

# Pengembangan Metode Deteksi Cacat Bantalan Berbasis Analisis *Envelope* pada Prototipe Fan Industri

Berli P. Kamiel<sup>a</sup>, Adib Muhammad Nuh<sup>b</sup>, Sudarisman<sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul 55183  
Telp. (0274) 387656 / (0274) 387 646  
e-mail: [berikamiel@umy.ac.id](mailto:berikamiel@umy.ac.id)<sup>a</sup>

---

## Abstract

*This paper examines the spectrum and envelope spectrum for detection of ball bearing fault using vibration signals taken from a prototype of industrial fan. It presents a procedure to detect fault on the outer and inner race of roller bearing. Three conditions of ball bearing i.e., normal, outer race fault and inner race fault is tested. The artificial fault on the bearing is 2 mm depth and 0,7 mm width. The vibration signals are taken by using an accelerometer mounted on the vertical-radial direction of bearing pillow block. The waveforms are then transformed into spectrum and envelope spectrum. The differences between spectrum and envelope spectrum for both types of faults are analyzed and discussed. The paper explains the effect of amplitude modulation (AM) on the inner race fault to the spectrum and envelope spectrum. The discussion about the ability of spectrum and envelope spectrum for bearing fault detection is presented and compared in detail. The results show that spectrum has good ability for fault detection since it gives clear and high amplitude of bearing fault frequencies. However the spectrum often fails when the size of fault is relatively small, in this case the envelope spectrum gives better results.*

**Keywords:** Fan, bearing, vibrations, spectrum, envelope spectrum

---

## 1. PENDAHULUAN

*Fan* dapat dijumpai di berbagai tempat, seperti di rumah, di kantor, dan di industri. *Fan* di industri umumnya digunakan pada system pendingin mesin atau digunakan untuk mensirkulasikan udara pada sebuah area. Apabila sebuah fan mengalami gangguan karena kerusakan pada salah satu komponennya maka fungsinya akan menurun sehingga berpotensi mengganggu kinerja system pendingin mesin atau kapasitasnya mensirkulasikan udara. Komponen fan yang sering mengalami kerusakan/cacat adalah bantalan. Oleh karena itu, monitoring kondisi bantalan perlu dilakukan supaya kerusakan yang timbul pada bantalan tersebut dapat diketahui lebih awal, sehingga kerusakan mesin lebih lanjut dapat dihindari. Salah satu metode untuk memonitor kondisi bantalan adalah dengan menggunakan metode berbasis getaran [1].

Domain frekwensi atau spektrum adalah metode berbasis getaran yang umum digunakan untuk mendeteksi cacat bantalan [2]. Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan, metode spektrum tidak selalu dapat mendeteksi secara jelas amplitudo frekuensi cacat bantalan [3]. Hal ini terjadi terutama pada tahap awal cacat dimana dampak (*impact*) antara lokasi cacat dengan elemen bantalan menghasilkan energi yang sangat rendah sehingga amplitudo pada spektrum tidak teramati. Amplitudo getaran komponen lain pada mesin dan noise relatif lebih besar sehingga membenamkan amplitudo cacat bantalan. *Envelope spectrum* adalah sebuah teknik yang dapat digunakan untuk menangkap amplitudo rendah yang berasal dari cacat bantalan tahap awal dengan cara mengeliminasi amplitudo tinggi yang berasal dari komponen lain termasuk amplitudo noise. Metode ini tidak hanya digunakan untuk mendeteksi cacat bantalan namun juga sering digunakan untuk mendeteksi cacat pada bagian roda gigi, dan turbin motor induksi [4]. Metode ini adalah

teknik yang berdasarkan analisis frekwensi tinggi resonansi bantalan. *High pass filter* digunakan untuk memblokir sinyal frekwensi rendah yang umumnya memuat frekwensi yang tidak terkait dengan cacat bantalan. Resonansi bantalan akibat dampak periodik antara lokasi cacat dengan elemen bola kemudian di-*envelope* dan transformasikan ke domain frekwensi [3].

Penelitian oleh [5] berhasil mendeteksi cacat blade pada kompresor sentrifugal menggunakan sinyal getaran. Analisis getaran yang dilakukan pada penelitian tersebut menggunakan *envelope spectrum* yang terbukti dapat mendeteksi cacat pada blade kompresor. Penelitian lain yang dilakukan oleh [6] menunjukkan bahwa analisis envelope berhasil mendeteksi cacat pada bantalan bola dengan hasil yang efektif dan baik.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahawa analisis envelope mampu mendeteksi cacat bantalan pada berbagai jenis mesin rotari. Namun demikian penerapan analisis envelope untuk mendeteksi cacat bantalan pada *fan* industri belum pernah dilakukan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode deteksi cacat dini bantalan pada *fan* industri menggunakan analisis envelope. Objek yang digunakan pada penelitian adalah bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row* pada kondisi normal dan kondisi cacat. Kondisi cacat pada dua buah bantalan bola berturut-turut dilakukan dengan merusak bagian lintasan luar dan lintasan dalam.

*Fan* adalah alat yang berguna menghasilkan aliran pada sebuah fluida udara maupun gas. Komponen *Fan* biasanya terdiri dari *blade* (bilah), casing, motor listrik, bantalan, dan poros. Salah satu jenis fan yang banyak digunakan di dunia industry adalah fan tipe aksial.

*Fan aksial* adalah jenis *fan* yang menggerakkan aliran udaranya sepanjang arah sumbu fan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1 *Fan* jenis ini sering digunakan di industri karena bentuknya yang kompak, harganya murah, dan ringan.



Gambar 1.1 *Fan Aksial*

*Fan aksial* sering digunakan dalam aplikasi pembuangan dengan ukuran partikel udara yang kecil contohnya seperti debu, asap, dan uap. *Fan aksial* juga juga berguna daam aplikasi ventilasi yang membutuhkan kemampuan untuk menghasilkan aliran udara balik. Walaupun fan ini biasanya dirancang untuk menghasilkan aliran dalam satu arah, *fan* ini juga dapat beroperasi dalam arah berlawanan. Karakteristik tersebut berguna ketika ruang mungkin memerlukan udara segar yang harus disediakan.

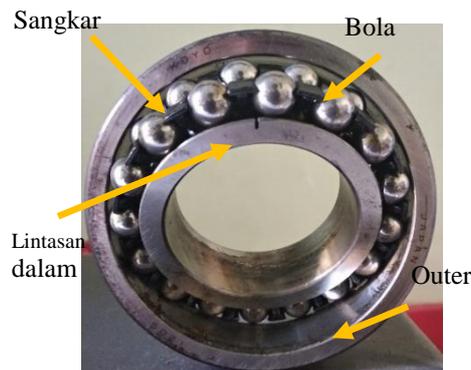
Bantalan bola adalah bantalan yang banyak menerima beban radial yang besar namun juga dapat menerima beban aksial yang kecil. Bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row* mempunyai dua baris yang masing-masing barisnya mempunyai alur tersendiri pada bagian lintasan dalamnya. Pada umumnya terdapat alur bola pada lintasan luarnya. Lintasan bagian dalamnya mampu bergerak sendiri untuk menyesuaikan posisinya. Bantalan jenis ini terdiri dari beberapa beberapa komponen yaitu: bola (*ball*), sangkar (*cage*), lintasan dalam (*inner*), dan lintasan luar (*outer*).

Frekwensi cacat lintasan luar, atau *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO), dihitung dengan persamaan:

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \times f_r \times x \left( 1 - \frac{Bd}{Pd} \times x \cos \alpha \right) \quad (1)$$

Keterangan:

- Nb = Jumlah bola (*Number of ball*).
- Fr = Frekuensi relatif antara lintasan luar dan lintasan dalam (Hz).
- Bd = Diameter bola (*Ball diameter*) mm.
- Pd = Diameter pitch (*Pitch diameter*) mm.
- $\alpha$  = Sudut kontak (*contact angle*) derajat.



Gambar 1.2 Bantalan Bola Jenis Self Aligning Double Row

Frekwensi cacat lintasan dalam atau *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI), dinyatakan sebagai berikut:

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \times f_r \times x \left( 1 + \frac{Bd}{Pd} \times x \cos \alpha \right) \quad (2)$$

## 2. METODE

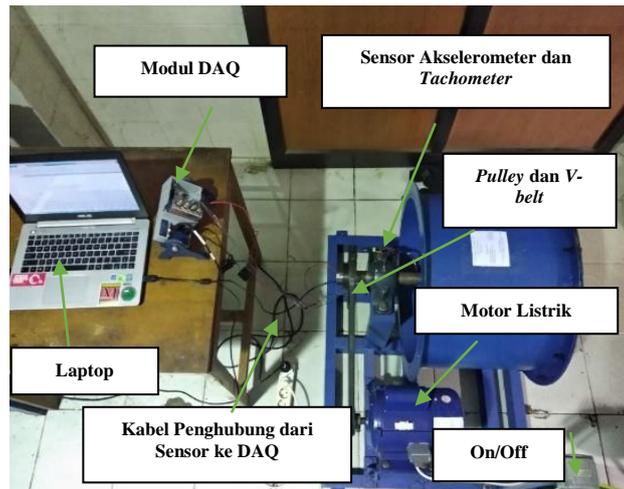
Sinyal getaran yang akan digunakan untuk menguji metode deteksi diambil dari alat tes uji kerusakan bantalan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Tiga kondisi bantalan bola akan digunakan yaitu kondisi normal, cacat lintasan luar dan cacat lintasan dalam.

Cacat buatan pada bantalan dilakukan dengan cara merusak bagian lintasan luar dan lintasan dalam menggunakan *Electrical Discharge Machine* (EDM) dengan kedalaman 2 mm dan lebar 0,7 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (cacat lintasan luar) dan Gambar 2.3 (cacat lintasan dalam). Bantalan yang digunakan untuk penelitian ini adalah bantalan bola jenis *self aligning double row* merk Koyo 1209K.

Sinyal getaran direkam menggunakan sensor akselerometer yang diletakkan di rumah bantalan arah radial. Sedangkan kecepatan poros direkam menggunakan tachometer pulse. Sinyal dari akselerometer dan tachometer kemudian diteruskan ke modul data akuisisi NI 9234 dari National Instrument dan direkam pada hardisk laptop. Proses akuisisi, perekaman dan pemrosesan sinyal menggunakan software Matlab dari Mathworks.

Pemrosesan sinyal diawali dengan mentransformasikan sinyal domain waktu menjadi spektrum. Identifikasi amplitude tinggi pada frekwensi cacat bantalan dilakukan pada spektrum tersebut. Frekwensi cacat bantalan ditentukan menggunakan persamaan (1) dan (2). Jika ditemukan amplitude tinggi pada frekwensi cacat bantalan maka dapat disimpulkan bahwa spektrum berasal dari sinyal bantalan yang cacat.

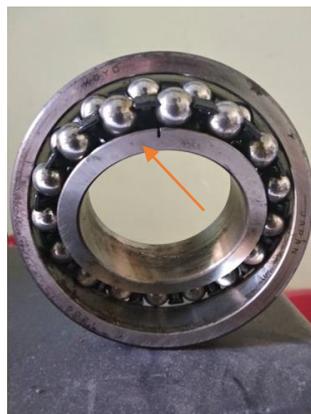
Tidak semua cacat bantalan menghasilkan frekwensi yang amplitudonya dapat terlihat pada spektrum, terutama terjadi pada cacat tahap awal (kecil). Pada situasi ini analisis envelope digunakan untuk mengungkap amplitude pada frekwensi cacat bantalan yang tidak terlihat pada spektrum.



Gambar 2.1. Alat Uji Bantalan Cacat pada Fan Aksial



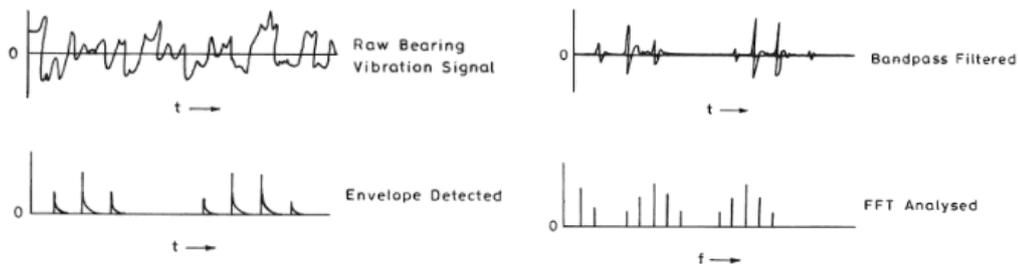
Gambar 2.2 Cacat Lintasan Luar



Gambar 2.3 Cacat Lintasan Dalam

Analisis envelope meng-ekstrak amplitude lemah cacat bantalan melalui beberapa tahap seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Tahap pertama diawali dengan memfilter sinyal baku (*raw signal*) menggunakan *high pass filter* untuk memblokir frekwensi rendah dan meneruskan frekwensi tinggi yang merupakan area frekwensi resonansi bantalan. Bantalan akan beresonansi akibat dampak yang terjadi saat lokasi cacat dilalui oleh bola. Selanjutnya transformasi Hilbert digunakan untuk mengubah bagian negative sinyal menjadi positif

sekaligus menguatkannya. Deteksi envelope kemudian dilakukan untuk menghilangkan frekwensi resonansi namun menampakkan repetisi resonansi hasil dari dampak antara bola dan lokasi cacat. Tahap terakhir adalah melakukan transformasi menjadi spektrum envelope menggunakan FFT. *Envelope spektrum* akan menampakkan amplitude pada frekwensi cacat bantalan dengan jelas dan relative tinggi dibandingkan dengan amplitude lain di sekitarnya.



Gambar 2.4 Skema Proses Envelope

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dimensi bantalan bola jenis *Self Aligning Double Row* merek Koyo 1209K yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Dimensi Bantalan

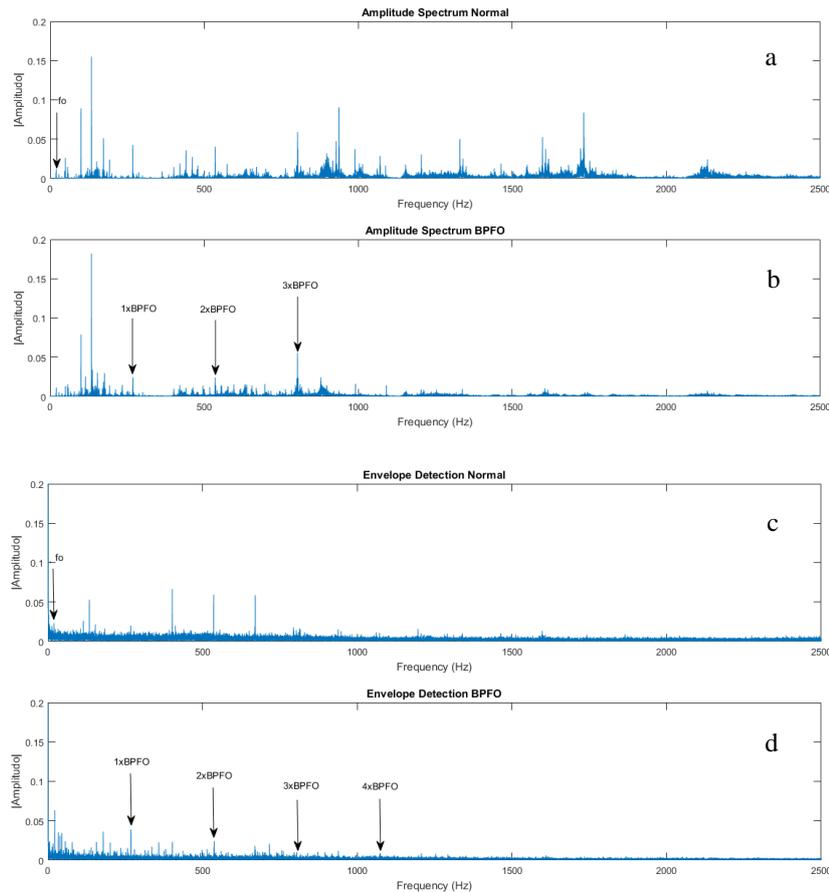
Diameter luar	85 mm
Diameter dalam	45 mm
Diameter bola	9,45 mm
Diameter pitch	65 mm
Jumlah bola	32 butir
Sudut kontak ( $\theta$ )	0°

Gambar 3.1 (a) dan 3.1(b) berturut-turut adalah spektrum bantalan normal dan bantalan cacat lintasan luar. Gambar 3.1 (b) menunjukkan amplitudo tinggi pada frekwensi cacat lintasan luar (BPFO) sampai dengan harmonik ke-3 yang sesuai dengan perkiraan sedangkan pada Gambar 3.1(a) tidak teramati amplitudo tinggi pada frekwensi tersebut. Dapat dilihat bahwa spektrum mampu mengidentifikasi cacat bantalan, hal ini menunjukkan bahwa ukuran cacat adalah besar yang menyebabkan energi dampak yang terjadi cukup besar sehingga amplitudonya dapat teramati pada spektrum.

*Envelope spectrum* menunjukkan hasil yang sama dimana pada Gambar 3.1(d) menunjukkan amplitudo yang dominan pada frekwensi cacat lintasan luar. Hal sebaliknya tidak terjadi pada Gambar 3.1(c). Hal ini sesuai dengan apa yang teramati pada spektrum. Namun demikian *envelope spectrum* memberikan hasil yang relative lebih bersih dari noise sehingga identifikasi amplitudo cacat bantalan lebih mudah dilakukan.

Kesesuaian antara nilai BPFO hasil perhitungan dengan hasil pengamatan pada spektrum menunjukkan sedikit perbedaan. Hasil perhitungan memberikan nilai 1xBPFO sebesar 268 Hz, 2x BPFO sebesar 536 Hz sedangkan 3x BPFO sebesar 804 Hz. Sedangkan hasil pengamatan pada spektrum menghasilkan berturut-turut frekwensi 268.3 Hz, 537.3 Hz dan 804.8 Hz untuk 1-3xBPFO. Selisih kecil dan tidak signifikan ini disebabkan oleh kecepatan poros yang tidak konstan selama pengambilan data. Selisih serupa dijumpai pula pada *envelope spectrum*.

Jumlah harmonik yang teramati dengan jelas pada spektrum dan *envelope spectrum* adalah sama yaitu sampai dengan 3x BPFO. Kehadiran 3 buah harmonik pada kedua spektrum tersebut mengindikasikan cacat bantalan berada pada tingkat lanjut.



Gambar 3.1 (a) Spektrum Bantalan Normal, (b) Spektrum Cacat Lintasan Luar, (c) Envelope Spectrum Bantalan Normal, (d) Envelope Spectrum Cacat Lintasan Luar.

Keberhasilan spektrum dan *envelope spectrum* dalam mendeteksi cacat bantalan lintasan luar juga terlihat pada kasus cacat lintasan dalam. Spektrum pada gambar 3.2(a) dan 8(b) memberikan hasil yang sangat jelas amplitudo tinggi pada frekwensi cacat lintasan dalam (BPFI). Demikian pula amplitudo tinggi tersebut dijumpai pada *envelope spectrum* seperti dapat dilihat pada Gambar 3.2(c) dan 3.2(d).

Namun demikian cacat lintasan dalam memberikan hasil spektrum dan *envelope spectrum* yang berbeda jika dibandingkan dengan yang diberikan pada cacat lintasan luar. Perbedaannya adalah pada munculnya amplitudo di sisi kiri dan kanan amplitudo frekwensi cacat lintasan dalam (frekwensi tengah). Amplitudo di sisi kiri dan kanan ini disebut *sidebands* (sb) [6]. Jarak antara masing-masing *sidebands* ke frekwensi tengah adalah sebesar 1x frekwensi poros. Kehadiran *sidebands* ini disebabkan oleh karakteristik khas sinyal getaran cacat lintasan dalam sehingga menjadi ciri pada spektrum yang berasal dari cacat lintasan dalam.

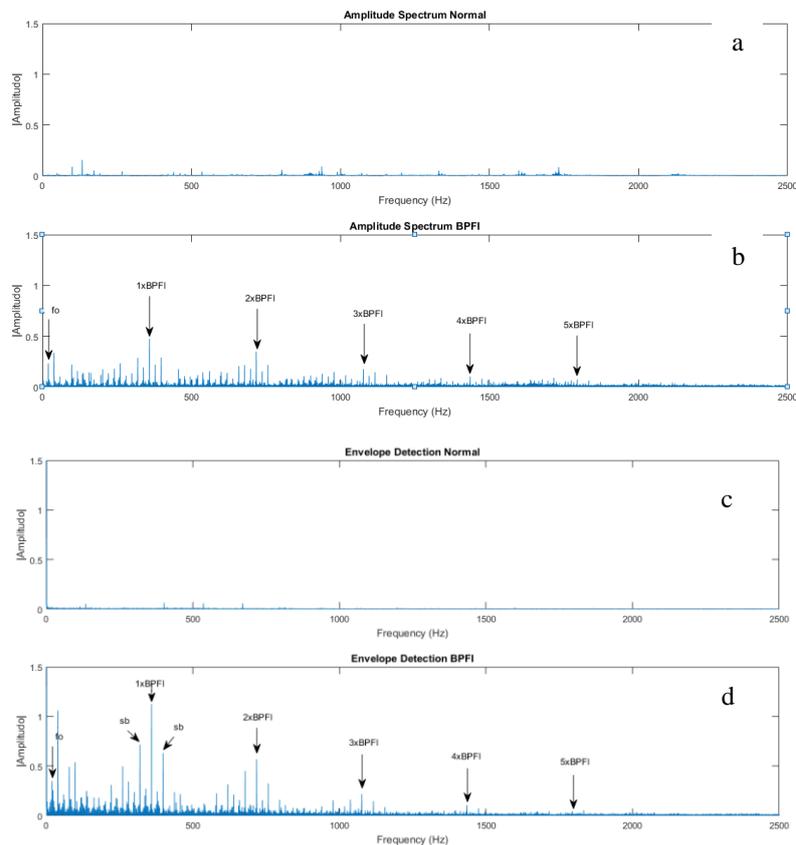
Munculnya *sidebands* pada spektrum disebabkan oleh modulasi amplitudo pada domain waktu. Modulasi amplitudo sinyal atau *amplitude modulation* (AM) disebabkan karena tidak seragamnya energi impact yang terjadi pada saat cacat lintasan dalam berbenturan dengan bola bantalan. Tidak seragamnya energi impact karena lokasi impact tidak terjadi pada posisi yang sama. Pada saat bantalan berputar maka cacat lintasan dalam juga akan ikut berputar. Hal ini menyebabkan impact dapat terjadi pada *loading zone* atau di luar *loading zone* bantalan. Energi impact akan maksimal ketika benturan terjadi pada *loading zone* dan sebaliknya. Energi impact ini pada domain waktu direpresentasikan sebagai amplitudo. Oleh karena itu amplitudo yang dihasilkan cacat lintasan dalam akan berfluktuasi, yang akan membesar ketika impact memasuki *loading zone* dan mengecil pada

saat keluar dari *loading zone*. Laju fluktuasi amplitudo adalah sama dengan 1x frekwensi poros.

Sama halnya pada cacat lintasan luar, pada cacat lintasan dalam terdapat pula perbedaan antara BPFI hasil perhitungan dengan yang hasil pengamatan pada spektrum dan *envelope spectrum*. Perhitungan menghasilkan 359 Hz untuk 1xBPFI, 718.4 Hz untuk 2xBPFI dan 1077.6 Hz untuk 3xBPFI. Sedangkan hasil pengamatan pada spektrum diperoleh berturut-turut 358.8 Hz, 717.6 Hz, 1076 Hz. Selisih yang terjadi adalah kecil yang disebabkan oleh sedikit variasi kecepatan poros.

Perbandingan antara spektrum dengan *envelope spectrum* menunjukkan bahwa keduanya menampilkan amplitudo tinggi pada frekwensi cacat lintasan luar dan lintasan dalam sehingga pada penelitian ini spektrum dan *envelope spectrum* dapat digunakan untuk mendeteksi cacat bantalan dengan tepat. Namun demikian spektrum menampilkan semua amplitudo pada frekwensi pita lebar (*broadband*) yang menyebabkan potensi terbenamnya amplitudo frekwensi cacat bantalan oleh amplitudo lainnya yg lebih tinggi. Hal ini akan terjadi jika pengamatan dilakukan di tahap awal cacat bantalan (cacat kecil). Kehadiran *noise* pada spektrum juga berpotensi menutup pengamatan terhadap amplitude frekwensi cacat bantalan.

Beberapa kekurangan yang dijumpai pada spektrum dalam batas-batas tertentu dapat diatasi oleh *envelope spectrum*. Penggunaan *high pass filter* menyebabkan *envelope spectrum* menghasilkan spektrum yang relatif lebih kecil *noise*-nya, selain itu amplitude cacat bantalan akan nampak lebih tinggi sehingga memudahkan identifikasi.



Gambar 3.2 (a) Spektrum Bantalan Normal, (b) Spektrum Cacat Lintasan Luar (c) Envelope Spectrum Bantalan Normal, (d) Envelope Spectrum Cacat Lintasan Dalam.

#### 4. KESIMPULAN

Deteksi cacat bantalan lintasan luar dan lintasan dalam dapat dilakukan menggunakan spektrum dan *envelope spectrum*. Cacat buatan pada bantalan yang digunakan di penelitian ini dapat digolongkan sebagai cacat lanjut (kedalaman 2 mm dan lebar 0.7 mm) sehingga

menghasilkan energi impact yang besar yang mengakibatkan amplitude frekwensi cacat tampak jelas di spektrum.

Walaupun amplitude frekwensi cacat tampak jelas di spektrum namun kerap dijumpai amplitude *noise* dan amplitude dari sumber lainnya yang berpotensi menutup amplitude frekwensi cacat. *Envelope spectrum* berhasil mengatasi hal tersebut dengan menerapkan *high pass filter* sehingga amplitude selain yang berasal dari cacat bantalan dapat direduksi. *Envelope spectrum* utamanya akan sangat membantu untuk mendeteksi cacat bantalan pada tahap awal (cacat kecil).

Terdapat perbedaan spektrum dan *envelope spectrum* antara cacat lintasan luar dan cacat lintasan dalam. Cacat lintasan dalam menghasilkan sinyal *amplitude modulation* (AM) sebagai akibat variasi energi impact. Variasi ini pada domain waktu direpresentasikan dalam bentuk modulasi amplitude sedangkan pada spektrum ditunjukkan dengan kehadiran *sideband* di sisi kiri dan kanan frekwensi tengah. Jarak antara masing-masing *sideband* ke frekwensi tengah adalah 1x frekwensi poros.

Selisih nilai BPFO dan BPFI antara hasil perhitungan dengan hasil pengamatan pada spektrum dan *envelope spectrum* disebabkan oleh variasi kecepatan poros yang terjadi pada saat perekaman data.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widodo, A. "Development of Wireless Smart Sensor for Structure and Machine Monitoring." *Telkomnika*. 2013; 11(2):417-424
- [2] Setyawan, H P., Suryadi, D. 2018. Analisis Karakteristik Vibrasi pada Paper Dryer Machine untuk Deteksi Dini Kerusakan Spherical Roller Bearing. *Rotasi*.2018; 20 (2): 110-117
- [3] Kamiel, B P., Mulyani., Sunardi. "Deteksi Cacat Bantalan Bola Pada Pompa Sentrifugal menggunakan Spektrum Getaran." *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*. 2017; 20(2): 204-215
- [4] Maladzi, R. "Analisis Kerusakan Bantalan gelinding dengan variasi kecepatan putar berdasarkan pola getaran menggunakan metoda envelope analysis." *Jurnal Teknik Mesin*. 2017; 5(1): 32-41
- [5] Li, H., Zhang, X., Xu, F. Experimental Investigation on Centrifugal Compressor Blade Crack Classification Using the Squared Envelope Spectrum. *Sensors (Basel)*. 2013; 13(9): 12548-12563
- [6] Ma, J., Wu, J., Fan, Y., Wang, X., "The Rolling Bearing Fault Feature Extraction Based on the LMD and Envelope Demodulation." *Mathematical Problem in Engineering*. 2015.
- [7] Sawalhi, N. Vibration Sideband Modulations and Harmonics Separation of a Planetary Helicopter Gearbox with Two Different Configurations. *Advances in Acoustics and Vibration*. 2016.