

## Diagnosa Kerusakan Roda Gigi Dengan Sinyal Getaran

A. Widodo<sup>a\*</sup>, Dj. Satrijo<sup>b</sup> dan I. Haryanto<sup>c</sup>

Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro,  
Jl. Prof. Sudarto, SH Tembalang Semarang 50275 Indonesia  
Email: <sup>a\*</sup>awid@undip.ac.id, <sup>b</sup>djsatrijo@gmail.com, <sup>c</sup>ismoyo2001@yahoo.de

### Abstrak

Artikel ini membahas deteksi dan diagnosa kerusakan roda gigi dengan menggunakan sinyal getaran. Deteksi dan diagnosa kerusakan roda gigi dilakukan dengan memakai metode pendekatan waktu-frekuensi (*time-frequency*) dan analisis transformasi wavelet kontinyu (*continuous wavelet transform*) kemudian hasilnya dibandingkan dengan penggunaan metode analisis *cepstrum*. Studi eksperimen dilakukan dengan pengujian roda gigi pada kondisi normal, aus dan patah satu gigi. Sinyal getaran diakuisisi dari *test-rig* menggunakan tiga buah akselerometer, sedangkan data putaran poros diambil dengan sensor *tachometer* optik. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa analisis sinyal domain frekuensi dengan *fast-fourier transform* (FFT) kurang sensitif terhadap kondisi roda gigi aus maupun patah. Namun demikian, metode *short-time fourier transform* (STFT) dapat memonitor adanya kerusakan pada roda gigi. Metode transformasi wavelet terbukti cukup baik untuk mendeteksi adanya cacat atau kerusakan pada roda gigi. Pada penelitian ini, metode wavelet dilakukan pada sinyal getaran roda gigi yang sebelumnya sudah dilakukan proses *time synchronous averaging* (TSA).

**Kata kunci:** Roda gigi, Getaran, Diagnosis, Wavelet, *Time synchronous averaging*, *Cepstrum*.

### Pendahuluan

Teknik untuk mendiagnosa kerusakan roda gigi yang paling populer adalah dengan mengambil sinyal getaran dari roda gigi melalui sensor akselerometer yang dipasang pada rumah roda gigi tersebut. Target yang akan dituju dari kegiatan diagnosa adalah untuk mendeteksi adanya kerusakan serta jenis kerusakan yang terjadi pada tahap awal kerusakan yang selanjutnya digunakan untuk memantau perkembangan kerusakan tersebut sehingga bisa diperkirakan sisa umurnya. Pada metode diagnosa menggunakan sinyal getaran, komponen sinyal yang paling utama adalah frekuensi *mesh* (*gear mesh frequency*-GMF) beserta komponen harmoniknya serta sinyal *sidebands* yang terletak di kiri dan kanan frekuensi-frekuensi dominan. Jumlah dan besarnya amplitudo *sidebands* dapat menunjukkan indikasi adanya kerusakan pada roda gigi beserta sumber penyebabnya [1].

Analisis *cepstral* sudah banyak dipakai untuk pemantauan kondisi roda gigi. Metode *cepstrum* merupakan metode yang sesuai untuk mendeteksi *sidebands* pada spektrum getaran serta merupakan fitur yang dapat merepresentasikan kondisi roda gigi. *Cepstrum* dapat memperkirakan rerata spasi *sidebands* pada rentang frekuensi yang lebar sehingga mampu menentukan periodisitas

*sidebands* dengan cukup akurat. Karena itulah metode *cepstrum* bisa diterapkan untuk deteksi dan diagnosa roda gigi [2].

Analisis spektral yang lain adalah *spectral correlation density* (SCD) pada sinyal getaran untuk mencari korelasi antara frekuensi harmonik pada saat meshing dengan *sidebands* yang dihasilkan. SCD ini merupakan karakteristik spektrum primer yang dihasilkan oleh roda gigi cacat. Oleh karenanya, SCD bisa diterapkan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi kecacatan pada roda gigi [3].

Kecacatan pada roda gigi, misalnya retak, akan memberikan sinyal eksitasi impak (*transient*) pada saat meshing dengan roda gigi pasangannya. Karena itu, sinyal tersebut bisa dianggap sebagai sinyal non-stasioner. Kebanyakan metode sistem pengolah sinyal didasarkan pada asumsi bahwa sinyal yang ditinjau adalah stasioner. Oleh sebab itu, sistem pengolah sinyal biasa kurang sesuai untuk mendeteksi fenomena dinamik yang berlangsung singkat (*short-duration*) seperti sinyal impak. Sebaliknya, aplikasi metode pendekatan distribusi waktu-frekuensi melalui STFT maupun WT lebih cocok digunakan untuk menganalisis fenomena sinyal karena impak [4-5].

Sudah dijelaskan di depan bahwa analisa spektrum sederhana biasanya tidak mampu untuk mendeteksi adanya kerusakan pada roda gigi pada

tahap awal, oleh sebab itu banyak peneliti mengajukan teknik diagnosa roda gigi yang lebih akurat dalam mendeteksi kerusakan yang terjadi.

Makalah ini bertujuan untuk memeriksa dan membandingkan beberapa metode deteksi dan diagnosa kerusakan roda gigi dengan tujuan memperoleh metode yang paling efektif berdasarkan data eksperimen.

## Dasar Teori

### 1. Time synchronous averaging (TSA)

TSA adalah sebuah teknik pengolahan sinyal dimana komponen periodik sinyal diekstrak dari sinyal yang mengandung derau (*noisy signal*). Penggunaan TSA sesuai untuk analisis sinyal roda gigi, dimana metode ini memisahkan fitur sinyal getaran roda gigi terhadap sinyal-sinyal lain beserta sumber derau yang tidak sinkron dengan sinyal roda gigi tersebut.

Rumus TSA dapat dinyatakan sebagai berikut [6]

$$y_{av}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(t+nT) \quad (1)$$

dimana  $N$  adalah besarnya putaran (rpm),  $n$  menyatakan jumlah sampling data tiap putaran dan  $T$  adalah perioda.

### 2. Short-time fourier transform (STFT)

Metode STFT dilakukan dengan cara memindahkan *time windowing* sepanjang pengukuran dan mendapatkan *fourier spectrum* sebagai fungsi dari pergeseran waktu (*time-shift*). Rumus dari STFT ditunjukkan di bawah ini [7]

$$x(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

dimana  $\omega$  adalah fungsi jendela dan  $x(t)$  adalah sinyal yang akan ditransformasi.

### 3. Transformasi wavelet

Transformasi wavelet merupakan sebuah fungsi konversi yang dapat digunakan untuk membagi suatu fungsi atau sinyal ke dalam komponen frekuensi yang berbeda, yang selanjutnya komponen-komponen tersebut dapat dipelajari sesuai dengan skalanya. Wavelet merupakan sebuah fungsi variabel real  $x$ , diberi notasi  $\psi$  dalam ruang fungsi  $L^2(\mathbb{R})$ . Fungsi ini dihasilkan oleh parameter skala dan translasi, yang dinyatakan dengan persamaan berikut [8]

$$x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (3)$$

dimana  $a$  dan  $b$  masing-masing adalah faktor skala dan parameter translasi, sedangkan  $\psi$  adalah fungsi kontinu yang dinyatakan dengan persamaan

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - k) ; j, k \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

## Eksperimen

Data akuisisi sinyal getaran dilakukan pada sebuah *back-to-back* test rig roda gigi hasil rancangan sendiri. Sebelumnya roda gigi diberi beban berupa sudut puntir (*twist*) pada poros. Terdapat tiga buah roda gigi yang diambil data getarannya yaitu kondisi normal, aus dan patah satu gigi. Tiga buah sensor akselerometer digunakan untuk mengambil data getaran melalui perangkat DAQ SpectraPad. Sampling rate yang diambil sebesar 5 kHz dengan rentang frekuensi maksimum 6 kHz, jumlah data yang dihasilkan sebesar 40960 data point. Sebuah sensor kecepatan putaran juga digunakan berupa sensor optik dari Lattice Instr., guna keperluan akuisisi sinyal putaran poros untuk proses TSA.

Proses data akuisisi sinyal getaran disajikan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1 Data akuisisi getaran roda gigi

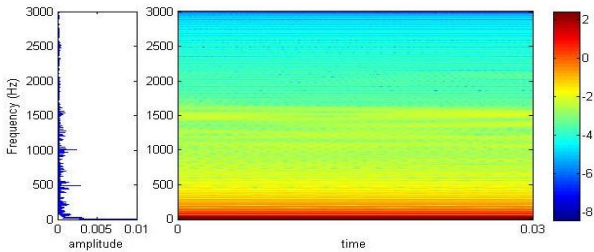


Gambar 2 Posisi sensor akselerometer

## Hasil dan Diskusi

STFT sinyal getaran roda gigi kondisi normal ditunjukkan pada Gambar 3, dimana parameter frekuensi getaran diplot terhadap waktu.

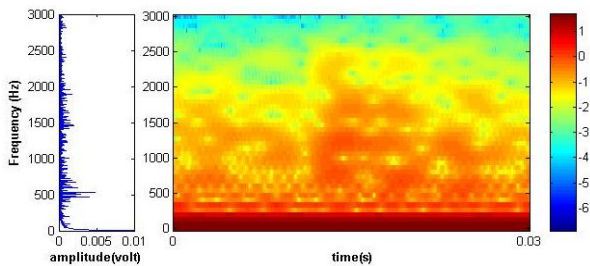
Amplitudo getaran direpresentasikan dengan degradasi warna merah (amplitudo besar) menuju warna biru muda (amplitudo kecil). Untuk roda gigi normal, kondisi degradasi amplitudo yang dihasilkan cenderung teratur dari warna merah, kuning menuju warna biru.



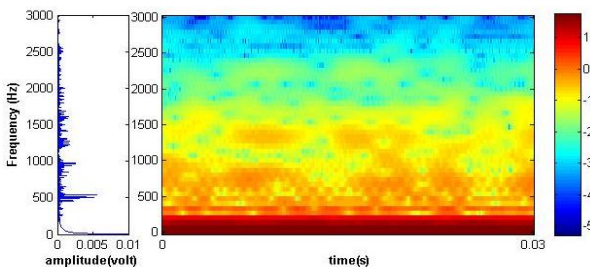
Gambar 3 Plot STFT roda gigi normal

STFT sinyal getaran untuk roda gigi aus dan patah satu gigi ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa amplitudo getaran bertambah besar dan terdistribusi pada sepanjang frekuensi 0-3000 Hz.

Pada roda gigi aus distribusi amplitudo getaran dapat dikatakan cukup tinggi merata ada rentang frekuensi yang diambil. Hal ini terlihat pada dominasi warna merah pada baik frekuensi rendah ataupun tinggi.



Gambar 4 Plot STFT roda gigi aus



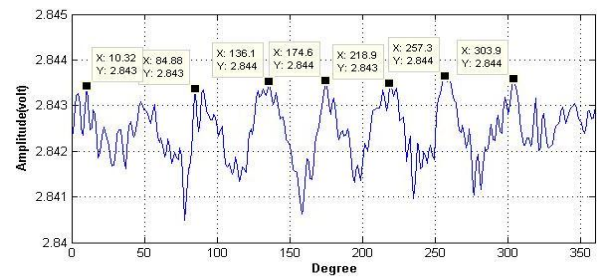
Gambar 5 Plot STFT roda gigi patah

Pada roda gigi yang patah, kondisi STFT dengan amplitudo tinggi secara signifikan dicapai pada frekuensi di sekitar 500 Hz beserta kelipatannya. Jika dibandingkan dengan kondisi roda gigi aus, distribusi warna merah (amplitudo tinggi) tidak merata pada seluruh rentang frekuensi pengambilan data, tetapi hanya pada

spot tertentu, serta amplitudo mengecil (warna biru) pada daerah frekuensi tinggi.

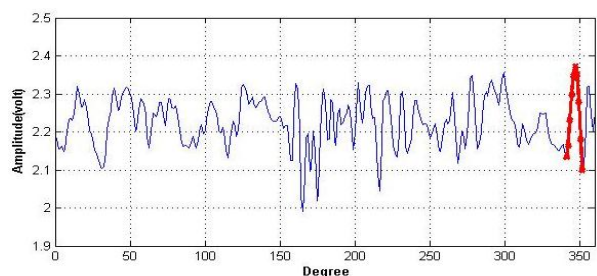
Kondisi TSA untuk roda gigi normal memiliki pola yang cukup beraturan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Amplitudo getaran pada seluruh daerah sudut putaran roda gigi relatif sama.

Namun demikian pada roda gigi aus, pola sinyal getarannya berubah menjadi tidak beraturan pada seluruh daerah sudut putaran, demikian juga besar amplitudo getarannya. Keausan dapat dikatakan dimulai pada sudut putar 160° dari referensi yang mana ditunjukkan oleh naiknya frekuensi getaran pada daerah tersebut sampai pada sudut 300°. Amplitudo getaran yang signifikan ditunjukkan dengan tanda merah pada sinyal TSA (Gambar 7).

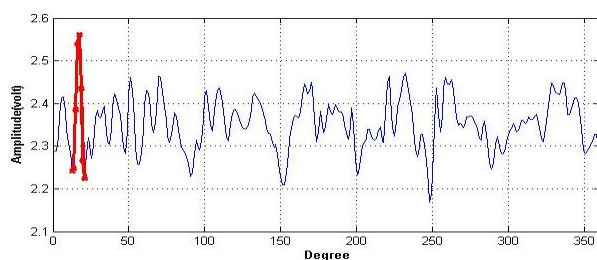


Gambar 6. TSA getaran roda gigi normal

Roda gigi dengan kondisi patah satu gigi juga memberikan pola sinyal getaran yang berbeda sepanjang sudut putarannya. Gambar 8 menunjukkan adanya daerah cacat patah gigi terjadi pada sudut putar sekitar 20°, ditandai dengan adanya peningkatan frekuensi getaran serta naiknya amplitudo (warna merah) pada daerah tersebut.



Gambar 7. TSA getaran roda gigi aus

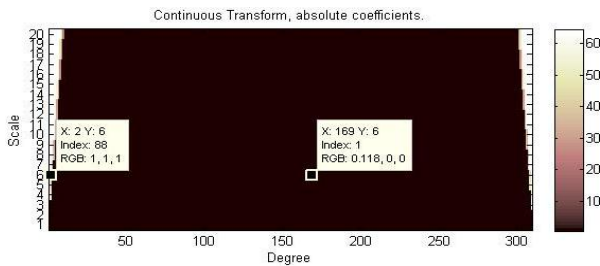


Gambar 8. TSA getaran roda gigi patah

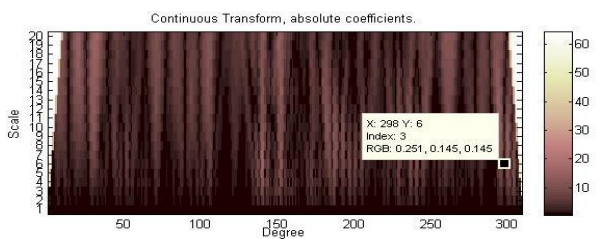
Analisis sinyal getaran roda gigi kondisi normal, aus dan patah satu gigi dengan menggunakan wavelet ditampilkan pada Gambar 9-11. Presentasi transformasi wavelet kontinu (CWT) untuk sinyal getaran kondisi normal menunjukkan skala koefisien yang relatif seragam (Gambar 9). Sedangkan untuk kondisi roda gigi aus menampilkan distribusi koefisien wavelet kontinu yang berbeda terutama pada sudut putar 160° (dari referensi) dimana kondisi aus berada (Gambar 10).

Gambar 11 menunjukkan kondisi koefisien wavelet untuk sinyal roda gigi patah. Pada sudut putar sekitar 20° menunjukkan pola yang berbeda yaitu adanya frekuensi getaran yang relatif tinggi dibandingkan dengan daerah sudut putar yang lain.

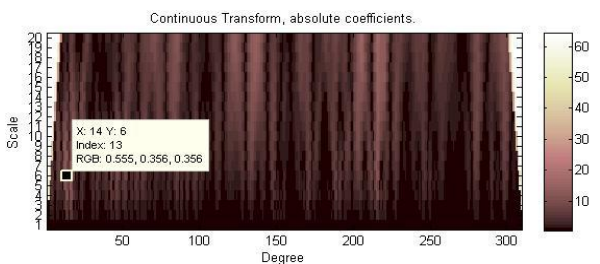
Observasi dari presentasi STFT, TSA maupun CWT menunjukkan kemampuan metode tersebut mendeteksi adanya kecacatan yang terdapat pada roda gigi secara jelas berdasar frekuensi, amplitudo serta lokasi (relatif) daerah cacat.



Gambar 9 CWT sinyal roda gigi normal

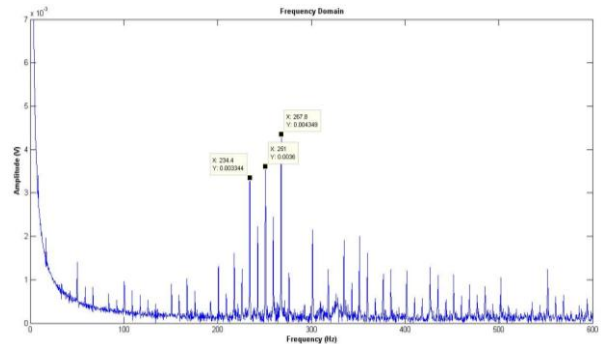


Gambar 10 CWT sinyal roda gigi aus



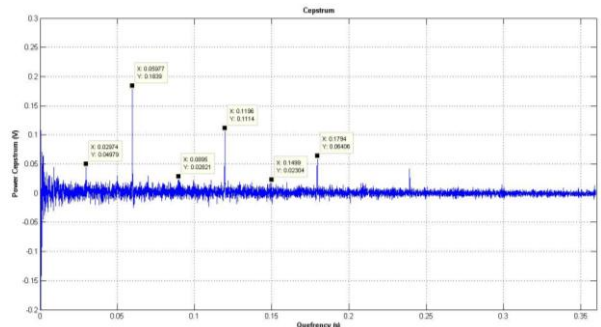
Gambar 11 CWT sinyal roda gigi patah

Sebagai perbandingan antara metode di atas dengan metode FFT dan *cepstrum*, maka ditunjukkanlah (sebagai contoh kasus) hasil FFT serta *cepstrum* untuk kondisi roda gigi aus. Gambar 12 menyajikan hasil FFT sinyal getaran roda gigi pada kondisi aus. Dari Gambar 12 tersebut terlihat banyak sekali puncak-puncak amplitudo yang muncul beserta *sidebands*-nya, sehingga deteksi kerusakan cukup sulit dilakukan meskipun *gear mesh frequency* (GMF) dapat ditentukan sebelumnya, yaitu sebesar 250 Hz.



Gambar 12 FFT sinyal getaran roda gigi aus

Tampilan *cepstrum* untuk sinyal getaran roda gigi aus ditunjukkan pada Gambar 13. Munculnya puncak-puncak yang sangat dominan pada *cepstrum* tersebut sangat memudahkan deteksi kecacatan pada roda gigi. Namun demikian, metode FFT dan *cepstrum* tidak mampu untuk mengestimasi lokasi relatif kecacatan berada menurut sudut putarnya.



Gambar 13 Cepstrum getaran roda gigi aus

### Kesimpulan

Artikel ini membahas beberapa metode untuk mendeteksi dan mendiagnosa kecacatan roda gigi berdasarkan sinyal getaran. Kasus deteksi roda gigi yang dibahas pada artikel ini adalah normal, aus dan patah satu gigi.

Penggunaan STFT mampu menampilkan perbedaan distribusi amplitudo getaran terhadap

frekuensinya. Namun, lokasi relatif kecacatan tidak bisa ditampilkan dengan STFT. Penggunaan TSA dan CWT mampu menentukan lokasi relatif kecacatan berdasarkan sudut putar, serta perubahan frekuensi pada saat melewati daerah cacat.

Metode FFT bisa digunakan untuk mendeteksi adanya kecacatan pada roda gigi berdasarkan munculnya *sidebands* di sekitar GMF. Namun demikian, seringkali ditemui banyaknya derau (*noise*) yang muncul sehingga menutupi puncak dominan dan *sidebands* tersebut, karena itu deteksi menjadi sulit. Metode *cepstrum* cukup bagus untuk deteksi kecacatan pada roda gigi karena dapat memunculkan puncak cepstrum yang sangat dominan pada *quefreny* tertentu beserta rahmoniknya. Baik metode FFT maupun cepstrum tidak bisa menentukan lokasi relatif kecacatan menurut sudut putar roda gigi.

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Universitas Diponegoro dan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI), Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia atas dukungan pendanaan pada penelitian ini melalui program hibah Penelitian Kompetensi dengan Nomor Kontrak 188-3/UN7.5.1/PG/2014.

### Referensi

- [1] R.B. Randall, A new method of modelling gear faults, *J. Mech. Design.* 104 (1982) 259-267.
- [2] R.B. Randall, *Frequency Analysis*, 3rd ed., Bruel&Kjaer Publ., Naerum, Denmark, 1987.
- [3] R. Rubini, M. Sidahmed, Diagnostics of gear system using the spectral correlation density of the vibration signal, *Proceedings of the Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Process*, Hull, UK, 1997, pp. 977-982.
- [4] W.J. Staszewski, G.R. Tomlinson, Application of the wavelet transform to fault detection in spur gear, *Mech. Sys. and Signal Proc.* 8(3) (1994) 289-307.
- [5] P.D. McFadden, Application of the wavelet transform to early detection of gear failure by vibration analysis, *Proceeding of an International Conference on Condition Monitoring*, Swansea, UK, 1994, pp. 172-183.
- [6] P.D. McFadden, A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging, *Mech. Sys. and Signal Proc.* 1(1) (1987) 83-95.

[7] J.B. Allen, Short-time spectral analysis, synthesis and modification by discrete fourier transform, *IEEE Trans. On Acoustic, Speech and Signal Proc.* 25(3) (1977) 235-238.

[8] C.K. Chui, *An introduction to wavelets*, Academic Press, San Diego, 1992.