

**STUDI KARAKTERISTIK
PENJALARAN GELOMBANG TEGANGAN (*STRESS WAVE*) BERUPA
EMISI AKUSTIK (*ACOUSTIC EMISSION, AE*)
PADA STRUKTUR ALAT PENUKAR KALOR**

Wahyu Nirbito^{1,a,*}, Anggita Dwi Liestyosiwi^{1,b}

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Indonesia

^awahyu.nirbito@ui.ac.id, ^banggitadwisiwi@gmail.com

ABSTRAK

Kajian ekeperimental telah dilakukan untuk mengetahui karaktersitik penjalaran gelombang tegangan berupa emisi akustik (*Acoustic Emission, AE*) pada struktur alat penukar kalor. Eksperimen dilakukan menggunakan dua buah sensor, yaitu yang terletak sejajar dengan aktuator dan secara diagonal dengan aktuator. Terjadi perbedaan hasil pada pendeteksian fungsi sinus dan fungsi *triangle* dari kedua sensor. Namun hasil yang sama didapatkan pada fungsi penjalaran *square*, yaitu pada 1 Hz. *Sampling rate* pengukuran yang dibutuhkan untuk mendeteksi AE adalah 200 MS/s. Terjadi perbedaan hasil antara sensor1 dan sensor2 pada setiap parameter karakterisasi yang diprediksi diakibatkan struktur dari medium penjalaran yang berbeda, yaitu pada sensor1 hanya menjalara pada *heat exchanger casing* dan pada sensor2 harus melewati *baffle* dan *heat exchanger tube*.

Kata kunci : Penjalaran Gelombang, Emisi Akustik, Pengurangan Amplitudo, Waktu Penjalaran, Alat Penukar Kalor.

Pendahuluan

Dalam menjalankan produksi, kondisi performa mesin harus selalu dijaga baik. Untuk itu dibutuhkan pemantauan mesin yang optimal. Berbagai macam jenis pemantauan kondisi mesin telah dikembangkan, diantaranya adalah dengan analisis partikel pelumas, sinar inframerah, gelombang ultrasonik, dan analisis getaran. Dari beberapa metode yang dikembangkan, pemantauan kondisi mesin dengan metode analisis getaran adalah yang paling populer dan paling handal saat ini. Namun, pengukuran getaran mesin juga masih memiliki beberapa kekurangan, salah satu contohnya adalah getaran yang terukur adalah getaran mesin yang telah rusak secara makro, sehingga seringkali analisis getaran menjadi terlambat, walaupun sebagai

dasar diagnosa kerusakan mesin cukup representatif.

Ada tiga jenis sistem pemeliharaan berdasarkan waktu pemeliharannya, yaitu *breakdown maintenance*, pemeliharaan preventif, dan pemeliharaan prediktif. Pada system pemeliharaan mesin yang tingkatannya lebih tinggi dari preventif (pemeliharaan prediktif), dibutuhkan kemampuan untuk memprediksi kerusakan sebelum kerusakan itu terjadi. Teknik memprediksi kerusakan dini dini pada elemen yang dinamis melalui deteksi gelombang tegangan telah dikembangkan [1,2,3,4,5]. Gelombang tegangan ini menjalar dari dilepaskannya energi dalam struktur material

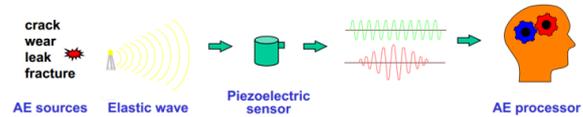
elemen mesin akibat terjadinya diintegrasikan molekuler atau mikroskopik sebagai cikal bakal timbulnya kerusakan. Gelombang tegangan ini menjalar sebagai emisi akustik (*Acoustic Emission = AE*). Dengan dapat dideteksinya *AE* ini, maka dapat diprediksi terjadinya kerusakan dini jauh sebelum terjadi kerusakan fisik bahkan sebelum terjadinya retakan awal kelelahan (*fatigue initial crack*). Pada penelitian sebelumnya [17] telah diteliti penentuan *threshold*, lokasi, serta kiaran frekuensi *AE* yang dapat terukur pada suatu plat datar tebal. Sedangkan penelitian ini ditujukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik dari gelombang yang ditangkap pada struktur mesin (alat penukar kalor) dengan komponen yang kompleks sehingga dapat menjawab berbagai tantangan yang dipaparkan diatas khususnya karakteristik pengurangan amplitudo dan karakteristik waktu penjaran

Landasan Teori

1. Gelombang Emisi Akustik (*Acoustic Emission/AE*).

Menurut [20], definisi gelombang emisi akustik dari aspek penjaran adalah fenomena gelombang elastik transien yang dibangkitkan oleh pelepasan energi yang sangat cepat dari suatu lokasi tertentu pada material atau dari gelombang elastik transien lain yang telah terbangkitkan. Sedangkan, menurut [13] gelombang emisi akustik adalah suatu fenomena penjaran gelombang tegangan ke segala arah yang disebabkan oleh rekonstruksi dinamik struktur material yang menyertai proses deformasi dan kerusakan. Gelombang tegangan dibangkitkan ketika laju dari suatu tegangan yang bekerja pada suatu daerah struktur mikroskopik yang berubah secara lokal sedemikian rupa sehingga tegangan tersebut tidak dapat ditransmisikan secara cepat ke daerah lain pada material [11]. Gelombang emisi akustik merupakan salah satu metode *non-destructive test (NDT)* yang bersifat pasif, karena hanya dapat mendeteksi gelombang elastik pada saat terjadi deformasi. Emisi ini dapat terdeteksi pada material, struktur, maupun kejadian alam lainnya, contohnya pada peristiwa seismik atau dislokasi pada struktur atom [Miller and Mc

intire,1987]. Dalam penjarannya, termodulasi pada frekuensi tinggi, umumnya diatas 100 KHz – 1MHz. Namun, nilai frekuensi ini tergantung pada ketebalan dan kerapatan material yang dilaluinya [16]. Prinsip deteksi gelombang *AE* ditunjukkan pada Gambar dibawah ini [13].



Gambar 1. Skematik Proses Pengolahan *AE*

Dari suatu sumber *AE* menjalar gelombang elastik, kemudian ditangkap oleh sensor piezoelektrik dan menjadi sinyal yang terbaca pada alat akuisisi, kemudian dilakukan pemrosesan pada sinyal ini untuk mendeteksi darimana sumber *AE* tersebut dan seberapa besar ukurannya [15].

2. Penjaran Gelombang.

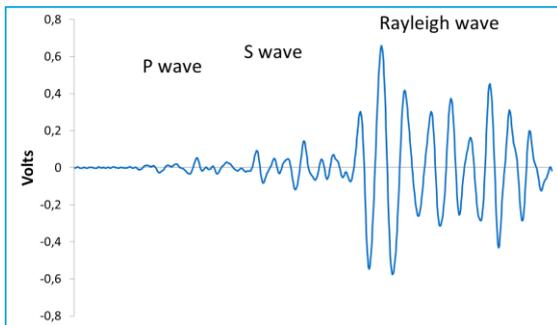
Jenis gelombang *AE* yang dihasilkan bergantung pada sifat yang dimiliki oleh material, nilai tegangan dan perilaku mekanis. Gelombang *AE* dapat berupa :

- Gelombang elastik.
- Gelombang elastik non-linear.
- Gelombang plastik-elastik.
- Gelombang elastik-viskoplastik

Namun, gelombang *AE* lebih banyak terdeteksi dalam bentuk gelombang elastik. Gelombang *AE* merupakan gelombang tegangan (*stress wave*). Sinyalnya yang tertangkap berupa respon dari sensor transduser terhadap gelombang seperti gelombang suara yang menjalar pada medium pejal (*solid*). Respon *AE* dipengaruhi oleh energi yang hilang sepanjang penjaran pada medium [5].

Setiap bentuk penjaran gelombang memiliki kecepatan penjaran yang berbeda-beda. Umumnya, hanya 3 gelombang elastik yang digunakan untuk analisis, yaitu gelombang P, gelombang S, dan gelombang *Rayleigh*. Gelombang P dan S mewakili gelombang yang terjadi dalam badan material, sedangkan gelombang *Rayleigh* merepresentasikan gelombang yang terjadi pada permukaan material. Ketiga gelombang ini memiliki kecepatan yang berbeda-beda. Gelombang P

adalah gelombang yang memiliki kecepatan penjalaran yang paling cepat, diikuti gelombang S dan gelombang *Rayleigh*. Namun, perbedaan tidak terlalu jauh antara kecepatan gelombang S dan gelombang *Rayleigh* sehingga sulit dibedakan saat pembacaan sinyal. Gelombang *Rayleigh* membawa 67% dari energi total penjalaran, diikuti dengan gelombang S 26% dan gelombang P 7%. Sehingga dapat dikatakan gelombang *Rayleigh* mendominasi penjalaran gelombang.

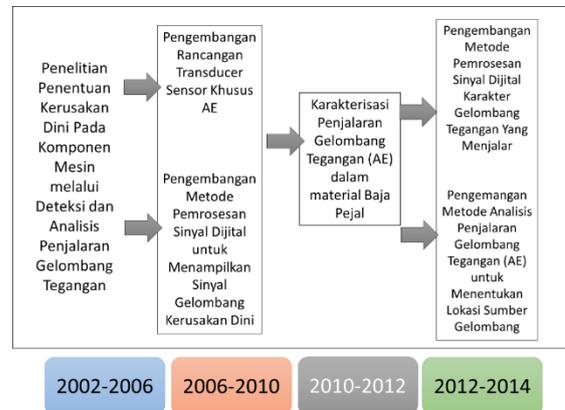


Gambar 2. Gelombang Elastik

3. Perkembangan Aplikasi AE

Gelombang AE telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Diantaranya adalah dalam mengembangkan teknik monitoring konstruksi sipil, seperti jembatan dan konstruksi beton. Selain itu dalam mengembangkan teknik monitoring kondisi bantalan dengan memanfaatkan gelombang emisi akustik, dan monitoring kondisi mesin induksi. Dari penelitian sebelumnya, telah dikembangkan suatu sensor berbasis material *piezoceramic* PZT yang disertai teknik penyaringan sinyal dengan metode *Blind Deconvolution*. Dan telah diketahui bahwa frekuensi gelombang emisi akustik yang ditangkap (frekuensi kerusakan dini) adalah frekuensi yang sama dengan frekuensi kerusakan makro bantalan. Studi karakterisasi penjalaran gelombang AE pada plat datar tebal juga telah dilakukan. Penelitian ini adalah kelanjutan dari studi karakterisasi penjalaran gelombang AE pada plat datar tebal dan penelitian-penelitian sebelumnya

seperti yang digambarkan pada gambar berikut



Gambar 3. Pengembangan dan Aplikasi AE

4. Getaran Yang Dibangkitkan Oleh Aliran Fluida Dalam Alat Penukar Kalor.

Penyebab getaran dari beberapa sistem diakibatkan oleh interaksi dari sejumlah gaya eksitasi dengan struktur yang elastik. Dalam kasus *flow induced vibration* pada alat penukar kalor, gaya eksitasi berasal dari aliran fluida dalam sisi *shell*, dan sistem elastik adalah dari *tube bundle* [12]. Gaya-gaya eksitasi berfluktuasi pada frekuensi karakteristik yang meningkat secara kontinyu dengan meningkatnya laju aliran. Gaya-gaya eksitasi pada *shell* dan *heat exchanger tubes* diantaranya diakibatkan oleh *fluid elastic instability*, *vortex shedding*, *acoustic resonance*, dan *turbulence buffeting*. Namun, sumber utama dari *flow induced vibration* adalah adanya aliran silang di sisi luar *tube*. Parameter penyebab getaran pada *tube* adalah [12] :

- Frekuensi alamiah dari *tubes*.
- Frekuensi akustik dari *shell*.
- Kecepatan aliran : kecepatan silang dan kecepatan aliran silang di jendela.

Metode Penelitian

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan keping material piezoelektrik sebagai aktuator dan sensor. Objek yang diuji adalah alat penukar kalor tipe *shell and tube*. Setup eksperimen dapat digambarkan pada diagram dibawah ini.



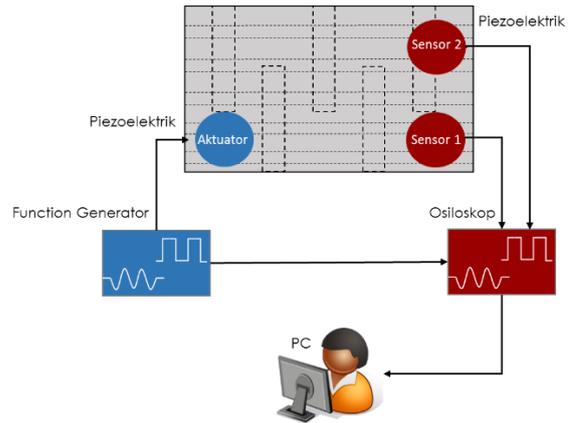
Gambar 4. Skematik Penelitian AE

Eksperimen dilakukan sebagaimana digambarkan pada gambar 4. Alat *Function Generator* membangkitkan sinyal listrik yang kemudian diubah menjadi gelombang gerak mekanik oleh piezoelektrik aktuator. Sinyal ini juga dikirim ke osiloskop untuk diakuisisi. Kemudian gerak gelombang ini menjalar dalam struktur alat *heat exchanger* sebelum akhirnya juga ikut menggerakkan keping piezoelektrik dari sensor. Sensor Piezoelektrik kemudian mengubah gerak mekanik menjadi sinyal listrik untuk ditangkap oleh osiloskop dan diakuisisi. Osiloskop mengakuisisi dan menampilkan diagram kedua sinyal yang diterimanya (dari *function generator* dan dari sensor piezoelektrik). Data sinyal ini kemudian dipindahkan ke PC dengan koneksi USB, kemudian disimpan dalam sebagai data mentah (berupa gambar, data seting, dan file dengan format .csv).

Variabel-variabel yang digunakan pada eksperimen ini adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Variabel Penelitian

Variabel Tetap	Variabel Bebas				Variabel Kontrol
	Fungsi Sinyal	Frekuensi Sinyal	Sampling Rate	Amplitudo	
Setup Amplitudo Function Generator	Sinus	1 Hz	100 S/s	1	Kondisi Ruang
	Square	10 Hz	1 KS/s	2	
	Triangle	100 Hz	10 KS/s	3	
		1 KHz	100 KS/s	4	
		10 KHz	1 MS/s	5	
		100 KHz	10 MS/s	6	
		1 MHz	25 MS/s	7	
			50 MS/s	8	
			100 MS/s	9	
			250 MS/s	10	
			500 MS/s	11	
			1 GS/s	12	



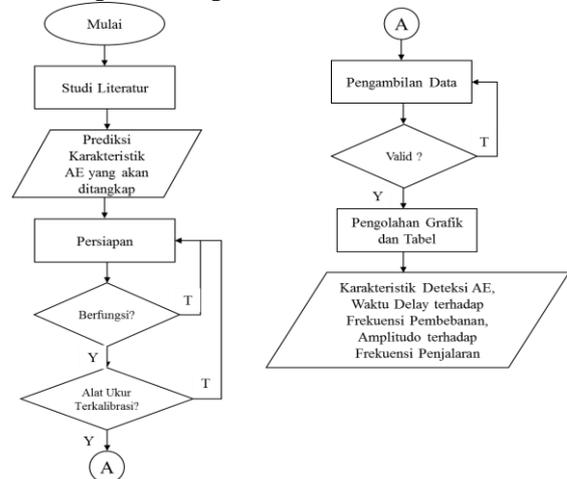
Gambar 5. Set Up Penelitian.

Pengolahan Data

1. Pengumpulan Data Penelitian
Data data penelitian dikumpulkan melalui tahapan penelitian yang ditunjukkan pada gambar 6.
2. Hasil pengolahan data.

Pengolahan data yang dilakukan berupa pengolahan data mentah menjadi :

- Tabel hubungan antara fungsi sinyal penjalaran dengan *sampling rate* untuk mengetahui pada frekuensi sinyal penjalaran aktuator dan *sampling rate* berapa AE dapat dideteksi.



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

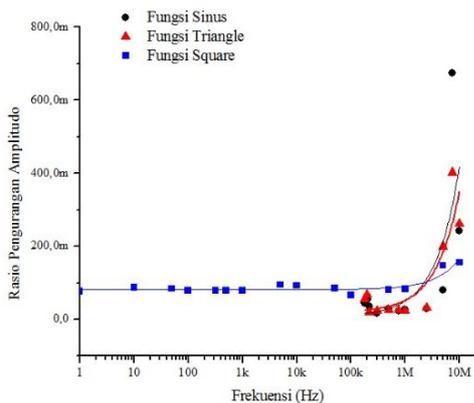
- Tabel dan grafik hubungan antara frekuensi sinyal penjalaran dengan rasio amplitudo sinyal yang ditangkap dan sinyal yang dibangkitkan pada tiap fungsi sinyal yang diberikan dengan amplitudo 1 dan 10. Hal ini ditunjukkan untuk mengetahui karakteristik pengurangan amplitudo terhadap frekuensi dan fungsi sinyal penjalaran aktuator .

- Tabel dan grafik hubungan antara deteksi frekuensi sinyal AE yang menjalar dengan waktu tunda (*delay time*) antara sinyal yang ditangkap dengan sinyal penjalaran dari aktuator.
- Tabel dan grafik hubungan antara amplitudo gelombang dari aktuator dengan amplitudo gelombang yang tertangkap sensor pada satu frekuensi yang menyebabkan AE terdeteksi. Data ini diambil dari dua sensor yaitu sensor yang terletak sejajar maupun sensor yang terletak diagonal terhadap piezo aktuator. Sehingga dapat dibandingkan perbedaan antara keduanya.

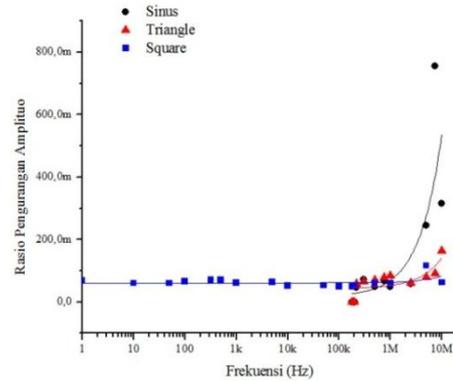
Pembahasan

1. Rasio Amplitudo

Gambar dibawah ini menjelaskan bagaimana hubungan antara frekuensi penjalaran terhadap rasio amplitudo sinyal yang ditangkap dengan yang dibangkitkan pada masing-masing fungsi penjalaran. Terjadi fluktuasi pada beberapa beberapa fungsi penjalaran. Ini diperkirakan terjadi akibat dari resonansi pelat pada rentang frekuensi tertentu.



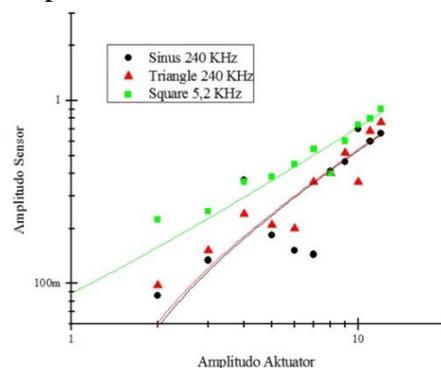
Gambar 7. Rasio Pengurangan Amplitudo Pada Sensor 1



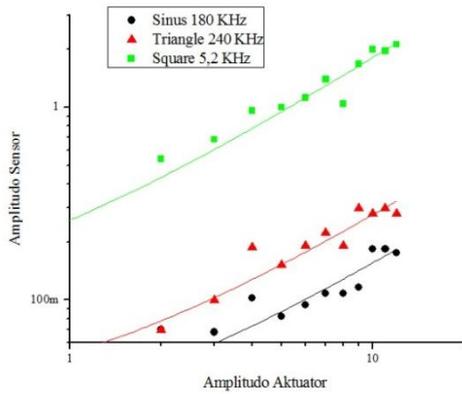
Gambar 8. Rasio Pengurangan Amplitudo Pada Sensor 2

Dapat dilihat bahwa pada sensor1 terjadi fluktuasi pada fungsi penjalaran gelombang sinus dan *triangle*. Namun pada sensor2 tidak terjadi fluktuasi. Dari kedua grafik ini, nilai yang cenderung stabil terjadi pada fungsi penjalaran gelombang *square*. Nilai rasio pada sensor1 lebih besar jika dibandingkan dengan sensor2, ini dikarenakan perbedaan struktur medium perambatan pada kedua sensor. Pada sensor1, gelombang merambat pada *casing* dari Heat Echanger, sedangkan pada sensor2, gelombang merambat pada *baffle* dan *tubes* dari Heat Exchanger sehingga dimungkinkan terjadi penyerapan gelombang dan pemantulan gelombang.

Dari gambar berikut dapat terlihat bahwa pada suatu frekuensi tertentu, besar amplitudo yang ditangkap sensor adalah proporsional terhadap besar amplitudo sinyal aktuator, sehingga pengurangan amplitudo adalah konstan terhadap besar amplitudo sinyal aktuator pada



Gambar 9. Karakteristik Amplitudo yang Ditangkap Sensor terhadap Amplitudo Sinyal Aktuator Pada Sensor1

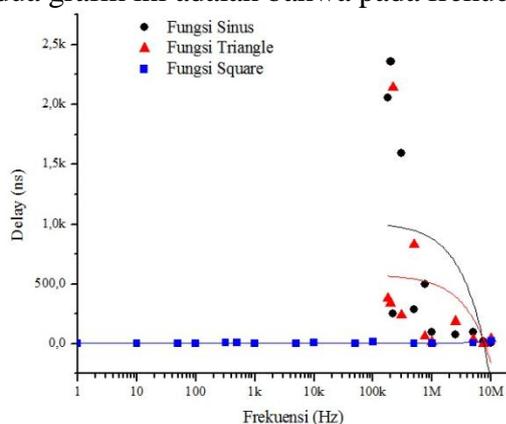


Gambar 10. Karakteristik Amplitudo yang Ditangkap Sensor terhadap Amplitudo Sinyal Aktuator Pada Sensor2

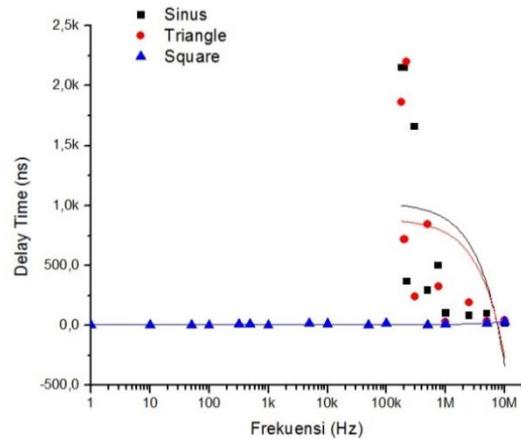
sensor1. Namun, itu tidak berlaku pada sensor2, ini diakibatkan dari medium yang dilalui oleh gelombang ke sensor2 merupakan struktur yang kompleks sehingga terjadi banyak pemantulan gelombang didalamnya. Walaupun demikian, nilai yang hampir sama di kedua sensor terjadi pada fungsi penjarangan gelombang *square*. Karakteristik ini memudahkan dalam aspek praktis yaitu pada saat mengestimasi besar energi sumber *AE* yang dapat dijadikan salah satu metode dalam menentukan sumber *AE*.

2. Waktu Tunda (Delay Time)

Dapat dilihat dari gambar berikutnya bahwa pada kedua sensor ternyata waktu penjarangan memiliki karakteristik yang tidak sama, walaupun dengan kisaran rentang frekuensi tertentu yang konstan. Hal yang menarik dari kedua grafik ini adalah bahwa pada frekuensi



Gambar 11. Hubungan Waktu Penjarangan terhadap Frekuensi pada Sensor1



Gambar 12. Hubungan Waktu Penjarangan terhadap Frekuensi pada Sensor2

diatas 100 kHz bentuk grafik *delay time* pada ketiga sensor adalah sama. Dan dari kedua grafik ini dapat disimpulkan bahwa fungsi penjarangan gelombang *square* memiliki waktu tunda yang cenderung stabil sepanjang rentang frekuensinya. Penyebab terjadinya fluktuasi pada waktu penjarangan adalah ketidakstabilan sinyal penjarangan. Penurunan *delay time* pada frekuensi tinggi diakibatkan terjadinya kenaikan kecepatan transmisi dari molekul-molekul material karena energi dari penjarangan yang diterima, langsung diteruskan tanpa diserap secara bermakna terlebih dahulu.

Kesimpulan

1. Dibutuhkan *sampling rate* yang tinggi untuk dapat mendeteksi gelombang *AE*.
2. Pada penjarangan gelombang *AE* melalui casing dari *Heat Exchanger*, gelombang *AE* baru dapat dideteksi oleh sensor1 pada frekuensi sumber penjarangan 180 KHz dengan sumber penjarangan fungsi gelombang sinus dan *triangle*, sedangkan untuk sumber penjarangan fungsi gelombang *square*, gelombang *AE* sudah dapat dideteksi dari frekuensi 1 Hz.
3. Pada penjarangan gelombang *AE* melalui *baffle* dan *tubes* dari *Heat Exchanger*, gelombang *AE* baru dapat dideteksi oleh sensor2 pada frekuensi sumber penjarangan

220 kHz dengan sumber penjalaran fungsi gelombang sinus dan *triangle*, sedangkan untuk sumber penjalaran fungsi gelombang *square*, gelombang *AE* sudah dapat dideteksi dari frekuensi 1 Hz.

4. Karakteristik atenuasi amplitudo sensor1 dan sensor2 tidak linear terhadap fungsi gelombang penjalaran. Hal ini dikarenakan terjadinya resonansi dalam rentang frekuensi tertentu.
5. Karakteristik pengurangan amplitudo pada sensor1 dan sensor2 tidak sama. Ini adalah akibat dari struktur mesin yang berbeda dimana stuktur mesin yang dijalar gelombang *AE* ke sensor2 lebih kompleks sehingga penjalarannya terhambat.
6. Waktu penjalaran gelombang ternyata tidak linear terhadap frekuensi gelombang sumber penjalaran, namun mempunyai kecenderungan semakin kecil pada frekuensi gelombang yang semakin tinggi. Hal ini sebagai akibat dari adanya kenaikan kecepatan transmisi molekuler energi yang langsung ditransmisikan tanpa diserap secara bermakna terlebih dahulu.
7. Waktu penjalaran gelombang ke sensor2 lebih rendah dibandingkan waktu penjalaran gelombang ke sensor1. Ini adalah akibat karena jalur media penjalaran gelombang untuk sensor2 lebih kompleks dibandingkan dengan media yang ke sensor1.

Daftar Pustaka

- [1] Less, A.W., dan Z. Quiney. "The Use of Acoustic Emission for Bearing Condition Monitoring". *J. Physics* (2011):1 – 10.
- [2] Masmoudi, Sahir., Mahi, Abderrahim El., Turki Said., dan Guerjouma, Rachid El. "Mechanical Behavior and Health Monitoring by Acoustic Emission of Unidirectional and Cross-Ply Laminates Intergrated by Piezoeletric Implant". *J. Applied Acoustics* 86 (2014) : 118-125.
- [3] Al-Balushi K. R., et all "Energy Index Technique for Detection Of Acoustic Emissions Associated with Incipient Bearing Failures" *J. Applied Acoustics* 71 (2010) : 812-821.
- [4] Mostafapuor, A., dan Davoudi S. "Analysis of Leakage in High Pressure Pipe Using Acoustic Emission Method" *J. Applied Acoustics* 74 (2013) : 335-342.
- [5] Kagayama, Koji., Yonezu, Akio., Cho, Hideo., Ogawa, Takeshi., dan Takemoto, Mikio., "Acoustic Emission For Fatigue Damage Detection of Stainless Steel Bellows". *J. Applied Acoustics* 23 (2005) : 227-284.
- [6] Tandon, N. dan A. Choudhury. "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the detection of Defects in Rolling Element Bearings". *J. Tribology International* 32 (1999) : 469-480 .
- [7] Anastasopoulos, Athanasios., Kourousis, Dimitrios., dan BOLLAS, Konstantinos. "Acoustic Emission Leak Detection of Liquid Filled Buried Pipeline". *J. Applied Acoustic* 27 (2009) : 27-39.
- [8] W.L, Li. *Foundation of Stress Waves*. Elsevier, 2007.
- [9] Szuladzinki, G. *Formula for Mechanical and Structural Shock and Impact*. CRC Press, 2010.
- [10] Schubert, Frank. "Basic Principle of Acoustic Emission Tomography". *J. Acoustic Emission* 22 (2004) : 147-152.
- [11] Muravin, Boris. "Acoustic Emission Wave Propagation and Source Location". Presentasi. 2008
- [12] Putra, Nandy Setiadi Djaya. "Getaran yang Dibangkitkan oleh Aliran Fluida dalam Alat Penukar Kalor Shell & Tube". Presentasi. 2011
- [13] D.J. Yoon. "Fundamental of Acoustic Emission". 1st Asia Pasific Student Summer School on Smart Structures Technology. 2008
- [14] Zakiah A. Halim., Jamaludin, Nordin., Junaidi, Syarief., dan Syed Yahya, Yusainee. "Pattern Recognition Approach of Stress Wave Propagation in Carbon Steel Tubes for Defect Detection". *International Journal of Computer Theory and Engineering*. Vol 7, no. 2. April 2015
- [15] Kaphle, Manindra., dan Tan, Andy. "Source Location of Acoustic Emission Waves for Structural Health Monitoring of Bridges". QUT Digital Repository. 2009
- [16] Marfo, A., Chen, Z. dan LI. J. "Acoustic Emission Analysis of Fatigue Crack

Growth in Steel Structures”. Journal of Civil Engineering and Construction Technology. 2013.

[17] Pratama, Raka Cahya. “Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tegangan (Stress Wave) Berupa Emisi Akustik (Acoustic Emission, AE) Untuk Penentuan Metode Prediksi Lokasi Sumber Emisi Pada Material Kaku (Solid) Baja Tahan Karat (Stainless Steel SS 304)”. Skripsi. 2012

[18] Nirbito, Wahyu. “Penentuan Kerusakan Dini pada Elemen Mesin Dinamis Bantalan Gelinding Melalui Deteksi Sinyal Penjalaran Gelombang Tegangan Frekuensi Tinggi”. Tesis. 2011.

[19] Ellyin, Fernand. “A Strain Energy Based Criterion for Multiaxial Fatigue Failure”. Jurnal. 2014.