

INVESTIGASI PEMANTAUAN KONDISI VIBRASI UNTUK KESELAMATAN OPERASI POMPA PENDINGIN PWR

Syaiful Bakhri
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

INVESTIGASI PEMANTAUAN VIBRASI UNTUK KESELAMATAN OPERASI POMPA PENDINGIN PWR. Pompa pendingin reaktor adalah salah satu komponen penting dalam sistem keselamatan di PWR yang pemeliharaannya membutuhkan pemantauan secara online seperti melalui analisis vibrasi. Penelitian ini mendemonstrasikan investigasi berbagai kerusakan baik mekanik, elektromekanik maupun munculnya fenomena hidrolika dengan membandingkan hasil pengukuran dengan berbagai model spektrum frekuensi kerusakan berbasis vibrasi yang ada. Untuk pengujiannya, mengingat tidak tersedianya pompa pendingin PWR, maka motor pendingin sekunder reaktor riset GA Siwabessy dengan prinsip motor induksi dan pompa yang sama dengan di PWR digunakan. Diperoleh hasil awal kondisi motor pendingin yang relatif baik dengan nilai RMS sinyal ternormalisasi adalah 0.5187, nilai *kurtosis*nya 2.08, dan crest factor 2.60, masih relatif berada di bawah batas-batas level tanda-tanda kerusakan. Selain itu, penelitian ini berhasil mengidentifikasi dugaan munculnya fenomena kavitasi dengan puncak frekuensi random antara 1000-1250 Hz dan frekuensi BPF sekitar 125 Hz, walaupun hasil ini perlu konfirmasi yang lebih lanjut dengan analisis yang lebih detil pada pengukuran disisi pompa.

Kata Kunci : keselamatan, pompa pendingin, analisis vibrasi, PWR

ABSTRACT

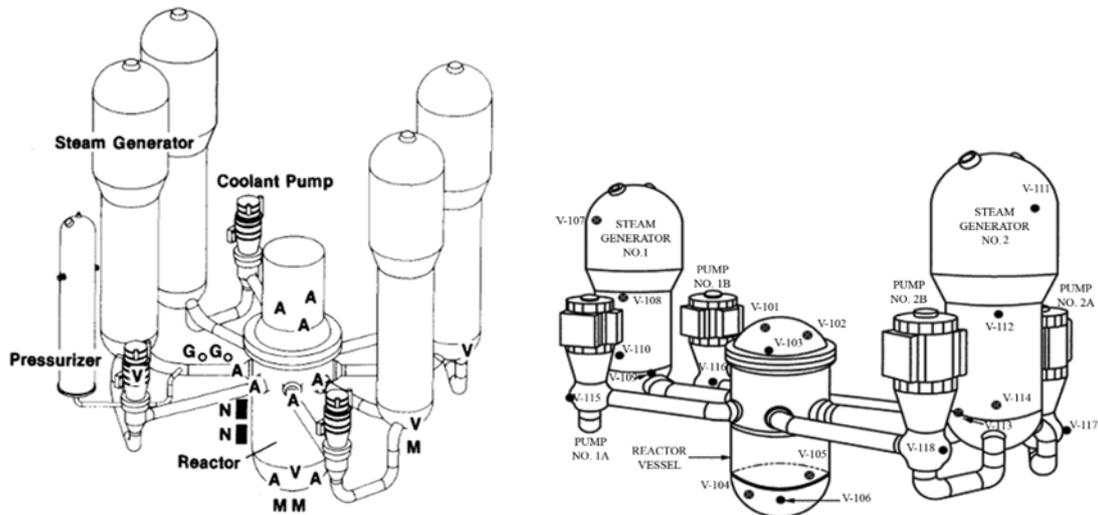
THE INVESTIGATION OF VIBRATION MONITORING FOR THE SAFETY OPERATION OF PWR COOLANT PUMP. Reactor coolant pump is an essential component for the safety operation of PWR where the maintenance requires online monitoring such as vibration analysis. This research demonstrates the investigation of various mechanical failures, electromechanical related failures or hydraulic phenomena by comparing the measurement data with various available model of fault frequency spectrum based on vibration analysis. For the experimental test, due to the unavailability of PWR coolant pump, therefore secondary coolant pump of research reactor GA Siwabessy with similar principle of induction motor and coolant pump were employed. It was found that coolant pump is relatively in a good condition below the level of failure with the parameter of normalized RMS about 0.5187, kurtosis around 2.08, and crest factor 2.60. In addition, this study successfully identified cavitation as indicated by random peak frequencies between 1000 and 1250 Hz, and BPF frequency at around 125 Hz, even though this result still need further confirmations using detail analysis of the pump section.

Keywords : safety, coolant pump, vibration analysis, PWR

PENDAHULUAN

Pompa pendingin merupakan salah satu perangkat yang mendapat perhatian khusus untuk menjamin keselamatan operasi di reaktor PWR. Guna menjamin keberlangsungan operasinya dan menghindari kecelakaan maka pemantauan kondisi secara kontinyu dan

online sangat diperlukan. Teknik pemantauan yang direkomendasikan oleh IAEA untuk memantau salah satunya dengan menggunakan metode vibrasi ⁽¹⁾. Metode pemantauan ini bahkan sudah terintegrasi dalam berbagai desain reaktor PWR terkini, seperti di APR1400 ⁽²⁾ maupun AP1000 ⁽³⁾ sebagai sistem pemantauan integritas komponen seperti terlihat di Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi sensor *monitoring* integritas NISS menggunakan vibrasi (V), akustik (A), noise (N) dan *metal impact* (M) di reaktor daya tipe PWR dari (a) Westinghouse (b) Advance Power Reactor-Korea^(4, 5)

Pemantauan vibrasi pada prinsipnya mengukur gaya eksitasi berulang yang diakibatkan oleh kerusakan, keausan atau kegagalan sebuah obyek. Sebagai salah satu metode yang sudah relatif mapan, vibrasi dapat digunakan tidak hanya mengukur peristiwa getaran akibat gaya-gaya mekanik, namun juga beberapa fenomena kasus getaran hidrolis atau elektrik yang berpotensi merusak terhadap struktur pompa pendingin. Peristiwa ini dapat diamati dengan mengekstraksi sinyal vibrasi melalui teknik pemrosesan sinyal, yang salah satunya dengan analisis spektrum FFT⁽⁶⁾. Sinyal spektrum frekuensi inilah yang akan menjadi penanda unik yang membedakan jenis kerusakan satu dengan lainnya.

Seperti dilaporkan IAEA, beberapa PWR terkini sudah memasukkan kompilasi informasi spektrum vibrasi berbagai kerusakan pada pompa pendingin maupun struktur komponen lainnya pada sistem pemantauannya⁽¹⁾. Namun informasi model spektrum ini sangatlah tidak

mudah diperoleh mengingat keterbatasan akses terhadap industri nuklir dan juga kerahasiaan desain produsen PWR. Di sisi lain, kemampuan sumber daya manusia dan kemajuan riset pemantauan kondisi terhadap PWR di PTRKN BATAN haruslah tetap memperoleh perhatian utama walaupun dengan berbagai keterbatasan.

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mendemonstrasikan investigasi spektrum frekuensi pemantauan vibrasi terhadap berbagai kerusakan sistem pompa pendingin di PWR. Sebagai catatan, walaupun pompa pendingin PWR didesain secara khusus, namun pada prinsipnya motor induksi dan bagian penghisap hidrolis serta *impellernya* sama seperti yang dipakai di industri pada umumnya. Untuk itu, penelitian ini mendiskusikan berbagai kemungkinan kerusakan yang bisa dideteksi dengan pemantauan vibrasi serta implementasinya dengan bantuan objek motor pendingin sekunder yang sudah ada di fasilitas reaktor riset GA Siwabessy.

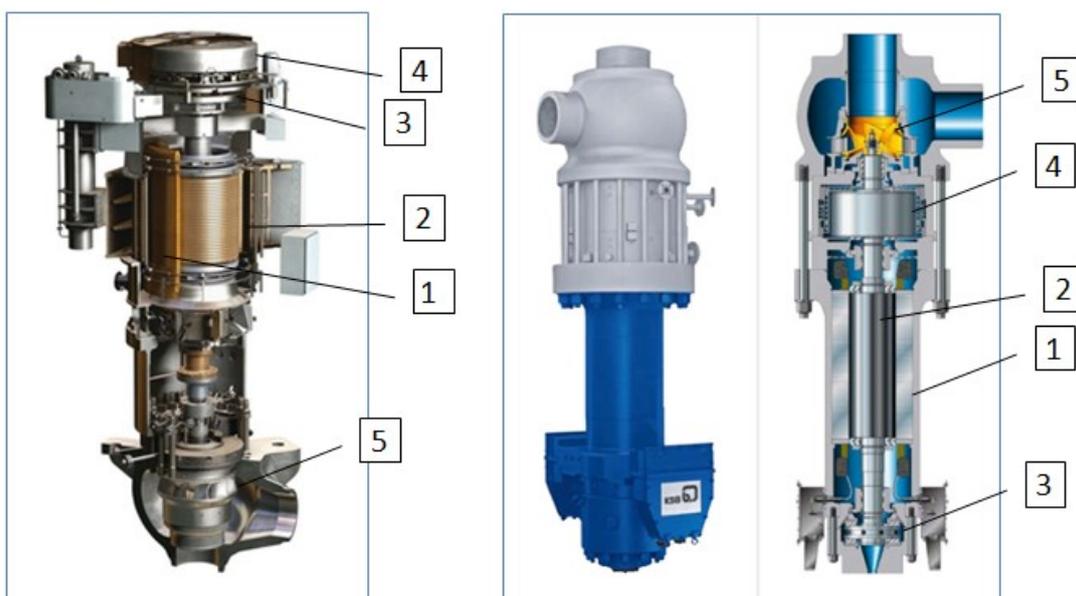
TEORI

A. Komponen-komponen utama pompa pendingin PWR

Tipikal pompa pendingin PWR terdiri atas berbagai komponen utama seperti terlihat pada Gambar 2^(7, 8). Walaupun semenjak kecelakaan Fukushima berbagai rekomendasi diberikan, seperti misalkan oleh *United States Nuclear Regulatory Commission* (US NRC) yang mensyaratkan kemampuan menghadapi peristiwa *station black-out* (SBO) sampai 72 jam⁽⁷⁾ telah diadopsi oleh konstruksi terbaru, namun bagian-bagian utama masih relatif sama seperti terlihat di Gambar 2. Bagian pertama motor yang berupa lilitan kawat sebagai bagian stasioner, yaitu *stator*, akan menimbulkan medan magnetik yang berputar saat tiga fase catu daya listrik diberikan. Sementara itu, medan magnet yang timbul diantara celah *stator* dan *rotor* akan memotong sekaligus menginduksi batangan-batangan *rotor* yang

mengakibatkan gaya putaran mekanik dari *rotor* menurut hukum *Lorentz*. Perputaran mekanik dari poros *rotor* ini disangga secara radial maupun aksial menggunakan *thrust bearing*, selain juga agar kerugian gesek poros yang ditimbulkan relatif kecil.

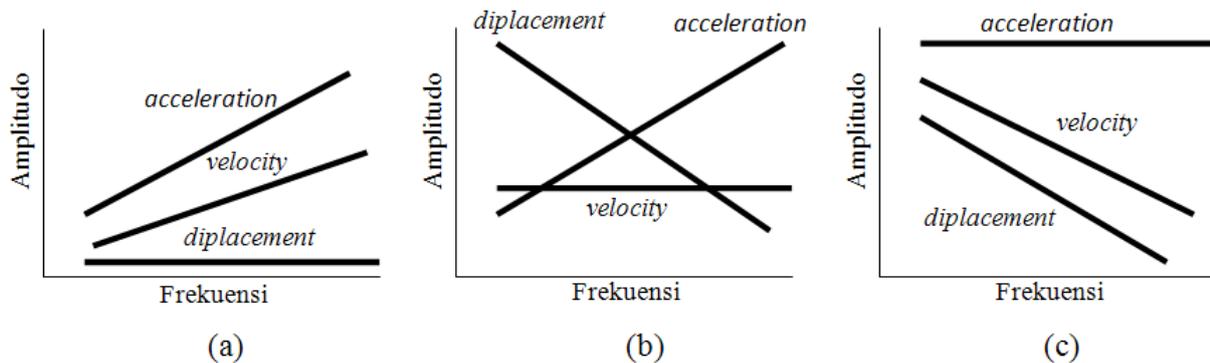
Terlihat juga pada Gambar 2, untuk menjamin keselamatan pengoperasian reaktor dengan membuang panas tersisa di aliran pendingin pendingin, *flywheel* akan memberikan gaya inersia perputaran poros selama waktu tertentu, walaupun catu daya pada motornya padam. Bagian lain adalah *impeller*, yang berfungsi merubah gaya mekanis putaran pompa menjadi kecepatan aliran pendingin yang memaksa air pendingin bagian penghisap terus menerus mengisi kekosongan yang ditinggalkan. Bagian-bagian penyusun inilah yang akan menimbulkan getaran atau vibrasi jika terjadi kerusakan atau penurunan fungsi, sama seperti pada motor dan pompa pada umumnya.



Gambar 2. Komponen utama pompa pendingin PWR untuk (a) AP1000 buatan RUV dan ⁽⁸⁾ (b) EPR 1650 MWe ⁽⁷⁾ yang terdiri dari : (1) *stator*, (2) *rotor*, (3) *thrust bearing*, (4) *flywheel*, dan (5) *impeller*

B. Tipe pengukuran vibrasi kaitannya dengan sensor sistem pemantauan

Vibrasi ini dapat diamati dengan berbagai melalui berbagai parameter, seperti pengukuran pergeserannya (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatannya (*acceleration*)⁽⁹⁾.



Gambar 3. Hubungan antara sensor *displacement*, *velocity* dan *acceleration* untuk mengamati frekuensi vibrasi pada kondisi (a) *displacement* konstan (b) *velocity* konstan (c) *acceleration* konstan

Terlihat pada grafik, sensor *accelerometer* merepresentasikan korelasi yang lebih mudah dipahami saat dipakai di frekuensi rendah maupun tinggi baik saat pergeseran, kecepatan atau percepatan yang terjadi relatif konstan. Dengan kata lain, seperti sensor tipe *displacement*, yang biasanya dengan probe *edy current* sering hanya dipakai untuk vibrasi dan pengukuran posisi poros motor karena sensitifitasnya hanya di frekuensi rendah. Kelemahan pada frekuensi tinggi ini hampir sama juga terjadi pada sensor *velocity*, walaupun dibanding dengan sensor *accelerometer*, sensor ini lebih tahan terhadap sinyal *clipping* meskipun pada saat kondisi sinyal yang mendekati saturasi. Terlepas dari perbedaan amplitudo tipe-tipe sensor, namun pada dasarnya satu dan lain sensor dapat dihasilkan dari differensiasi atau integrasi dari hasil pengukuran tipe sensor lainnya.

Tipe-tipe pengukuran ini berperan dalam pemilihan sensor vibrasi, dimana masing parameter ini akan memberikan efek yang spesifik terhadap hasil pengukurannya seperti terlihat di Gambar 3.

C. Metode ekstraksi sinyal pada domain waktu dengan Fourier Transform

Pengukuran pada domain frekuensi ini dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik ekstraksi sinyal dari gelombang vibrasi pada domain waktu. Salah satu teknik yang sudah sangat dikenal luas adalah *fourier transform* (FT). *Fourier transform* pada dasarnya adalah teknik ekstraksi sebuah gelombang bertipe sinusoid menjadi sinyal-sinyal penyusun dan menampilkannya dalam domain frekuensi, seperti terlihat dalam Persamaan 1 berikut ini⁽¹⁰⁾.

$$X(f) = F\{x(t)\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

dimana $x(t)$ adalah *time domain* sinyal, $X(f)$ adalah FFT-nya dan ft adalah frekuensi yang dianalisis.

Namun karena sistem transformasi diimplementasikan dalam sebuah digitizer,

maka proses transformasi dilakukan secara diskrit pada rentang penyampelan tertentu, dengan metode *discrete fourier transform* (DFT)⁽¹⁰⁾ seperti ditunjukkan di Persamaan 2.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

dimana N adalah jumlah sampel dari urutan input $x(n)$, dan $k=1,2,3,\dots N-1$, dan $X(k)$ adalah hasil DFT nya.

Implementasi langsung dari DFT ini sangat tidak efisien dan sangat menghabiskan memori komputer karena membutuhkan operasi bilangan kompleks sebanyak (n^2) . *Fast fourier transform* (FFT) menyederhanakan kompleksitas ini sehingga hanya dibutuhkan $(N \log_2 (N))$ yang salah satunya seperti ditunjukkan oleh algoritma Cooley Tookey. Algoritma ini hanya melakukan perhitungan setahap demi setahap separuh bagian $(N/2)$, dan membaginya terus menerus sampai bagian terkecil dengan dengan ukuran kelipatan (2^n) .

FFT akan memberikan relasi yang sangat diperlukan dalam pemantauan kondisi dengan spektrum ferkuensi. Pertama adalah frekuensi tertinggi yang bisa di analisis dengan jumlah sampling tertentu, dan yang kedua adalah resolusi yang bisa diperoleh dengan waktu akuisisi tertentu. Jumlah sampling dapat ditentukan dengan setting frekuensi penyampelan, sedangkan waktu akuisisi akan terhubung dengan ukuran blok nya.

D. Identifikasi kerusakan dengan basis data frekuensi vibrasi pompa pendingin

Kombinasi frekuensi berikut amplitudo sinyal yang terekam dari sensor vibrasi ini

selanjutnya dapat digunakan untuk menunjukkan berbagai gejala kerusakan atau degradasi pompa pendingin, tentunya dengan asumsi bahwa amplitudo frekuensi yang rata dapat tercapai pada rentang pengukuran tertentu dengan sensor tertentu. Frekuensi ini yang selanjutnya dapat diklasifikasikan menurut jenis kerusakannya seperti ditunjukkan di Gambar 4. berikut ini. Sebagai catatan, beberapa persamaan umum yang dibutuhkan untuk menganalisis frekuensi fundamental vibrasi diantaranya adalah⁽¹¹⁾.

$$N_s = (120 f)/P \quad (3)$$

$$s = (N_s - N_R)/N_s \quad (4)$$

$$F_p = (F_s * P) \quad (5)$$

$$F_R = (N_R)/60 \quad (6)$$

Dimana

N_s = kecepatan sinkron motor (*rpm*),

f = frekuensi dari catu daya (Hz)

P = Jumlah kutub-kutub motor

s = slip

N_R = kecepatan rotor (*rpm*)

N_s = kecepatan sinkron motor (*rpm*)

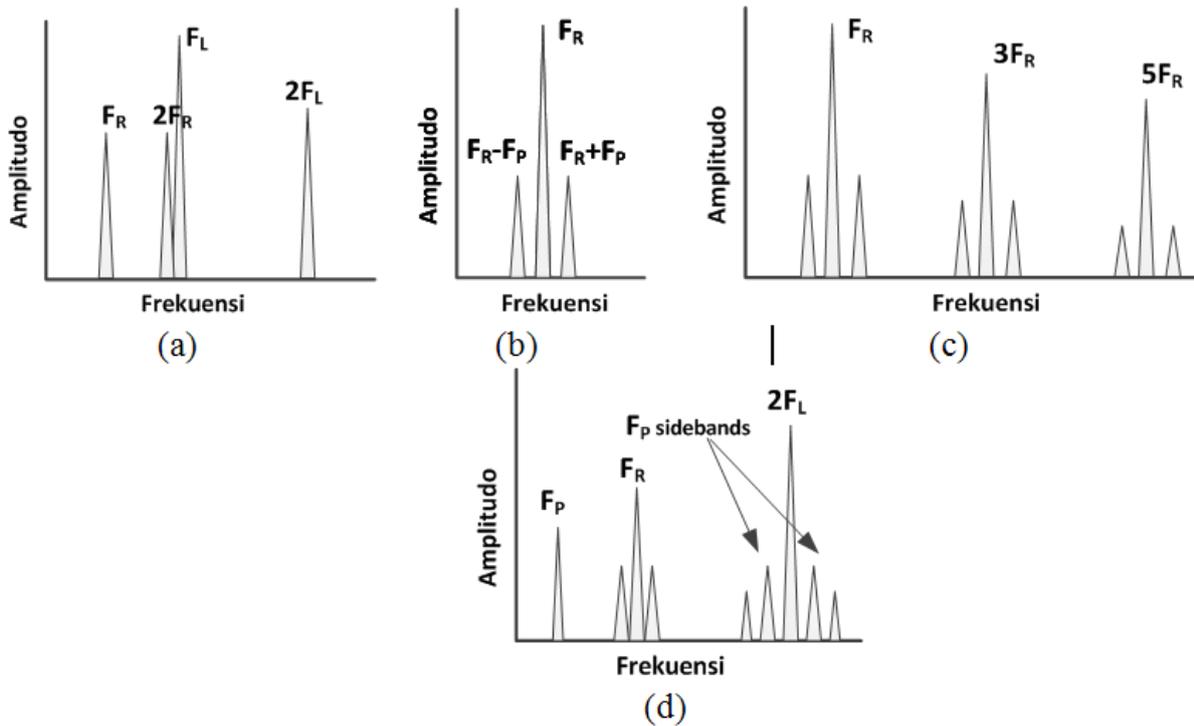
F_R = frekuensi rotor/poros (Hz)

F_R = frekuensi jala-jala listrik (Hz)

Terlihat di Gambar 4 berbagai kerusakan yang umum terjadi pada bagian komponen elektromekanikal, yaitu stator dan rotor. Pengukuran dengan menggunakan metode vibrasi akan memunculkan tidak hanya pengaruhnya terhadap putaran rotor (F_R berikut harmoniknya), akan tetapi juga peningkatan signifikan dari frekuensi jala-jala berikut harmoniknya (F_L). Sebagai contoh, pada kerusakan stator Gambar 4 (a) muncul F_L dan $2F_L$, sedangkan Gambar 4 (b) patah batang

rotor memunculkan interaksi frekuensi kutup-kutup stator yang termodulasi dalam frekuensi putaran rotor, serta munculnya $2F_L$ berikut *sideband*-nya pada saat terjadi *eccentric* antara rotor dan stator (lihat Gambar 4 (d)). Perlu dicatat

bahwa frekuensi kutup (F_P) sangatlah kecil, sebagai hasil perkalian antara frekuensi slip (frekuensi perbedaan antara kecepatan sinkron motor induksi dan frekuensi kecepatan putaran rotor) dan jumlah pasangan kutup pada stator.

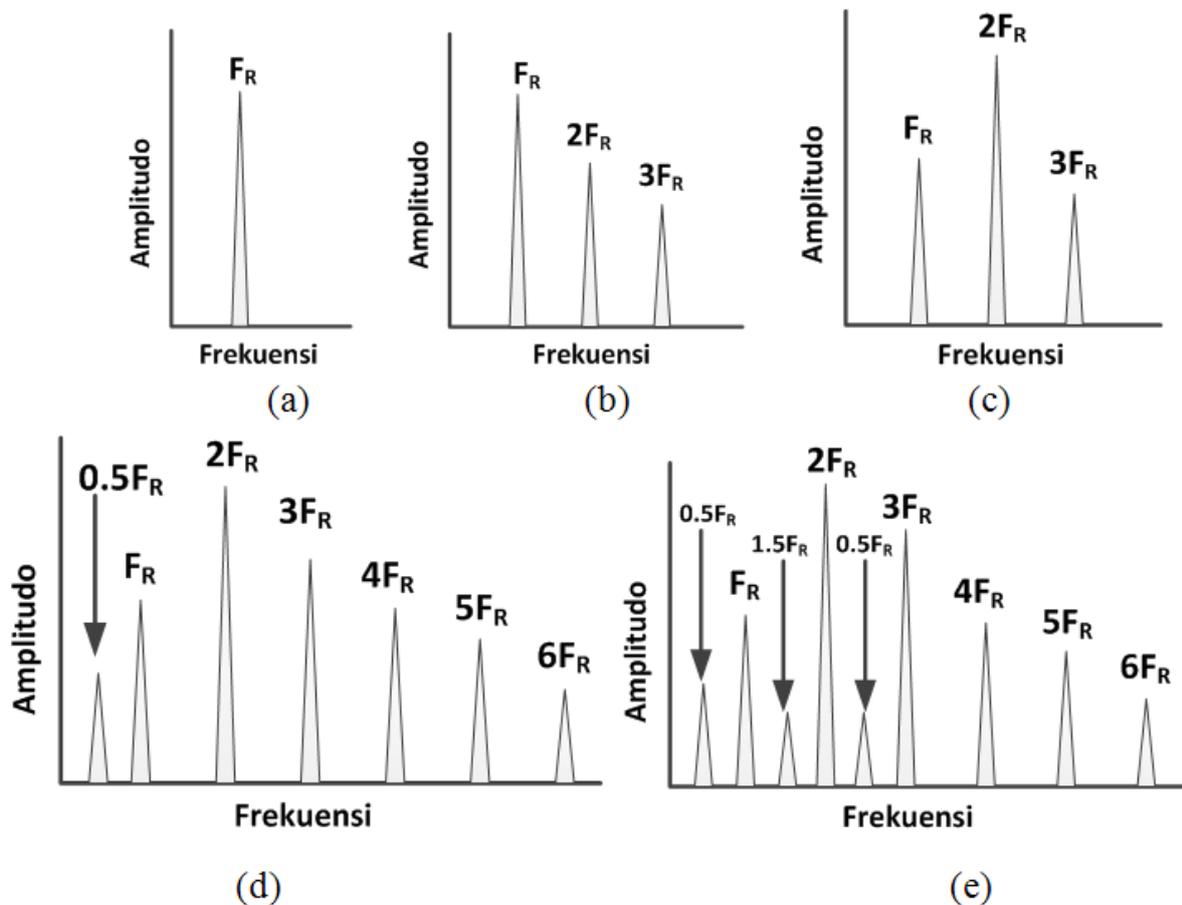


Gambar 4. Spektrum frekuensi kerusakan yang berhubungan dengan kerusakan komponen elektromekanik (a) *stator*⁽¹²⁾ (b) patah batang *rotor*⁽¹³⁾ (c) kerusakan laminasi pada *rotor*⁽¹³⁾ (d) *eccentric* antara *rotor* dan *stator*⁽¹³⁾. Sebagai catatan F_L adalah frekuensi catu daya, F_R adalah frekuensi putaran *rotor* dan F_P frekuensi di kutup-kutup *stator* (*pole passing frequency*)

Berbeda dengan gambar sebelumnya, Gambar 5 lebih terfokus pada kerusakan karena mekanikal. Gambar 5 mengilustrasikan kerusakan yang sering timbul, seperti misalkan kerusakan karena *mechanical unbalance*, *misalignment* maupun *looseness*. Hampir semua kerusakan menunjukkan kontribusi frekuensi putaran dari rotor (F_R) berikut harmoniknya. Sebagai catatan, bagian ini tidak menjelaskan

fenomena kerusakan karena *bearing* karena keterbatasan waktu penelitian.

Untuk sisi pompa, berbagai fenomena dideteksi dengan pemantauan vibrasi terjadi lebih kompleks karena melibatkan fluida. Berbagai fenomena umum yang terjadi dapat dilihat di Gambar 6 berikut ini. Frekuensi yang timbul karena gaya-gaya hidrolika maupun aerodinamika ditandai dengan munculnya *Blade Pass Frequency* (BPF).



Gambar 5. Spektrum frekuensi kerusakan yang berhubungan dengan kerusakan mekanik⁽¹³⁾
 (a) *mechanical unbalance* (b) *parallel misalignment* (c) *angular misalignment* (d) *internal assembly looseness* (e) *looseness* antara motor dan dudukan

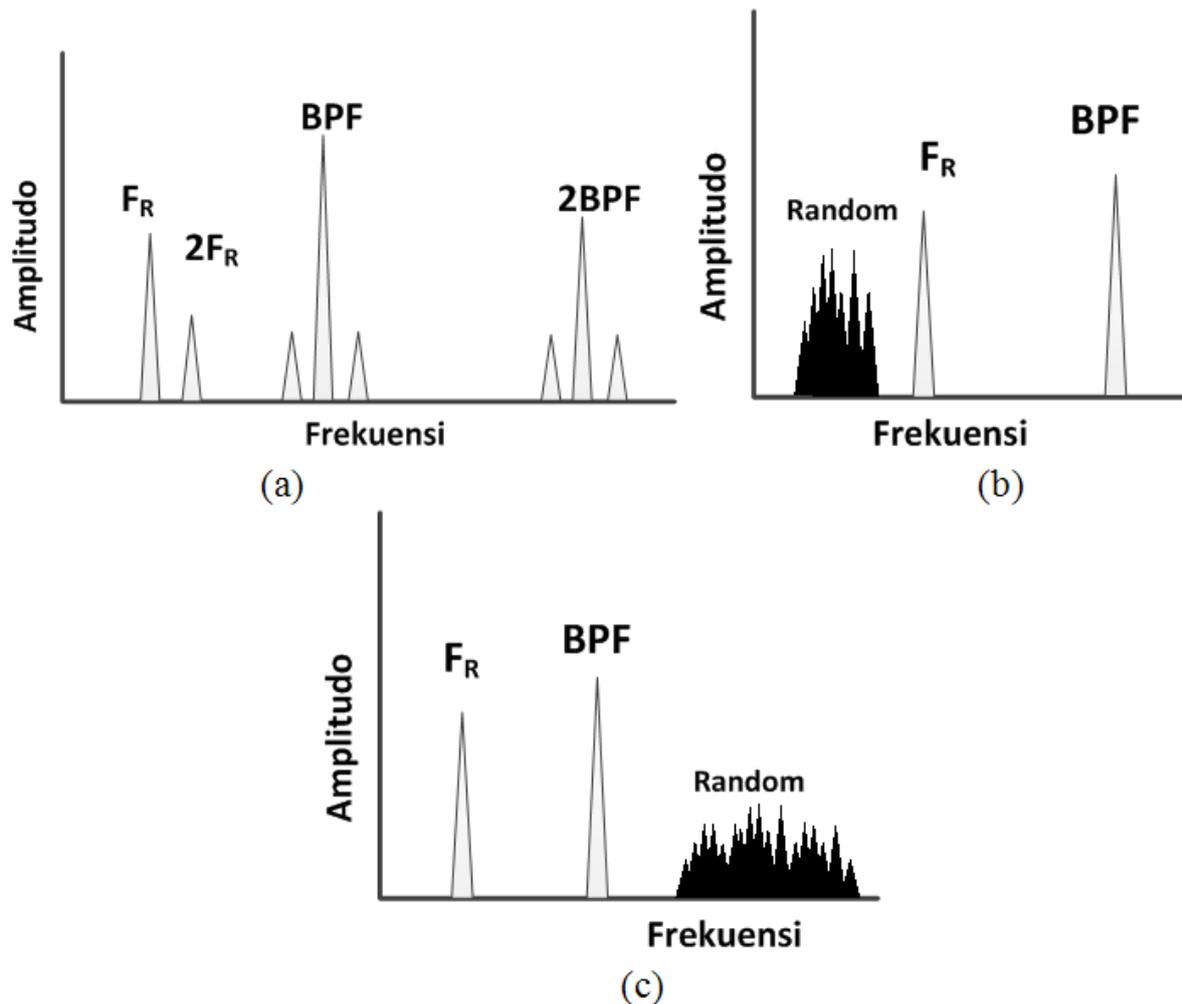
Frekuensi ini normal terjadi pada sebuah pompa, namun karena tingkat keausan dari impellerlah atau *eccentric* dari rotor yang akan menentukan seberapa tinggi amplitudo frekuensinya. Gambar 6 menunjukkan interaksi dari BPF dengan kecepatan rotasi poros motor serta frekuensi random yang cukup lebar saat peristiwa turbulensi dalam pompa terjadi (Gambar 6.c) dan kavitas (Gambar 6.d). BPF dapat dicari dengan persamaan berikut, dimana B adalah jumlah *blade* atau bilah impeller pompa.

$$F_{BPF} = (F_R * B) \quad (7)$$

Berbagai model kombinasi frekuensi inilah yang bisa digunakan untuk mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan. Kuncinya adalah pengetahuan tentang parameter-parameter dari sebuah motor dan pompa. Kemudian parameter parameter yang dihitung dengan Persamaan 3 sampai dengan 7 yang nantinya akan digunakan sebagai informasi mendasar tentang kondisi sebuah motor pendingin.

TATA KERJA

Penelitian ini berupaya untuk memberikan pemahaman mendasar tentang bagaimana pemantauan pompa pendingin di reaktor daya



Gambar 6. Spektrum frekuensi pompa yang berhubungan dengan fenomena gaya-gaya hidrolika (a) pompa normal dengan BPF yang tinggi (potensi kerusakan), (b) turbulensi (c) kavitasi

bertipe PWR dilakukan. Namun mengingat motor pendingin untuk PWR seperti di Gambar 2 tidak diperoleh, maka motor induksi dan pompa pendingin dengan fungsi yang sama diimplementasikan. Motor pendingin sekunder RSG GA Siwabessy dengan spesifikasi seperti ditunjukkan di Tabel 1 pada penelitian ini diambil data spektrum frekuensinya dengan metode pemantauan vibrasi, dianalisis dan diprediksi jenis cacatnya terkini. Perlu dipahami, mengingat bahwa motor dan pompa yang terpasang digunakan untuk fasilitas keselamatan RSG-GA Siwabessy, maka jenis-

jenis kerusakan tertentu untuk lebih mendalami metode pemantauan vibrasi ini tidak dapat disimulasikan.

Pemantauan vibrasi dilakukan dengan menggunakan rangkaian perangkat yang terdiri dari, sistem pemrosesan sinyal *Dynamic Signal Analyzer* (DSA NI 4551), NI PCI-4451, 16-Bit, 204.8 kS/s, *simultaneously sampled input* 2 kanal/ output 2 kanal. Sebuah sensor vibrasi accelerometer, *piezoelectric vibration sensor* PTB EX-81/2125, yang terkoneksi melalui terminal *Integrated Circuit Piezoelectric* ICP-2140 BNC ke kartu akuisisi NI 4551.

Tabel 1. Data teknis pompa pendingin sekunder RSG-GAS ⁽¹⁴⁾

Besaran Teknis	Nilai Desain
Tipe dan Merek Motor	KN 5315M BB011-Z Motor Induksi (SCHORCH)
Total Daya Input Motor	220 KW
Tegangan Motor	380V/3~/50Hz
Kecepatan Rotor	1490 rpm
Switching motor	Y- Δ
Cos ϕ	0,86
Tipe dan Merek Pompa	CPK-S 350 – 400 Pompa Sentrifugal (KSB)
Laju Alir	1980 m ³ /jam
Daya pompa	220 KW
Jumlah <i>Blade</i> pompa	5 buah

Data sinyal vibrasi yang diperoleh kemudian ditampilkan dalam domain frekuensi untuk mendemonstrasikan contoh jenis gangguan yang mungkin terjadi terhadap motor dan pompa pendingin RSG GA Siwabessy. Penyampelan dilakukan pada frekuensi 2500 Hz dengan jumlah blok data FFT 2048 kanal. Window yang dipakai adalah Hanning dengan perata-rataan spektrum frekuensi 5 kali pada mode *root mean square* (RMS).

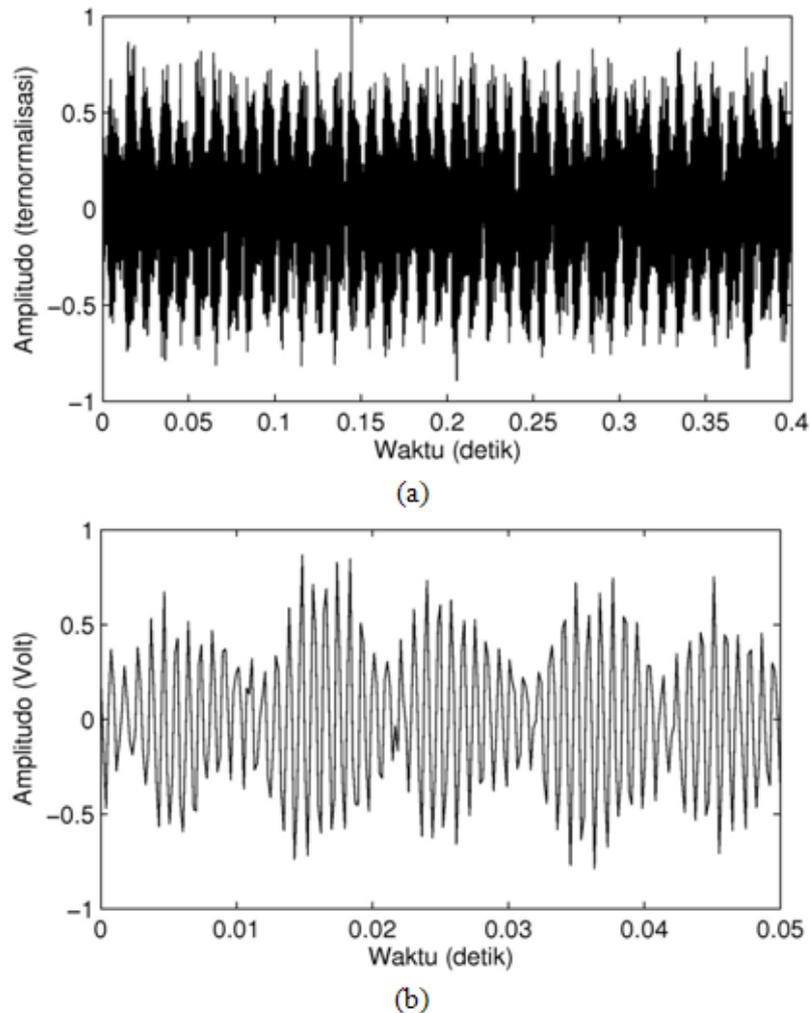
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa pendahuluan spektrum vibrasi

Penelitian ini memberikan porsi yang lebih terhadap analisis pendahuluan sejauh mana sistem pemantauan berbasis vibrasi dapat diterapkan kembali. Beberapa penelitian terdahulu dengan obyek motor pendingin sekunder telah dilakukan, namun diperlukan analisis ulang mengingat motor sekunder sudah mengalami pemeliharaan yang cukup signifikan. Selain itu, penelitian ini bermanfaat untuk

mengetahui *spectrum baseline* kondisi motor pendingin sekunder RSG GA Siwabessy, sehingga berguna bagi analisis selanjutnya secara historikal. Analisis pertama dilakukan terhadap sinyal vibrasi pada *time domain* seperti terlihat pada Gambar 7 berikut ini.

Gambar 7(a) menunjukkan data ternormalisasi hasil pengukuran pada domain waktu dengan laju sampling 2000 Hz, selama 0.4 detik, dan 2048 sampel pada posisi motor pendingin bagian luar (pada posisi kipas pendingin) di daerah *bearing* dengan arah horizontal. Gambar pembesaran untuk melihat lebih detil lagi pola sinyalnya ditunjukkan seperti di Gambar 7 (b). Secara visual terlihat bahwa hasil pengukuran vibrasi memberikan gambaran sinyal yang cenderung berpola berulang, cenderung impulsif dan memberikan nilai *root mean square* (RMS) ternormalisasi (lihat persamaan 8) yang cukup signifikan (0.5187), mirip seperti tanda-tanda kejadian pada cacat/keausan *bearing*.



Gambar 7. Sinyal hasil pemantauan vibrasi (ternormalisasi) pada domain fungsi waktu pompa pendingin RSG GAS PA 02 pada posisi *motor outboard horisontal* (a) grafik total dan (b) grafik pembesaran (rentang 0 sampai dengan 0.05 detik).

Namun, secara sederhana konfirmasi untuk mengetahui level tanda-tanda terjadinya berbagai cacat yang disebabkan oleh *bearing*, menggunakan nilai *kurtosis* dari distribusi sinyalnya (lihat persamaan 9), masih dibawah nilai batas ambang 3, yaitu berkisar pada 2.08. Demikian juga konfirmasi dengan menggunakan pendekatan *Crest Factor* (lihat persamaan 10) menghasilkan nilai 2.60. Nilai ini relatif memenuhi syarat dimana untuk mesin yang relatif sehat, nilai ini umumnya berkisar Antara 2 sampai dengan 6. Sebagai alternatif, untuk

lebih mempertajam analisis, selanjutnya nilai RMS dapat juga diaplikasikan pada analisis *overall* vibrasi untuk mengetahui sehat atau tidaknya sebuah mesin dengan kriteria ISO 10816, tentunya setelah dikonversi menjadi parameter percepatan.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (8)$$

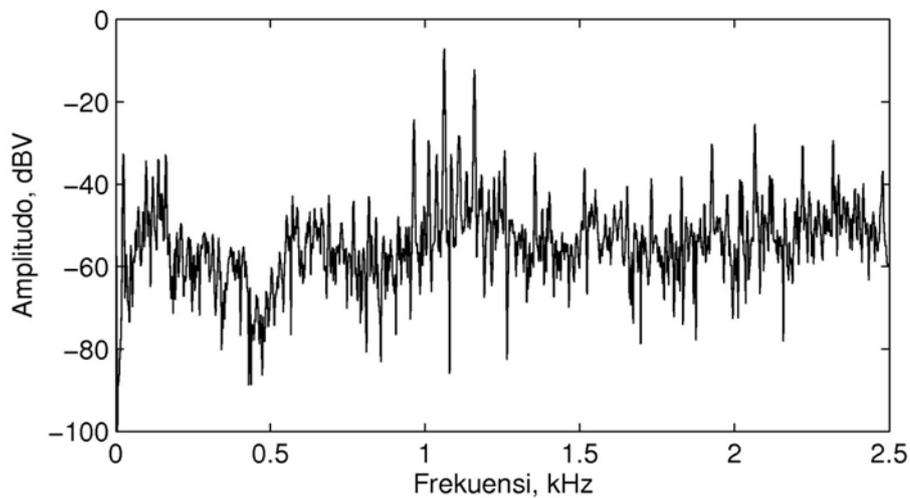
$$k = \frac{\sum_{n=1}^N [x_n - \mu]^4}{N * (\sigma^2)^2} \quad (9)$$

$$CF = \frac{\text{peak level}}{RMS} \quad (10)$$

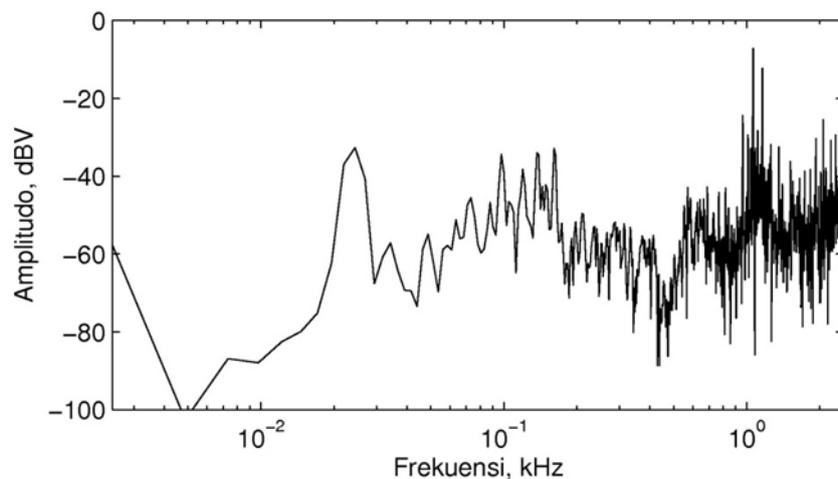
Dimana, N adalah jumlah sampel dari urutan input $x(n)$, m adalah rata-rata data, s^2 adalah varian dari data, k adalah nilai *kurtosis* dan CF adalah *Crest Factor* ⁽¹⁵⁾.

Analisis lebih lanjut untuk mengetahui detail setiap potensi cacat atau kerusakan, dapat dilakukan pada domain frekuensi dengan membandingkan hasil pengukuran dengan pola frekuensi kerusakan di Gambar 4, 5 dan 6. Hasil pengukurannya dari pemantauan vibrasi ditunjukkan di Gambar 8 dimana detailnya pada frekuensi rendah ditunjukkan di Gambar 9

dengan skala logaritmik. Spektrum vibrasi menunjukkan tidak dominannya puncak frekuensi kecepatan putaran rotor 1RPM (24.8 Hz), 2RPM yaitu pada 49.6 Hz, ataupun harmonik-harmnik lainnya. Kenyataan ini menunjukkan bahwa fenomena kerusakan atau gangguan mekanik seperti *mechanical unbalance*, *misalignment*, ataupun *looseness* kemungkinan besar tidak terjadi. Demikian juga dengan kerusakan *bearing* pada stadium yang akut juga tidak ditemukan, seperti ditandai oleh tidak munculnya fekuensi-frekuensi kerusakan



Gambar 8. Sinyal hasil pemantauan vibrasi pada domain frekuensi



Gambar 9. Detail sinyal hasil pemantauan vibrasi pada frekuensi rendah

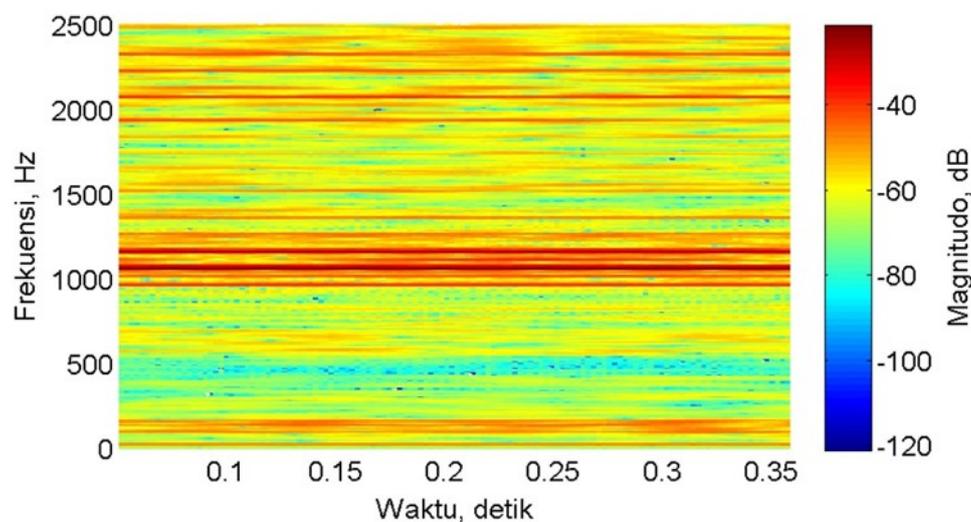
bearing pada 10 Hz, 52 Hz, 119 Hz, 176 Hz. Sebagai catatan nilai ini adalah nilai perkiraan analitis yang menjadi spesifikasi dari *bearing* terpasang tipe FAG 6319 C3 2Z motor pendingin sekunder.

Ditinjau dari aspek gangguan elektro mekanikal, beberapa potensi kerusakan baik pada bagian rotor, stator maupun *eccentricity* antara keduanya juga tidak terdeteksi. Frekuensi jala-jala catu daya F_L (50Hz) yang biasanya menjadi penanda utama kerusakan yang berkaitan dengan elektrikal tidak muncul dengan signifikan. Namun tidak adanya gangguan elektrikal tidak bisa disimpulkan hanya dengan mengandalkan teknik ini. Hal ini karena pemantauan dengan vibrasi memang kurang begitu sensitif terhadap gangguan yang berhubungan dengan sistem elektrikal.

Puncak-puncak frekuensi yang lebih dominan terjadi sebenarnya antara frekuensi yang relatif random dan terkumpul antara 1000-1250 Hz. Pengalaman menunjukkan, dilihat dari

rentang frekuensinya boleh jadi kerusakan ini karena keausan awal dari *bearing* yang memang tidak mudah dideteksi. Kemungkinan lain yang lebih menarik adalah peristiwa kavitasi pada pompa pendingin. Hal ini ditandai dengan munculnya frekuensi disekitar 124 Hz, yang merupakan frekuensi BPF. Dugaan ini haruslah bisa dikonfirmasi lebih lanjut dengan lebih teliti, terutama pada pengukuran yang lebih terkonsentrasi di sisi pompa.

Gambar 10 menunjukkan spektrogram dari sinyal untuk mendemonstrasikan berbagai distribusi frekuensi pada waktu tertentu. Gambar 10 menunjukkan bahwa puncak frekuensi lebih dari -40 db antara 1000 sampai dengan 1250 Hz dapat diasumsikan terjadi hampir secara ajeg dan bukanlah sinyal fluktuatif. Grafik ini sekaligus memberikan konfirmasi tentang karakteristik frekuensi kemungkinan kejadian kavitasi yang terjadi hampir berterusan selama rentang pengambilan data.



Gambar 10. Spektrogram dari frekuensi

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil didemonstrasikan bagaimana metode pemantauan berbasis vibrasi pada motor pendingin di PWR agar dicapai tingkat keselamatan yang lebih baik secara online. Berbagai model kerusakan spektrum frekuensi vibrasi baik karena penyebab mekanik, elektromekanikal maupun munculnya fenomena hidrolika didiskusikan dalam penelitian ini. Pada penelitian ini, ditunjukkan juga tahap-tahap pengujian awal metode ini dengan menggunakan motor pendingin reaktor yang ada di reaktor riset GA Siwabessy. Pengujian dengan analisis pada domain waktu menunjukkan nilai RMS sinyal adalah 0.5187, nilai *kurtosis*nya 2,08, dan *crest factor* 2.60, masih relatif berada dibawah batas-batas standar kerusakan. Selanjutnya konfirmasi dengan analisis pada domain frekuensi juga tidak menunjukkan adanya kerusakan komponen mekanikal maupun elektromekanikalnya. Namun fenomena termohidrolika seperti kavitasi diduga terjadi seperti ditandai dengan munculnya frekuensi BPF pada kisaran 124 Hz berikut frekuensi randomnya yang tersebar antara 1000 sampai 1250 Hz. Dapat disimpulkan bahwa metode pemantauan dengan vibrasi akan sangat membantu untuk menganalisis tidak hanya bagi pemeliharaan komponen pompa pendingin namun juga meningkatkan keselamatan pengoperasiannya dengan identifikasi berbagai fenomena yang terjadi secara komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, *On-Line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants Part 2 : Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics*, International Atomic Energy Agency; 2008.
2. Choi S-Y, Byun H-H, Kim S-A, editors. *Design and implementation of advanced NSSS integrity monitoring system for APRI400.*, 7th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies 2010, NPIC and HMIT 2010, November 7, 2010 - November 11, 2010; 2010; Las Vegas, NV, United states: American Nuclear Society.
3. Company WE., *Vibration Integrity Monitoring System*, Westinghouse Electric Company, 2012.
4. Oh YG, Galin SR, Lee SJ., *An advanced NSSS integrity monitoring system for Shin-Kori nuclear units 3 and 4*, IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010;57(6 PART 2):3661-6.
5. Gopal R, Ciaramitaro W., *Experiences with diagnostic instrumentation in nuclear power plants*, Progress in Nuclear Energy. 1977;1(2-4):759-79.
6. Tavner PT, and J. Penman, *Condition monitoring of electrical machines.*, Peter J, Tavner, editor. Letchworth, England: Research Studies Press LTD, John Wiley and Sons Inc; 1987.

7. *SBO-qualified RCP seal.*, Nuclear Engineering International; 2012 [cited 2013 17/10]; Available from: <http://www.neimagazine.com/features/featuresbo-qualified-rcp-seal/>.
8. SEC-KSB Nuclear Pumps & Valves Co. L. *Product Introduction RUV, Generation 3+ Customized Reactor Coolant Pump.*, SEC-KSB Nuclear Pumps & Valves Co., Ltd; 2008 [cited 2013 17/06]; Available from: <http://www.ksb.com/sec-en/Products/RUV/>.
9. SKF. *Vibration Sensors. SKF Condition Monitoring 2005* [cited 2013 17/06]; Available from: <http://www.skf.com/files/260860.pdf>.
10. Benbouzid MEH., *Review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection.*, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2000;47(5):984-93.
11. Wildi T., *Electrical machines drives and power system*, Columbus, Ohio: Prentice Hall; 2005.
12. Singh GK, and S. A. S. Al Kazzaz., *Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey*, Electric Power Systems Research. 2003;64(2):45-158.
13. Girdhar P, and C. Scheffer., *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance.*, First ed. Mackay S, editor. Burlington: Newnes, Elsevier; 2004.
14. *Safety Analysis Report Rev-8*, Pusat Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy-BATAN. Serpong, Indonesia: BATAN; 1998.
15. Lebold M, McClintic K, Campbell R, Byington C, Maynard K., *Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics*, Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology; Virginia Beach, VA2000. p. 623-34.