

## INVESTIGASI PENGGUNAAN METODE *ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS* UNTUK PEMANTAUAN KESELAMATAN MOTOR POMPA PENDINGIN DI PWR

Syaiful Bakhri

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN

Email : bakhri@batan.go.id

### ABSTRAK

**INVESTIGASI PENGGUNAAN METODE *ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS* UNTUK PEMANTAUAN KESELAMATAN MOTOR POMPA PENDINGIN DI PWR.** Pemantauan keselamatan pompa pendingin di PWR menjadi hal yang sangat penting walaupun motor pendingin sudah didesain dengan teknologi keselamatan dan kehandalan yang tinggi. Untuk memantau keselamatan motor pendingin ini, salah satu metode maju adalah dengan *electrical signature analysis*, dikenal juga dengan *motor current signature analysis*. Makalah ini mendemonstrasikan investigasi metode *electrical signature analysis* agar diperoleh hasil pemantauan keselamatan yang akurat. Beberapa masalah krusial dibahas dalam penelitian ini, seperti pengesetan parameter data akuisisi, karakterisasi motor pendingin dan contoh pendeteksian kerusakan menggunakan sebuah motor induksi 2.2 kW yang mensimulasikan motor pendingin reaktor. Hasil karakterisasi motor pendingin menunjukkan identifikasi frekuensi slip motor pada rentang 0-4 Hz, frekuensi fundamental arus stator 50 Hz, frekuensi rotasi rotor pada beban penuh 23.5 Hz. Sebagai tambahan, kerusakan *eccentricity* antara rotor dan stator juga berhasil diidentifikasi melalui puncak-puncak harmonik frekuensi slot rotor dan *sideband* frekuensi fundamental arus stator karena pengaruh frekuensi rotasi rotor 26.5 Hz dan 73.5 Hz.

Kata kunci: keselamatan, motor pompa pendingin, *electrical signature analysis*.

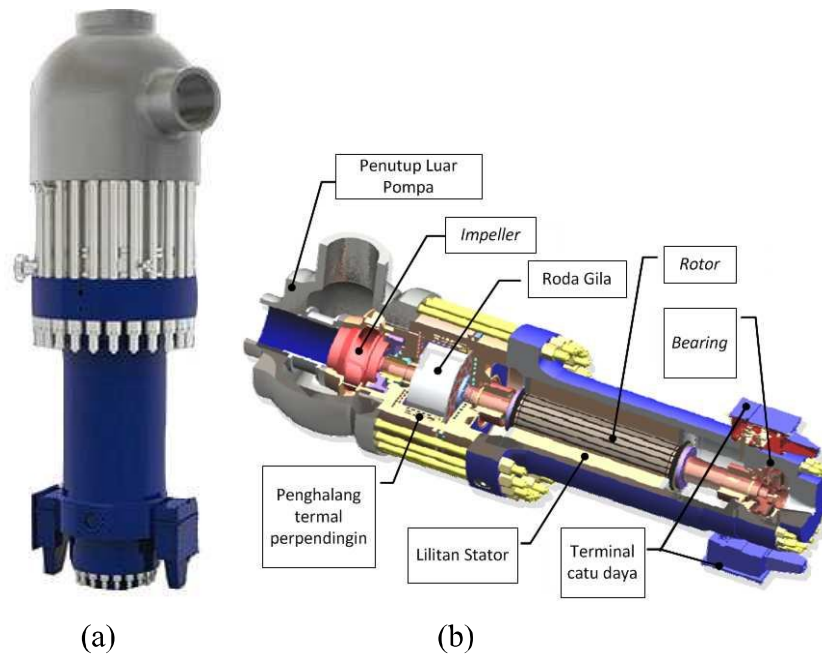
### ABSTRACT

**THE INVESTIGATION OF *ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS* METHOD IMPLEMENTATION FOR THE MONITORING OF SAFETY MOTOR COOLANT PUMP IN PWR.** The monitoring for the safety of motor coolant pumps for the PWR can be very essential even though they have been designed considering high safety technology and reliability. To monitor the safety of the motor coolant pump, one of the advance techniques is using *electrical signature analysis*, known also as *motor current signature analysis*. This research demonstrates the investigation of *electrical signature analysis* technique in order to obtain accurate safety analysis results. Crucial aspects are discussed in this paper, such as data acquisition set-up, characterization of motor coolant pump and the example for fault detection utilizing 2.2 kW induction motor to simulate the reactor motor coolant pump. The motor characterization results the identification of slip motor between 0-4 Hz, fundamental frequency of stator current at 50 Hz, rotor frequency at full load around 23.5 Hz. In addition, the eccentricity of stator and rotor faults can also be identified using the existence of frequencies of the rotor slot harmonic and the sideband of fundamental frequency of stator current affected by rotor frequency at 26.5 Hz and 73.5 Hz.

Keywords: safety, motor coolant pump, *electrical signature analysis*

### PENDAHULUAN

Motor pompa pendingin di reaktor daya bertipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) umumnya menggunakan motor induksi atau motor asinkron. Sebagai contoh, pompa pendingin RUV 560-775 yang khusus didesain untuk sistem pendingin reaktor daya AP1000 menggunakan empat buah *canned induction motor* (dua pompa pendingin bertipe motor induksi di tiap *steam generator*) berbentuk vertikal, stator dan rotor bertipe lilitan basah. Desain rotor adalah *squirrel-cage*, berpendingin air, empat *pole*, tiga fase catu daya, dengan daya 6600 KW seperti terlihat di Gambar 1 dan spesifikasi teknis seperti diberikan pada Tabel 1<sup>[1-3]</sup>.



Gambar 1. (a) Pompa pendingin AP1000 tipe RUV 560-755 (b) bagian-bagian utama dari pompa pendingin<sup>[1-3]</sup>

Tabel 1. Data teknis pompa pendingin RUV 560-755 untuk AP1000[1-3]

Besaran Teknis	Nilai Desain
Temperatur sistem	280 °C
Tekanan sistem	155 Bar
Kapasistas	17.886 m <sup>3</sup> /jam
Head	111 m
Total Daya Input	6.600 kW
Tegangan Motor	6.900 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Rotor	1780 rpm
Panjang Kabel Stator	4.800 m
Panjang Total Pompa	6.730 mm
Total Berat Pompa	63.250 kg

Tipe motor induksi di pompa RUV 560-755 untuk AP1000 ini sangat handal karena konstruksimotor dan pompa yang dibuat menyatu dan menggunakan pendingin tambahan. Untuk tipe motornya, tercatat sekitar 97% bertipe motor induksi dengan desain rotor bertipe squirrel-cage digunakan di PWR dan 94% dipakai di BWR[4]. Pompa RUV juga dirancang tanpa menggunakan seal untuk menghindari LOCA karena resiko kerusakan seal. Rotor dirancang dari lapisan-lapisan tipis besi bermagnet dengan rotorbar terbuat dari tembaga. Stator selain juga dibuat dari besi bermagnet menggunakan lilitan kawat saling silang yang berisolasi dari bahan polyethylene. Isolator lilitan kawat ini dirancang sedemikian rupa agar tahan terhadap regangan yang diakibatkan temperatur lingkungan saat terjadi fluktuasi suhu yang cukup ekstrem. Selain itu, rotor dan stator dibuat bertipe basah sehingga pendingin air dapat bersirkulasi untuk membantu pendinginan. Kelebihan lainnya, motor pompa pendingin menggunakan kontrol variable speed untuk menghemat daya operasi saat kecepatan nominalnya tidak dibutuhkan dalam sistem pendinginan reaktor. Beberapa komponen utama dari motor pompa pendingin seperti ditunjukkan di Gambar 1 adalah stator, rotor, bearing dan terminal catu daya.

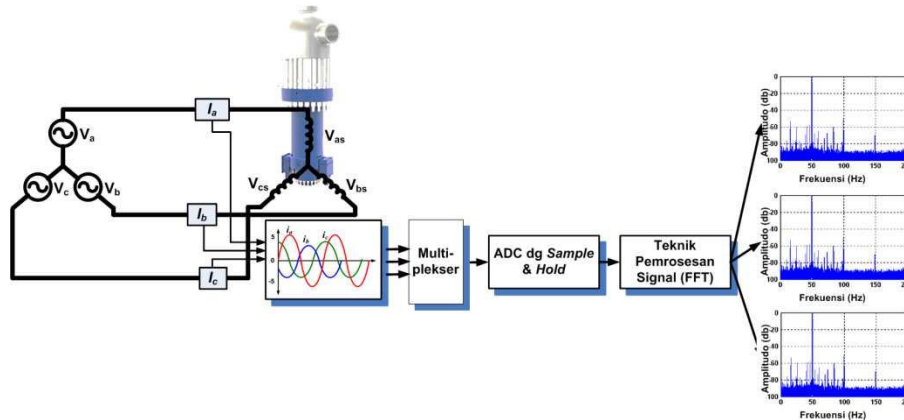
Beberapa teknik telah diimplementasikan baik teknik konvensional secara offline maupun teknik maju (advance) sekaligus online untuk memantau keselamatan motor pompa pendingin. Sebagai contoh,

uji Polarization Index untuk menganalisis isolasi secaravibrasi, tegangan kebocoran AC/DC (High Pot), Partial Discharge, tegangan impulse, analisis oli pelumas untuk analisa cacat bearing, akustik, vibrasi motor, temperatur lilitan stator dan bearing, dan MCSA[5-7]. Diantara beberapa teknik ini electrical signature analysis atau lebih dikenal sebagai Motor Current Signature Analysis(MCSA) direkomendasikan mengingat berbagai kemudahan, salah satunya adalah mudah mengakuisisi data dari jarak jauh dengan hanya mengakses kabel catu daya atau switchgear breaker motor. Namun teknik ini membutuhkan keahlian untuk membaca tanda-tanda kerusakan yang terjadi dengan menganalisis puncak-puncak spektrum frekuensi tertentu.

Tantangan ini membutuhkan penguasaan kemampuan sekaligus metode dalam mengimplementasikan analisa menggunakan electrical signature analysis(MCSA) di PWR nantinya. Selain itu, sesuai dengan RENSTRAPusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN, hal ini akan memberikan kontribusi positif bagi kemampuan sumber daya manusia dalam mengevaluasi sekaligus memantau keselamatan pembangkit daya PWR di masa yang akan datang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mendemonstrasikan teknik MCSA secara detail, mulai dari sistem akuisisi data, karakteristik sebuah motor induksi dengan analisis spektrum frekuensi, dan teknik identifikasi kerusakan dari spektrum frekuensi terukur agar diperoleh kemampuan mengevaluasi keselamatan motor pendingin nantinya.

## DASAR TEORI

*Motor Current Signature Analysis* pada dasarnya adalah teknik dekomposisi spektrum dari arus stator dalam keadaan *steady state* menjadi informasi yang mewakili kondisi dari sebuah motor listrik. Gambar 2 berikut ini mengilustrasikan teknik pemantauan keselamatan yang hanya membutuhkan sensor sederhana seperti sensor dengan *Hall Effect*, *Clamp Transformer* (CT), atau dengan *Rogowski Coil* untuk mendeteksi arus bolak balik tanpa merusak ataupun menghentikan operasi dari sebuah motor induksi.



Gambar 2. Teknik pemantauan keselamatan komponen dengan electrical signature analysis[8]

Teknik pemantauan keselamatan komponen dengan *electrical signature analysis* dilakukan dengan mengukur tiga fase arus listrik, kemudian mengkonversi sinyal arus dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) seperti ditunjukkan di Gambar 2. Perlu dicatat bahwa pendeteksian bisa saja menggunakan satu sensor di satu fasa, namun tiga sensor sekaligus dapat digunakan untuk memperoleh akurasi yang lebih baik dalam mendeteksi peristiwa asimetri antar ketiga fasa ini. Selain itu, FFT bukanlah satu-satunya teknik ekstraksi sinyal untuk mempermudah analisis kerusakan, teknik lain dapat juga digunakan seperti *Short Time Fourier Transform*, *Wavelet Transform*, *Negative Sequence Impedance* ataupun pendekatan *Park's Vector*.

Informasi puncak spektrum frekuensi yang diperoleh dengan menggunakan sistem ini selanjutnya membutuhkan pencocokan dengan model-model puncak spektrum kerusakan yang dihasilkan melalui perhitungan analitis dari beberapa literatur. Beberapa contoh frekuensi kerusakan

dari puncak-puncak spektrum ini ditunjukkan di Tabel 2 berikut ini<sup>[8, 9]</sup>. Sebagai catatan,  $f_1$  adalah frekuensi fundamental catu daya dari motor,  $f_r$  adalah frekuensi rotasi dari motor,  $R$  adalah jumlah slot batang rotor,  $p$  adalah jumlah pasangan kutub magnet (*pole*) di stator,  $s$  adalah *slip* yang sangat tergantung dari pembebanan motor dan  $k$  adalah indeks harmonik ( $k=1,2,3,\dots$ ),  $n_{ws}$  adalah frekuensi harmonik dari catu daya ( $n_{ws} = 1,3,5,7,\dots$ ). Sebagai catatan *slip* dapat dirumuskan secara sederhana dengan persamaan berikut:

$$\text{slip (\%)} = (n_s - n_r) / n_s * 100,$$

dimana kecepatan sinkron motor atau  $n_s = 60 * f_1 / p$ , dan  $n_r$  adalah kecepatan rotasi rotor dalam satuan rotasi per menit.

Tabel 2. Frekuensi kerusakan motor induksi[8]

	Jenis Kerusakan	Frekuensi kerusakan
1	Patah batang-batang rotor	$(1 \pm 2s)f_1$
2	Hubung singkat antar lilitan stator	$f_1 [(n/p)(1-s) \pm k]$
3	Pergeseran titik tengah rotasi antara stator dan rotor	$(f_1 \pm f_r), (R \cdot f_r \pm n_{ws} \cdot f_s)$
4	Pergeseran titik poros antara motor dan pompa	$(1 \pm 2s)f_1, (f_1 \pm kf_r)$

Terlihat di Tabel 2, beberapa perhitungan frekuensi sangat tergantung dengan seberapa akurat frekuensi dari karakteristik parameter motor dapat diketahui. Sebagai contoh, perhitungan pembebanan secara sederhana dapat diperoleh dengan berbagai teknik, seperti menggunakan rasio daya terukur sebagai fungsi pembebanan dan daya keluaran nominal saat beban penuh (*rated power output*). Teknik kedua adalah rasio arus listrik stator sebagai fungsi pembebanan dan arus nominalnya. Teknik ketiga dengan memanfaatkan frekuensi *slip* yang proporsional dengan pembebanan. *Slip* yang pada dasarnya adalah selisih perbedaan antara kecepatan putaran medan magnet di stator (kecepatan sinkron motor) dan kecepatan putaran dari rotor akibat terinduksi oleh medan magnet stator. Pembebanan membuat kecepatan putaran rotor melambat dan menghasilkan interaksi medan magnet dan frekuensi unik yg proporsional dengan seberapa besar pembebanan. Kecepatan rotor itu sendiri dapat diamati secara mudah dengan *tachometer* atau dengan sensor vibrasi.

## TATA KERJA

Mengingat motor yang berkelas sama dengan tipe 6.600 kW RUV 560-755 AP1000 tidak bisa diperoleh secara bebas, maka penelitian ini menggunakan motor induksi dengan kelas yang lebih kecil (2.2 kW) sebagai contoh obyek untuk mengaplikasikan teknik pemantauan keselamatan ini. Motor induksi 2.2 kW yang diberi catu daya tiga fase koneksi Y, saluran tegangan 415 V, 50 Hz, mempunyai 4 kutub (*pole*), arus nominal 4.9 A, dan kecepatan nominal 1415 rpm. Untuk memudahkan menganalisis berbagai variasi pembebanan, motor tidak dikopling dengan pompa tetapi dengan motor DC 5 kW yang tereksitasi secara terpisah.

Tabel 3. Pengesetan penyampelan frekuensi yang dilakukan pada penelitian ini

	Sampling frekuensi rendah	Sampling frekuensi tinggi
Frekuensi sampling	400 Hz	8000 Hz
Total waktu sampling	100 detik	5 detik
Resolusi Frekuensi	0.01 Hz	0.2 Hz
Jumlah sampel tercatat	40.000	40.000
Frekuensi Nyquist	200 Hz	4000 Hz
Frekuensi Cut-off Butterworth filter order 8	100 Hz	2000 Hz

Arus listrik diukur dengan menggunakan sensor *Hall Effect* sederhana dengan rentang input  $\pm 10$  A, *bandwith* 50 kHz dan keluaran tegangan 5 A = 1V. Arus listrik dibaca dengan menggunakan

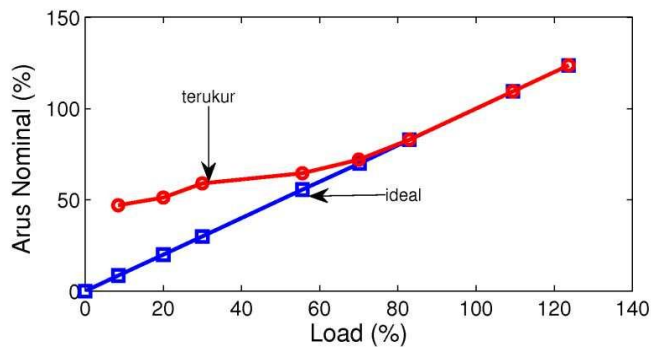
sistem akuisisi data seperti terlihat di Gambar 2 dengan menggunakan kartu akuisisi NI-PCI-6110, 12-bit, 5MS/sec, *simultaneous sampling*, termasuk *antialiasing* dan *filtering* dengan rincian seperti ditunjukkan di Tabel 3.

Dua jenis pendeteksian pada rentang berbeda dilakukan, frekuensi rendah untuk lebih teliti mendeteksi karakteristik frekuensi rotasi rotor dan slip, sedangkan rentang yang lebih tinggi untuk mendeteksi semua harmonik frekuensi yang mungkin dari sebuah motor pompa. Data yang diperoleh kemudian dikonversi dengan FFT dan dianalisis puncak-puncaknya spektrum ferkuensinya untuk mengetahui kondisi dari motor pompa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Karakterisasi Frekuensi Slip, Frekuensi Rotasi Rotor, Frekuensi Fundamental Arus Stator dan Efek Pembebanan

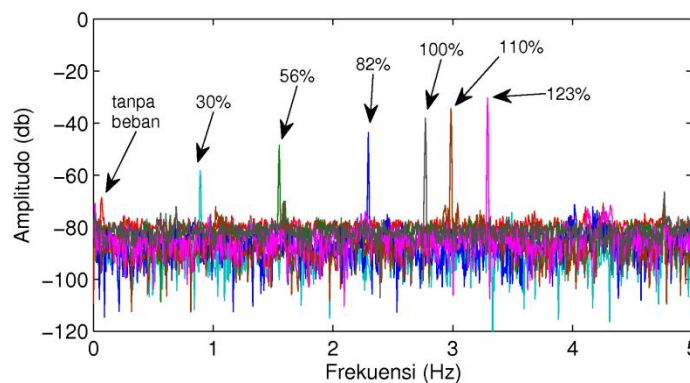
Salah satu parameter penting dalam analisis frekuensi adalah deteksi pembebanan mengingat spektrum frekuensi dalam berbagai kasus sangatlah dipengaruhi oleh pembebanan. Perhitungan pembebanan didemonstrasikan dengan dua cara, pertama adalah dengan menggunakan perbandingan arus listrik terukur dan arus listrik nominal seperti ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 3, kedua dengan menggunakan frekuensi *slip* seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Grafik hubungan antara pembebanan terhadap arus terukur.

Seperti terlihat di Gambar 3, korelasi antara arus nominal dan beban nominal terjadi secara proporsional saat pembebanan lebih dari 60%. Dengan kata lain, dengan menggunakan arus listrik maka persentase pembebanan motor tidak dapat diamati secara akurat mulai dari pembebanan yang sangat ringan.

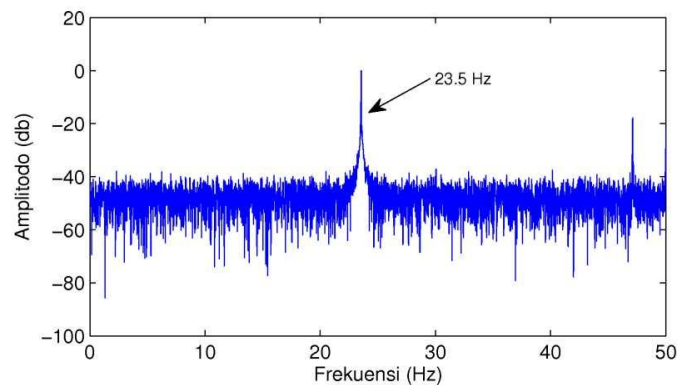
Teknik kedua dengan memanfaatkan korelasi antara pembebanan dengan frekuensi *slip*. Pengamatan di rentang frekuensi rendah terhadap frekuensi slip menggunakan sensor *flux leakage* sebagai fungsi pembebanan terlihat di Gambar 4 berikut ini.



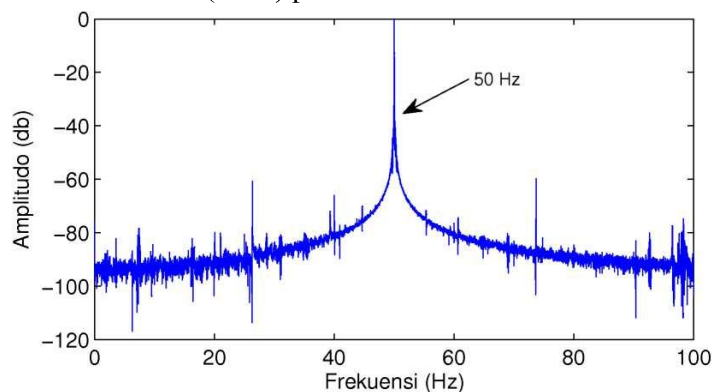
Gambar 4. Hubungan antara variasi pembebanan terhadap frekuensi slip.

Gambar di atas menunjukkan beberapa hasil data analisis *slip* dari berbagai variasi pembebanan, mulai dari tanpa beban sampai dengan 123% pembebanan yang saling ditumpangtindihkan. Gambar ini juga menunjukkan frekuensi *slip* yang relatif proporsional dengan pembebanan dan kecenderungan amplitudo frekuensi *slip* yang meningkat seiring dengan peningkatan pembebanan. Pada beban penuh 100% didapat frekuensi *slip* berkisar pada 2.75Hz atau pada *slip* 0.055 (dengan frekuensi catu daya 50 Hz). Hasil spektrum frekuensi *slip* ini secara tidak langsung juga mengkonfirmasi kebenaran hasil kalkulasi *slip* yaitu berkisar pada 0.057 dengan memanfaatkan kecepatan nominal (1415 rpm) dan kecepatan sinkronnya.

Parameter lain yang perlu dipahami dalam implementasi *electrical signature analysis* adalah frekuensi rotor dan frekuensi fundamental catu daya seperti terlihat di Gambar 5 dan 6 berikut ini. Gambar 5 mengkonfirmasi frekuensi rotasi rotor dari motor induksi pada beban penuh 100% atau, yaitu pada 23.5Hz. Selanjutnya, Gambar 6 menjelaskan frekuensi fundamental dari arus listrik setelah dinormalisasi pada 50 Hz pada dengan pengukuran pada rentang frekuensi rendah.



Gambar 5. Identifikasi frekuensi rotor dengan mengukur vibrasi di posisi drive end horizontal (DEH) pada motor induksi



Gambar 6. Identifikasi frekuensi fundamental catu daya dengan pengukuran arus listrik

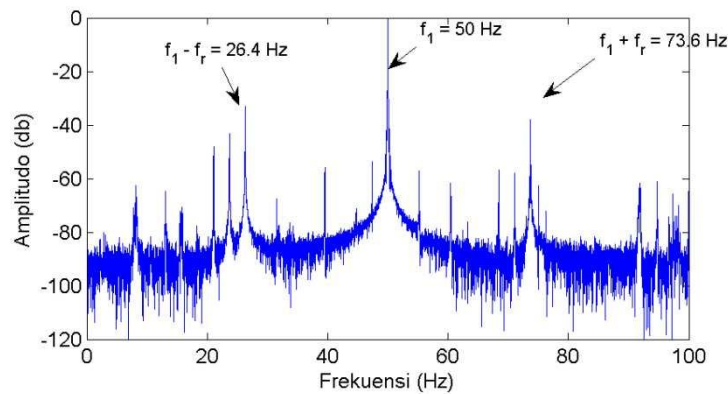
## B. Teknik Identifikasi Frekuensi Kerusakan Motor

Pada penelitian ini dianalisis satu kasus pergeseran titik tengah rotasi antara stator dan rotor (dikenal dengan nama *eccentricity*) sebagai contoh kasus dari beberapa bentuk kerusakan seperti yang ditunjukkan di Gambar 2. Analisis ini memanfaatkan beberapa parameter frekuensi yang telah diidentifikasi dan persamaan prediksi frekuensi kerusakan *eccentricity* di baris ketiga Table 1.

Letak posisi rotor divariasikan terhadap stator untuk membuktikan kasus *eccentricity* ini, dengan mempertimbangkan total celah udara antara stator dan rotor di masing-masing sisi 0.4 mm. Contoh kasus ini dilakukan dengan menaikkan rumah *bearing* yang menahan rotor dibagian *drive end* (DE) motor setinggi +0.2 mm. Dengan menggunakan alternatif persamaan  $f_{ecc1} = (f_1 \pm f_r)$  dan  $f_{ecc2} = (R \cdot f_r \pm n_{ws} \cdot f_s)$  (lihat Tabel 2), dengan jumlah slot rotor 32 buah dan  $n_{ws}$  sama dengan bilangan integer ganjil, maka akan diperoleh beberapa frekuensi kerusakan, seperti terlihat di Tabel 4 berikut ini.

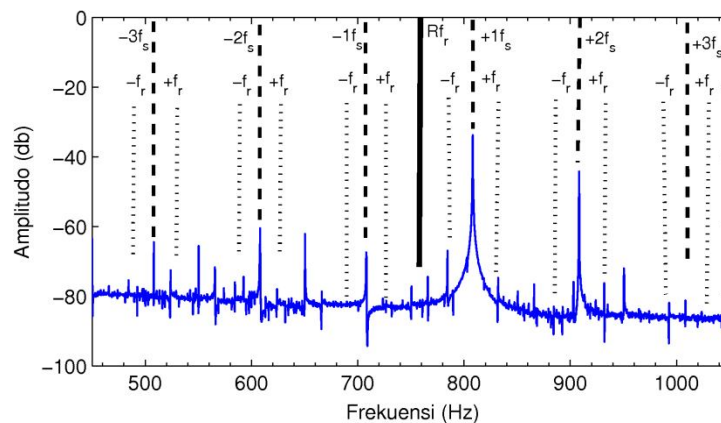
Tabel4. Identifikasi frekuensi eccentricity

	Persamaan	$f_{ecc1} = (f_1 \pm f_r)$	$f_{ecc2} = (R \cdot f_r \pm n_{ws} \cdot f_s),$ $n_{ws} = 1, 3, 5, \dots$	Sideband dari $f_{ecc2}$ $(f_{ecc2} \pm f_r)$	
1.	$-f_r$	26.5 Hz	-	-	
2.	$+f_r$	73.5 Hz	-	-	
3.	$+1f_s$	-	802 Hz	778.5 Hz	825.5 Hz
4.	$+3f_s$	-	902 Hz	878.5 Hz	925.5 Hz
5.	$+5f_s$	-	1002 Hz	978.5 Hz	1025.5 Hz
6.	$-1f_s$	-	702 Hz	678.5 Hz	725.5 Hz
7.	$-3f_s$	-	602 Hz	578.5 Hz	625.5 Hz
8.	$-5f_s$	-	502 Hz	478.5 Hz	525.5 Hz



Gambar 7. Identifikasi frekuensi eccentricity dengan persamaan  $(f_1 \pm f_r)$

Prediktor kerusakan *eccentricity* menggunakan *sideband* persamaan  $f_{ecc1} = (f_1 \pm f_r)$  seperti terlihat di baris ke 1 dan 2, ditunjukkan di Gambar 7. Frekuensi sideband 26.5 Hz dan 73.5 Hz terdeteksi dengan jelas (dengan amplitudo -35 db dan -38 db) yang sekaligus membuktikan keberadaan *eccentricity* antara rotor dengan stator. Namun, apabila dibandingkan antara Gambar 7 dan Gambar 6, terlihat bahwa dua frekuensi *sideband* juga teramati walaupun dengan amplitudo yang relatif lebih rendah berkisar pada (-60 db) pada motor yang sehat tanpa kerusakan apapun. Hal ini menunjukkan bahwa asimetri medan magnetik dari motor yang menjadi ciri khas dari motor ini juga bisa memunculkan frekuensi  $(f_1 \pm f_r)$ . Perbedaan frekuensi antara motor yang sehat dan yang mengalami kerusakan, hanyalah peningkatan magnitudo dari frekuensi  $(f_1 \pm f_r)$  seiring dengan ketidakseragaman medan magnet karena ketidakseragaman celah putaran antara stator dan rotor. Mempertimbangkan hal ini maka diperlukan alternatif frekuensi-frekuensi lain, yang lebih unik untuk mendeteksi jenis kerusakan *eccentricity* ini, seperti yang ditunjukkan di Gambar 8.



Gambar 8. Identifikasi frekuensi *eccentricity* dengan persamaan  $(R.f_r \pm n_{ws}.f_s)$  berikut *sideband*-frekuensinya pada  $(\pm f_r)$

Implementasi dari prediktor frekuensi dengan persamaan  $(R.f_r \pm n_{ws}.f_s)$  berikut *sideband*-nya ditunjukkan di Gambar 8. Frekuensi harmonik yang diprediksi oleh persamaan ini, yang dikenal juga dengan nama RSH (*Rotor Slot Harmonic*)<sup>[8]</sup> dihasilkan sebagai akibat perbedaan densitas celah udara antara stator dan rotor, serta interaksinya dengan slot rotor. Gambar 8 menunjukkan keberadaan beberapa frekuensi harmonik karena kerusakan *eccentricity* yang relatif signifikan pada 502 Hz, 602 Hz, 702 Hz, 802 Hz, dan 902 Hz. Frekuensi ini juga diikuti oleh sejumlah kecil *sideband*-nya pada  $\pm f_r$  (contoh *sideband*  $+1f_s$  : 778.5 Hz, dan 825.5 Hz) yang sekaligus menegaskan bahwa *eccentricity* yang dibuat statis pada *drive end* (DE) motor setinggi +0.2 mm, dan kemungkinan diikuti oleh *eccentricity* yang bersifat dinamis dan lebih acak pergerakannya antara stator dan rotor.

Walaupun hasil identifikasi ini sangat menjanjikan untuk memudahkan pemantauan keselamatan pompa pendingin di PWR nantinya, namun penelitian yang lebih dalam tetaplah dibutuhkan. Sebagai contoh, pengaruh pembebanan terhadap puncak-puncak spektrum frekuensi terdeteksi, bagaimana mengidentifikasi puncak-puncak spektrum kerusakan frekuensi lainnya, ataupun bagaimana interaksinya jika dua kerusakan bersamaan terjadi, masih perlu dilakukan.

## KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil didemonstrasikan bagaimana metode pemantauan keselamatan berbasis *electrical signature analysis* pada motor pendingin di PWR secara detil agar diperoleh hasil yang akurat. Hal ini meliputi, teknik data akuisisi yang mencakup sensor, perangkat keras, sampai penyampelan sinyal pada frekuensi rendah 400 Hz dan frekuensi tinggi 2000 Hz agar puncak-puncak spektrum frekuensi yang terdeteksi cukup baik untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, karakteristik motor pendingin, berupa frekuensi *slipp* pada rentang frekuensi rendah 0-4 Hz, deteksi frekuensi rotasi rotor (23.5 Hz) berikut korelasinya dengan pembebanan, berhasil diperoleh agar dapat diprediksi berbagai frekuensi kerusakan dengan lebih akurat. Dua teknik identifikasi kerusakan *eccentricity* melalui perbandingan frekuensi terukur dengan prediktor *sideband* frekuensi fundamental dan prediktor frekuensi harmonik rotor slot, menunjukkan bahwa jenis kerusakan ini dapat dipantau dengan mudah untuk keselamatan pengoperasian motor pendingin.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Baumgarten S, Brecht B, Bruhns U, Fehring P, editors. Reactor coolant pump type RUV for Westinghouse Electric Company LLC reactor AP1000. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010, ICAPP 2010, June 13, 2010 - June 17, 2010; 2010; San Diego, CA, United states: American Nuclear Society.
2. Bin H, editor. Research on mechanical analyses of the cans based on 1000 nuclear power plant. 2nd Annual Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011, September 16, 2011 - September 18, 2011; 2011; Yichang, China: IEEE Computer Society.
3. 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/>.
4. Wlaran M, Subudhi M. Aging Assessment of Large Electric Motors in Nuclear Power Plants. Upton, NY 11973 Brookhaven National Laboratory, U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1996.
5. IAEA. On-Line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants Part1 : Instrument Channel Monitoring International Atomic Energy Agency; 2008.
6. IAEA. On-Line Monitoring for Improving Performance of Nuclear Power Plants Part2: Process and Component Condition Monitoring and Diagnostics: International Atomic Energy Agency; 2008.
7. IAEA. Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants: A Guidebook: International Atomic Energy Agency; 1999.



8. Benbouzid ME. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. IEEE Trans Ind Electron. 2000;47(5):984-93.
9. Thomson WT, and A. Barbour. On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1998 December;13(4).

**DISKUSI / TANYA JAWAB :**

PERTANYAAN : (Deswandri, PTRKN – BATAN)

- Apa keunggulan dan kelemahan metode Current Signature Analysis, apakah ada standard untuk ini ?

JAWABAN : ( Syaiful Bakhri, PTRKN – BATAN)

- Keunggulan MCSA bisa mengidentifikasi kerusakan mekanik sekaligus elektrik, sensor lebih murah dan mudah dipakai dibandingka metode pemantauan denga vibrasi.
- Sandard ISO belum ada, berbeda dengan teknik vibrasi dengan ISO 10816