

Pengaruh Kecepatan Operasi Pompa Sentrifugal Terhadap Sensitivitas Metode Deteksi Fenomena Kavitas Berbasis Parameter Statistik Domain Waktu

(The Effect of Centrifugal Pump Operating Speed to the Sensitivity of Cavitation Detection Based on Statistical Parameters of Time Domain)

BERLI P KAMIEL, RAY S. RAMADHAN

ABSTRACT

Cavitation is one of the main concern on centrifugal pump faults that could cause component damages up to production failure in the industries. It is essential to detect and diagnose the fault as early as possible to prevent a catastrophic failure. Cavitation on sentrifugal pump could be caused by many factor, one of them are caused by the pump operating speed. This paper presents a method that able to detect cavitation by monitoring the vibrations level of the pump based on statistical analysis of time domain. This method is known as vibration monitoring technique that is undoubtedly the most effective technique to detect rotational machinery faults. The cavitation simulated on the test rig by varying the operating speed at 1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM, ..., 2600 RPM and by varying the size of suction valve opening. The cavitation phenomena are measured and indicated by magnitude of vibration level changes in stastical parameter such as Probability Density Function (PDF), Variance, Standard Deviation, Root Mean Square (RMS), Peak Value, Crest Factors and Kurtosis. The results show that PDF, Variance, Standard Deviation and RMS are proved to be able to detect cavitation caused by the pump operating speed variation. However, parameter such as Peak Value, Crest Factor and Kurtosis show low sensitivity and not suitable for the cavitation detection purposes.

Keywords: cavitation, operating speed, vibration monitoring, statistical parameters, time domain.

PENDAHULUAN

Pada sebuah pompa, kavitas merupakan suatu fenomena yang dihasilkan fluida cair dimana tekanannya turun dibawah tekanan uap jenuhnya (Brennen, 1977). Pengoperasian pompa dalam keadaan kavitas dalam jangka panjang dapat membuat kerusakan pada komponen pompa seperti impeller, rumah pompa dan penutup pada pompa (Cunha, Strack dan Stricker, 2008). Menurut analisis yang dilakukan oleh ABB, Argentina pada industri NGL, kegagalan yang diakibatkan pompa sentrifugal dapat menghasilkan kerugian mencapai US\$ 590.450. Oleh karenanya, sebuah metode deteksi dan diagnosis kavitas diperlukan untuk menghindari kerusakan pada pompa sentrifugal yang berpotensi mengakibatkan kerugian yang besar.

Pemantauan sinyal getaran merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas yang terjadi pada pompa

sentrifugal. Metode ini tidak diragukan lagi merupakan teknik yang paling efektif dalam mendeteksi kerusakan pada permesinan berputar (Scheffer dan Girdhar, 2004).

Umumnya, terdapat dua metode yang dapat digunakan dalam analisis getaran yaitu dengan menggunakan analisis spektrum dan analisis domain waktu. Dengan *Fast Fourier Transform* (FFT), analisis menggunakan spektrum dinilai praktis menghasilkan pola dengan karakteristik frekuensi jalur lebar (*broadband frequency*). Namun, dalam keadaan alamiah, frekuensi jalur lebar tersebut mungkin terjadi karena adanya pengaruh lain seperti lokalisasi fluktuasi tekanan serta *noise* yang dihasilkan oleh komponen-komponen lainnya. Sehingga diagnosis menggunakan spektrum tidak begitu jelas hubungannya dengan gejala yang dihasilkan oleh operasi pompa (Al-Hashmi, 2009). Sedangkan metode kedua, yaitu analisis domain waktu, menggunakan sejumlah parameter statistic yang diekstrak dari domain

waktu terbukti mampu menjadi indicator terjadinya kavitas pada pompa sentrifugal dengan lebih akurat (McKee et al., 2015).

Birajdar *et al.* (2009) menerangkan tentang bagaimana mendeteksi kesalahan yang terjadi pada pompa sentrifugal dan metode diagnosis yang dapat digunakan. Disebutkan bahwa pada pompa sentrifugal, sumber getaran dan suara yang mengganggu mungkin dapat terjadi dikarenakan oleh aspek mekanik maupun hidrolis. Secara umum sangat mudah melacak kerusakan mekanik namun tidak dengan kerusakan hidrolis. Al-Hashmi (2009) mengemukakan metode deteksi kesalahan yang terjadi pada pompa sentrifugal menggunakan analisis statistik berbasis sinyal getaran. Al-Tobi and Al-Sabari (2016) meneliti tentang bagaimana mendeteksi kavitas menggunakan metode domain waktu. Tujuan dari penelitiannya yaitu untuk membuktikan bahwa metode domain waktu dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas.

Hal yang sama juga dilakukan oleh Luo *et al.* (2015), penelitiannya mengemukakan tentang bagaimana aplikasi dari penggunaan sinyal getaran dalam mendeteksi keadaan pompa saat beroperasi dengan menggunakan metode analisis statistik serta karakteristik yang dihasilkan. Hasil penelitiannya membuktikan bahwa parameter statistik seperti *variance, standard deviation, Root Mean Square (RMS), crest factor, kurtosis dan Probability Density Function (PDF)* dapat digunakan dalam mendeteksi awal mula terjadinya fenomena kavitas pada pompa sentrifugal.

Penelitian-penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa sejumlah parameter statistik berhasil mendeteksi peristiwa kavitas namun belum menunjukkan sensitifitas parameter statistik tersebut dalam mendeteksi level kavitas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh level kavitas (dilakukan dengan menggunakan beberapa kecepatan poros) terhadap sensitifitas parameter statistik dalam mendeteksi peristiwa kavitas.

LANDASAN TEORI

Pompa sentrifugal merupakan salah satu mesin rotasional dimana aliran dan tekanan dihasilkan secara dinamis (Karassik, *et al* 2008). pompa sentrifugal pada umumnya memiliki 2 bagian utama yaitu rumah pompa dan motor listrik (Luo et al., 2015). Kavitas yang terjadi pada

pompa sentrifugal seringkali dapat merusak bagian/komponen yang ada dirumah pompa.

Menurut Brennen (1977:15) kavitas merupakan suatu fenomena yang dihasilkan fluida cair ketika tekanannya turun dibawah tekanan uap jenuhnya. Namun, secara definisi istilah, kavitas berarti penguapan parsial dari cairan dalam sistem aliran. Fase uap yang dihasilkan akan seketika meletup/meledak disaat mengalir pada zona dimana tekanan statiknya kembali melebihi tekanan uap jenuhnya (Gulich, 2013, p. 287). Kondisi kavitas yang seperti inilah merupakan fenomena yang dapat terjadi pada pompa sentrifugal dan harus dicegah karena dapat menyebabkan kerusakan serta dapat mengganggu sistem kerja produksi.

Menurut Al-Hashmi (2009), sebagai bagian dari konsep matematika, probabilitas menampilkan nilai dari terjadinya suatu peluang pada kejadian tertentu. Jika kejadian dianggap pasti terjadi, probabilitasnya adalah 1; jika tidak terjadi, probabilitasnya adalah 0. Dalam aplikasinya, metode kepadatan probabilitas ini mudah digunakan dalam mempelajari sinyal kontinu seperti pada sinyal getaran. Secara definisi, kepadatan probabilitas adalah nilai amplitudo sesaat dalam interval amplitudo Δx , terhadap lamanya waktu Δt pada getaran acak. Adapun fungsi kepadatan probabilitas dirumuskan pada persamaan 1.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana x menyatakan data yang digunakan, \bar{x} nilai rata-rata dari total data dan σ merupakan nilai standar deviasinya.

Ketika pengukuran data getaran dilakukan, hubungan antara variasi kecepatan aliran maupun kecepatan operasi terhadap histogram dapat dihasilkan lebih akurat dengan menggunakan kenaikan parameter standar deviasi (SD). Adapun standar deviasi dirumuskan dengan persamaan 2.

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data (Al-Hashmi, 2009).

Dalam bidang statistika, *variance* merupakan nilai kuadrat dari standar deviasi (σ^2) yang dirumuskan pada persamaan 2.8.

$$Var(X) = \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (3)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data.

Nilai pada RMS merupakan sebuah indikator dari level energi dari sinyal getaran yang dirumuskan pada persamaan 4.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N x_j^2}{N}} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana N merupakan jumlah dari titik sinyal data, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai total sinyal dan x_j merupakan kolom data (Brandt, 2010).

Crest factor merupakan pengukuran statistika yang cukup banyak digunakan dalam analisis sinyal. Parameter ini didefinisikan sebagai rasio nilai absolut maksimum dari nilai RMS sinyal. Jika sebuah sinyal $x(n)$, dengan rata-rata nol maka fungsi *crest factor* dapat didefinisikan sebagai persamaan 5 berikut.

$$C_f = \frac{MAX(|x(n)|)}{\sigma} \dots\dots\dots (5)$$

Nilai dari *crest factor* sering kali digunakan sebagai parameter penting karena nilai yang didapat mengindikasikan seberapa memuncak (*peaky*) data yang dihasilkan. Nilai *crest factor* yang tinggi menyiratkan bahwa ada setidaknya satu puncak bernilai tinggi positif maupun negative pada sinyal (Brandt, 2010, p. 71).

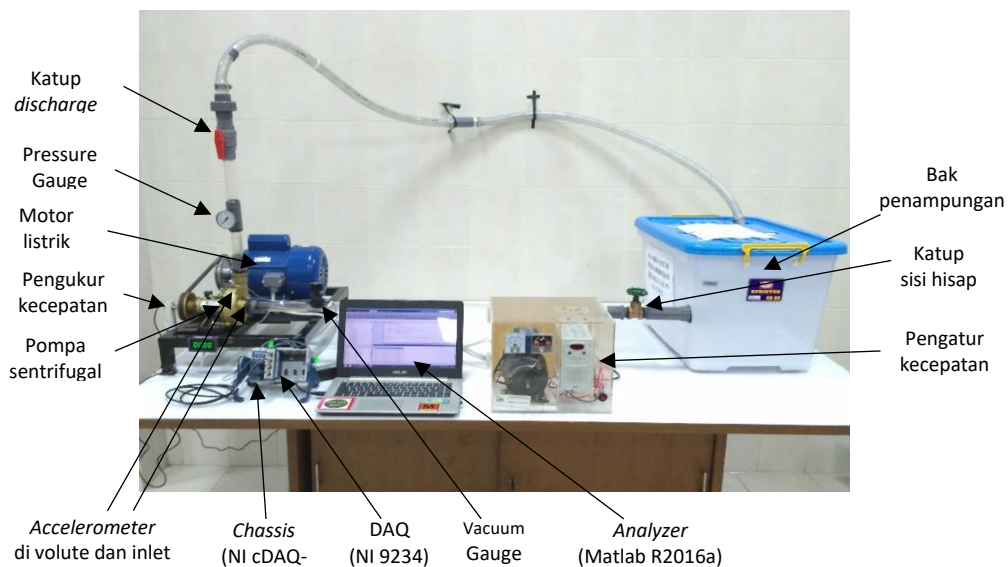
Parameter lainnya yang sering digunakan dalam analisis statistik salah satunya adalah *kurtosis* K , yang mana juga merupakan parameter dimensi yang dirumuskan dengan persamaan 6.

$$k = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^4}{(\sigma^2)^2} - 3 \dots\dots\dots (6)$$

Kurtosis menyerupai *variance* yang mana nilai yang didapat merupakan pangkat empat dari *variance* dari pada pangkat dua pada *variance* sehingga akan membuat semua nilai menjadi positif. Dibandingkan dengan *variance* nilai *kurtosis* menekankan nilai besar dan menekan nilai kecil pada sinyal x .

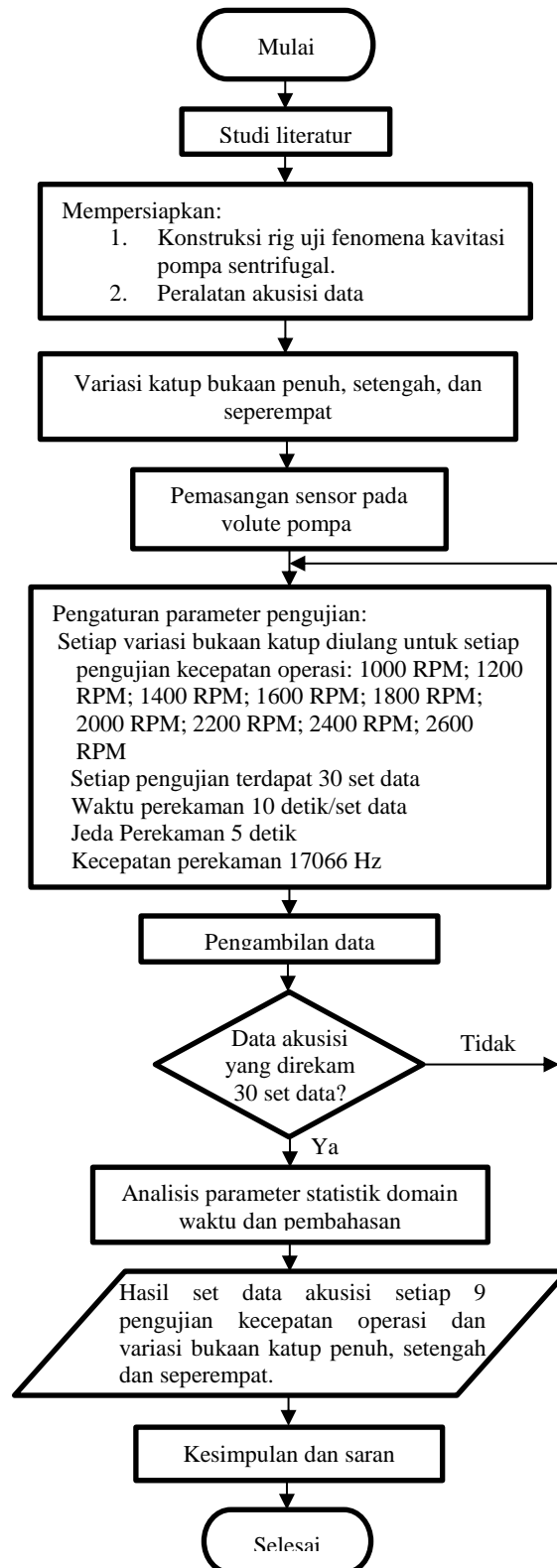
METODOLOGI PENELITIAN

Sinyal getaran diambil dari alat simulator uji kavitasi seperti dapat dilihat pada Gambar 1. Simulator uji terdiri dari sebuah pompa sentrifugal dengan daya 1 HP yang dihubungkan dengan sebuah motor listrik satu fasa menggunakan transmisi sabuk-puley, dengan perbandingan puley input/output sebesar 5:3. Kecepatan motor listrik diatur oleh sebuah pengatur kecepatan (inverter) 3 fasa 1 HP. Sirkulasi fluida terjadi melewati selang fleksibel yang menghubungkan sisi tekan (discharge) dan sisi hisap (suction) pompa. Sebuah bak penampungan diletakkan diantara sisi hisap dan tekan pompa yang berguna untuk menjaga sisi hisap mendapatkan suplai fluida yang cukup selama pompa beroperasi. Sepasang katup dan pengukur tekanan masing-masing dipasang di sisi hisap dan tekan.



GAMBAR 1. Simulator Uji

Gambar 2 merupakan alur atau langkah yang dilakukan dalam penelitian ini. Hasil dari penelitian ditutup dengan kesimpulan dan saran.



GAMBAR 2. Diagram alir penelitian

Pengukuran getaran dilakukan dengan mengatur daya keluaran pada inverter. Agar memvariasikan kecepatan operasi dengan mengatur daya keluaran pada inverter. Agar kavitasi pada alat simulasi lebih terkontrol

maka besar bukaan katup pada sisi *discharge* pompa divariasikan dengan besar bukaan penuh, setengah bukaan penuh, dan seperempat bukaan penuh. Hasil perekaman sinyal getaran terdiri dari sekurang-kurangnya 30 set data untuk setiap n , dimana $n = 1 - 9$ yang menunjukkan variasi kecepatan ke- n , seperti diilustrasikan pada Gambar 3.

Adapun Gambar 4. merupakan skematik rangkaian simulator uji yang menunjukkan lokasi pemasangan *accelerometer* dan system akuisisi data yang digunakan dalam merekam sinyal getaran pompa sentrifugal. Rekaman data yang didapat dari setiap akuisisi data akan diolah dan diproses menggunakan Matlab.

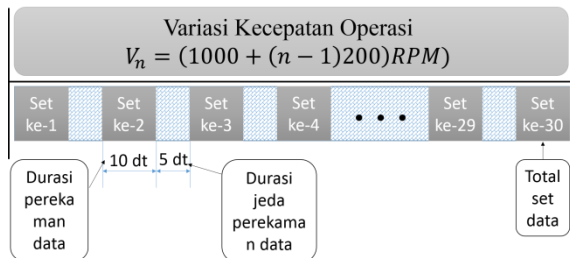
Sistem akuisisi data diatur pada *sampling rate* sebesar 17066 Hz dan lama perekaman tiap set data adalah 10 detik dengan jeda antar perekaman adalah 5 detik. Sistem akuisisi data terhubung ke sebuah komputer melalui *software* NI MAX yang telah terintegrasi pada Matlab sehingga pengaturan parameter akuisisi data dapat dilakukan dengan mudah.

Pengolahan data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan menggunakan

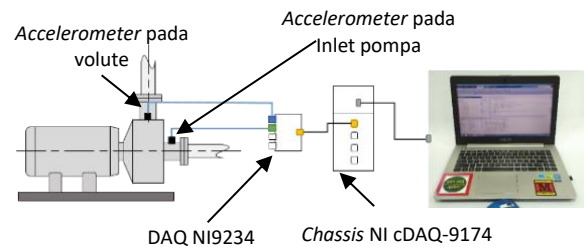
analisis parameter statistik domain waktu, diantaranya *Peak Value*, *Root Mean Square (RMS)*, *Standard Deviation*, *Crest Factor*, *variance*, *kurtosis*, dan *Probability Density Function (PDF)*. Sinyal getaran yang telah disimpan pada komputer diekstrak parameter statistiknya menggunakan program MATLAB versi R2015a. Tabel 1. merupakan perintah MATLAB yang digunakan untuk parameter statistic yang disebutkan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagnosis kavitasi dengan menggunakan domain waktu merupakan salah satu metode dimana sinyal getaran berupa deret waktu (*time series*) di-plot berdasarkan besarnya amplitudo sinyal pada sumbu y terhadap banyaknya jumlah sampel atau panjangnya waktu pengambilan data pada sumbu x . Gambar 5, 6 dan 7 merupakan plot domain waktu dari sinyal getaran pada kecepatan operasi 1000-2600 RPM dengan variasi bukaan katup penuh, setengah dan seperempat yang dihasilkan oleh pompa sentrifugal.



GAMBAR 3. Skematik pengambilan data



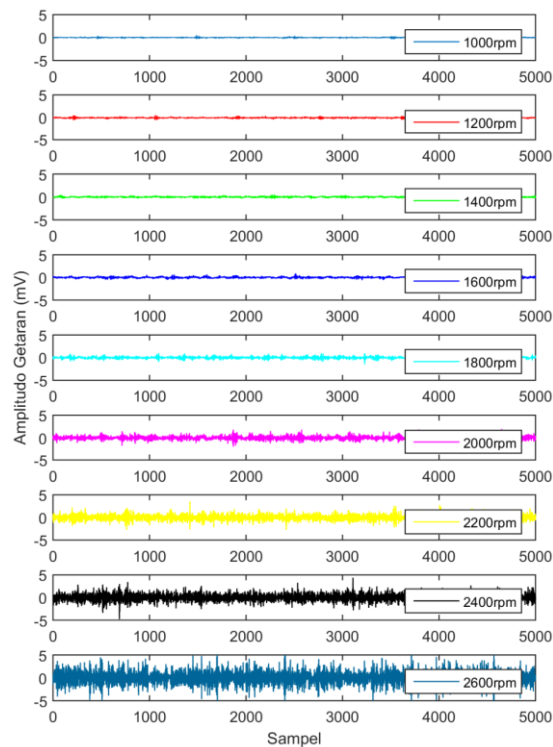
GAMBAR 4. Skematik sistem akuisisi data

TABEL1. Parameter statistik dan perintah MATLAB

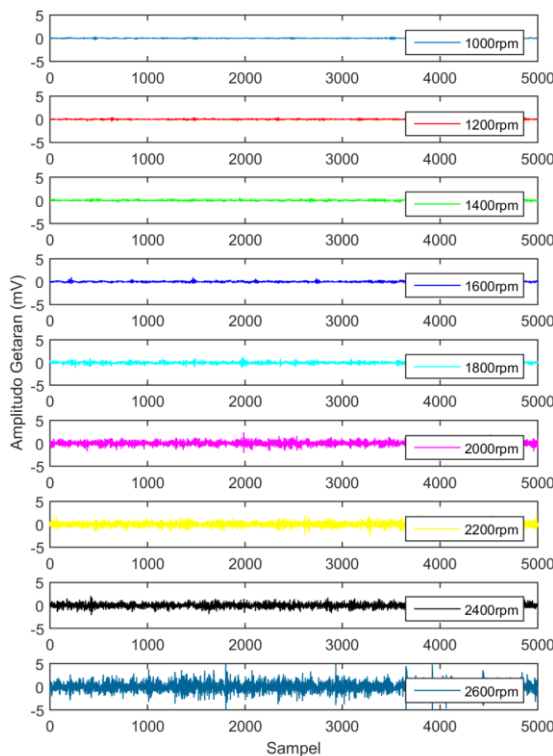
Parameter	Perintah MATLAB	Rumus
PDF	Pdf	Persmn. 1
Peak Value	(max(abs(x))- (min(abs(x)/2	Persmn. 2
SD	Std	Persmn. 3
Variance	Var	Persmn. 4
RMS	Rms	Persmn. 5
Crest Factor	peak2rms	Persmn. 6
Kurtosis	kurtosis	Persmn. 7

Dari variasi bukaan katup yang dilakukan, sinyal getaran dalam domain waktu tidak dapat menunjukkan dengan jelas awal mula terjadinya

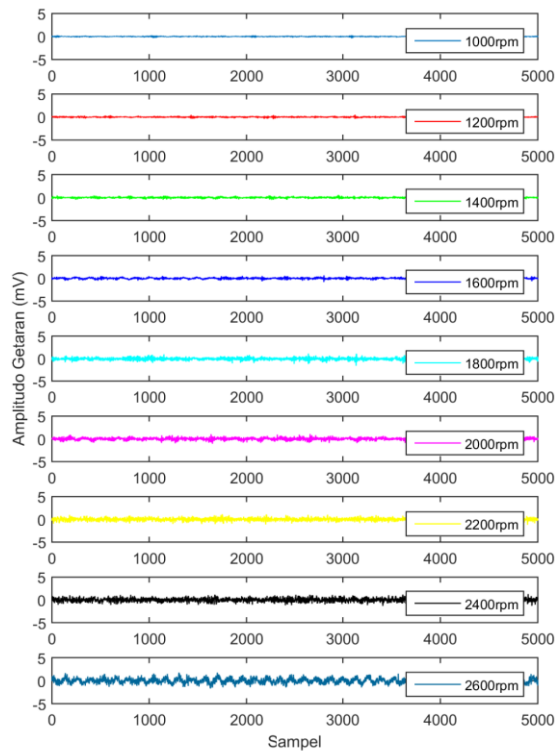
kavitasi. Oleh karena itu diperlukan metode yang lebih tepat dalam menjelaskan perubahan yang ditunjukkan pada domain waktu.



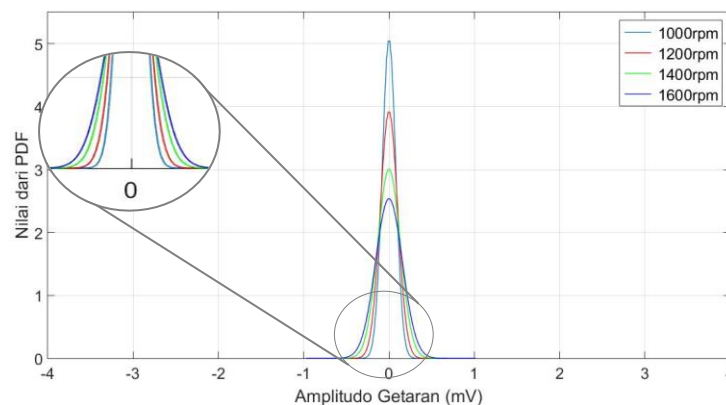
GAMBAR 5. Sinyal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan penuh



GAMBAR 6. Sinyal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan setengah



GAMBAR 7. Sinyal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan seperempat



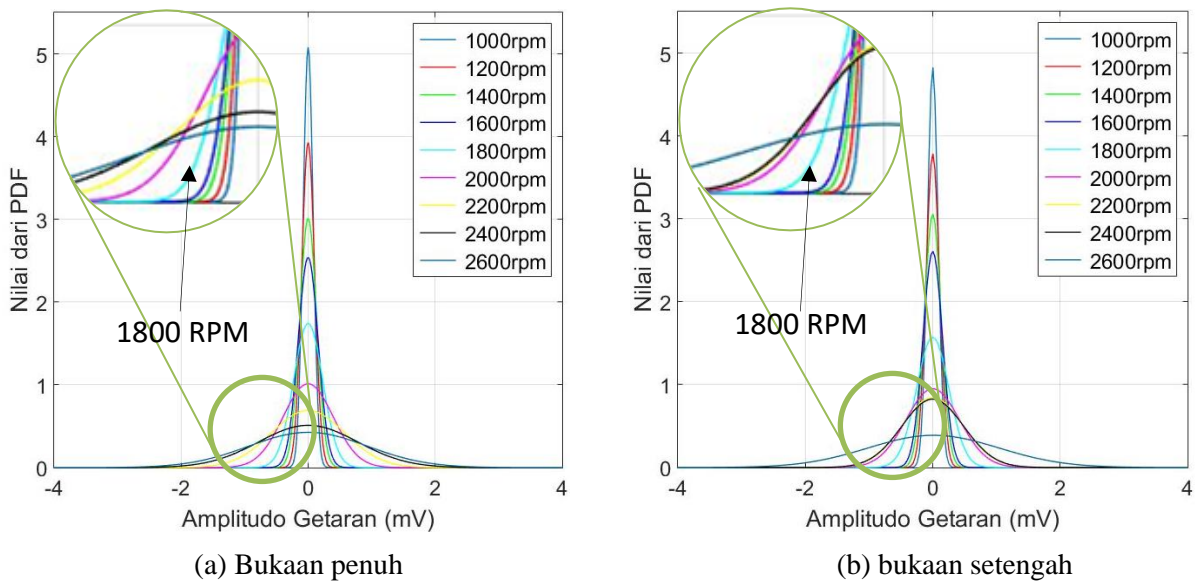
GAMBAR 8. Kepadatan probabilitas getaran dari domain waktu pada katup bukaan penuh kecepatan 1000-1600 RPM

Probability Density Function

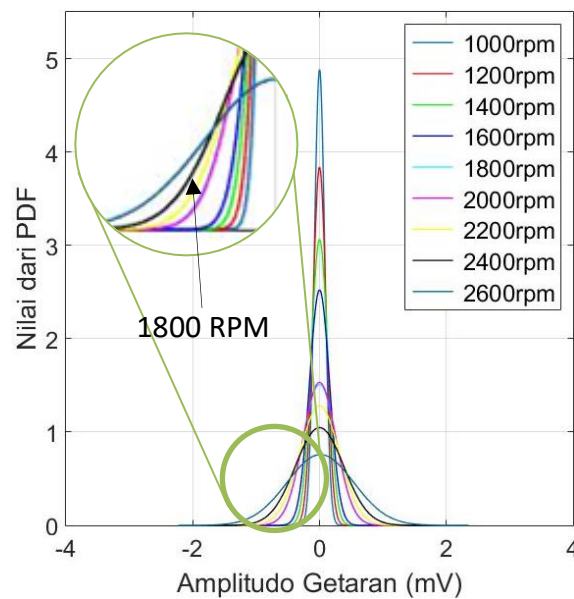
Gambar 8 menunjukkan bahwa PDF yang dihasilkan oleh sinyal getaran pada kecepatan 1000-1600 RPM memiliki laju perkembangan amplitudo dengan selisih yang tidak jauh berbeda antara satu dengan lainnya. Diagnosis dari tidak jauh berbedanya nilai laju perubahan ini mengindikasikan bahwa pompa masih tidak terpengaruh oleh komplikasi hidrolika fluida. Setiap distribusi pada tiap kecepatan mengalami kenaikan amplitudo yang hampir sama besar untuk rentang dari nilai PDF dibawah satu.

Sehingga dapat dikatakan pompa masih beroperasi dalam keadaan normal.

Gambar 9 (a) merupakan plot nilai PDF dari setiap pengujian pada kecepatan 1000-2600 RPM untuk katup bukaan penuh. Terlihat bahwa pada kecepatan 1800 RPM, PDF memiliki peningkatan laju perkembangan dengan selisih yang cukup signifikan dibanding PDF pada kecepatan dibawahnya. Sehingga pada kecepatan 1600-1800 RPM ini menunjukkan bahwa pompa telah mengalami pengaruh hidrolika fluida yaitu mulai terjadinya fenomena kavitasi.



GAMBAR 9. Histogram PDF



GAMBAR 10. Histogram PDF variasi katup bukaan penuh

Hal yang sama terjadi pada variasi katup bukaan setengah dan seperempat seperti pada Gambar 9 (b) dan Gambar 10. Oleh karenanya diagnosis yang dihasilkan menyerupai pada variasi bukaan katup penuh.

Samanya diagnosis yang dihasilkan Gambar 9 (a), (b) dan Gambar 10 pada tiga variasi bukaan katup khususnya pada kecepatan 1000-1600 RPM, semakin menguatkan indikasi bahwa pada kecepatan tersebut pompa benar bekerja dalam kondisi normal.

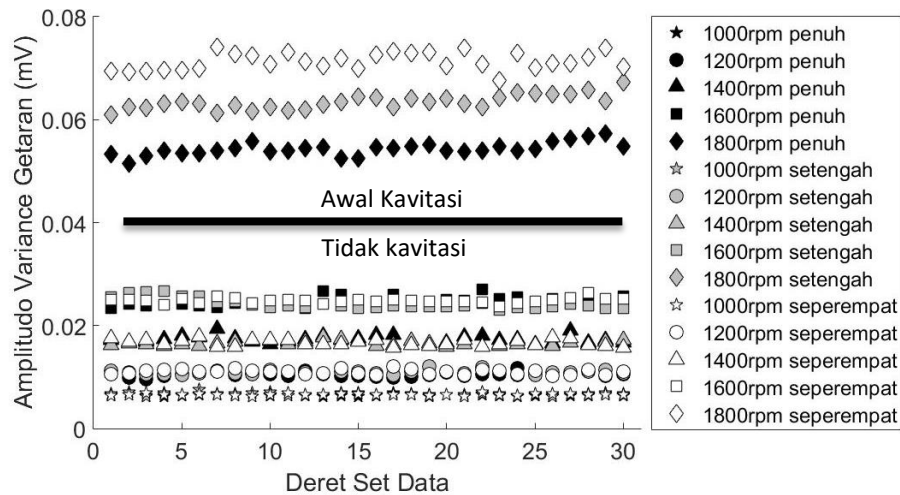
Dari ketiga histogram untuk tiga bukaan katup terlihat bahwa distribusi yang didapat dari kecepatan operasi setelah 1600 RPM mengalami distribusi dengan rentang yang lebih besar terhadap nilai PDF dan penurunan puncak mengindikasikan bahwa amplitudo getaran telah berkembang sehingga intensitas amplitudo rendah mengecil. Nilai PDF untuk kecepatan operasi diatas 1600 RPM menunjukkan bahwa kinerja pompa telah terpengaruh oleh gejala hidrolika yang dalam hal ini merupakan awal fenomena kavitasi.

Variance

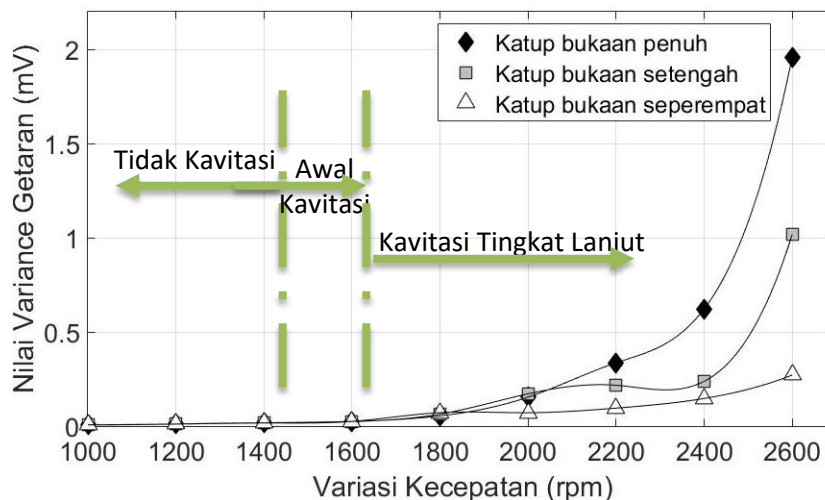
Variance merupakan parameter yang digunakan untuk melihat seberapa besar keberagaman suatu kelompok data. Gambar 11 merupakan distribusi nilai variance yang didapat dari 30 set data sinyal getaran. Terlihat bahwa pada kecepatan 1000-1600 RPM memiliki keberagaman yang hampir sama tinggi untuk setiap pengujian kecepatan dan variasi bukaan katupnya. Seperti halnya pada analisis nilai PDF, pada variance dari kecepatan 1000-1600 RPM juga memiliki laju kenaikan nilai dengan selisih yang tidak jauh berbeda.

Standar Deviasi

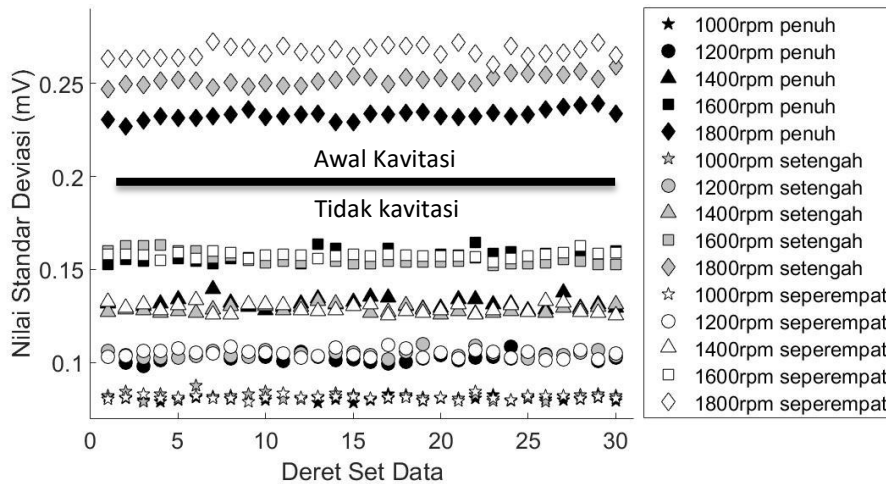
Gambar 13 merupakan distribusi nilai standar deviasi dari 30 set data sinyal getaran pada ketiga bukaan katup. Seperti halnya nilai varians pada gambar 11, distribusi amplitudo yang dihasilkan pada kecepatan 1000 RPM memiliki distribusi nilai standar deviasi berkisar 0.08 mV pada ketiga bukaan katup. Begitu juga yang terjadi pada kecepatan operasi 1200 RPM, 1400 RPM, 1600 RPM yang memiliki selisih distribusi yang hampir sama besar. Jika dibandingkan dengan ke-4 kecepatan tersebut, pada kecepatan operasi 1800 RPM telah mengalami kenaikan yang signifikan dimulai dari kecepatan 1600 RPM



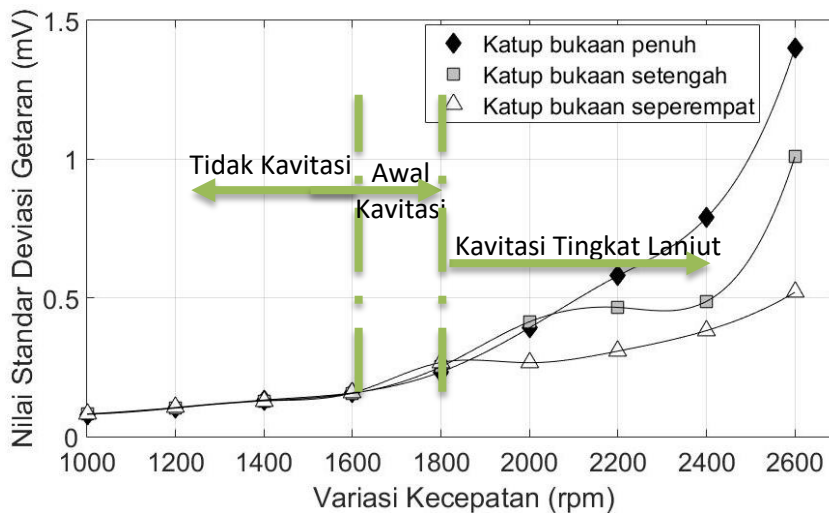
GAMBAR 11. Distribusi nilai variance getaran pada set data



GAMBAR 12. Grafik hubungan nilai variance dengan variasi kecepatan



GAMBAR 13. Distribusi nilai standar deviasi getaran terhadap set data



GAMBAR 14. Grafik hubungan nilai standar deviasi terhadap fungsi kecepatan

Dalam kondisi ini maka operasi pompa pada kecepatan 1000-1600 RPM masih dalam keadaan normal dan selisih kenaikan nilai standar deviasi hanya terpengaruhi oleh pertambahan kecepatan operasi pompa dan kecepatan antara 1600-1800 RPM dapat ditetapkan sebagai daerah awal terjadinya kavitasi. Pada Gambar 14. menggambarkan nilai standar deviasi secara keseluruhan dari kenaikan yang terjadi pada operasi pompa. Terlihat bahwa pada variasi katup bukaan seperempat antara kecepatan 1800 RPM dan 2000 RPM mempunyai nilai yang hampir sama, indikasi dari hal tersebut adalah peningkatan kecepatan tidak terlalu berpengaruh pada getaran yang dihasilkan oleh pompa. Begitu pula yang terjadi pada variasi katup bukaan setengah dimana kecepatan antara 2000 RPM

sampai dengan 2400 RPM memiliki kenaikan nilai standar deviasi yang hampir sama.

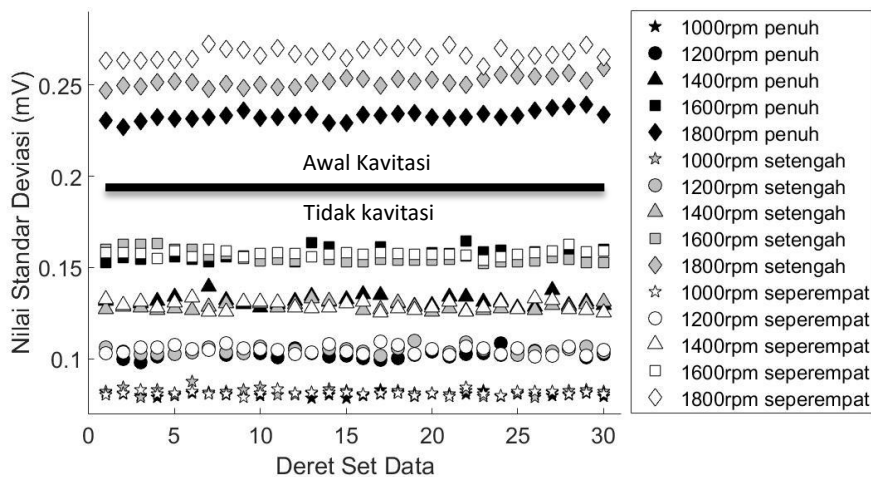
Dari peninjauan yang dilakukan terhadap selisih kenaikan yang terjadi maka metode deteksi dini kavitasi menggunakan parameter statistik dapat dilakukan. Hasil yang didapat adalah parameter statistic PDF, variance dan standar deviasi mendeteksi pompa berada pada kondisi normal pada bentang kecepatan antara 1000-1600 RPM, sementara itu pada bentang kecepatan 1600-1800 pompa mengalami kondisi awal kavitasi, sedangkan pada kecepatan di atas 1800 kondisi kavitasi tingkat lanjut telah terjadi.

Root Mean Square (RMS)

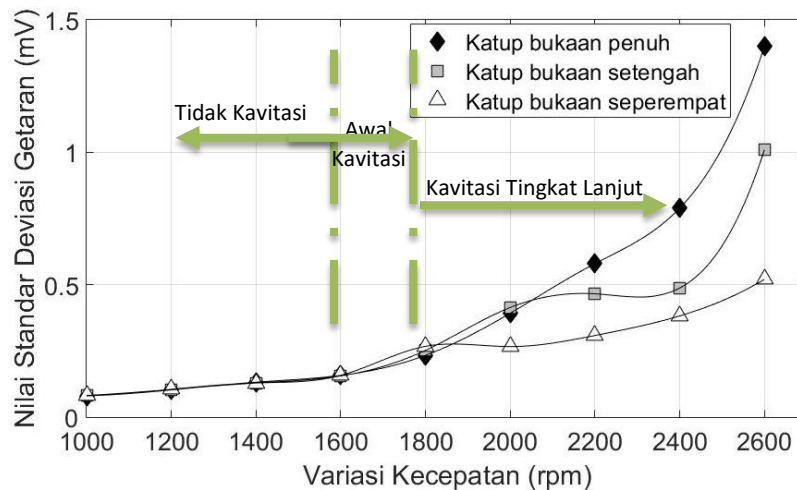
Seperti yang telah disebutkan pada teori, nilai RMS mencerminkan besarnya intensitas energi

pada sinyal getaran. Gambar 15 merupakan distribusi nilai RMS terhadap pengolahan 30 set data pada tiga variasi bukaan katup. Tidak jauh berbeda dari nilai parameter standar deviasi dan varians, dimulai dari kecepatan 1000-1600 RPM nilai RMS mengalami distribusi yang tidak jauh berbeda antara ketiga variasi bukaan katup. Serta selisih laju perkembangan level getaran juga mempunyai rentang yang tidak jauh berbeda. Oleh karena itu, pada parameter ini dalam kecepatan 1000-1600 RPM tersebut menunjukkan bahwa pompa masih bekerja dalam kondisi normal. Pada kecepatan operasi 1800 RPM terlihat bahwa laju perkembangan level getaran semakin meningkat dibandingkan pada kecepatan sebelumnya. Besarnya laju perkembangan level getaran pada rentang kecepatan 1600–1800 RPM tersebut, menunjukkan bahwa pompa mulai mengalami pengaruh hidrolika dimana juga

mengindikasikan fenomena kavitasi mulai terjadi pada rentang kecepatan tersebut. Secara menyeluruh dari 9 pengujian, nilai RMS ditampilkan pada Gambar 16 dimana nilai RMS didapat dengan merata-rata nilai dari ke-30 set data. Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai yang dihasilkan RMS menyerupai grafik yang dihasilkan pada parameter standar deviasi. Hal ini mengindikasikan bahwa keberagaman level getaran pada tiap sampel mempunyai nilai rata-rata yang sangat rendah hingga tidak begitu mempengaruhi perubahan nilai antara parameter RMS dan standar deviasi. Oleh karenanya, sensitifitas dari kedua parameter tersebut terbilang sama terhadap pengaruh yang didapat dari variasi kecepatan. Sehingga indikasi yang dihasilkan pun saling menyerupai dimana awal kavitasi di indikasikan mulai pada kecepatan lebih besar dari 1600 RPM.



GAMBAR 15. Distribusi nilai puncak terhadap set data

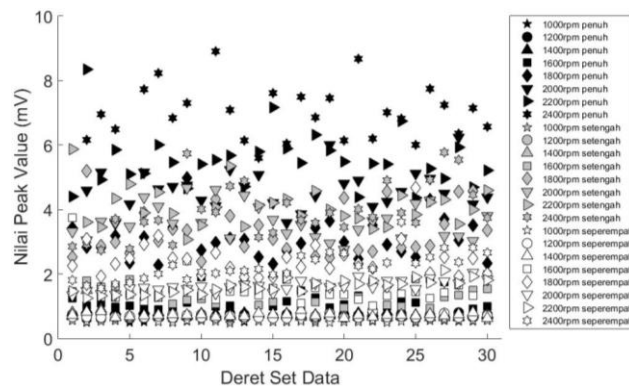


GAMBAR 16. Grafik hubungan nilai puncak terhadap fungsi kecepatan

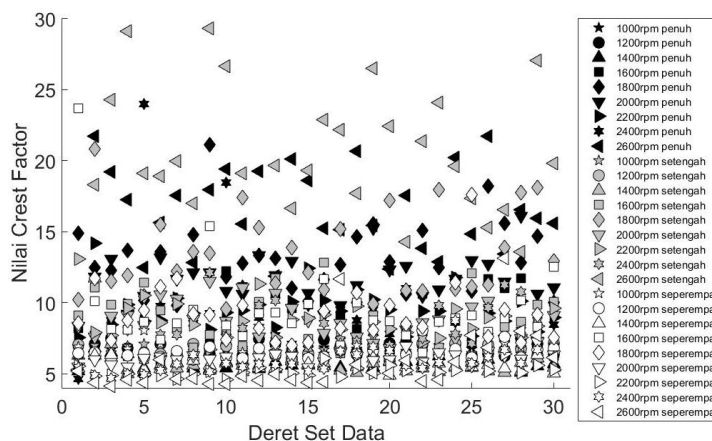
Peak Value, Crest Factor dan Kurtosis

Seperti halnya RMS, *peak value* atau nilai puncak juga mencerminkan intensitas energi dari data sinyal. Pada parameter ini, seperti yang terlihat pada Gambar 17. distribusi yang dihasilkan memiliki nilai dengan keseragaman yang acak atau tidak memiliki batas yang jelas antara kondisi tidak kavitasi dan kavitasi pada

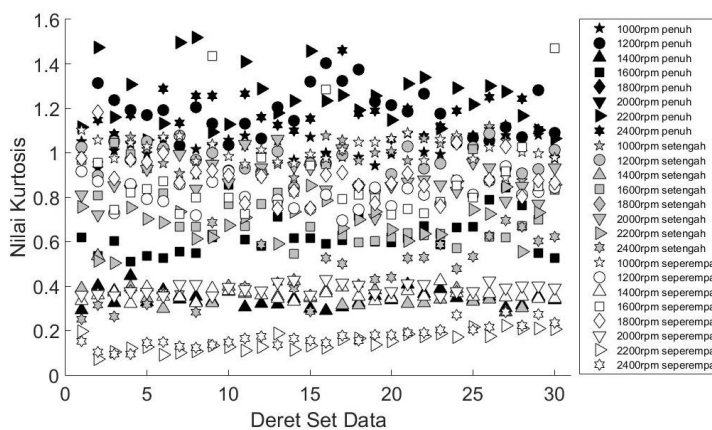
tiap variasi kecepatannya. Tidak seragamnya nilai puncak ini mengindikasikan bahwa amplitudo yang dihasilkan pada domain waktu dari setiap pengujian kecepatan memiliki nilai puncak yang berbeda-beda baik pada amplitudo positif maupun negatif. Sehingga deteksi kavitasi dengan menggunakan metode ini memiliki sensitifitas yang sangat rendah.



GAMBAR 17. Diagram *peak value* penelitian



GAMBAR 18. Distribusi nilai *crest factor* terhadap set data



GAMBAR 19. Grafik hubungan nilai kurtosis terhadap domain waktu

Begitu pula yang terjadi pada analisis parameter *crest factor* dan kurtosis seperti ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 18 dan Gambar 19. dimana distribusi nilai yang dihasilkan juga tidak memiliki batas yang jelas untuk dapat digunakan dalam mengindikasikan batas tidak kavitasi dan kavitasi dari pengaruh yang dihasilkan oleh kecepatan operasi.

Rendahnya sensitifitas yang dihasilkan oleh parameter *peak value*, *crest factor* dan kurtosis membuat diagnosis deteksi kavitasi tidak baik untuk digunakan.

Domain Frekuensi

Pada saat pompa bekerja dalam kondisi kavitasi, pengaruh hidrolika yang dihasilkan akan mempengaruhi perubahan besar kecilnya amplitudo *Blade Pass Frequency* (BPF). Hal ini disebabkan karena kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal seringkali berada pada kisi-kisi *impeller* sehingga mempengaruhi besarnya amplitudo yang dihasilkan (Abdulaziz & Kotb,

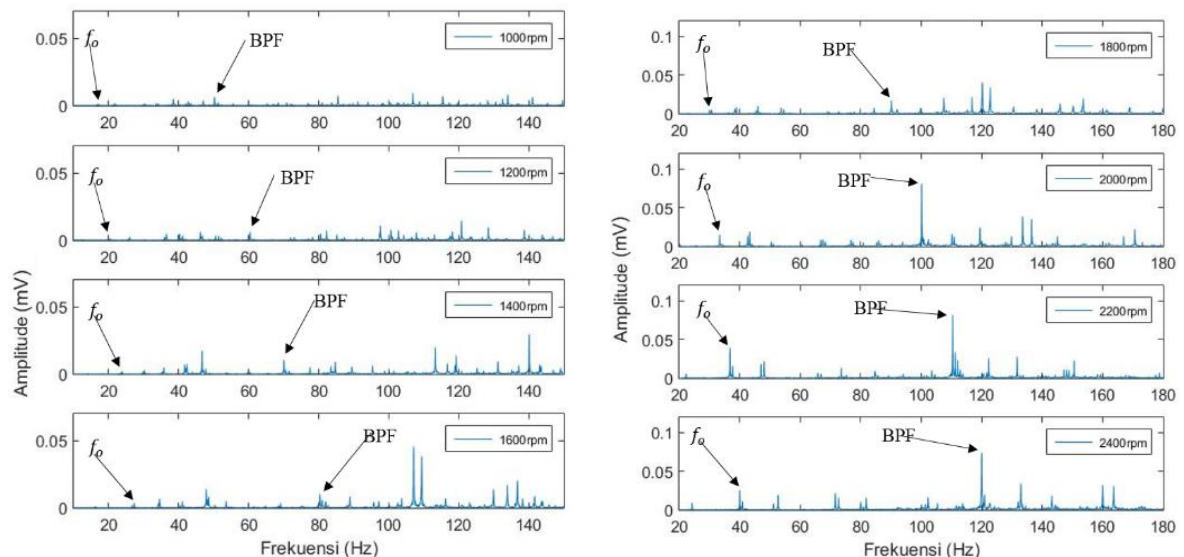
2016). Nilai BPF tersebut didapat dan tergantung pada perubahan kecepatan operasi dan jumlah kisi pada *impeller*, dimana BPF ini sama dengan $f_o \cdot N_{blade}$ dimana f_o merupakan kecepatan rotasional poros pompa dan N_{blade} jumlah dari kisi *impeller*. Tabel 2 merupakan nilai dari tingkat kecepatan dan nilai BPF yang dihasilkan pada tiap pengujian kecepatan.

Gambar 20 (a) dan (b) serta Gambar 21 merupakan spektrum getaran yang dihasilkan dari variasi katup bukaan penuh pengujian kecepatan 1000-2600 RPM. Terlihat bahwa pada Gambar 20 pada kecepatan 1000-1600 RPM memiliki nilai BPF dengan selisih kenaikan yang tidak begitu signifikan dimana pada kecepatan operasi ini dapat dikatakan bahwa operasi pompa masih dalam keadaan normal.

Begitu pula yang terjadi pada kecepatan 1800 RPM dimana amplitudo getaran masih belum mengalami kenaikan yang signifikan. Diagnosis yang didapat dari rentang kecepatan 1000-1800

TABEL 2. Nilai f_R dan BPF pada spektrum analisis 1000-2600 RPM

RPM	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
f_o (Hz)	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	43.33
BPF (Hz)	50	60	70	80	90	100	110	120	130



(a) Variasi kecepatan 1000-1600 RPM

(b) Variasi kecepatan 1800-2400 RPM

GAMBAR 20. *Spectrum* getaran pada variasi katup bukaan penuh

RPM pada spektrum adalah pompa masih berada pada kondisi normal. Jika dibandingkan pada kecepatan 2000 RPM, amplitudo getaran pada BPF telah mengalami kenaikan yang jelas. Sehingga batas (*threshold*) sensitivitas penggunaan dari domain frekuensi dalam mendeteksi kavitasi mulai terlihat pada kecepatan diatas 1800 RPM.

Stabilnya nilai amplitudo pada kecepatan 2000-2400 RPM ini dapat di indikasikan bahwa pompa sentrifugal telah beroperasi dalam kondisi kavitasi begitu pula pada kecepatan 2600 RPM pada Gambar 24 dimana nilai amplitudo mengalami kenaikan yang lebih besar. Sedangkan kenaikan amplitudo pada kecepatan 1800 RPM sampai dengan 2000 RPM mengindikasikan bahwa awal mulai terjadinya kavitasi berada diantara rentang kecepatan tersebut.

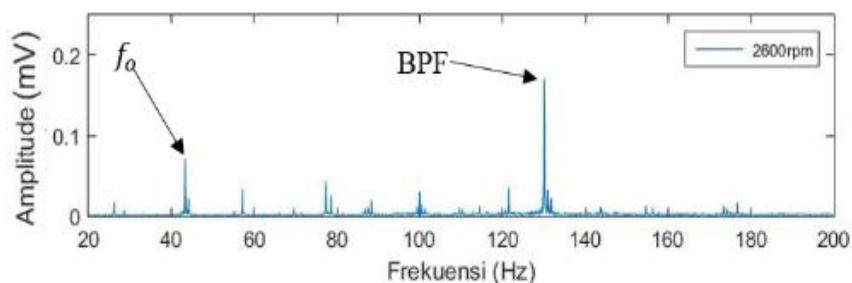
Secara keseluruhan, nilai BPF dari ketiga variasi bukaan katup dapat dilihat dari Gambar 22 yang menunjukkan grafik hubungan nilai amplitudo terhadap nilai BPF.

Pada kecepatan 2200 RPM sampai dengan 2600 RPM, jika dibandingkan pada ketiga bukaan

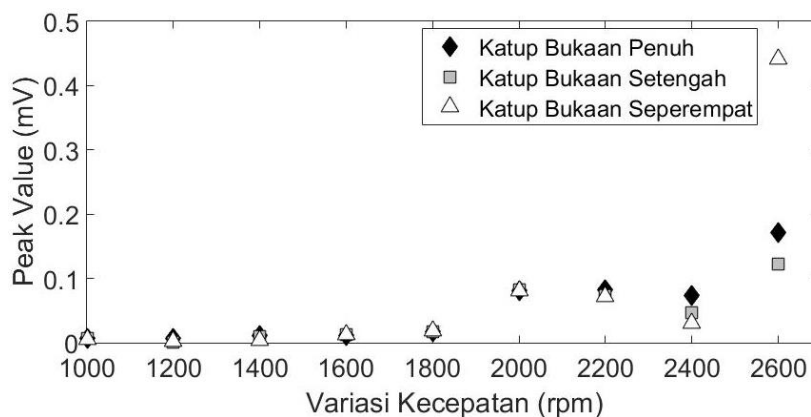
katup terlihat bahwa nilai BPF menurun terhadap masing-masing kecepatan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Abdulaziz dan Kotb (2016), seiring terjadinya perubahan kecepatan aliran dimana dalam penelitian ini dipengaruhi oleh bukaan katup akan mengalami mengalami penurunan nilai BPF yang mana level kavitasi yang dihasilkan lebih besar. Terkecuali pada kecepatan 2600 RPM katup bukaan seperempat terlihat bahwa nilai BPF mengalami nilai yang sangat besar dibandingkan dari kedua bukaan katup.

Performansi Parameter Statistik

Dalam pengujian sensitifitas deteksi kavitasi dengan menggunakan metode statistik domain waktu didapat bahwa dari semua parameter domain waktu menunjukkan gejala awal mula kavitasi terjadi dari kecepatan 1600 RPM. Namun, apabila ditinjau lebih seksama, dari masing-masing parameter mempunyai karakter tersendiri yang mempengaruhi performa sensitifitas dalam mendeteksi kavitasi diantaranya sebagai berikut:



GAMBAR 21. Tipikal *spectrume* getaran pada variasi katup bukaan penuh



GAMBAR 22. Nilai puncak BPF pada domain frekuensi dari tiga bukaan katup 1000-2600 RP

1. Penggunaan analisis parameter statistik PDF mampu dengan jelas menggambarkan laju perubahan dan perkembangan amplitudo getaran terhadap variasi kecepatan. Hal ini berlaku untuk masing-masing variasi bukaan katup. Ketika pompa sedang dalam kondisi kavitasi, karakteristik distribusi amplitudo getaran akan berubah secara drastis jika dibandingkan dengan kondisi pompa tidak mengalami kavitasi. Dimana kondisi pompa tidak dalam kondisi kavitasi menghasilkan perkembangan laju distribusi amplitudo dengan selisih yang hampir sama besar. Oleh karena itu, metode ini cocok digunakan dalam mendeteksi kavitasi, khususnya pada pompa sentrifugal.
2. Parameter seperti RMS dan Standar Deviasi memiliki sensitivitas yang hampir sama besar. Hal ini dikarenakan nilai rata-rata getaran yang dihasilkan oleh sinyal sangat kecil dan tidak begitu berpengaruh pada parameter. Sedangkan pada parameter *variance* memiliki sensitifitas yang lebih rendah dibandingkan RMS dan Standar Deviasi namun tetap memberikan batas yang jelas antara kondisi normal dan kondisi kavitasi.
3. Pada penggunaan parameter statistik lainnya seperti *Peak Value*, *Cresct Factor*, dan Kurtosis didapat bahwa sensitifitas deteksi masih rendah. Hal ini ditunjukkan dengan tidak terdapat batas yang jelas antara kondisi tidak kavitasi dan kavitasi. Oleh karena itu, parameter ini tidak sesuai digunakan dalam mendeteksi fenomena kavitasi. Khususnya pada pompa sentrifugal.
4. Pada penggunaan parameter *crest factor*, didapat bahwa nilai distribusi yang dihasilkan mengalami kenaikan dan penurunan. Hal ini disebabkan oleh nilai puncak pada fungsi *variance* juga memiliki nilai yang tidak seragam. Oleh sebab itu, penggunaan parameter ini memiliki sensitifitas yang sangat rendah dan tidak baik dalam mendeteksi kavitasi. Sedangkan pada kurtosis, kenaikan nilai yang kecil begitu berpengaruh pada hasil yang didapat. Sehingga apabila pada data statistik memiliki nilai *variance* sedikit berbeda

antara setiap set data akan mengurangi sensitifitas parameter ini. Oleh karenanya, metode ini tidak sensitif dalam mendeteksi kavitasi.

Empat parameter statistic seperti PDF, varians, standar deviasi dan RMS yang dalam penelitian ini berhasil digunakan dalam mendeteksi kavitasi juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Luo *et al.*, (2015) dan Al-Hashmi, (2009) dimana disebutkan bahwa karakteristik dari metode yang digunakan dapat digunakan dalam mendeteksi kavitasi pada pompa sentrifugal.

Apabila dipertimbangkan dari efektifitas metode yang digunakan berdasarkan penelitian terdahulu (Al-Hashmi, 2009; Luo *et al.*, 2015), dimana dinyatakan metode statistik lebih mumpuni maka hal dalam penelitian ini juga menunjukkan hal yang sama dimana pada analisis parameter statistik menunjukkan bahwa kavitasi mulai terdeteksi pada kecepatan 1600 RPM sedangkan pada domain frekuensi mulai terdeteksi pada kecepatan 1800 RPM.

KESIMPULAN

Penelitian deteksi fenomena kavitasi dengan menggunakan parameter statistik domain waktu pada pompa sentrifugal ini, didapat beberapa kesimpulan yaitu:

1. Hasil dari parameter statistik dalam mendeteksi fenomena kavitasi terhadap pengaruh kecepatan operasi menunjukkan bahwa, pompa sentrifugal mulai mengalami kavitasi pada kecepatan diatas 1600 RPM. Hal ini ditandai dengan meningkatnya level getaran yang tercerminkan pada nilai parameter statistik domain waktu.
2. Parameter statistik domain waktu seperti *Probability Density Function* (PDF), Varians, Standar Deviasi dan *Root Mean Square* (RMS) terbukti mampu mendeteksi kavitasi terhadap perubahan variasi kecepatan operasi kerja pompa. sedangkan untuk parameter *peak value*, *crest factor*, dan kurtosis tidak terbukti mampu dalam mendeteksi kavitasi khususnya pada pengaruh variasi kecepatan operasi kerja.

3. Bertambahnya kecepatan operasi pada pompa sentrifugal akan meningkatkan level getaran yang dihasilkan. Pada kondisi normal, level getaran pompa akan sebanding dengan bertambahnya selisih kecepatan operasi. Sedangkan pada kondisi kavitasi, level getaran akan meningkat secara signifikan jika dibandingkan dengan laju perubahan level getaran pada kondisi normal.
4. Untuk nilai PDF, kavitasi dapat dilihat dari besarnya laju perkembangan amplitudo dimana terdapat perkembangan yang lebih besar dibanding kondisi sebelumnya. Sedangkan pada parameter variance, standar deviasi maupun RMS awal mula kavitasi dapat dilihat dari besarnya laju perubahan getaran terhadap kondisi normal seperti yang disebutkan poin ke-3.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulaziz, A. M., & Kotb, A. (2016). Detection of pump cavitation by vibration signature, *4846*(October).
<https://doi.org/10.1080/14484846.2015.1093261>
- Al-Hashmi, S. A. (2009). Statistical analysis of vibration signals for cavitation detection ISIEA 2009. *2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA 2009 - Proceedings, 1*(Isiea), 78–82.
<https://doi.org/10.1109/ISIEA.2009.5356506>
- Al-Tobi, M. A. S., & Al-Sabari, M. H. J. (2016). Cavitation detection of centrifugal pump using Time – Domain method, *4*(5), 161–167.
- Birajdar, R., Patil, R., & Khanzode, K. (2009). Vibration and noise in centrifugal pumps - Sources and diagnosis methods. *3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure*, (May 2016), 20–24.
- Brandt, A. (2010). *NOISE AND VIBRATION ANALYSIS SIGNAL ANALYSIS AND*.
- Brennen, E. C. (1977). *Cavitation and bubble dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics*(Vol.9).<https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
- Cunha, I. Da, Strack, T., & Stricker, S. (2008). *PUMP SYSTEMS: Energy Efficiencyreference Guide*. CEATI International.
- Gulich, J. F. (2013). *Centrifugal Pumps*. Springer.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Karassik, I. J., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). *PUMP HANDBOOK*.
- Luo, Y., Sun, H., Yuan, S., & Yuan, J. (2015). Research on Statistical Characteristics of Vibration in Centrifugal Pump, *38*, 49–61.
- McKee, K. K., Forbes, G. L., Mazhar, I., Entwistle, R., Hodkiewicz, M., & Howard, I. (2015). A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. *Expert Systems with Applications*, *42*(1), 67–78.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.07.029>
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*.
[https://doi.org/10.1016/0301-679X\(78\)90097-X](https://doi.org/10.1016/0301-679X(78)90097-X)

PENULIS:

Berli P Kamiel

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

Email: berlikamiel@umy.ac.id

Ray S. Ramadhan

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