

Deteksi Cacat Lintasan Luar Bantalan Bola pada *Fan* Industri Menggunakan Metode *Cepstrum*

(Detection of Ball Bearing Outer Race Fault on Industrial Fan Using Cepstrum Method)

BERLI P KAMIEL

ABSTRAK

Bantalan bola pada sebuah fan (kipas) menerima beban dinamis yang sangat besar ketika beroperasi. Hal ini menyebabkan bantalan mengalami keausan yang harus dapat segera dideteksi untuk mencegah kerusakan/cacat lebih lanjut. Salah satu metode deteksi yang sering digunakan adalah metode analisis spektrum. Namun metode ini menghasilkan harmonik dan sidebands yang rumit jika diaplikasikan pada fan dengan transmisi roda gigi sehingga observasi amplitudo pada spektrum sulit dilakukan. Penelitian ini mengusulkan metode cepstrum ketimbang spektrum karena cepstrum dapat mengelompokkan berbagai harmonik yang berasal dari getaran komponen-komponen fan sehingga amplitudo cacat bantalan dapat diidentifikasi dengan mudah dan jelas. Bantalan yang digunakan dalam penelitian adalah tipe ASB 6209 2RS dengan kondisi normal (tanpa cacat) dan cacat lintasan luar. Cacat pada bantalan sengaja dibuat menggunakan Electrical Discharge Machine (EDM) dengan kawat kuningan berdiameter 0,25 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spektrum dapat mendeteksi frekuensi poros fan 9,11 Hz, frekuensi ball pass frequency outer (BPFO) 36,52 Hz, dan frekuensi poros roda gigi 22,59 Hz. Namun demikian amplitudo BPFO sulit diidentifikasi pada spektrum karena secara visual bercampur dengan amplitudo harmonik dari komponen-komponen lain yang turut bergetar pada fan. Hasil lebih baik diberikan oleh metode cepstrum dimana amplitudo quefrency BPFO sebesar 0,027 detik, yang bersesuaian dengan BPFO, sangat jelas terlihat karena tidak terganggu oleh amplitudo lain di sekitarnya.

Kata kunci : Bantalan bola, BPFO, *cepstrum*, fan, harmonik.

ABSTRACT

A Ball bearing in a fan experience a very large dynamic load during its operation. This causes wear which must be detected immediately to prevent severe damage. One detection method that is often used is the spectrum analysis. However, this method produces complex harmonics and sidebands when applied to a fan with a gear transmission which makes it difficult to observe amplitude on the spectrum. This research proposes the cepstrum method rather than the spectrum because the cepstrum can classify the various harmonics that come from the vibrations of the fan components so that the amplitude of the bearing defects can be identified easily and clearly. The bearings used in the study are ASB 6209 2RS with normal condition (no fault) and with outer race fault. Defect in the bearings is intentionally made using an Electrical Discharge Machine (EDM) with 0,25 mm brass wire. The results show that the spectrum can detect the fan shaft frequency of 9,11 Hz, the ball pass frequency outer race (BPFO) 36,52 Hz, and the gear shaft frequency of 22,59 Hz. However, the BPFO amplitude is difficult to identify on the spectrum because it is visually mixed with the harmonic amplitude of the other vibrating components. A prominent results are given by the cepstrum method where the quefrency of 0,027 s, which corresponds to the BPFO, is clearly visible because it is not disturbed by other amplitudes.

Keywords: Ball bearing, BPFO, *cepstrum*, fan, harmonics

PENDAHULUAN

Fan adalah salah satu mesin industri yang berfungsi menghasilkan aliran fluida untuk fungsi ventilasi, pendinginan ataupun pembakaran. Salah satu komponen penting sebuah fan adalah bantalan yang berfungsi sebagai tumpuan poros agar berputar dengan gesekan yang minim. Cacat pada bantalan dapat menyebabkan penurunan kinerja sebuah fan bahkan dapat menyebabkannya gagal beroperasi. Oleh karena itu sangat penting merumuskan sebuah metode untuk mendeteksi cacat pada bantalan sebelum meningkat menjadi kerusakan tingkat lanjut.

Terdapat beberapa metode berbasis getaran yang telah digunakan untuk mendeteksi cacat pada bantalan yaitu diantaranya analisis spektrum dan analisis *envelope* (Kamiel et al., 2017). Namun demikian kedua metode tersebut kurang efektif digunakan pada fan yang menggunakan transmisi roda gigi sebagai pereduksi putaran karena menghasilkan spektrum yang rumit akibat kehadiran sejumlah harmonik dan *sidebands* yang menyebabkan identifikasi amplitudo frekwensi cacat bantalan sulit dilakukan.

Transmisi roda gigi menghasilkan karakteristik getaran yang kompleks yang disebabkan diantaranya oleh geometri profil roda gigi, bantalan dan masalah *unbalance*. Hal tersebut menghasilkan kombinasi modulasi amplitudo dan frekwensi pada domain waktu, dan struktur harmonik dan *sidebands* pada spektrum (Vernekar et al., 2014). Metode berbasis spektrum konvensional seperti spektrum *envelope* menjadi tidak efektif pada kasus ini.

Cepstrum dapat dinyatakan sebagai spektrum dari logaritma sebuah spektrum (dalam skala logaritma untuk amplitudo namun skala linear untuk frekwensi). *Cepstrum* dapat digunakan untuk mendeteksi sinyal periodik pada sebuah spektrum, misalnya kelompok harmonik dan *sidebands* yang umum terjadi pada sistem transmisi roda gigi (Randall & Sawalhi, 2011). Kelompok harmonik yang dihasilkan tersebut menyebabkan spektrum transmisi roda gigi menjadi kompleks dan rumit.

Cepstrum awalnya digunakan di bidang analisis percakapan (*speech analysis*) yang bertujuan mendeteksi struktur harmonik suara manusia seperti ditunjukkan pada hasil penelitian oleh Makhijani et al. (2011). Demikian pula

penelitian Ning dan Jie (2007) menyelidiki sinyal yang mengandung gema (*echoes*) yang menghasilkan struktur periodik pada spektrumnya.

Struktur periodik pada sebuah spektrum juga dijumpai pada spektrum getaran sistem transmisi roda gigi dalam bentuk kelompok harmonik dan *sidebands*. Vernekar et al. (2015) menyatakan bahwa *sidebands* yang dijumpai pada spektrum transmisi roda gigi dapat berasal dari modulasi amplitudo putaran poros, eksentrisitas roda gigi, dan variasi tekanan kontak antar gigi.

Deteksi cacat bantalan pada sebuah sistem transmisi roda gigi menjadi sulit dilakukan pada spektrum karena kehadiran sejumlah struktur periodik dan harmonik. Amplitudo cacat bantalan sering terbenam atau tersembunyi diantara amplitudo-amplitudo harmonik komponen lain (Gupta & Pradhan, 2017).

Penelitian yang dilakukan oleh Morsy dan Achtenova (2015) untuk mendiagnosis cacat roda gigi menyimpulkan bahwa metode spektrum (dalam hal ini spektrum *envelope*) dan *cepstrum* efektif untuk mendeteksi cacat, namun kesulitan penerapan spektrum *envelope* adalah keharusan menentukan frekwensi-tengah filter terlebih dahulu. Kelebihan utama *cepstrum* adalah kemampuan identifikasi cacat lebih awal karena *cepstrum* dapat memisahkan sinyal periodik dan harmonik dengan mudah dan jelas.

Peeters et al. (2017) menyatakan bahwa salah satu langkah penting untuk mendeteksi cacat bantalan pada sistem transmisi roda gigi adalah memisahkan sinyal cacat bantalan dari sinyal-sinyal lain yang mengganggu seperti sinyal dari poros dan roda gigi. Sinyal bantalan merupakan sinyal siklostasioner yang menghasilkan frekwensi menyebar (*smearing*) pada spektrum, sedangkan sinyal dari poros dan roda gigi adalah sinyal deterministik yang menghasilkan frekwensi diskrit pada spektrum. *Cepstrum* akan mengelompokkan sinyal deterministik pada spektrum sehingga mudah dideteksi dan dieliminasi sehingga tidak mengganggu proses deteksi bantalan cacat.

Beberapa penelitian tentang *cepstrum* dan variasinya untuk mendeteksi sinyal bantalan cacat menunjukkan hasil yang menjanjikan, seperti yang telah dilakukan oleh Zhang et al. (2012), Borghesani et al. (2013) dan Peeters et al. (2017). Namun demikian penelitian tersebut menggunakan pendekatan yang relatif

kompleks menggunakan tahap *pre-processing* sinyal tingkat lanjut, seperti resonansi *stochastic*, *pre-whitening* dan *automated cepstrum editing*.

Penelitian ini membandingkan pendekatan spektrum *envelope* dengan *cepstrum* untuk mendeteksi cacat bantalan pada sistem transmisi roda gigi. Varian *cepstrum* yang digunakan adalah *cepstrum-real* tanpa *pre-processing* sinyal. Perbandingan ini bertujuan untuk menyelidiki potensi *cepstrum-real* tanpa *pre-processing* yang lebih sederhana untuk mendeteksi cacat bantalan pada sistem transmisi roda gigi. Spektrum *envelope* digunakan sebagai pembanding hasil yang diperoleh oleh *cepstrum-real*.

METODE PENELITIAN

Frekuensi eksitasi impuls akibat adanya cacat local pada lintasan luar bantalan disebut *ball pass frequency outer race* (BPFO), yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

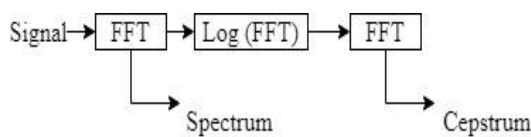
$$BPFO = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad (1)$$

Keterangan:

- Nb : Jumlah elemen bola,
- Fr : Frekuensi poros (Hz),
- Bd : Diameter bola (mm),
- Pd : Diameter Pitch (mm),
- α : Sudut kontak (derajat).

1. Cepstrum

Cepstrum merupakan transformasi fourier logaritma sebuah spektrum sehingga dapat juga dinyatakan sebagai spektrum dari spektrum. Gambar 1. menunjukkan skema hubungan antara spektrum dan *cepstrum*. Nama *cepstrum* berasal dari membalik empat huruf pertama dari *spectrum*. Demikian pula *quefrequency* berasal dari *frequency*, dan *rahmonic* dari *harmonic*.



GAMBAR 1. Perbandingan skema spektrum dan cepstrum

Jika diketahui sebuah sinyal $x(t)$ maka definisi *cepstrum*-kompleks adalah sebagai berikut,

$$C_c = \mathcal{F}^{-1}\{\ln(X(f))\} \\ = \mathcal{F}^{-1}\{\ln(A(f)) + j\phi(f)\} \quad (2)$$

dimana $X(f)$ adalah spektrum frekwensi sinyal $x(t)$:

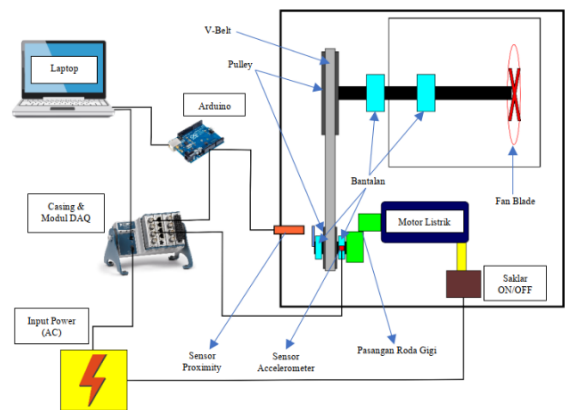
$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = A(f)e^{j\phi(f)}$$

jika sudut fasa sama dengan nol maka didapat *cepstrum-real*,

$$C_r = \mathcal{F}^{-1}\{\ln(A(f))\} \quad (3)$$

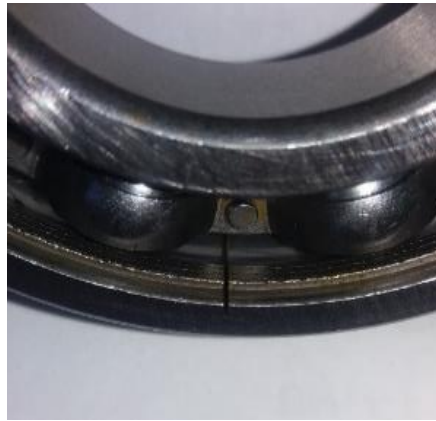
2. Alat uji eksperimen

Pengukuran getaran dilakukan pada sebuah alat uji seperti ditunjukkan pada Gambar 2. yang terdiri dari fan yang digerakkan oleh motor listrik melalui mekanisme pereduksi kecepatan berupa *gearbox* dan sabuk-puli. Sebuah akselerometer diletakkan pada rumah bantalan uji dan terhubung dengan sistem data akuisisi dari National Instrument NI 9234. Sinyal takometer didapatkan dari takometer yang diletakkan di dekat puli kecil. Bantalan uji adalah bantalan bola yang terletak pada poros puli kecil.

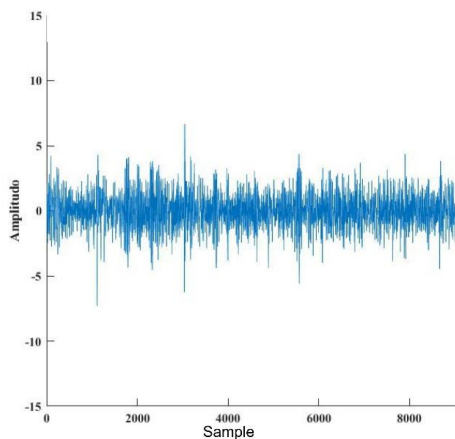


GAMBAR 2. Skema alat uji eksperimen

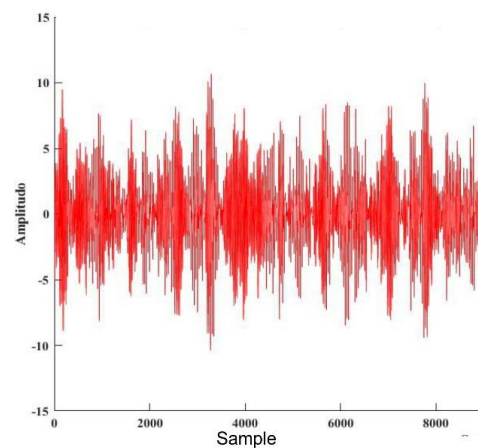
Bantalan uji adalah bantalan bola *single row* seri ASB 6209 berdiameter dalam 45 mm, diameter luar 85 mm, lebar 19 mm dan jumlah bola 10 buah. Gambar 3. menunjukkan cacat lintasan luar yang dibuat dengan *wire cut* dengan kawat kuningan berdiameter 1,4 mm. Potongan dilakukan sepanjang lebar bantalan.



GAMBAR 3. Cacat lintasan luar bantalan



GAMBAR 4. Domain waktu bantalan normal



GAMBAR 5. Domain waktu bantalan cacat lintasan luar

Sinyal akselerasi getaran direkam menggunakan akselerometer Bruel & Kjaer sedangkan sinyal takometer diambil menggunakan takometer *proximity*. *Sampling rate* yang digunakan sebesar 17066 Hz dan sinyal getaran direkam dengan durasi 10 detik.

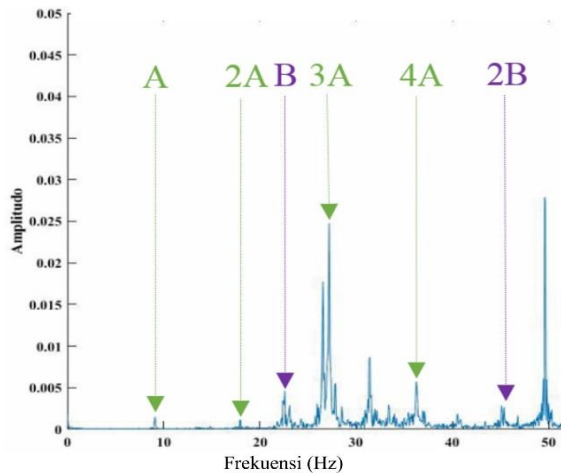
HASIL DAN PEMBAHASAN

Plot sinyal getaran dari dua bantalan yaitu bantalan normal dan bantalan cacat lintasan luar dengan kecepatan poros 550 rpm dapat dilihat berturut-turut pada Gambar 4. dan Gambar 5.

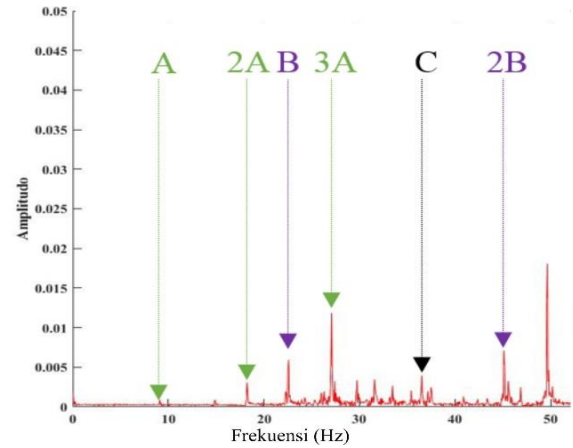
Kedua plot menunjukkan perbedaan besar amplitudo antara bantalan kondisi normal dan kondisi cacat lintasan luar. Secara umum amplitudo sinyal getaran bantalan kondisi normal lebih rendah dibandingkan dengan amplitudo yang dihasilkan bantalan cacat

lintasan-luar. Hal ini disebabkan oleh energi *impact* yang terjadi pada bantalan cacat jauh lebih besar dibandingkan dengan yang diterima oleh bantalan normal. Energi *impact* direpresentasikan oleh tinggi amplitudo pada domain waktu. Kenaikan amplitudo tidak dapat digunakan sebagai indikator deteksi bantalan cacat karena tidak hanya *impact* dari bantalan cacat saja yang menghasilkan amplitudo tinggi namun hal yang sama terjadi pula pada *impact* roda gigi.

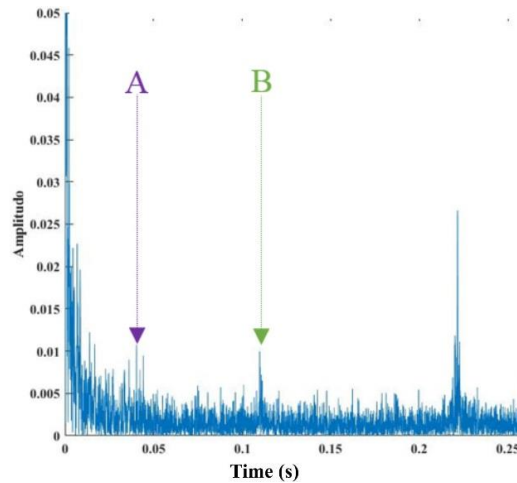
Gambar 6. adalah spectrum bantalan normal dimana dapat diobservasi *peak* amplitudo frekwensi poros fan sebesar 9,16 Hz dan harmoniknya (garis A, 2A, 3A dan 4A) demikian pula *peak* amplitudo poros roda gigi sebesar 22,5 Hz dan harmoniknya (garis B dan 2B).



GAMBAR 6. Spektrum bantalan normal



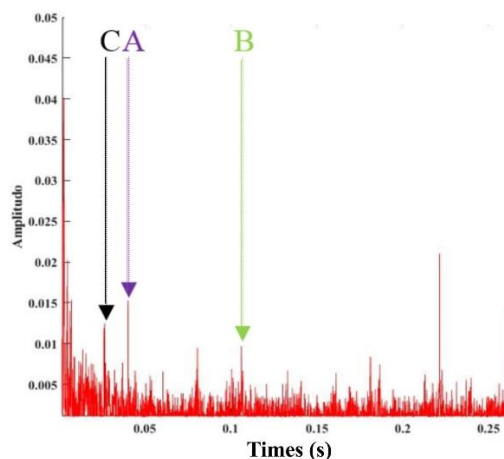
GAMBAR 7. Spektrum bantalan cacat lintasan luar



GAMBAR 8. Cepstrum bantalan normal

Sedangkan Gambar 7. adalah spektrum yang berasal dari bantalan cacat lintasan luar dimana dapat diobservasi *peak* amplitudo cacat lintasan-luar bantalan (BPFO) pada 36,52 Hz (garis C) yang berada di antara *peak* amplitudo dan harmonik komponen poros dan roda gigi. Pada spektrum tersebut terdapat dua periodisitas dalam bentuk harmonik yaitu *peak* amplitudo poros fan dan *peak* amplitudo poros roda gigi. Masing-masing periodisitas tersebut pada dasarnya menceritakan hal yang sama yaitu karakteristik getaran poros fan dan poros roda gigi sehingga informasi periodisitas pada *spectrum* dapat dianggap *redundant*.

Gambar 8 menunjukkan plot *cepstrum* bantalan normal dimana dapat diobservasi *peak* pada *quefreny* 0,044 detik (garis A) yang berkorespondensi dengan frekwensi poros roda gigi sebesar 22,5 Hz. Demikian pula *quefreny* poros roda gigi terlihat jelas *peak* pada 0,109 detik (garis B) yang sesuai dengan frekwensi poros fan sebesar 9,16 Hz. *Peak* pada *cepstrum* terlihat lebih sederhana dibandingkan *peak* pada spektrum yang menyebabkan observasi frekwensi tertentu menjadi lebih mudah. Repetisi harmonik direpresentasikan menjadi satu *peak quefreny* tanpa *rahmonic*.



GAMBAR 9. Cepstrum bantalan cacat lintasan luar

Cepstrum bantalan cacat seperti ditunjukkan pada Gambar 9 terlihat jelas *quefreny* (garis C) dari BPFO sebesar 0,027 detik yang sesuai dengan frekuensi BPFO yaitu 36,52 Hz. Sedangkan garis A dan B berturut-turut adalah *quefreny* poros roda gigi dan poros fan. *Quefreny* BPFO memiliki *peak* yang tinggi dan tidak berada diantara barisan *peak* lainnya sehingga mudah diobservasi. Hal ini berbeda pada spektrum dimana *peak* BPFO tersamar diantara barisan *peak* dari harmonik poros fan dan poros roda gigi.

Tiga buah *peak quefreny* pada *cepstrum* di Gambar 9 menunjukkan periodisitas komponen frekwensi poros fan, poros roda gigi dan BPFO. *Cepstrum* mengelompokkan peristiwa periodik yang sering terlihat rumit pada spektrum menjadi *quefreny* dan kadang-kadang *rahmonic* yang lebih sederhana. Kehadiran *peak* BPFO pada spektrum maupun *cepstrum* adalah indikator terjadinya cacat pada lintasan luar bantalan. Walaupun spektrum juga menunjukkan *peak* pada BPFO namun *peak* tersebut tidak selalu mudah diobservasi karena berada di tengah-tengah *peak* harmonik komponen frekwensi lainnya. Sebaliknya, observasi *quefreny* yang berkaitan dengan cacat bantalan lebih mudah dilakukan karena *peak* BPFO terlihat jelas dan *cepstrum* memisahkan antara periodistas cacat bantalan dengan periodisitas harmonik lainnya termasuk noise.

KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan efektifitas deteksi cacat bantalan bola lintasan luar menggunakan metode *cepstrum* dan spektrum.

Kedua metode berhasil mendeteksi cacat bantalan pada sebuah fan dengan sistem transmisi sabuk-puli dan gearbox. Walaupun metode konvensional spektrum menunjukkan *peak* pada BPFO namun tidak efektif karena *peak* tersebut rendah dan sulit diobservasi. Selain rendah *peak* BPFO tersebut terbenam diantara harmonik komponen frekwensi lainnya. Sistem transmisi sabuk-puli dan gearbox secara natural menghasilkan spektrum dengan struktur harmonik yang rumit. Metode *cepstrum* terlihat lebih efisien dalam mendeteksi cacat bantalan dimana *peak quefreny* yang terkait dengan BPFO terlihat jelas. Kelebihan utama menggunakan *cepstrum* adalah kemampuan mendeteksi bantalan cacat lebih awal karena *peak* rendah cacat minor segera dapat dideteksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Fahri Al Rokhim yang telah membantu dalam pembuatan spesimen uji bantalan dan pengambilan data sehingga penelitian ini dapat dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Borghesani, P., Pennacchi, P., Randall, R. B., Sawalhi, N., & Ricci, R. (2013). Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(2), 370-384.

- Gupta, P., & Pradhan, M. K. (2017). Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2, Part A), 2085-2094.
- Kamiel, B. P., Mulyani, M., & Sunardi, S. (2017). Deteksi Cacat Bantalan Bola Pada Pompa Sentrifugal Menggunakan Spektrum Getaran. *Semesta Teknika*, 20(2), 204-215.
- Makhijani, R., Shrawankar, U., & Thakare, V. M. (2011). Speech Enhancement Using Pitch Detection Approach For Noisy Environment. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(2), 1764-1769.
- Morsy, M. E., & Achtenova, G. (2015). *Envelope Detection and Cepstrum Analysis for Gear Fault Diagnosis - A Comparative Study*. Paper presented at the Measurement, 10th International Conference, Smolenice, Slovakia.
- Ning, C., & Jie, Z. (2007, 22-24 Aug. 2007). *A Novel Echo Detection Scheme based on Autocorrelation of Power Cepstrum*. Paper presented at the 2007 Second International Conference on Communications and Networking in China.
- Peeters, C., Guillaume, P., & Helsen, J. (2017). A comparison of cepstral editing methods as signal pre-processing techniques for vibration-based bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, 354-381.
- Randall, R. B., & Sawalhi, N. (2011). Use of The Cepstrum to Remove Selected Discrete Frequency Components From A Time Signal. In *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration* (Vol. 5, pp. 451-461). New York: Springer.
- Vernekar, K., Kumar, H., & Gangadharan, K. V. (2014). Gear Fault Detection Using Vibration Analysis and Continuous Wavelet Transform. *Procedia Materials Science*, 5, 1846-1852.
- Vernekar, K., Kumar, H., & Gangadharan, K. V. (2015). Fault Detection of Gear Using Spectrum and Cepstrum Analysis. *Proc Indian National Science Acad*, 81(5), 1177-1182.
- Zhang, X., Hu, N., Hu, L., Fan, B., & Cheng, Z. (2012). Enhanced Fault Detection of Rolling Element Bearing Based on Cepstrum Editing and Stochastic Resonance. *Journal of Physics: Conference Series*, 364, 012029.

 PENULIS:

Berli P Kamiel

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul,
Yogyakarta

Email : berlikamiel@umy.ac.id