

Analisis Kerusakan Bantalan Gelinding Dengan Variasi Kecepatan Putar Berdasarkan Pola Getaran Menggunakan Metoda *Envelope Analysis*

*Radhi Maladzi¹, Toni Prahasto², dan Achmad Widodo²

¹Mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: radhimaladzi@gmail.com

Abstrak

Bantalan gelinding merupakan salah satu elemen mesin yang memiliki peran penting pada mesin di mana memiliki fungsi untuk mengurangi besarnya gaya gesek yang ditimbulkan oleh poros saat berputar. Sehingga kegagalannya menjadi alasan yang paling umum untuk mesin mengalami kerusakan. Jenis kerusakan yang terjadi pada bantalan gelinding meliputi, kerusakan lintasan luar, kerusakan lintasan dalam, kerusakan elemen gelinding, dan kerusakan kombinasi. Pada makalah ini, deteksi kerusakan bantalan gelinding bagian lintasan luar, lintasan dalam, elemen gelinding, atau juga kerusakan kombinasi akan dikaji berdasarkan sinyal getaran. Namun sinyal getaran yang dihasilkan merupakan sinyal modulasi, oleh karena itu diperlukan metoda Analisis envelope untuk mengekstrak informasi dari sinyal modulasi. Analisis sinyal getaran domain frekuensi setelah dilakukannya Analisis envelope menjadi dasar utama. Pola-pola sinyal hasil getaran dianalisis melalui plot fitur sinyal getaran, kemudian dibandingkan antara kondisi bantalan gelinding normal dan bantalan gelinding yang mengalami kerusakan sebagaimana disebutkan di atas. Dengan cara perbandingan fitur sinyal getaran tersebut, maka deteksi kerusakan bantalan gelinding dapat dilakukan.

Kata kunci: Bantalan gelinding, deteksi kerusakan, envelope, getaran, modulasi

Abstract

Rolling bearing is one of machine elements which is have an important role in the engine especially rotating engine. The function of rolling element bearing is to reduce the magnitude of the frictional forces generated by the rotating shaft. So that failure is most common reason for engine damaged. The failures that occurred in rolling element bearing are the fault in inner race, outer race, rolling element and the combination fault. In this paper, the detection of fault to rolling bearings outer race, inner race, the rolling elements, or also combination will be assessed based on of the vibration signal. However, the resulting vibration signal is a signal modulation, therefore it's necessary to have envelope analysis method to extract information from the modulated signal. Frequency domain analysis of vibration signals following an envelope analysis was fundamental. The envelope analysis frequency domain will become the main topic. The patterns of vibration signal will be analyze by it's feature, then normal rolling bearing and fault rolling bearing will be compared. With these vibration signal's feature comparison, fault detection in rolling bearing can be done.

Keywords: Envelope, fault detection, modulation, rolling bearing, vibration.

1. Pendahuluan

Bantalan gelinding atau bisa disebut dengan *rolling element bearing* merupakan salah satu komponen yang sering digunakan pada mesin yang fungsinya untuk mengurangi besarnya gaya gesek yang ditimbulkan oleh poros yang berputar. Sehingga kerusakannya menjadi alasan yang paling umum untuk mesin *breakdown*. Kerusakan yang terjadi di dalam bantalan gelinding bisa disebabkan oleh beberapa hal salah satunya adalah karena adanya beban *impact* yang berlebihan pada arah radial. Sehingga menimbulkan *crack* pada bagian lintasan dalam atau lintasan luar sebuah bantalan gelinding. Apabila kerusakan pada bantalan gelinding tidak terdeteksi pada tahap awal kerusakan bantalan, dan dibiarkan saja maka besar kemungkinan akan terjadi kerusakan fatal pada mesin dan akan membutuhkan biaya yang cukup besar untuk melakukan perbaikan pada mesin[1]. Di mana tahapan – tahapannya adalah *bandpass filter*, lalu dilakukan rektifikasi dan yang terakhir mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi untuk melihat bentuk sinyal yang baru agar lebih mudah mendapatkan informasi-informasi yang diinginkan[2].

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk membandingkan sinyal getaran dalam kondisi normal dengan kondisi kerusakan, membandingkan sinyal getaran pada bantalan gelinding sebelum dan setelah dilakukannya *envelope analysis*, dan mengetahui perbandingan sinyal gaya yang terjadi pada berbagai macam kondisi bantalan gelinding.

2. Bahan dan Metode Penelitian

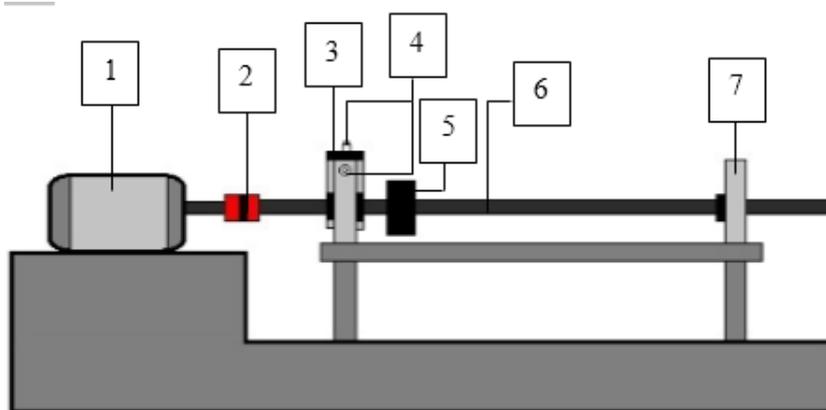
Kerusakan bantalan yang terletak pada bagian *innerace*, *outerace*, *ball*, atau pada bagian *cage*-nya akan menghasilkan rangkaian gaya impact secara periodik di mana lajunya tergantung dari geometri bantalannya. Dari gaya-gaya impact tersebut akan menciptakan frekuensi kerusakan pada bantalan gelinding yang disebut sebagai *bearing fundamental frequency*. Untuk menghitung *bearing fundamental frequency* diperlukan data-data geometri dari bantalan tersebut dan mengikuti besarnya kecepatan rotasi dari poros yang berputar untuk penghitungannya dapat dilihat pada Tabel 1 untuk penghitungannya. Bearing frequency, bantalan terdiri dari empat komponen yang berbeda[3].

Tabel 1. *Bearing Fundamental Frequency*

Nama Frekuensi	Jenis Kerusakan	Rumus Penghitungan
<i>Ball Pass Frequency Outer</i>	Kerusakan pada lintasan luar	$BPF_{O} = \frac{N_b}{2} S \left(1 - \frac{B_d \cos \theta}{dp} \right) \dots \dots \dots (1)$
<i>Ball Pass Frequency Inner</i>	Kerusakan pada lintasan dalam	$BPF_{I} = \frac{N_b}{2} S \left(1 + \frac{B_d \cos \theta}{dp} \right) \dots \dots \dots (2)$
<i>Ball Spin Frequency</i>	Kerusakan pada elemen gelinding	$BSF = \frac{dp}{2B_d} S \left(1 - \frac{B_d^2 \cos^2 \theta}{dp^2} \right) \dots \dots \dots (3)$
<i>Fundamental Train Frequency</i>	Kerusakan yang terjadi pada <i>cage</i> .	$FTF = \frac{1}{2} S \left(1 - \frac{B_d \cos \theta}{dp} \right) \dots \dots \dots (4)$

Sumber: [4]

Envelope analysis adalah salah satu teknik untuk mengekstrak sinyal modulasi dari sebuah amplitudo sinyal yang termodulasi oleh karena itu teknik ini disebut juga *amplitude demodulation*. Metoda ini sering digunakan juga untuk mendeteksi kerusakan-kerusakan pada mesin melalui sinyal getarannya seperti roda gigi, turbin motor induksi, dan bantalan gelinding. Sinyal getaran yang ditimbulkan oleh bantalan gelinding merupakan salah satu sinyal yang termodulasi, menyebabkan dibutuhkan penyelidikan lanjutan untuk menganalisis sinyal kerusakan yang dihasilkan oleh bantalan gelinding. Envelope Analysis merupakan salah satu perangkat untuk mendemodulasikan sinyal modulasi pada bantalan gelinding[4]. Pada metoda ini dibagi menjadi 3 tahapan yaitu tahapan pertama sinyal baku (*raw signal*) dilakukan proses filter yaitu *bandpass filter* yang memiliki arti proses filter untuk melewatkan sinyal dengan batas frekuensi rendah dan batas frekuensi tinggi. Setelah itu sinyal hasil *bandpass filter* dilakukan rektifikasi yaitu pengkuadratan pada sinyal untuk menghilangkan nilai negatif dari amplitudo sinyal domain waktu. Yang terakhir dilakukan adalah perubahan domain waktu menjadi domain frekuensi yang dilakukan dengan *fast furrior transform* untuk mendapatkan informasi dari kerusakan bantalan gelinding[2].



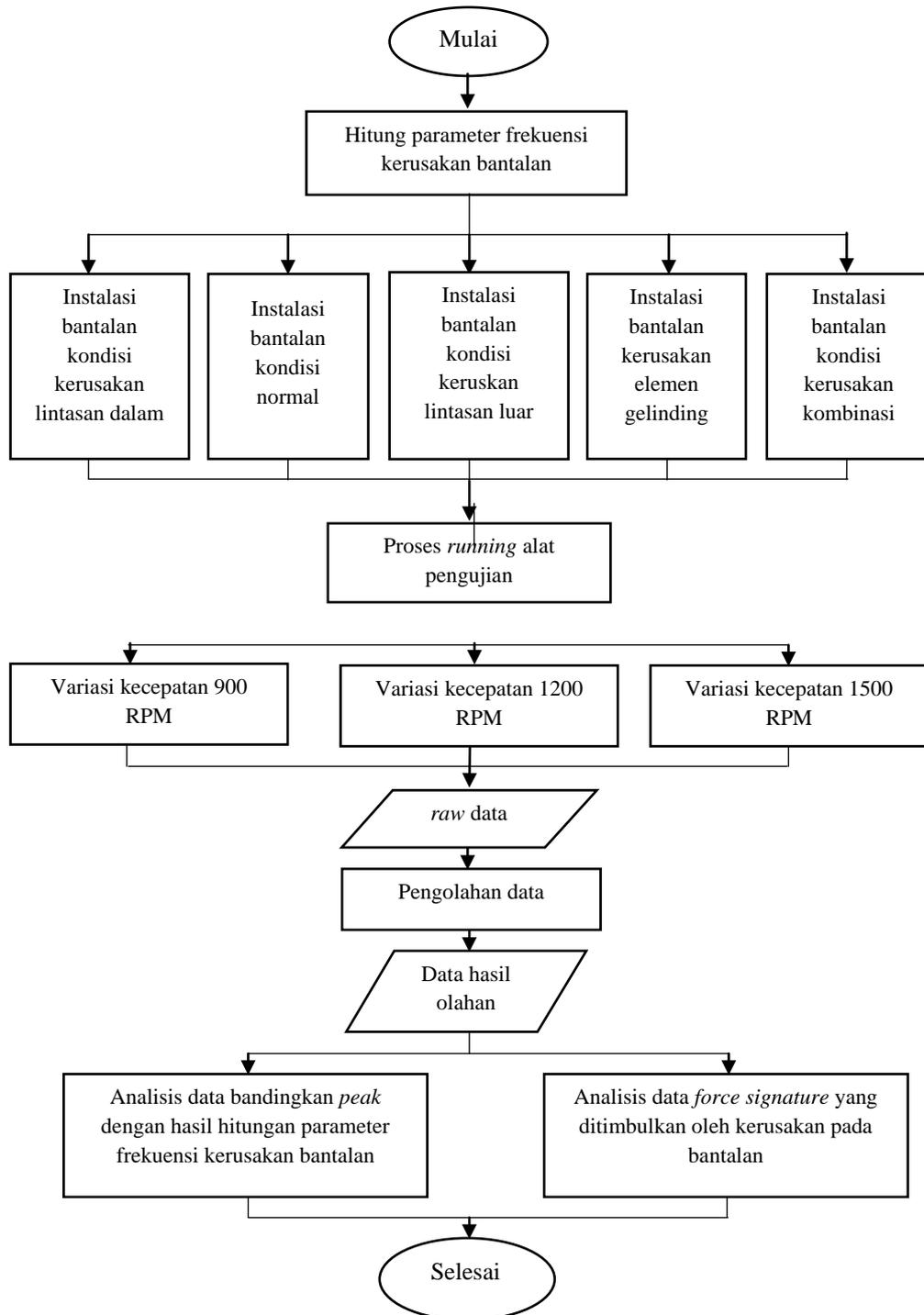
Gambar 1. Skema Pengujian *Machine Fault Simulator*

Tabel 2. Penjelasan Skema alat

No.	Nama alat	No.	Nama alat
1	Motor listrik	5	Beban (<i>loader</i>)
2	Kopling	6	Poros (<i>shaft</i>)
3	Rumah bantalan A	7	Rumah bantalan B
4	<i>Accelerometer & force transducer</i>		

Penelitian ini menggunakan 5 buah bantalan gelinding dengan spesifikasi yang sama namun dengan kondisi yang berbeda yaitu bantalan gelinding kondisi normal, kerusakan bantalan gelinding pada lintasan luar, lintasan dalam, kerusakan pada elemen gelinding, dan kerusakan kombinasi diletakan secara bergantian pada rumah bantalan A yang telah dipasang 3 buah sensor yaitu *accelerometer* dengan arah radial horizontal, *accelerometer* arah radial vertikal, dan

force transducer arah radial vertikal. Di mana pada saat motor dihidupkan dengan variasi rpm yaitu 900 rpm, 1200rpm, dan 1500 rpm ketiga buah sensor tersebut akan menangkap sinyal getaran yang dihasilkan oleh bantalan gelinding dan nantinya akan dilakukan proses data akuisisi. Setelah data akuisisi akan dilakukan proses pengolahan data untuk mendapatkan informasi yang diinginkan.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Tabel 3. Spesifikasi Bantalan gelinding

Model	: ER -16K, Rexnord
Jenis elemen gelinding	: Bola
Jumlah elemen gelinding	: 9
Diamter elemen gelinding	: 0,3125 in
Diameter luar bantalan	: 2,0472 in
Diamter dalam bantalan	: 1 in
Diamter lintasan luar	: 1,2354 in
Diamter lintasan dalam	: 1,9606 in

MFS adalah seperangkat alat yang digunakan untuk mensimulasikan serta mendiagnosa kerusakan berbagai komponen alat yang sering terjadi pada industri. MFS terdiri dari berbagai jenis komponen alat terkontrol yang dirancang agar mudah diganti ketika dilakukan berbagai jenis eksperimen kerusakan mesin. Dalam MFS terdapat beberapa alat penunjang yang berfungsi untuk memperoleh sinyal getaran saat MFS dioperasikan. Pada Gambar 3 merupakan instalasi bantalan gelinding beserta sensor-sensornya pada alat MFS.



Gambar 3. Setup Bantalan Gelding Kedalam MFS

Terdapat 5 bantalan gelinding pada Gambar 4 dan spesifikasi pada Tabel 3 dengan perbedaan kondisi yaitu kondisi normal, kondisi kerusakan lintasan dalam, kondisi kerusakan lintasan luar, kerusakan elemen gelinding, dan kerusakan kombinasi untuk diteliti bentuk sinyal yang dihasilkan dari perbedaan kondisi bantalan tersebut.



Gambar 4. Spesimen Bantalan Gelinding

3. Hasil dan Pembahasan

Berikut ini pada Tabel 4 diketahui hasil penghitungan dari *bearing fundamental frequency (BFF)* yang sudah dijelaskan diatas di mana berbeda macam jenis kerusakan akan menghasilkan frekuensi kerusakan yang berebeda.

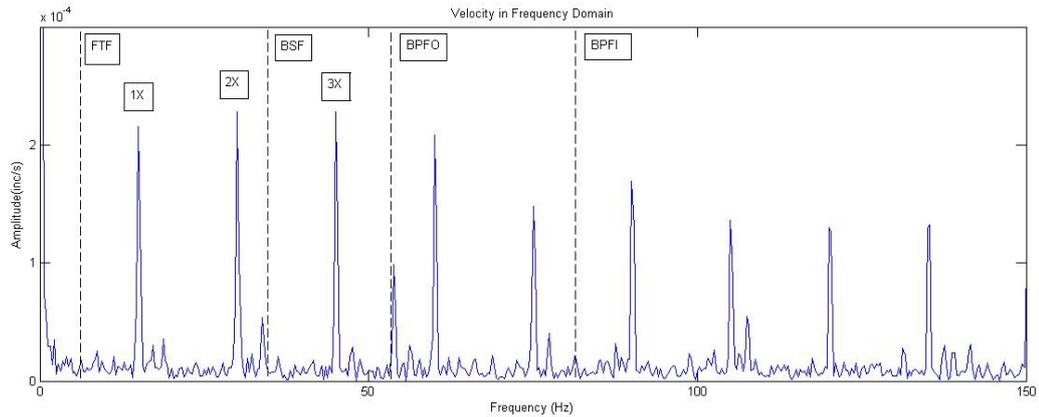
Tabel 4. Hasil Penghitungan *Bearing Fundamental Frequency*

Kecepatan	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	FTF (Hz)	BSF (Hz)
900 RPM	53,58	81,45	6,4	34,83
1200 RPM	71,44	108,6	8,04	46,44
1500 RPM	89,3	135,75	10,05	58,05

3.1 Perbandingan Sinyal Getaran Setelah dan Sebelum Dilakukannya *Envelope*

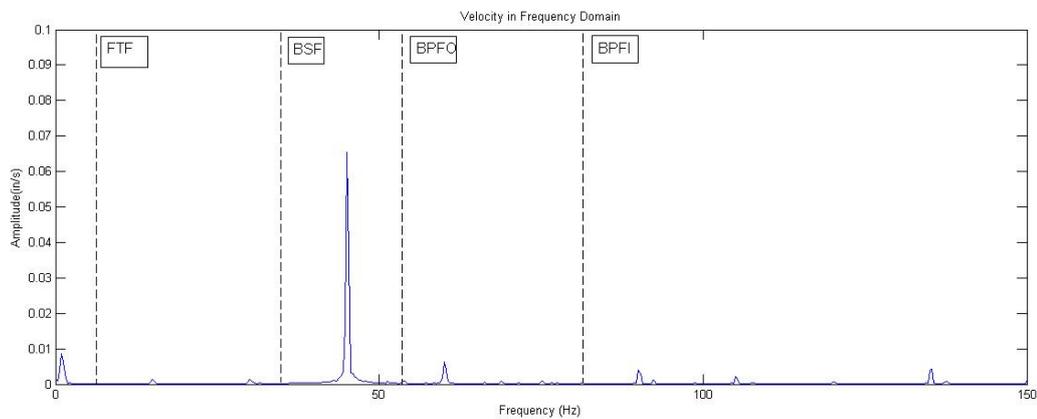
- Kondisi Normal

Setelah dilakukan pengoperasian sinyal menggunakan metoda *envelope analysis* pada Gambar 5 dapat dilihat sinyal bantalan gelinding pada kondisi normal dengan kecepatan 900 RPM



Gambar 5. Sinyal Bantalan Kondisi Normal Kecepatan 900 RPM Dengan *Envelope*

Pada kondisi normal dengan kecepatan 900 rpm, yang terdapat hanyalah *peak* yang diakibatkan dari putaran poros yaitu 15Hz dan kelipatannya pada *peak-peak* selanjutnya atau bisa disebut juga 1X,2X,3X dan seterusnya dengan memiliki amplitudo yang bervariasi. Tidak terdapatnya *peak* yang mendekati sinyal BFF menandakan tidak adanya kerusakan yang terjadi pada bantalan gelinding.

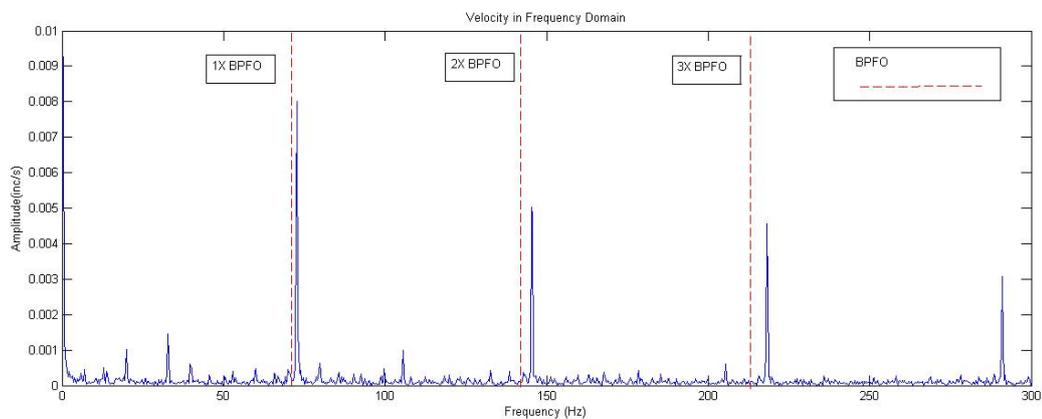


Gambar 6. Sinyal Bantalan Kondisi Normal Kecepatan 900 RPM Tanpa *Envelope*

Pada Gambar 6 diketahui hasil sinyal domain frekuensi tanpa dilakukan *envelope*, terlihat tidak ada *peak* yang mendekati frekuensi kerusakan bantalan atau BFF. Yang terlihat hanya *peak* 3X RPM yang tidak mendeskripsikan adanya kerusakan pada bantalan gelinding.

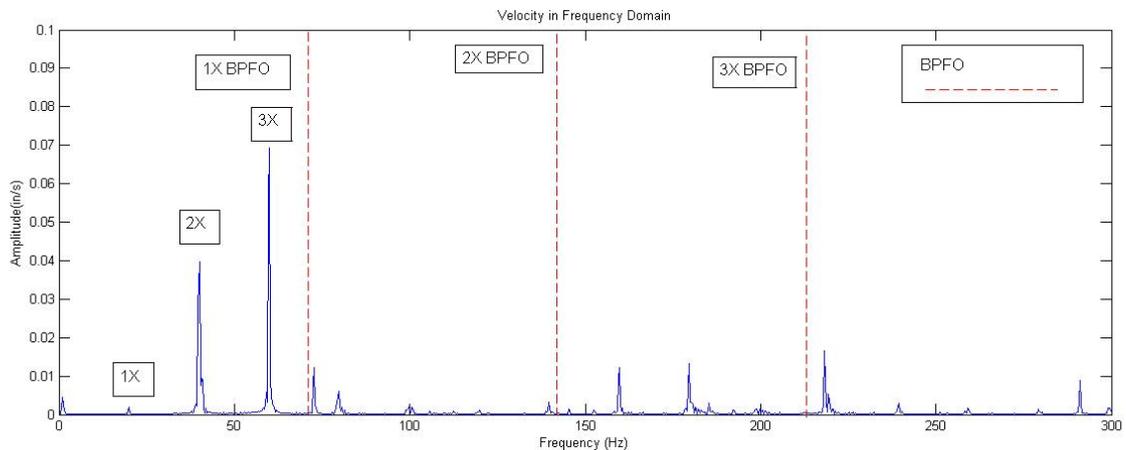
- Kondisi Kerusakan Lintasan Luar

Berikut ini merupakan sinyal hasil dari pengolahan sinyal menggunakan *envelope*, di mana bantalan gelinding mengalami kerusakan pada lintasan luar dengan kecepatan putar 1200 RPM:



Gambar 7. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Lintasan Luar Kecepatan 1200 RPM Dengan *Envelope*

Pada bantalan kondisi kerusakan lintasan luar dengan variasi kecepatan 1200 RPM 1 memperlihatkan *peak* yang besar pada frekuensi 72,83 Hz dibandingkan dengan *peak* lainnya, di mana untuk hasil penghitungan BPFO variasi kecepatan 1200 rpm pada bearing fundamental frequency adalah 71,44 Hz.



Gambar 8. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Lintasan Luar Kecepatan 1200 RPM Tanpa Envelope

Gambar 8 merupakan sinyal bantalan tanpa menggunakan *envelope analysis* memperlihatkan sinyal getaran domain frekuensi dari bantalan dengan kerusakan lintasan luar, tidak terlihat *peak* BPFO yang jelas untuk menggambarkan adanya kerusakan pada bagian lintasan luar bantalan gelinding.

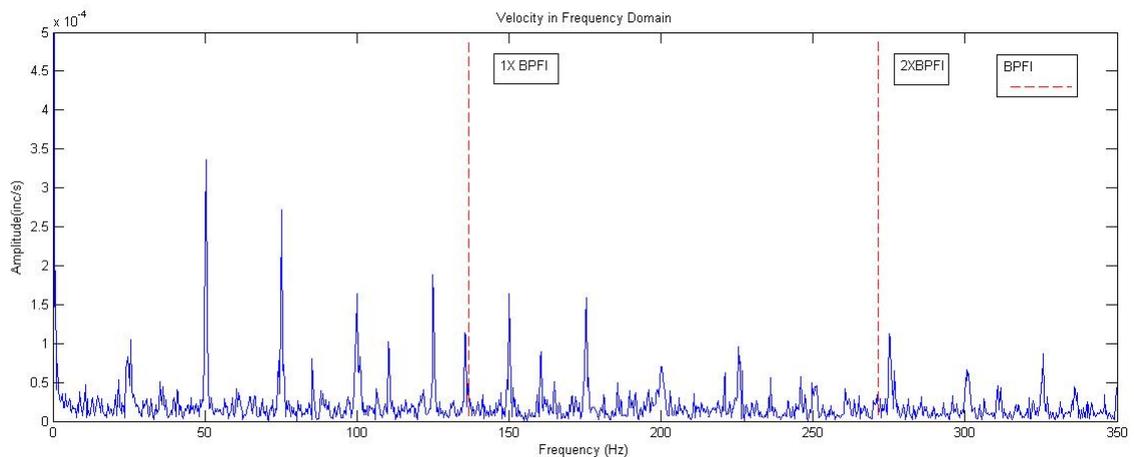
Tabel 5. Nilai Frekuensi dan Amplitudo BPFO 1200 RPM

	1X BPFO	2XBPFO	3X BPFO
Frekuensi BPFO (Hz)	71,44	142,88	214,32
Frekuensi <i>Peak</i> (Hz)	72,83	145,7	218,3
Amplitudo <i>Peak</i> (in/s)	$8,01 \times 10^{-3}$	$5,01 \times 10^{-3}$	$4,56 \times 10^{-3}$

Pada Tabel 5 merupakan nilai frekuensi dan amplitudo *peak* yang terjadi pada sinyal getaran bantalan gelinding setelah dilakukannya *envelope*. Terlihat *peak* pada frekuensi 1X, 2X, dan 3X BPFO dengan amplitudo sinyal yang makin mengecil.

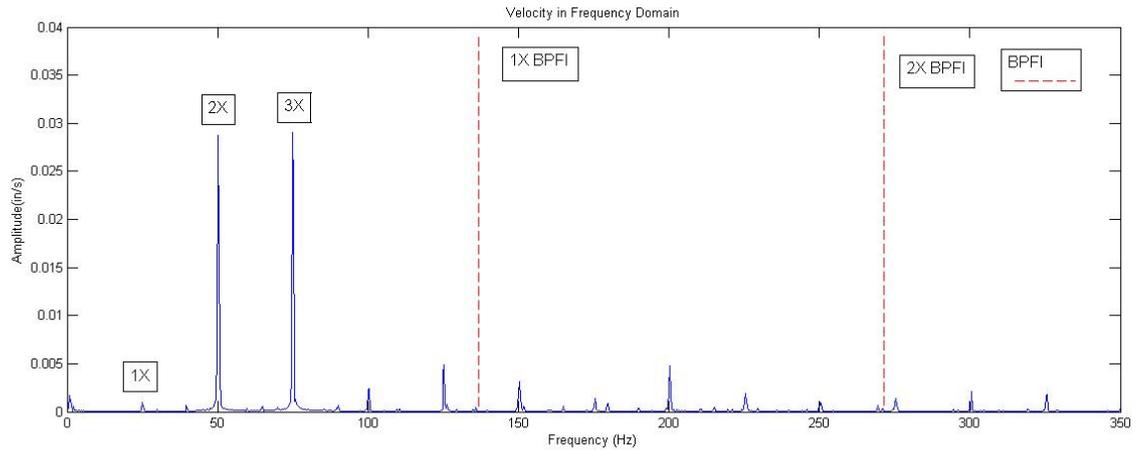
- Kondisi Kerusakan Lintasan Dalam

Berikut ini merupakan hasil setelah dilakukan pengoperasian sinyal *envelope* dengan kondisi bantalan gelinding kerusakan lintasan dalam dan variasi kecepatan putar 1500 RPM.



Gambar 9. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Lintasan Dalam Kecepatan 1500 RPM Dengan *Envelope*

Untuk kedua sensor pada kondisi kerusakan bantalan gelinding dengan variasi 900 RPM terlihat beberapa *peak* yang timbul selain *peak* yang mendekati nilai BPFI, yaitu 81,58 Hz di mana hasil penghitungan BPFI untuk kecepatan 900 RPM adalah 81,45 Hz yang memungkinkan terjadinya kerusakan bantalan gelinding pada lintasan luar. Namun terdapat pula *peak* yang disebabkan oleh putaran poros untuk kecepatan 900 RPM yaitu 15 Hz yang berulang terus menerus dan *peak* lainnya.



Gambar 10. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Lintasan Dalam Kecepatan 1500 RPM Tanpa Envelope

Gambar 10 diketahui sinyal bantalan tanpa menggunakan *envelope analysis*, terdapat beberapa *peak* sinyal namun tidak terlihat adanya *peak* BPF1 seperti pada Gambar 9.

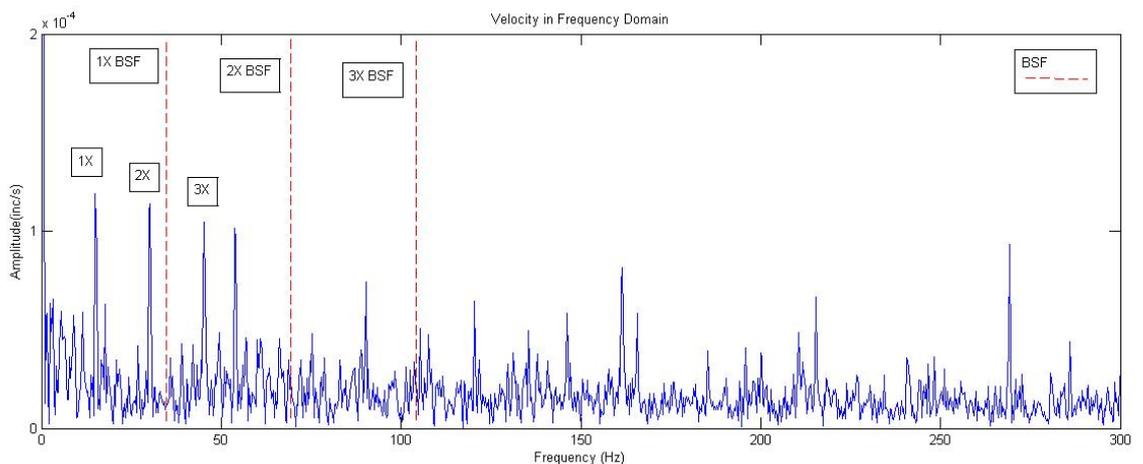
Tabel 6. Nilai Frekuensi dan Amplitudo Bantalan Gelinding Kerusakan Lintasan Dalam

	1X BPF1	2X BPF1	3X BPF1
Frekuensi BPF1 (Hz)	135,7	271,4	-
Frekuensi <i>Peak</i> (Hz)	135,3	275,1	-
Amplitudo <i>Peak</i> (in/s)	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-4}$	-

Pada Tabel 6 diketahui nilai frekuensi *peak* dan amplitudo bantalan gelinding kondisi kerusakan lintasan dalam setelah dilakukan pengolahan sinyal *envelope* di mana terdapat *peak* yang mendekati nilai BPF1 pada frekuensi 134,7 Hz dengan amplitude $1,14 \times 10^{-4}$ (in/s).

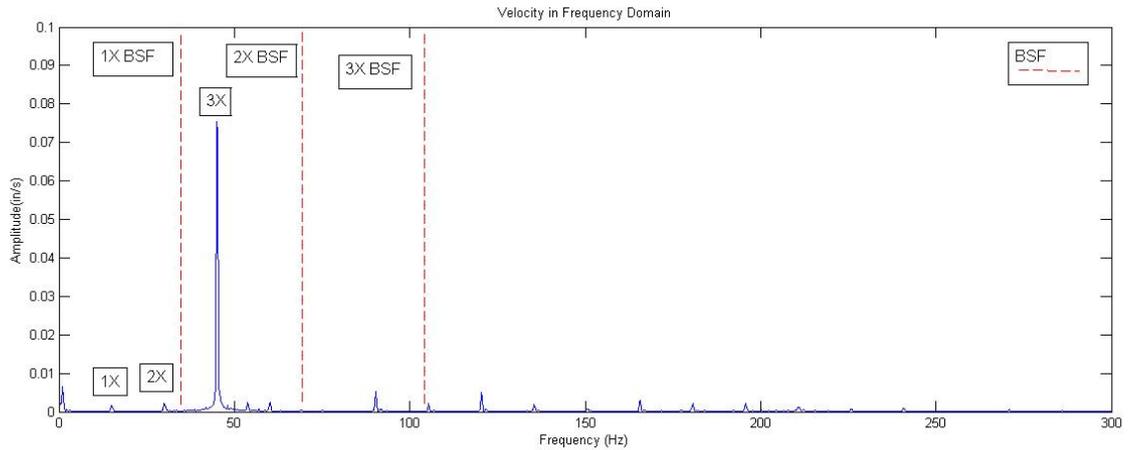
- Kondisi Kerusakan Elemen Gelinding

Berikut ini merupakan hasil sinyal setelah dilakukannya *envelope* pada bantalan gelinding kondisi kerusakan elemen gelinding.



Gambar 11. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Elemen Gelinding Dalam Kecepatan 900 RPM Dengan *Envelope*

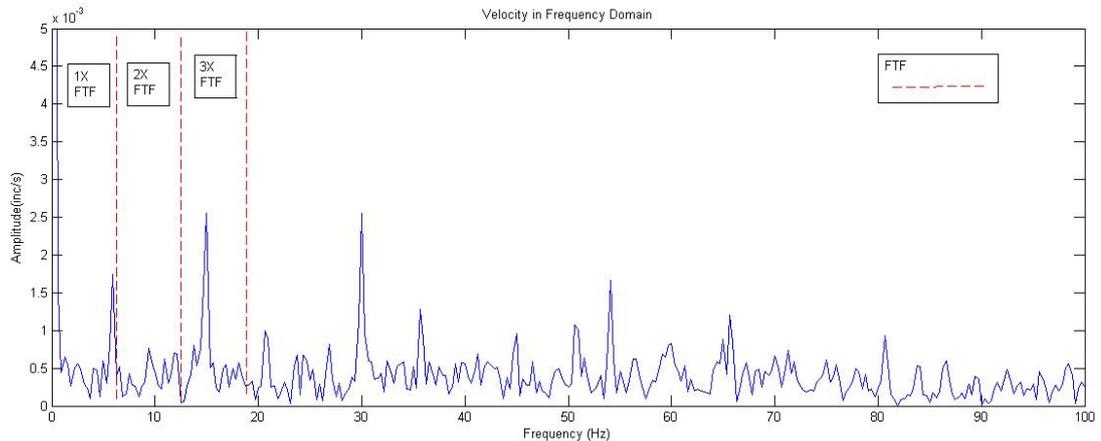
Untuk kondisi kerusakan pada elemen gelinding variasi kecepatan tidak terlihat *peak* yang mendekati hasil perhitungan BSF yaitu 34,83 Hz hal ini mungkin disebabkan karena frekuensi kerusakan pada elemen gelinding tidak ikut ter-*filter* pada saat proses *bandpass filter*.



Gambar 12. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Elemen Gelinding Dalam Kecepatan 900 RPM Tanpa *Envelope*

Pada Gambar 12 merupakan gambar sinyal getaran bantalan gelinding dengan kondisi kerusakan elemen gelinding dengan variasi kecepatan putar 900 RPM terlihat *peak* yang cukup tinggi pada 3 X RPM dibandingkan *peak* lainnya yang terlihat, namun tidak terlihat *peak* yang mendekati daerah frekuensi 1X BSF.

- Kondisi Kerusakan Kombinasi

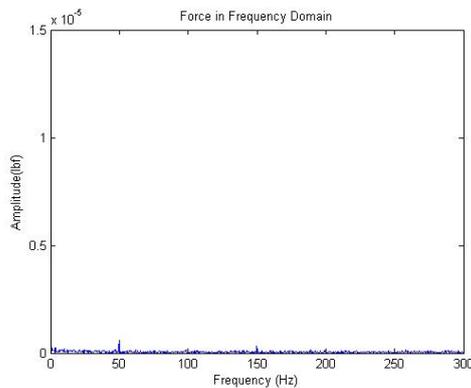


Gambar 13. Sinyal Bantalan Kondisi Kerusakan Kombinasi Dalam Kecepatan 900 RPM Dengan *Envelope*

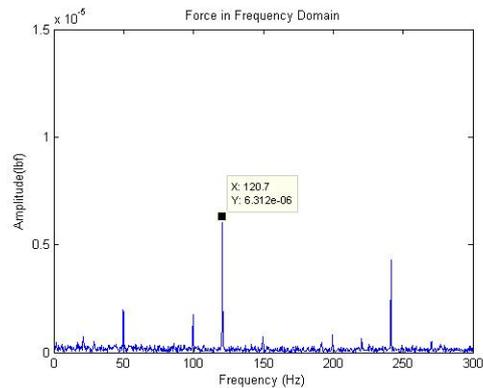
Pada gambar 13 diketahui sinyal bantalan gelinding dengan kondisi kerusakan kombinasi menggunakan *envelope* memiliki frekuensi *peak* yang mendekati hasil penghitungan FTF pada frekuensi 5,939 Hz, di mana untuk hasil penghitungan FTF adalah 6,3 Hz dan amplitudo $1,747 \times 10^{-3}$ in/s.

3.2 Sinyal Gaya yang Dihasilkan Bantalan Gelinding

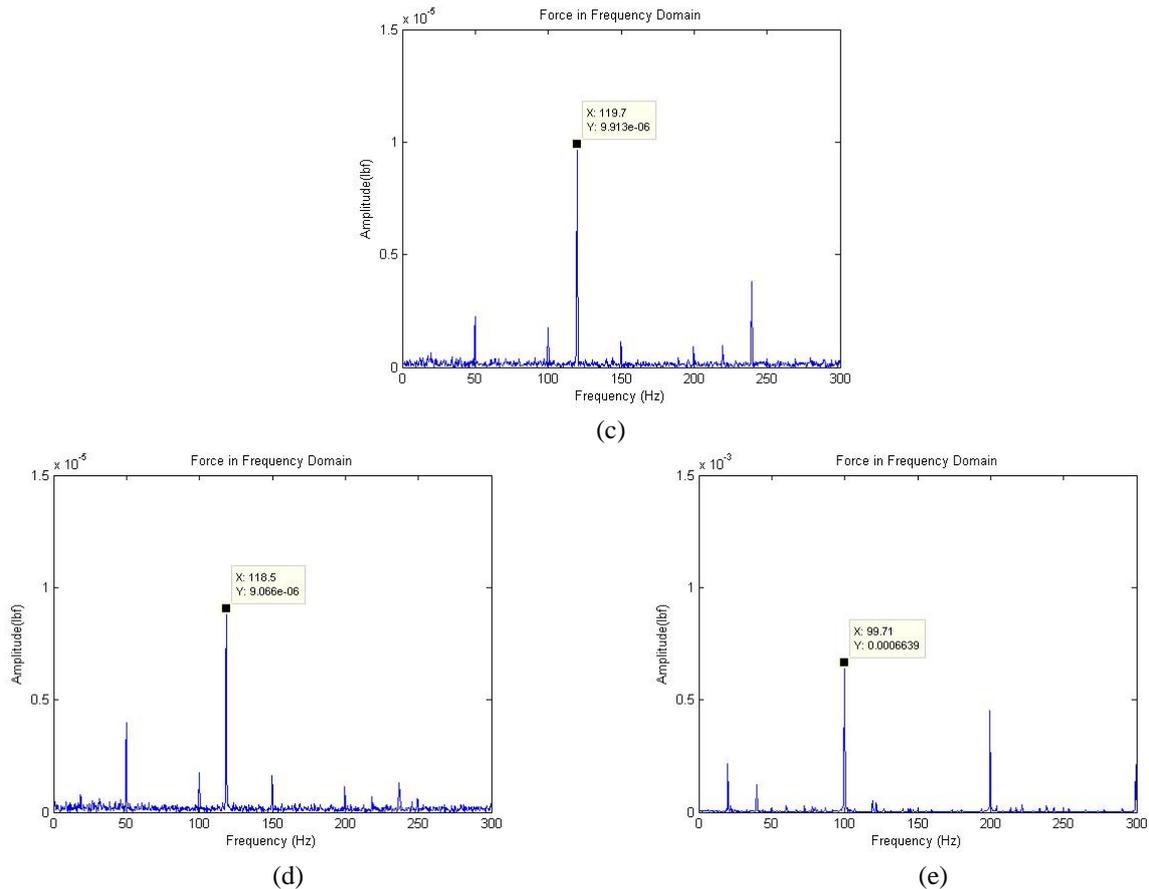
Pada Gambar 14 diketahui sinyal gaya pada domain frekuensi dengan variasi kecepatan dan kondisi bantalan yang berbeda di mana sumbu-x merupakan frekuensi sinyal(Hz), sedangkan sumbu-y adalah besarnya gaya(lbf).



(a)



(b)



Gambar 14. Kondisi Sinyal Gaya pada Bantalan Gelinding (a).Kondisi Normal, (b). Kondisi Kerusakan Lintasan Luar, (c). Kerusakan Lintasan Dalam, (d). Kerusakan Elemen Gelinding, dan (e). Kerusakan Kombinasi

Analisis gaya yang terjadi pada rumah bantalan dilakukan, untuk mengetahui adanya perubahan gaya yang terjadi pada rumah bantalan dengan kondisi bantalan gelinding yang berbeda dan variasi kecepatan yang berbeda. Analisis gaya merupakan pengoprasian sinyal dari *force transducer* berupa domain waktu yang akan diolah menjadi domain frekuensi untuk mempermudah mendapatkan informasi yang diinginkan. Sinyal gaya yang terjadi pada rumah bantalan dengan bantalan kondisi normal tidak ada *peak* yang muncul dibanding dengan kondisi bantalan gelinding dengan kondisi kerusakan pada lintasan luar, kerusakan lintasan dalam, kerusakan elemen gelinding, dan kerusakan kombinasi. Pada kondisi kerusakan lintasan luar, kerusakan lintasan dalam, dan kerusakan gelinding terjadi *peak* pada frekuensi 50Hz, 100Hz, 120Hz, 150Hz, 200Hz, dan 240Hz dengan variasi amplitudo yang ada. Namun pada kondisi kerusakan kombinasi terdapat *peak* yang tinggi dibanding kerusakan lainnya yaitu pada 100Hz dan 200Hz. Pada kerusakan lintasan luar, lintasan dalam, dan elemen gelinding terdapat *peak* yang dominan pada frekuensi 120 Hz. Adanya variasi kecepatan tidak terlalu berpengaruh pada perubahan frekuensi *peak* yang ada pada kondisi kerusakan maupun normal.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukannya metoda *envelope analysis* yaitu melakukan *bandpass filter* rentang 500 Hz – 2000 Hz, rektifikasi, dan FFT, Dapat disimpulkan bahwa metoda tersebut belum terlalu jelas untuk memperlihatkan *peak – peak* yang ditimbulkan oleh kerusakan yang terjadi pada bantalan gelinding. Walaupun terlihat beberapa *peak* yang mendekati *Bearing Fundamental Frequency* namun memiliki amplitudo yang relatif lebih kecil dibandingkan *peak* lainnya pada kondisi kerusakan lintasan luar, elemen gelinding, dan kerusakan kombinasi.

Terdapat pengaruh perubahan gaya yang terjadi pada bantalan kondisi normal dan bantalan yang mengalami kerusakan, dengan timbulnya *peak* pada bantalan yang mengalami kerusakan. Bantalan gelinding yang mengalami kerusakan lintasan luar, lintasan dalam, dan elemen gelinding memperlihatkan adanya *peak* pada frekuensi 120 Hz memiliki amplitudo yang lebih besar dibanding *peak* lainnya. Untuk kondisi kerusakan kombinasi memiliki pola *peak* yang berbeda di mana *peak* pada frekuensi 100 Hz memiliki amplitudo yang lebih besar dibanding *peak* lainnya, Tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan dengan dilakukannya variasi kecepatan putar.

Daftar Pustaka

- [1] McFadden PD, Smith JD. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound Vibration*. 1984;96(1):69–82.
- [2] Randall RB. *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. 1st ed. John Wiley and Sons. Chichester: John Wiley and Sons; 2011. 47-49 p.
- [3] Hochmann D, Bechhoefer E. Envelope bearing analysis: Theory and practice. In: *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2005.
- [4] Graney BP, Starry K. Rolling element bearing analysis crosses threshold. *Materials Evaluation*. 2011;70(1):78–85.