

PENGHILANGAN DERAU (*DENOISING*) DARI SINYAL GETARAN HASIL PENGUKURAN MENGGUNAKAN TRANSFORMASI WAVELET DISKRET

Ignatius Pulung Nurprasetio¹, Hilarius Tutut Sandewan²

¹Program Study Teknik Mesin

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara

Institut Teknologi Bandung, Jl Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

² PT. Indonesia Tutut Sandewan

Kompleks PLN Cioray Rajamandala, Cimahi 40554, Indonesia

¹ Email: ipn@labsurya.ms.itb.ac.id, ²E-mail: tutut.sandewan@indonesiapower.co.id

Abstract

Dalam makalah ini, disajikan teknik penghilangan derau dengan menggunakan Transformasi Wavelet Diskret atau DWT. Mengingat situasi dan kondisi saat pengukuran, sinyal hasil pengukuran sensor senantiasa mengandung derau. Cara lama menghalau derau adalah dengan teknik perata-rataan (untuk derau putih atau *white noise*) atau penapisan (*filtering*) untuk derau warna (*colored noise*). Kedua cara di atas, selain tak efektif, sinyal yang dihasilkan akan mengalami distorsi sehingga menyulitkan analisis. Berbeda dengan pemisahan dengan teknik penapisan (*filtering*), DWT tak menghasilkan beda fase. Akibatnya, karakteristik komponen sinyal tidak terdistorsi. Sesuai karakteristik kerjanya, DWT akan mempartisi sinyal di daerah frekuensi pengukuran (antara 0 Hz. hingga frekuensi Nyquist) menjadi beberapa interval. Jumlah interval atau alokasi frekuensi bergantung jumlah tingkat atau level penerapan DWT. Oleh sebab itu, sinyal hasil pengukuran yang diperlukan dapat langsung diambil dari partisi sinyal keluaran DWT sesuai alokasi frekuensi yang diinginkan. Teknik ini telah diujicoba di Laboratorium Mekanika dan Konstruksi Mesin, FTMD – ITB, untuk meniadakan derau akibat *grounding* yang tak sempurna. Komponen sinyal derau dengan frekuensi jala-jala (50 Hz) yang mengotori hasil pengukuran berhasil disingkirkan dengan mudah dengan memanfaatkan DWT.

ABSTRACT

In this paper, we present denoising technique using Decimated Discrete Wavelet Transform or DWT. The main objective is to remove measurement noise from the output of vibration sensor. The old way of noise removal is through averaging, in the case of white noise, or filtering, in the case of colored noise. However, both the above procedure will distort the original signal. As a result, the signal becomes more difficult to analyze. Unlike filtering or averaging, DWT will not distort nor change the phase of the processed signal. DWT will simply decompose the signal into several allocated frequency bands within the measurement range, i.e., from 0 Hz up to the Nyquist frequency. The number of bands or intervals depends on the DWT levels. Since the signal has been decomposed, we may leisurely pick the component within the preferred frequency band. Using the above approach, DWT has been successfully implemented at the Mechanics and Mechanical Construction Laboratory, FMAE – ITB to remove grounding noise (50 Hz) from the measured signal.

Keywords: denoising, signal processing, wavelet



1. Pendahuluan

Masuknya derau atau noise di sinyal hasil pengukuran merupakan hal yang biasa dijumpai di lapangan [1]. Sudah barang tentu, pada prakteknya, kehadiran derau merupakan sesuatu yang tak diinginkan karena akan memengaruhi kualitas sinyal dan akurasi analisis. Untuk kasus derau berupa sinyal acak yang tak terkorelasi kecuali dengan dirinya sendiri atau derau putih (*white noise*), efeknya dengan mudah dapat dihilangkan melalui operasi *averaging*. Masalahnya, derau yang masuk ke sinyal pengukuran acap kali bukan derau putih, melainkan derau warna atau *colored noise*. Salah satu derau warna yang lazim dijumpai di lapangan adalah masuknya sinyal frekuensi 50 Hz (atau frekuensi jala-jala listrik) karena faktor pentahanan atau *grounding* yang kurang baik. Untuk sinyal di atas, karena rentang frekuensinya yang sempit, biasanya dilakukan penapisan lolos rendah atau *low pass filtering*. Hanya saja, penerapan penapis sinyal umumnya akan membuat sinyal terdistorsi, minimal akan ada beda fasa antara sinyal masukan dan keluaran penapis [2]. Dalam kasus beda fasa tidak diperlukan, penapisan boleh jadi merupakan alternatif solusi. Masalahnya, pada beberapa pengukuran, misalnya getaran, beda fasa memegang peran vital. Deteksi dan analisis kerusakan bisa kacau-balau andai ada beda fasa tambahan karena penapisan. Contoh sederhana, pada kasus deteksi resonansi, misalnya. Teori getaran senantiasa mengatakan bahwa pada saat resonansi, beda fasa antara sinyal eksitasi dan respons adalah 90° atau $\pi/2$ radian [3]. Dengan adanya beda fasa tambahan, deteksi peristiwa resonansi berpotensi meleset.

Semenjak ditemukannya wavelet sebagai salah satu perangkat baru pemrosesan sinyal, penghilangan derau atau *denoising* telah menjadi salah satu aplikasi populer yang khusus dari wavelet. Pengembangan literatur dan berbagai perangkat lunak wavelet memang baru dimulai sekitar 10 – 15 tahun yang lalu [4 – 6]. Hanya saja, sejak ditemukan hingga sekarang, perkembangannya sangatlah pesat.

Makalah ini membahas tentang aplikasi wavelet, khususnya transformasi wavelet diskret atau *decimated discrete wavelet transform*, yang untuk selanjutnya disebut DWT, dalam proses penghilangan derau dari sinyal keluaran sensor getaran. Masalah ini mengemuka karena kualitas peralatan dan jaringan listrik di Laboratorium Mekanika dan Konstruksi Mesin, FTMD-ITB, yang kurang baik membuat semua pengukuran terkontaminasi oleh sinyal berfrekuensi 50 Hz. Untuk mengatasi masalah dari sumbernya, dibutuhkan biaya dan upaya yang tak sedikit. Oleh sebab itu, diupayakan memroses sinyal keluaran sensor sehingga pengaruh derau menjadi sekecil mungkin. Keluaran sensor perlu dibuat sebagus mungkin karena data tsb. digunakan oleh mahasiswa dalam mempelajari fenomena getaran secara eksperimental untuk selanjutnya dibandingkan dengan teori. Tanpa hasil pengukuran yang baik, analisis data

percobaan getaran menjadi sulit, bahkan kadang tak mungkin dilakukan. Dalam makalah ini akan diimplementasikan DWT untuk menyempurnakan sinyal keluaran sensor.

2. Transformasi Wavelet

Transformasi wavelet didefinisikan sebagai penguraian sinyal dengan menggunakan suatu himpunan fungsi basis yang disebut wavelet [5 – 6]. Dalam hal ini, sinyal yang diuraikan harus memenuhi persyaratan

$$\text{Dirichlet, } \int_0^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty . \quad \text{Secara populer,}$$

pertidaksamaan ini mensyaratkan bahwa sinyal yang diekspansi dengan wavelet haruslah berhingga energinya. Istilah matematis untuk ruang yang beranggotakan sinyal dengan energi berhingga adalah $L^2(\mathbb{R})$ (dari asal persamaan bahwa norm 1-2 sinyal besarnya berhingga). Wavelet sendiri merupakan set atau himpunan fungsi orthogonal yang lengkap, dengan ciri khusus bahwa durasinya pendek dan amplitudonya berhingga, bentuknya diturunkan secara matematis, dan harga rataratanya sama dengan nol. Anggota fungsi wavelet diturunkan dari bentuk dasar yang disebut ibu atau mother wavelet, $\psi(t)$. Dari ibu wavelet, anak-anak atau daughter wavelet bisa dibuat dengan meregangkan (dalam istilah wavelet disebut scaling) dan menggeser (atau translasi waktu). Peregangan akan memengaruhi frekuensi, dalam hal ini faktor skala atau faktor peregangan akan berbanding lurus dengan periода dan berbanding terbalik dengan frekuensi. Anak-anak wavelet dapat dirumuskan sebagai:

$$\Psi_{ab}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}, b \in \mathbb{R} \quad (1)$$

dimana a adalah faktor skala (scaling factor) dan b adalah parameter lokalisasi waktu. Kedua parameter ini bisa kontinu dan diskret. Koefisien transformasi wavelet kontinu atau CWT suatu sinyal $s(t) \in L^2(\mathbb{R})$ dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan berikut:

$$C(a,b) = \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi_{ab}^*(t) dt \quad (2)$$

Rekonstruksi sinyal atau inverse CWT dapat dilakukan melalui persamaan berikut:

$$s(t) = \frac{1}{K_\Psi} \int_R \int_{R^+} C(a,b) \Psi_{ab}(t) \frac{da}{a^2} db \quad (3)$$

dimana

$$K_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad \text{dan}$$

$\hat{\Psi}(\omega) = \int \Psi(t) e^{-j\omega t} dt$. Karena ada faktor a dan b , plot $C(a,b)$ mengandung informasi yang sama dengan distribusi frekuensi-waktu. Dalam hal ini, frekuensi terkandung di faktor skala, a , dan waktu terjadinya



peristiwa di faktor b. CWT biasanya dimanfaatkan untuk deteksi karena adanya keretakan, patahnya elemen, ketidaksempurnaan bentuk, dan cacat lain yang menghasilkan sinyal dengan pola terpatah atau tak sempurna.

Berbeda dengan CWT, transformasi wavelet diskret atau DWT lebih efisien. Secara ringkas, suatu sinyal diskret, $s(n) \in L^2(\mathbb{R})$ dengan n : indeks waktu diskret, dapat diuraikan sebagai:

$$C(a,b) = c(j,k) = \sum_{n \in Z} s(n)g_{j,k}(n) \quad (4)$$

Dalam hal ini g mengambil peran fungsi wavelet ψ . Faktor skala a dan parameter lokalisasi waktu b dirumuskan sebagai $a = 2^j$, dan $b = k 2^j$, $(j,k) \in Z^2$, artinya j dan k merupakan integer. Faktor j di DWT menyatakan jumlah level. Untuk memeroleh sinyal $s(t)$ kembali, inversi DWT dapat ditentukan dengan:

$$s(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} c(j,k) \Psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

Di tiap level j , dapat ditentukan bagian sinyal yang disebut detail yang dapat dituliskan sebagai:

$$D_j(t) = \sum_{k \in Z} c(j,k) \Psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

Secara nyata, detail menyatakan bagian sinyal yang berada di paruh frekuensi tinggi dari suatu interval frekuensi. Selain detail, separuh lainnya yang menyatakan bagian frekuensi rendah, disebut aproksimasi, yang untuk level J dapat dituliskan sebagai:

$$A_{J-1}(t) = \sum_{j > J} D_j \quad (7)$$

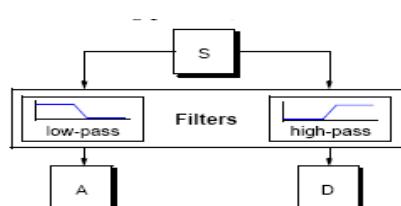
Dari (5) – (7), dapat ditunjukkan bahwa:

$$A_{J-1}(t) = A_j(t) + D_j(t) \quad (8)$$

sehingga sinyal hasil rekonstruksi wavelet (hasil dari invers DWT) dapat dinyatakan sebagai:

$$s(t) = A_J(t) + \sum_{j \leq J} D_j(t) \quad (9)$$

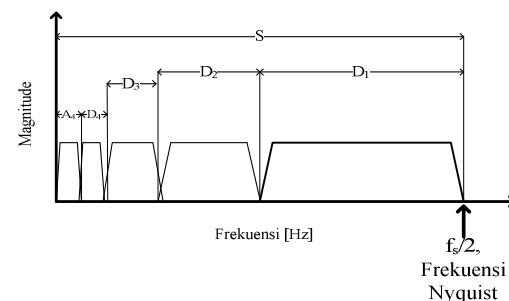
Dalam praktiknya, penentuan nilai aproksimasi dan detail dilakukan dengan proses filtering, sesuai skema seperti tersaji pada Gambar 1 berikut [5, 6].



Gambar 1. Skema penguraian sinyal dengan satu level DWT menjadi aproksimasi $A(t)$ dan detail $D(t)$ melalui filtering.

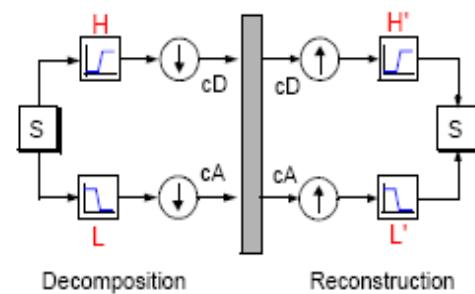
Dari Gambar 1, secara mudah bisa dilihat bahwa bagian aproksimasi atau $A(t)$ merupakan bagian yang

mengandung nilai frekuensi di paruh interval yang rendah, sedang bagian detail atau $D(t)$ merupakan bagian yang mengandung nilai frekuensi di paruh interval yang tinggi. Pemrosesan satu level akan menghasilkan $A_1(t)$ dengan komponen frekuensi dari $0 - f_s/4$ dan $D_1(t)$ dengan komponen frekuensi dari $f_s/4 - f_s/2$, dimana f_s adalah frekuensi pencuplikan atau *sampling frequency* sehingga $f_s/2$ adalah frekuensi Nyquist. Pemrosesan lebih lanjut atau level DWT berikutnya akan membagi $A_1(t)$ menjadi $A_2(t)$ dan $D_2(t)$, masing-masing untuk pita frekuensi $0 - f_s/8$ dan $f_s/8 - f_s/4$. Demikian seterusnya, sehingga secara skematis, untuk 4 level DWT, akan dihasilkan dekomposisi sinyal seperti pernyataan domain frekuensi di Gambar 2.



Gambar 2. Skema umum alokasi frekuensi hasil penguraian dengan menggunakan DWT untuk jumlah level = 4.

Proses lengkap dekomposisi atau penguraian sinyal menjadi koefisien DWT yang diikuti rekonstruksi sinyal atau invers DWT dapat dinyatakan sebagai operasi penapisan berganda seperti dinyatakan di Gambar 3.



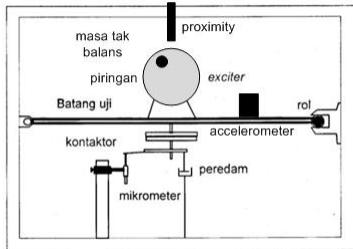
Gambar 3. Proses dekomposisi dan rekonstruksi sinyal dengan menggunakan DWT.

Penguraian sinyal atas komponen, dengan menggunakan perangkat lunak, dapat diatur secara fleksibel sehingga dekomposisi bisa dilakukan di rentang frekuensi antara $0 - fs/2$ secara bebas. Pengaturan seperti ini disebut sebagai DWT paket atau *Wavelet Packets* [6].



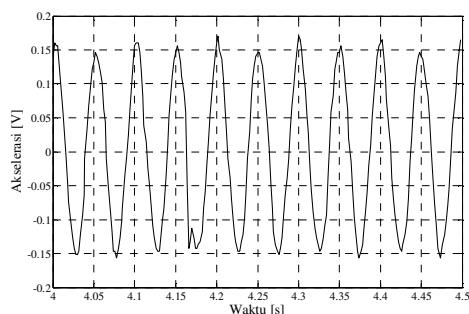
3. Pengukuran Sinyal Getaran

Sebagai sarana percobaan, dalam makalah ini digunakan perangkat uji getaran paksa seperti tersaji di Gambar 4.



Gambar 4. Peralatan uji getaran paksa berupa batang kontinu yang ditumpu sederhana dengan sumber eksitasi berupa piringan yang diberi massa tak balans.

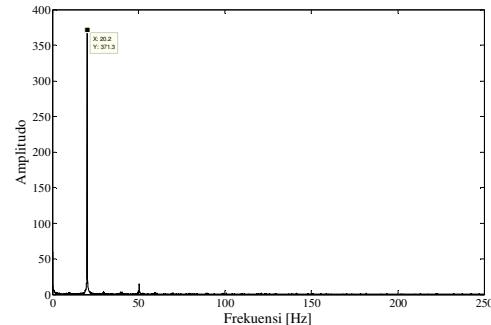
Perangkat utama adalah batang baja kontinu dengan ukuran $838 \times 25,4 \times 12,7$ mm yang ditumpu di salah satu ujungnya dengan engsel pada rangka. Ujung yang lain ditumpu dengan rol sehingga batang dapat bergerak lateral. Sebuah motor arus searah dengan sebuah piringan yang diberi massa tak balans dipasang pada bagian tengah batang uji. Untuk membatasi amplitudo getaran, batang ditumpu juga di bagian tengah dengan peredam viskos. Kecepatan putar motor listrik dapat divariasikan dengan pengatur kecepatan. Sebagai sensor getaran, digunakan accelerometer KYOWA AS-2C CD-4659 untuk mengukur sinyal getaran arah vertical. Untuk mendeteksi posisi massa tak balans dan sebagai penanda fasa (*key phasor*), digunakan *proximity switch* Autonics PR12-4DN. Keluaran kedua sensor di atas ditangkap oleh perangkat akuisisi data melalui *A/D card* National Instruments AT-MIO-16L. Proses akuisisi data dilakukan dengan perangkat lunak LABTECH® yang diatur pada frekuensi pencuplikan 500Hz. Sinyal keluaran accelerometer yang terukur ditampilkan di Gambar 5.



Gambar 5. Sinyal keluaran accelerometer

Dari Gambar tersebut, tampak bahwa sinyal getaran tidak murni berbentuk gelombang sinus seperti yang diuraikan di teori getaran [3]. Sinyal tersebut tampak terkontaminasi derau pengukuran. Untuk memastikan jenis derau, dilakukan analisis domain frekuensi untuk

melihat kandungan frekuensi. Hasil FFT sinyal disajikan di Gambar 6.



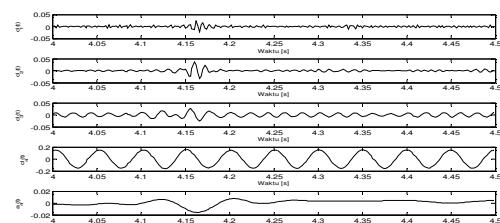
Gambar 6. Hasil FFT sinyal keluaran accelerometer.

Dari kurva *magnitude* atau harga absolut FFT tsb., tampak bahwa sinyal pengukuran mengandung komponen harmonik pada frekuensi 20,2 Hz dan 50 Hz. Komponen 20,2 Hz berasal dari eksitasi massa tak balans, sedangkan yang 50 Hz merupakan derau warna berupa sinyal jala-jala listrik yang menyusup masuk karena sistem pentahanan (*grounding*) yang tak sempurna. Dengan terdeteksinya frekuensi sinyal derau, langkah selanjutnya adalah proses pemurnian dengan menggunakan DWT.

4. Dekomposisi Sinyal dengan DWT

Untuk dekomposisi dengan DWT, mengingat komponen harmonik ada di 20,2 Hz dan 50 Hz, sedangkan Nyquist frequency adalah 250 Hz, akan dicoba pemrosesan dengan 4 level. Secara teoretik, rentang frekuensi untuk $D_1(t)$ adalah antara 125 – 250 Hz, $D_2(t)$ antara 62,5 – 125 Hz, $D_3(t)$ antara 31,25 – 62,5 Hz, $D_4(t)$ antara 15,625 – 31,25 Hz, dan akhirnya, $A_4(t)$ antara 0 – 15,625 Hz. Dari perancangan dekomposisi seperti ini, komponen yang diinginkan yakni 20,2 Hz akan ada di $D_4(t)$. Untuk pengolahan data lebih lanjut, cukup $D_4(t)$ saja yang diambil, sedangkan komponen lainnya boleh dibuang.

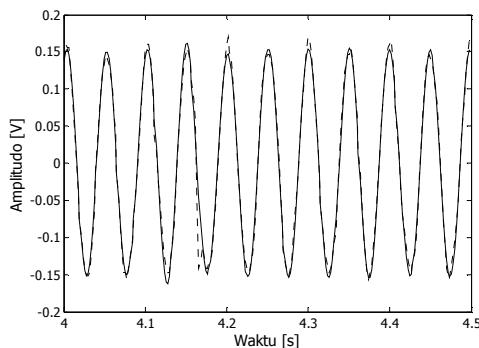
Pemilihan mother wavelet semata dilakukan atas dasar pertimbangan kemiripan bentuk atau pengalaman. Untuk sinyal harmonik, ada beberapa bentuk yang berpotensi. Setelah melalui sedikit upaya coba-coba, dipilih *discrete Meyer* sebagai mother wavelet.



Gambar 7 Komponen sinyal sebagai hasil dekomposisi.

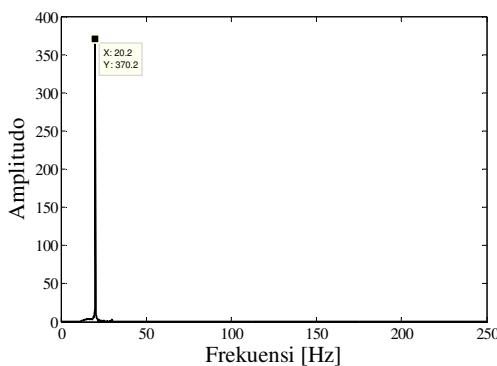


Dari observasi cepat, komponen $D_1(t)$ dan $D_2(t)$ merupakan derau dengan tingkatan rendah (mengingat amplitudonya yang kecil), $D_3(t)$ merupakan sinyal harmonik frekuensi tinggi, walau amplitudonya kecil, $D_4(t)$ adalah komponen harmonik yang paling dominan, sedangkan $A_4(t)$ hanyalah komponen statik. Dengan demikian, sesuai rancangan, hanya komponen $D_4(t)$ yang akan diambil. Untuk memastikan bahwa $D_4(t)$ merupakan hasil *denoising* sinyal semula, sinyal ini diplot dengan sinyal semula pada sumbu yang sama. Hasil pembandingan sinyal semula dan $D_4(t)$ disajikan di Gambar 8, yang menyatakan bahwa bentuk sinyal menjadi lebih mendekati gelombang sinus dan pemrosesan dengan DWT tidak mengakibatkan perubahan fasa.



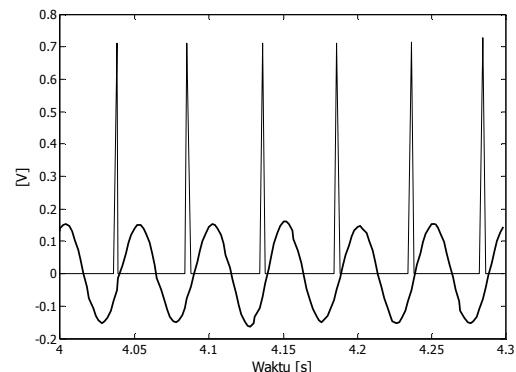
Gambar 8 . Perbandingan antara sinyal asli yang masih terbaur derau (garis terputus-putus) dan sinyal yang sudah dilakukan penghapusan derau (garis tebal).

Untuk meyakinkan bahwa $D_4(t)$ mempunyai kandungan frekuensi yang sama dengan sinyal asli, dilakukan analisis domain frekuensi, yang hasilnya disajikan pada Gambar 10. Hasil analisis domain frekuensi pun menyatakan bahwa komponen utama adalah sinyal harmonik dengan frekuensi 20,2 Hz.



Gambar 10. Hasil FFT sinyal $D_4(t)$

Penggabungan sinyal $D_4(t)$ dengan keluaran proximity switch disajikan pada Gambar 11, yang menunjukkan bahwa pemrosesan selanjutnya seperti penentuan amplitudo getaran dan beda fasa antara eksitasi dan respons sekarang bisa dilakukan dengan mudah berkat denoising oleh DWT.



Gambar 11. Penyandingan sinyal $D_4(t)$, yang merupakan hasil *denoising* dengan *wavelet*, dan sinyal keluaran *proximity switch*.

5. Kesimpulan

Dalam makalah ini telah disajikan potensi pemanfaatan transformasi *wavelet diskret* atau DWT dalam penghapusan derau (*denoising*). Penerapan langsung dalam praktek di laboratorium terbukti menunjukkan hasil yang memuaskan. Bertolak dari pengalaman ini, proses *denoising* dengan DWT dapat dianjurkan sebagai prosedur baku di awal sebelum data hasil pengukuran dianalisis lebih lanjut.

Hal lain yang juga menarik untuk dieksplorasi adalah pemanfaatan *wavelet packets* untuk memisahkan komponen sinyal. Pemanfaatan pemisahan memberi peluang untuk mempermudah diagnostik dalam kaitan dengan kegiatan perawatan berbasis kondisi mesin. Hal yang disebut terakhir akan menjadi obyek penelitian berikutnya.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis berterima kasih pada saudara Mirza Bamanto, Yang Tiono Deca Sakti, dan Aris Irmi yang telah membantu dalam pelaksanaan uji getaran dan pengambilan data.



Daftar Pustaka

- [1] Broch, J.T., *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, Brüel and Kjaer, Naerum, Denmark, 1984.
- [2] Strum, R.D., and Kirk, D.E., *Contemporary Linear Systems Using Matlab®*, PWS Publishing Company, Boston, 1994
- [3] Rao, S.S., *Mechanical Vibrations*, 4th ed., Pearson Education International (Prentice-Hall), 2004
- [4] Daubechies, I., *Ten Lectures on Wavelets*, CMBS-NSF Series in Applied Mathematics, SIAM, 1992
- [5] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, J.-M., *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®*, The MathWorks, 1997
- [6] Fugal, D.L, *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing*, Space & Signals Technologies, 2009

