

Deteksi Cacat Bantalan Poros Engkol Motor Pembakaran dalam Menggunakan Spektrum *Envelope*

(*Detection of Faulty Crank Shaft's Bearing Using Envelope Spectrum*)

Berli Paripurna Kamiel^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183
e-mail: berlikamiel@umy.ac.id

Abstrak

Bantalan poros engkol adalah salah satu komponen penting pada motor pembakaran-dalam (IC *engine*) yang dapat mengalami cacat akibat pembebanan berulang dan temperatur tinggi. Kerusakan bantalan menyebabkan penurunan kinerja mesin yang jika tidak segera dilakukan tindakan perawatan dapat mengakibatkan kerusakan total. Analisis spektrum getaran adalah teknik utama yang digunakan untuk mendeteksi cacat bantalan. Namun demikian, spektrum tidak efektif untuk mendeteksi cacat bantalan di mesin-mesin pembakaran-dalam karena menghasilkan *background noise* yang sangat besar sehingga menutup amplitudo getaran bantalan. Penelitian ini mengusulkan prosedur *pre-processing* sinyal getaran untuk mengeliminasi frekuensi-rendah-amplitudo-tinggi dan menguatkan amplitudo dari frekuensi bantalan. Penelitian ini menerapkan analisis *envelope* pada bantalan poros engkol motor pembakaran dalam 2 langkah. Eksperimen pada rig uji menggunakan 3 kondisi bantalan *single row* dari *Danmotor* yaitu bantalan normal (tidak cacat), cacat lintasan dalam ukuran 0,25 mm dan 0,50 mm. Kecepatan poros dijaga konstan pada variasi 1500 RPM dan 2000 RPM. Sensor akselerometer diletakkan pada blok mesin dekat dengan lokasi poros engkol untuk merekam sinyal getaran menggunakan kecepatan *sampling* 51200 Hz. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spektrum tidak dapat mendeteksi cacat bantalan untuk semua ukuran cacat dan kecepatan poros sedangkan spektrum *envelope* berhasil menampilkan BPF1 dan *side band* yang dapat digunakan untuk mendeteksi cacat bantalan dan menentukan level cacatnya.

Kata kunci: Bantalan, Poros Engkol, Motor Pembakaran Dalam, Spektrum *Envelope*, Akselerometer

Abstract

A bearing on the crankshaft is one of critical component of the IC engine which may fault due to cyclic loading and high temperature. The vibration spectrum analysis is the main technique used to detect faulty bearings. However, it is not effective because IC engine produces a very large background noise which immerses bearing vibration amplitude. The study proposes a signal pre-processing procedure to eliminate low-frequency high-amplitude vibration and magnifies the amplitude of the bearing frequency. This paper applies envelope analysis on crankshaft bearings of two-strokes IC engine. The experiments on the test rig uses 3 condition of single row bearing from *Danmotor* i.e. normal bearing (healthy), inner race fault of 0,25 mm and 0,50 mm. The shaft speed of 1500 RPM and 2000 RPM is used during experiment. An accelerometer sensor is placed on the engine block near the location of the crankshaft to record vibration signals using 51200 Hz sampling rate. The result shows that spectrum fails to detect faulty bearing for all size defects and shaft speed. Meanwhile, envelope spectrum shows obvious BPF1 and its side bands which can be used to detect and localize bearing fault.

Keywords: Bearing, Crank Shaft, IC Engine, Envelope Spectrum, Accelerometer

1. PENDAHULUAN

Motor pembakaran dalam atau *internal combustion engine* (*IC engine*) umum digunakan sebagai penggerak kendaraan penumpang yang bekerja dengan prinsip mengkonversi gerak translasi torak menjadi gerak rotasi poros engkol (*crank shaft*). Gerakan rotasi poros engkol ditumpu oleh sebuah bantalan yang menerima beban relatif besar dan bersifat periodik. Kondisi ini menyebabkan bantalan berangsur-angsur mengalami degradasi atau cacat yang dapat menurunkan kinerja mesin.

Cacat bantalan menghasilkan frekuensi yang besarnya tergantung pada lokasi cacat, kecepatan poros dan geometri bantalan. Frekuensi bantalan cacat menghasilkan amplitudo tinggi pada spektrum yang merefleksikan energi dampak hasil benturan antara lokasi cacat dengan elemen gelinding bantalan [1].

Namun demikian, deteksi bantalan cacat menggunakan spektrum tidak mudah diamati jika cacat tersebut berada pada kondisi awal (*early fault*) karena energi dampak akibat benturan antara lokasi cacat dengan elemen gelinding sangat kecil. Energi yang kecil tersebut pada spektrum akan tersebar di bentang frekuensi lebar (*broadband*) sehingga amplitudonya sangat rendah dan terbenam di dalam amplitudo *noise* dan amplitudo elemen mesin lainnya [2].

Kemampuan spektrum dalam mendeteksi bantalan cacat awal semakin rendah pada bantalan di motor pembakaran dalam karena motor pembakaran dalam menghasilkan impuls yang besar akibat ledakan pada ruang bakar yang terjadi pada setiap langkah kerja [3]. Impuls pada spektrum akan menghasilkan amplitudo kontinu bukan diskrit yang artinya energi spektrum tersebar secara kontinu sepanjang bentang frekuensi alih-alih terpusat pada frekuensi tertentu [4]. Hal ini menyebabkan observasi amplitudo frekuensi bantalan cacat semakin sulit dilakukan.

Kelemahan spektrum dapat diatasi dengan menggunakan teknik analisis *envelope* yang pada dasarnya melakukan *pre-processing* sinyal baku (*raw signal*) sebelum proses transformasi ke dalam domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Tiwari dan Jatola [5] melaporkan efektivitas analisis *envelope* dalam mendeteksi bantalan bola cacat lintasan luar. Elemen piezoelektrik digunakan untuk merekam sinyal baku dilanjutkan dengan proses *band pass filtering*, demodulasi, dan FFT. Spektrum *envelope* menunjukkan puncak amplitudo yang jelas dan mudah diobservasi pada frekuensi cacat lintasan luar. Penelitian lain yang dilakukan oleh Hochmann dan Bechhoefer [6] menunjukkan bahwa analisis *envelope* efektif mendeteksi bantalan cacat awal pada sistem transmisi helikopter dengan mengekstrak parameter cacat dari modulasi sinyal getaran. Beta dkk. [7] menyimpulkan bahwa transformasi Hilbert adalah metode demodulasi sinyal paling baik dalam mendeteksi *envelope* sinyal getaran.

Walaupun analisis *envelope* terbukti efektif mendeteksi bantalan cacat awal, tetapi tidak ditemukan penelitian yang menunjukkan bahwa metode ini juga efektif dalam mendeteksi bantalan cacat pada motor pembakaran dalam. Pendekatan yang banyak dilakukan pada motor pembakaran dalam adalah berdasarkan metode pengenalan pola atau *machine learning* [8] yang membutuhkan jumlah data yang banyak dan kondisi *benchmark* ketika prasyarat ini tidak selalu tersedia dalam praktik di lapangan. Penelitian ini mengusulkan *pre-processing* sinyal baku getaran menggunakan analisis *envelope* untuk mendeteksi bantalan cacat pada poros engkol motor pembakaran dua langkah.

2. METODE

Bantalan cacat menghasilkan getaran dengan frekuensi yang sebanding dengan kecepatan poros. Cacat pada bantalan dapat terjadi pada lokasi lintasan dalam (*inner race*), lintasan luar (*outer race*), elemen bola (*ball fault*), dan elemen sangkar (*cage fault*).

Informasi terkait cacat yang terjadi pada lintasan luar ditunjukkan dengan adanya frekuensi eksitasi impuls yang disebut dengan *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO) dan dapat dihitung dengan persamaan (1). Persamaan (2) untuk *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPF1), Persamaan (3) untuk cacat elemen bola, *Ball Spin Frequency* (BSF), dan Persamaan (4) untuk cacat sangkar, *Fundamental Train Frequency* (FTF).

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{db}{dp} \times \cos \alpha\right) \quad (1)$$

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{db}{dp} \times \cos \alpha\right) \quad (2)$$

$$BSF = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{db}{dp} \times \cos \alpha\right) \quad (3)$$

$$FTF = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{db}{dp} \times \cos \alpha\right) \quad (4)$$

keterangan:

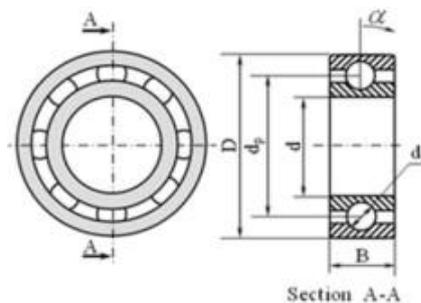
Nb = Jumlah bola

fr = Frekuensi relatif antara lintasan luar dan lintasan dalam (Hz).

db = Diameter bola (mm).

dp = Diameter *pitch* (mm).

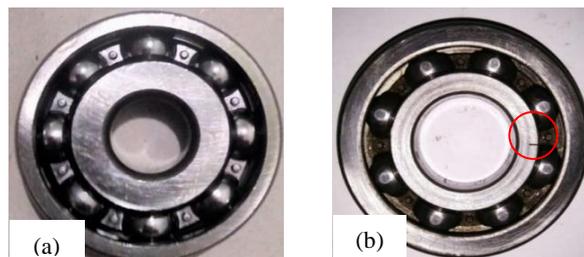
α = Sudut kontak (derajat).



Gambar 2.1. Bantalan bola

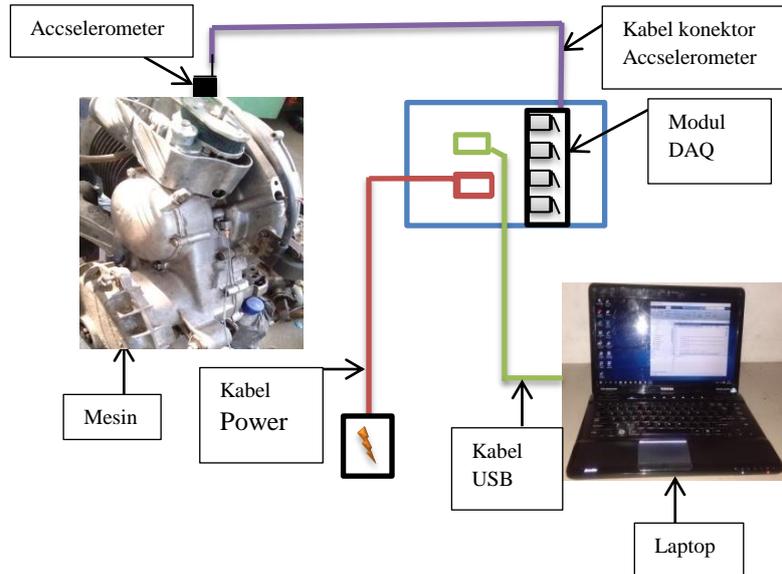
Objek utama penelitian ini adalah getaran dari rig uji mesin motor Vespa dua langkah. Sebuah akselerometer diletakkan menggunakan sepatu magnet pada blok mesin sedekat mungkin dengan lokasi bantalan yang diobservasi pada arah radial. Sinyal getaran direkam menggunakan instrumen data akuisisi yang diteruskan ke sebuah komputer melalui kabel USB. Perekaman sinyal getaran dimulai setelah mesin dinyalakan selama 1 menit untuk mendapatkan kondisi *steady*. Durasi perekaman adalah 20 detik dan diulang sebanyak 30 kali dengan jeda antarrekaman sebesar 3 detik. Hal ini dilakukan untuk memastikan rekaman sinyal getaran mengandung cukup informasi keseluruhan dinamika mesin. Frekuensi sampling di-*set* sebesar 51200 Hz.

Tiga kondisi bantalan poros engkol yaitu kondisi normal (tidak cacat), cacat ringan, dan cacat lanjut digunakan pada penelitian ini dengan variasi kecepatan poros engkol 1500 RPM dan 2000 RPM. Bantalan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.2 adalah merk *Danmotor* dengan diameter dalam 25 mm, diameter luar 62 mm, dan jumlah bola 8. Cacat bantalan dibuat dengan menggores lintasan dalam menggunakan mesin EDM dengan dimensi lebar 0,25 mm untuk cacat ringan dan lebar 0,50 mm untuk cacat lanjut.



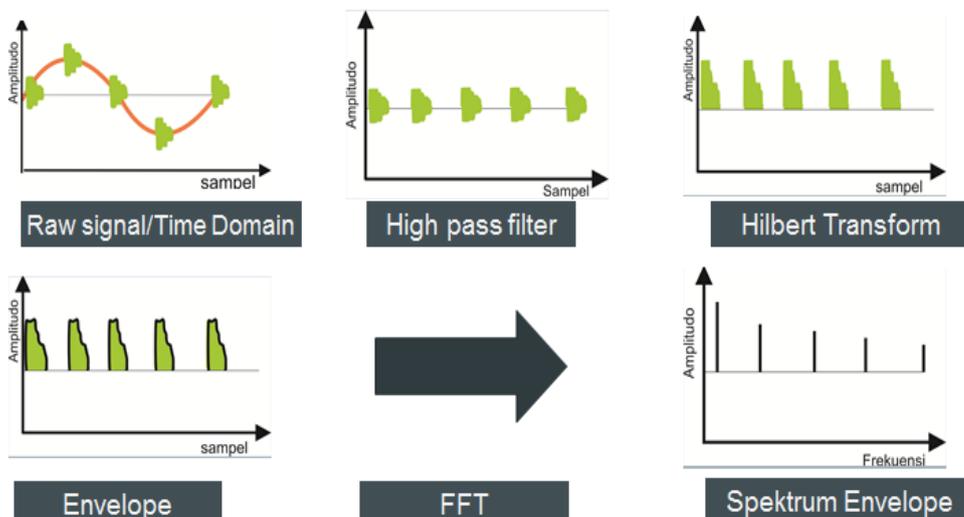
Gambar 2.2. Bantalan (a) normal (tidak cacat), (b) cacat

Secara skematis, perekaman data dari rig uji menggunakan sistem data akuisisi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema rig uji

Analisis *envelope* mengekstrak dampak periodik getaran yang terjadi pada bantalan. Prosedur pemrosesan sinyal menggunakan analisis *envelope* ditunjukkan pada Gambar 2.4. Sinyal getaran domain waktu difilter menggunakan *high pass band filter*. Proses pemfilteran ini akan menghilangkan komponen frekuensi rendah yang umum dijumpai pada mesin-mesin rotari, seperti frekuensi poros, frekuensi *misalignment*, dan *unbalance*. Setelah difilter sinyal, kemudian dikoreksi dengan proses *enveloping*, bagian bawah (negatif) sinyal domain waktu dilipat ke bagian atas (positif) sehingga hasilnya tampak seluruh sinyal berada di atas sumbu referensi [9]. Proses *enveloping* dilakukan dengan transformasi Hilbert dan selanjutnya ditransformasikan sekali lagi menggunakan FFT untuk mendapatkan spektrum *envelope*. Keseluruhan proses tersebut akan mengeliminasi semua komponen frekuensi yang tidak terkait dengan frekuensi yang diakibatkan dampak seperti frekuensi poros, *misalignment*, dan *unbalance*.

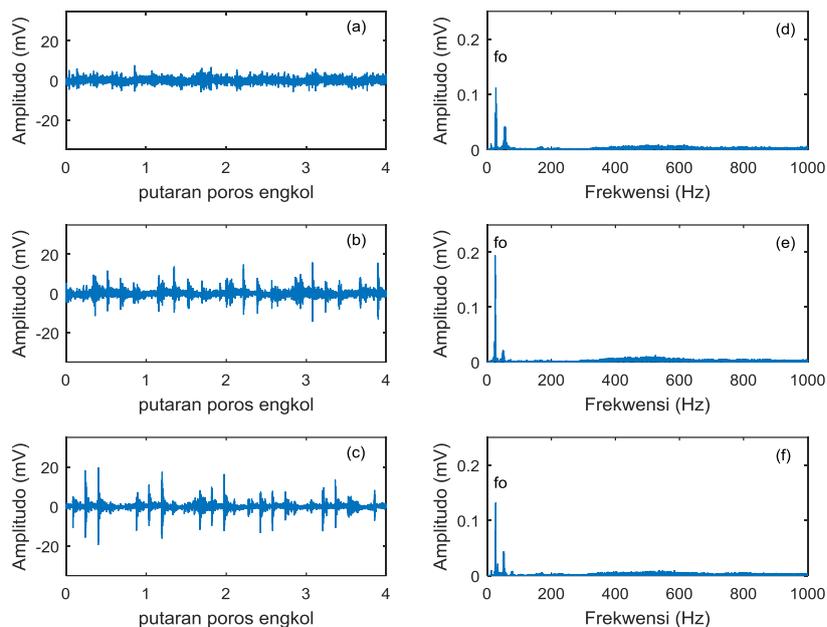


Gambar 2.4. Skema proses envelope

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3.1 adalah domain waktu dan domain frekuensi pada kecepatan poros 1500 RPM, sedangkan Gambar 3.2 adalah domain waktu dan domain frekuensi kecepatan 2000 RPM. Berturut-turut pada Gambar 3.1 (a), (b), dan (c) adalah domain waktu bantalan normal, cacat 0,25 mm dan cacat 0,50 mm yang menunjukkan peningkatan amplitudo sejalan dengan peningkatan ukuran besar cacat. Peningkatan amplitudo disebabkan oleh peningkatan energi impact benturan antara lokasi cacat dengan elemen gelinding bantalan. Ukuran cacat yang lebih besar akan menghasikan impact yang lebih besar. Walaupun terdapat perbedaan amplitudo yang besar pada domain waktu, jenis cacat yang terjadi tidak dapat ditentukan. Spektrum bantalan cacat pada Gambar 3.1 (e) dan (f) menunjukkan amplitudo tinggi hanya terlihat pada frekuensi poros (f_o) sebesar 25 Hz, tetapi tidak terlihat pada frekuensi bantalan cacat yang besarnya dapat dilihat pada Tabel 3.1. Frekuensi bantalan cacat lintasan dalam dihitung menggunakan persamaan 2. Domain waktu dan domain frekuensi yang hampir sama juga diperoleh pada kecepatan poros 2000 RPM seperti dapat dilihat pada Gambar 3.2.

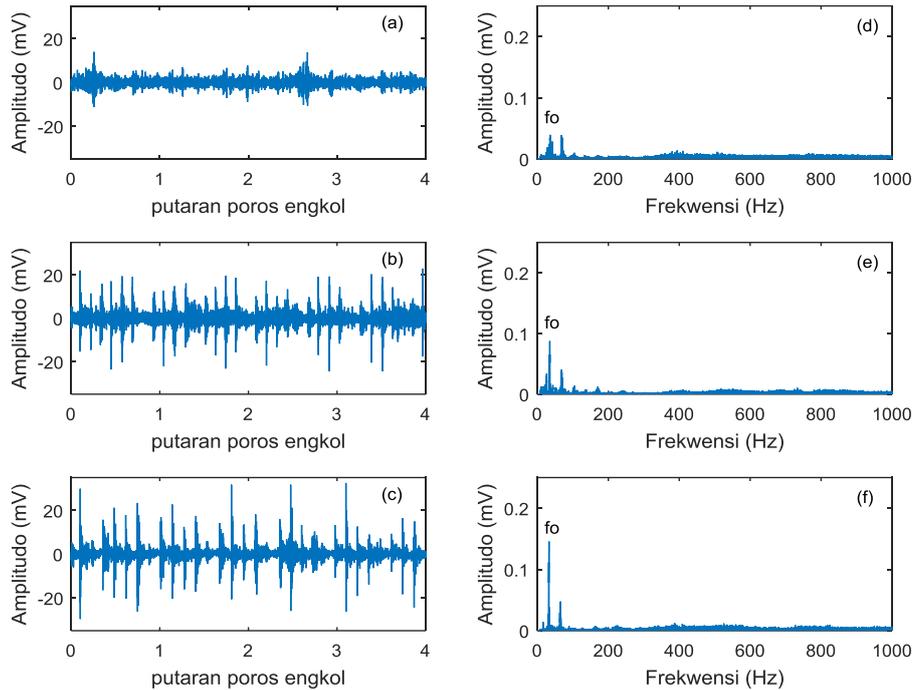
Spektrum pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 tidak berhasil mendeteksi frekuensi bantalan cacat lintasan dalam karena amplitudo impact akibat cacat relatif sangat kecil jika dibandingkan amplitudo getaran akibat dari siklus pembakaran. Kesulitan mendeteksi amplitudo dari frekuensi bantalan cacat sering dijumpai pada kasus-kasus di motor pembakaran dalam dan mesin-mesin rotari lainnya yang memiliki *background noise* relatif besar.



Gambar 3.1. Domain waktu bantalan (a) normal, (b) cacat 0,25 mm, (c) cacat 0,50 mm. Domain frekuensi bantalan (d) normal, (e) cacat 0,25 m, (f) cacat 0,50 mm. Kecepatan putaran poros engkol 1500 RPM

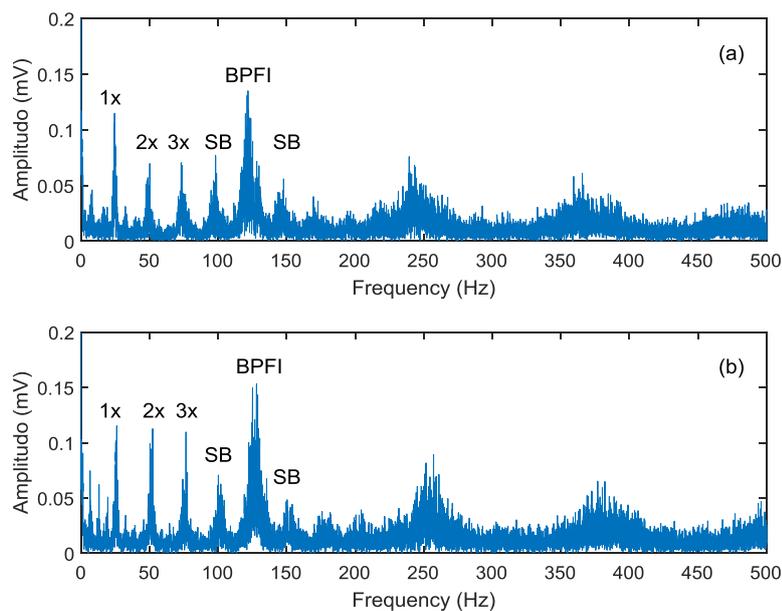
Table 3.1. Frekuensi Bantalan Cacat Lintasan Dalam (BPFI)

Harmonik	BPFI hasil perhitungan	
	Kecepatan poros 1500 RPM	Kecepatan poros 2000 RPM
1xBPFI	122,71 Hz	163,46 Hz
2xBPFI	245,45 Hz	326,92 Hz
3xBPFI	368,14 Hz	490,38 Hz



Gambar 3.2. Domain waktu bantalan (a) normal, (b) cacat 0,25 mm, (c) cacat 0,50 mm. Domain frekuensi bantalan (d) normal, (e) cacat 0,25 m, (f) cacat 0,50 mm. Kecepatan putaran poros engkol 2000 RPM

Gambar 3.3 adalah spektrum *envelope* kondisi cacat 0,25 mm dan 0,50 mm pada kecepatan poros 1500 RPM. Spektrum *envelope* tersebut menunjukkan 3 harmonik frekuensi BPFI yaitu 1xBPFI sebesar 122,3 Hz dengan amplitudo 0,02374 mV, 2xBPFI sebesar 245,4 Hz amplitudo 0,01379 mV, dan 3xBPFI sebesar 365,4 Hz amplitudo sebesar 0,01068 mV. Kondisi tersebut menunjukkan tidak terdapat perbedaan frekuensi cacat antara kondisi cacat 0,25 mm dan 0,30 mm karena frekuensi cacat bukan fungsi dari besar cacat. Namun demikian, terdapat peningkatan amplitudo pada semua frekuensi cacat pada kondisi cacat 0,50 mm yang disebabkan oleh peningkatan energi impact pada kondisi cacat yang lebih besar.

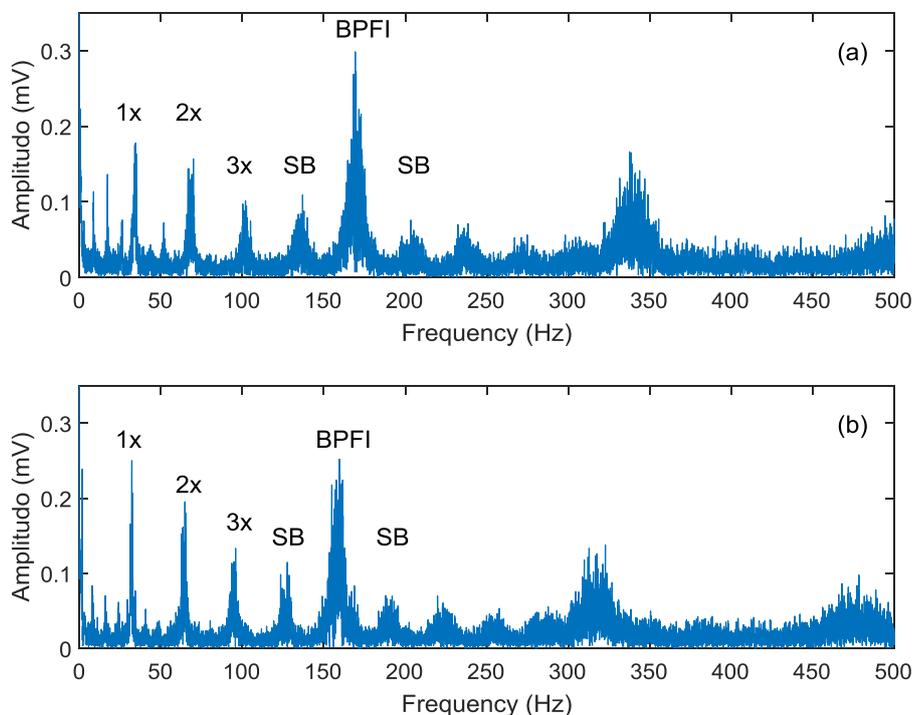


Gambar 3.3. Spektrum *envelope* (a) cacat 0,25 mm, (b) cacat 0,50 mm kecepatan poros 1500 RPM

Selain frekuensi poros dan BPFI, spektrum envelope juga menunjukkan *side band* (SB) yang terletak pada sisi sebelah kiri dan kanan BPFI. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa sinyal yang termodulasi akan menghasilkan *side band* pada spektrumnya. Jarak *side band* pada sisi samping kanan dan kiri dari frekuensi cacat bantalan pada kecepatan poros 1500 RPM adalah 1 kali kecepatan poros yaitu sebesar 25 Hz. *Side band* terjadi akibat modulasi amplitudo sinyal getaran dari benturan cacat lintasan dalam dengan elemen gelinding bantalan. Cacat lintasan dalam bergerak keluar dan masuk *loading zone*. Ketika cacat lintasan masuk *loading zone* akan menghasilkan amplitudo lebih tinggi dibandingkan ketika keluar dari *loading zone*. Hal ini mengakibatkan tinggi amplitudo pada domain waktu “berayun” naik-turun yang disebut *amplitude modulation* (AM). Cacat bantalan lintasan dalam adalah salah satu tipe cacat bantalan yang menghasilkan modulasi amplitudo pada domain waktu.

Gambar 3.4 (a) dan (b) berturut-turut adalah spektrum *envelope* cacat 0,25 mm dan 0,50 pada kecepatan poros 2000 RPM. Terlihat jelas frekuensi 1xBPFI sebesar 163,3 Hz dan dengan amplitudo 0,0283 mV, 2xBPFI sebesar 326,6 Hz dengan amplitudo 0,01728 mV, dan 3xBPFI sebesar 490,9 Hz dengan amplitudo 0,007387 mV. Sama dengan spektrum *envelope* pada kecepatan poros 1500 RPM pada Gambar 3.3, Gambar 3.4 pada kecepatan poros 2000 RPM juga menunjukkan amplitudo tinggi pada frekuensi poros dan BPFI beserta harmoniknya. Dapat diamati dengan jelas bahwa amplitudo pada spektrum di Gambar 3.4 secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan spektrum di Gambar 3.3. Peningkatan tinggi amplitudo disebabkan oleh energi benturan antara lokasi cacat dan elemen gelinding semakin tinggi dengan semakin tingginya kecepatan poros.

Side band juga terlihat jelas pada Gambar 3.4 dengan amplitudo lebih tinggi dibandingkan dengan spektrum di Gambar 3.3. Demikian juga, amplitudo *side band* teramat lebih tinggi pada cacat 0,50 mm dibandingkan dengan cacat 0,25 mm. Peningkatan tinggi amplitudo *side band* mengindikasikan dampak yang besar pada bantalan dan menunjukkan level kerusakan yang meningkat. Jarak *side band* ke BPFI teramat sebesar 33 Hz yang merupakan kecepatan poros.



Gambar 3.4. Spektrum *envelope* (a) cacat 0,25 mm, (b) cacat 0,50 mm kecepatan poros 2000 RPM

Spektrum *envelope* menunjukkan amplitudo tinggi pada frekuensi cacat bantalan yang mudah diamati dibandingkan dengan yang ditunjukkan pada spektrum. Analisis spektrum

sering tidak berhasil mendeteksi frekuensi cacat bantalan terutama pada kondisi cacat awal (*early fault*) atau pada kondisi ketika terdapat level getaran yang tinggi selain getaran berasal dari bantalan. Analisis *envelope* mampu mengeliminasi frekuensi getaran yang tidak berasal dari bantalan dengan menggunakan serangkaian prosedur *pre-processing* seperti *high-pass filter* dan transformasi Hilbert.

Spektrum *envelope* pada Gambar 3.3 dan 3.4 menunjukkan amplitudo tinggi pada frekuensi BPF1 yang tidak teramati pada spektrum pada Gambar 3.1 dan 3.2. Dapat diamati pula pada Gambar 3.1 dan 3.2 bahwa ukuran cacat dan kecepatan poros tidak berpengaruh terhadap peningkatan amplitudo BPF1. Artinya, spektrum tidak sensitif untuk mendeteksi cacat pada bantalan untuk semua level cacat dan kecepatan poros pada mesin-mesin pembakaran dalam.

Hasil sebaliknya diperoleh pada spektrum *envelope* pada Gambar 3.3 dan 3.4 bahwa amplitudo BPF1 tampak jelas dan mudah diamati pada semua ukuran cacat dan kecepatan poros. Terlihat peningkatan amplitudo BPF1 seiring dengan peningkatan level cacat dan kecepatan poros. Hasil ini sejalan dengan yang didapatkan oleh Kamiel dkk. [10]. Spektrum *envelope* mampu menampilkan BPF1 dan *side band* yang tidak teramati pada spektrum sehingga spektrum *envelope* efektif untuk mendeteksi cacat bantalan pada mesin-mesin pembakaran dalam.

4. KESIMPULAN

Mesin-mesin pembakaran-dalam menghasilkan *background noise* yang besar yang berasal dari ledakan di ruang bakar dan gerak translasi dan rotasi komponen-komponennya. Hal ini mengakibatkan sinyal getaran bantalan terbenam di dalam amplitudo tinggi komponen-komponen tersebut. Cacat bantalan menghasilkan frekuensi yang merupakan fungsi dari geometri dan kecepatan poros.

Spektrum tidak dapat menunjukkan BPF1 sinyal getaran mesin pembakaran dalam pada semua level cacat dan kecepatan poros. Amplitudo tinggi hanya teramati pada frekuensi kecepatan poros tidak berpengaruh pada peningkatan level getaran dan kecepatan poros dengan amplitudo BPF1.

Spektrum *envelope* terbukti mampu menampilkan BPF1 yang tidak terdeteksi oleh spektrum. Selain BPF1, frekuensi *side band* juga teramati dengan jelas bahwa tinggi amplitudo *side band* mengindikasikan level kerusakan. Teramati peningkatan tinggi amplitudo BPF1 dan *side band* yang sejalan dengan peningkatan ukuran cacat dan kecepatan poros.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Yani, Y. Resti, and F. Burlian, "Identification of bearing failure using signal vibrations," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1007, no. 1, p. 012067, 2018.
- [2] M. Kunli and W. Yunxin, "Fault diagnosis of rolling element bearing based on vibration frequency analysis," in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, pp. 198-201, 2011.
- [3] S. Liu, F. Gu, and A. Ball, "Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 220, no. 3, pp. 379-386, 2006.
- [4] Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Fault detection in a ball bearing system using minimum variance cepstrum," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 5, pp. 1433-1440, 2007.
- [5] A. Tiwari and R. Jatola, "Fault detection in bearing using envelope analysis," *Indian Journal Of Research*, vol. 3, no. 5, pp. 75-78, 2013.
- [6] D. Hochmann and E. Bechhoefer, "Envelope bearing analysis: theory and practice," in *2005 IEEE Aerospace Conference*, pp. 3658-3666, 2005.
- [7] B. Betea, P. Dobra, M.-C. Gherman, and L. Tomesc, "Comparison between envelope detection methods for bearing defects diagnose," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 6, pp. 137-142, 2013.

- [8] D. Kateris, D. Moshou, X.-E. Pantazi, I. Gravalos, N. Sawalhi, and S. Loutridis, "A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 61-71, 2014.
- [9] C. Z. Tan and M. S. Leong, "An experimental study of cavitation detection in a centrifugal pump using envelope analysis," *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 274-285, 2008.
- [10] B. P. Kamiel, M. Mulyani, and S. Sunardi, "Deteksi cacat bantalan bola pada pompa sentrifugal menggunakan spektrum getaran," *Semesta Teknika*, vol. 20, no. 2, pp. 204-215, 2017.