkan pada sumbat dapat dilihat respon dari sinyal yang ditangkap menjadi besar dikarenakan sinyal tersebut langsung dipantulkan oleh sumbat tersebut ke mikrofon tanpa sampai ditutup dari pipa.

Nilai *wavelet coefficient* dapat dilihat pada **Gambar 9** dan nilai dari *wavelet coefficient* dapat dilihat pada **Tabel 1**.



**Gambar 9. Wavelet Transform Pipa Kondisi kerusakan (a) Mikrofon 1, (b) Mikrofon 2, (c) Mikrofon 3 dan (d) Mikrofon 4**

**Tabel 1. Jarak dan wavelet coefficient Pipa Kondisi Kerusakan (a) Mikrofon 1, (b) Mikrofon 2, (c) Mikrofon 3 dan (d) Mikrofon 4**

	Bocor 0,7m arah 90°		Bocor jarak 1,2m arah 90°		Sumbat 1m		Sumbat 1,4m	
	Space (m)	Wavelet coefficient	Space (m)	Wavelet coefficient	Space (m)	Wavelet coefficient	Space (m)	Wavelet coefficient
Mikrofon 1 (arah 0°)	0,6256	0,02292	1,231	0,01604	1,074	0,1896	1,396	0,1651
Mikrofon 2 (arah 90°)	0,646	0,02534	1,26	0,05038	1,063	0,1854	1,391	0,1665
Mikrofon 3 (arah 180°)	0,6375	0,02448	1,253	0,007537	1,069	0,1868	1,396	0,1688
Mikrofon 4 (arah 270°)	0,663	0,0198	1,231	0,0408	1,073	0,2001	1,391	0,176

Posisi kerusakan dapat dideteksi karena adanya refleksi akustik (*acoustic reflection*), dimana sinyal suara yang dieksitasi dari salah satu ujung pipa harus mencapai ujung pipa lain lalu dipantulkan kembali dan selanjutnya diterima oleh mikrofon. Pada **Tabel 1** diketahui untuk kondisi kebocoran pada jarak 0,7 meter dengan arah 90°, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 2 sebesar 0,02534 dan kebocoran pada jarak 1,2 meter dengan arah 90°, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 2 sebesar 0,05038 sesuai dengan letak kerusakan yang terjadi pada sudut 90° dan untuk sumbatan pada jarak 1 meter, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 4 sebesar 0,2001 serta sumbatan pada jarak 1,4 meter, *wavelet coefficient* tertinggi terjadi pada mikrofon 4 sebesar 0,176 sesuai dengan bentuk sumbatan yang diberikan berada dasar pipa.

## KESIMPULAN

Refleksi akustik (*acoustic reflection*) terjadi sebagai akibat dari adanya kerusakan dalam bentuk bocor dan sumbat pada pipa. Kerusakan yang diberikan berbanding lurus dengan besarnya nilai *wavelet coefficient*.

Pengidentifikasi posisi dilakukan dengan metode *Wavelet Transform* yang menghubungkan dengan cepat rambat udara. Tingkat kerusakan dalam bentuk bocor dan sumbat yang diberikan memiliki karakteristik masing-masing dan letak kerusakan berbanding lurus terhadap *wavelet coefficient*.

Pendeteksian letak kerusakan pipa di berbagai posisi kerusakan dapat dicari dengan membandingkan *wavelet coefficient* dari keempat mikrofon dan mendeteksi kerusakan lebih dari satu dengan cara memperhatikan sinyal domain waktu dari kerusakan yang terjadi pada selubung pipa.

## DAFTAR PUSTAKA

Adnan, F, Fairusham G. M, 2014, “*Leak Detection in Gas Pipeline by Acoustic and Signal Processing*” IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 100

Caraka, Rezzy Eko. 2016. “*Threshold (DWT) Wavelet Decomposition Object.*” Departemen Statistik, FMIPA, Universitas Diponegoro.

F. Huda, I. Kajiwarra, N. Hosoya. (2014),” Damage Detection in Membrane Structures Using Non-contact Laser Excitation and Wavelet Transformation”. *Journal of Sound and Vibration. Vol. 333: 3609-3624*

- Hanggarsari Prativi Nugraheni, Helmy Fitriawan, Yetti Yuniati. 2012. "Simulasi Sistem Pengacakan Sinyal Suara Secara Realtime Berbasis *Fast Fourier Transform* (FFT)." *Electrical Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, Vol. 6 No. 3.
- Hariadi. (2019). "Deteksi Kerusakan Pipa Dalam Bentuk Kebocoran Dan Sumbatan Menggunakan Sinyal Suara Dan Dual Mikrofon" [Skripsi]. Pekanbaru (ID): Universitas Riau
- Huda, F., A. Anggriawan, M. Rusli. (2019), "The Using of Sound Signal and Simple Microphone to Detect Damages in Induction Motor", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 539(1): 012034.
- Kajiwara, I., et al. (2018). "Damage Detection in Pipes Based on Acoustic Excitations Using Laser-Induce Plasma." *Mechanical Systems and Signal Processing* 111 (0): 570-579.
- Kurniawan, Iwan. 2012. Diktat Pengolahan Sinyal-UTS. Politeknik Jambi.
- Sadeghioon Ali M., Nicole Metje, dkk, 2014, "SmartPipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines", *J. Sens. Actuator Netw.* 2014, 3, 64-78.
- Satria, Riedho Tilma. 2018. "Deteksi Kebocoran Dan Sumbatan Pada Jaringan Pipa Menggunakan Sinyal Suara" [Skripsi]. Pekanbaru (ID): Universitas Riau
- Silalahi, Imanuel, dkk. 2010. "Analisa MultiWavelet Untuk Kompresi Suara." *Electrical Engineering Journal* ISSN 1979-2867 Vol. 1 No. 1.