

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Spesifikasi Data

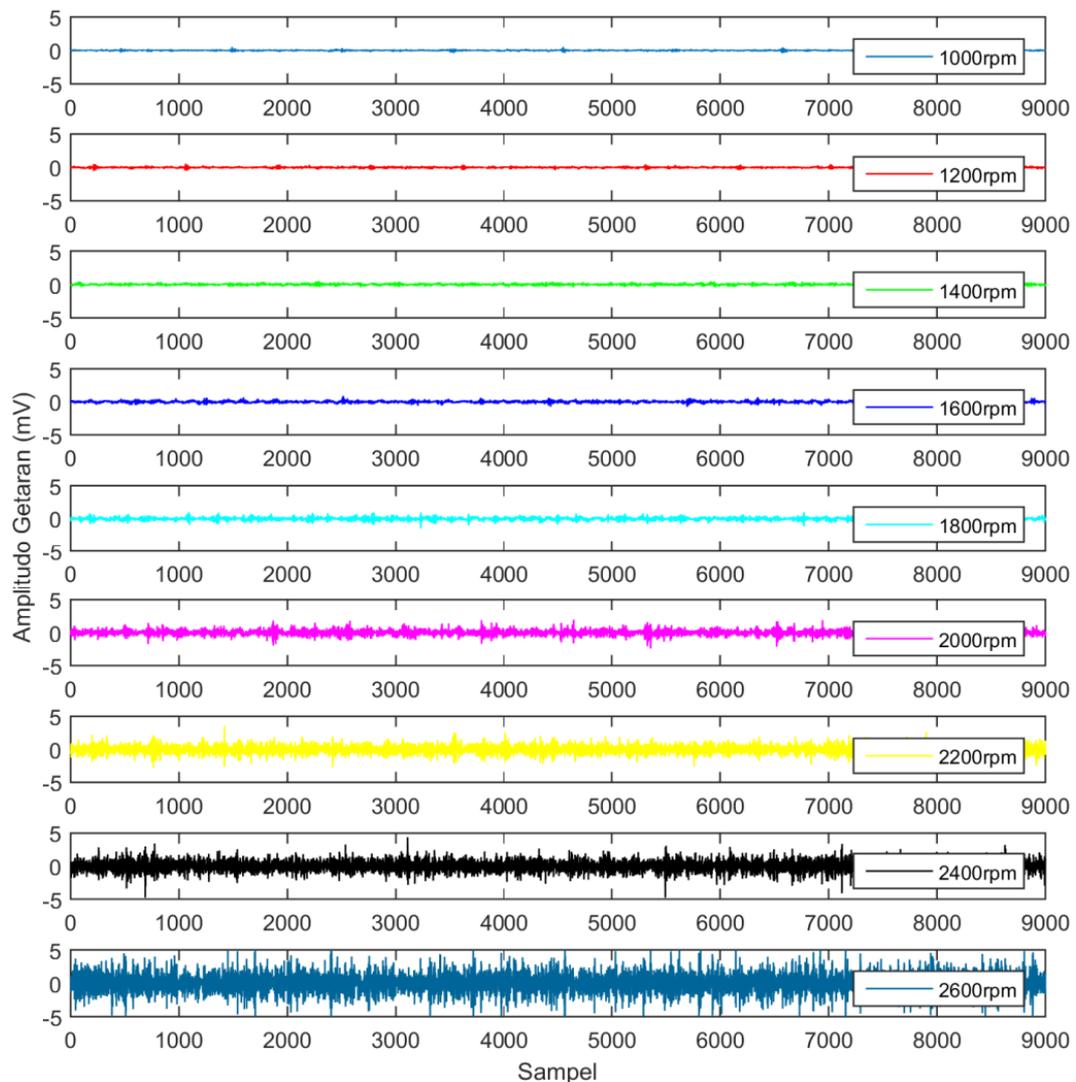
Pengambilan data dilakukan dengan spesifikasi yang telah ditentukan sebagai berikut:

Pengujian	: Sembilan kecepatan motor (1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM, 1600 RPM, 1800 RPM, 2000 RPM, 2200 RPM, 2400 RPM, 2600 RPM).
Variasi/pengujian	: 3 bukaan katup (bukaan penuh, bukaan setengah, bukaan seperempat per luas penampang katup)
Set data/pengujian	: 30 set
Durasi pengambilan	: 10 detik/set
Jeda Pengambilan	: 5 detik
<i>Sampling rate</i>	: 17066 Hz
Error data	: 1 set data pertama
<i>Blade impeller</i>	: 3 bilah
Blade motor listrik	: 7 bilah

4.2 Analisis Domain Waktu

Diagnosis kavitasi dengan menggunakan analisis domain waktu merupakan salah satu metode dimana data getaran berupa deret waktu (*time series*) di *plotting* berdasarkan besarnya perubahan amplitudo gelombang pada sumbu *y* terhadap banyaknya jumlah sampel atau panjangnya waktu pengambilan data pada sumbu *x*. Gambar 4.1 merupakan tipikal domain waktu dari *plotting* data getaran pada kecepatan operasi 1000-2600 RPM dengan variasi bukaan katup penuh yang dihasilkan oleh pompa sentrifugal. Dapat dilihat pada kecepatan operasi 1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM dan 1600 RPM secara visual rentang amplitudo terlihat tidak

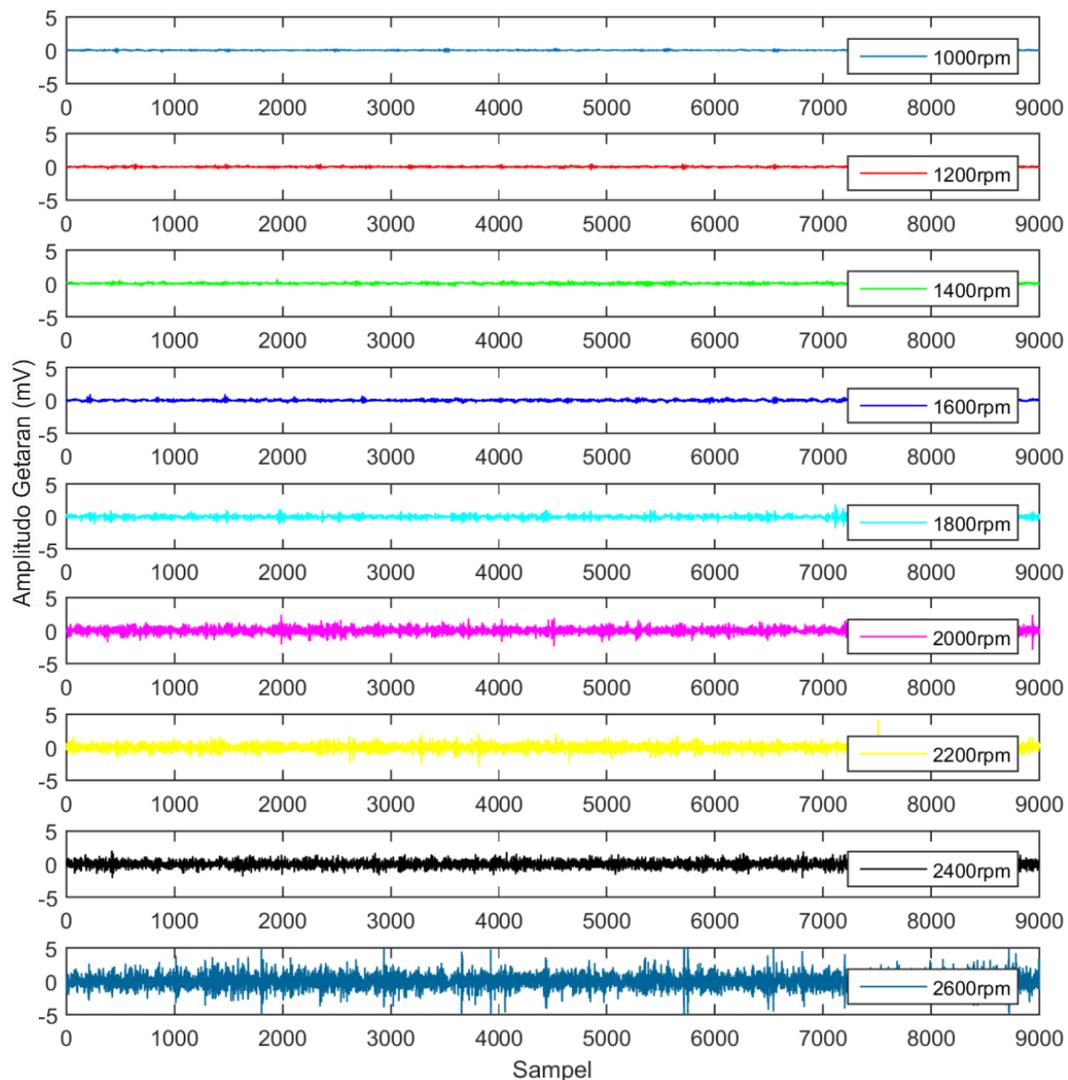
jauh berbeda yang mengindikasikan bahwa getaran yang dihasilkan oleh operasi pompa sentrifugal tersebut tidak begitu terpengaruh oleh adanya perubahan kecepatan operasi.



Gambar 4. 1 Tipikal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan penuh

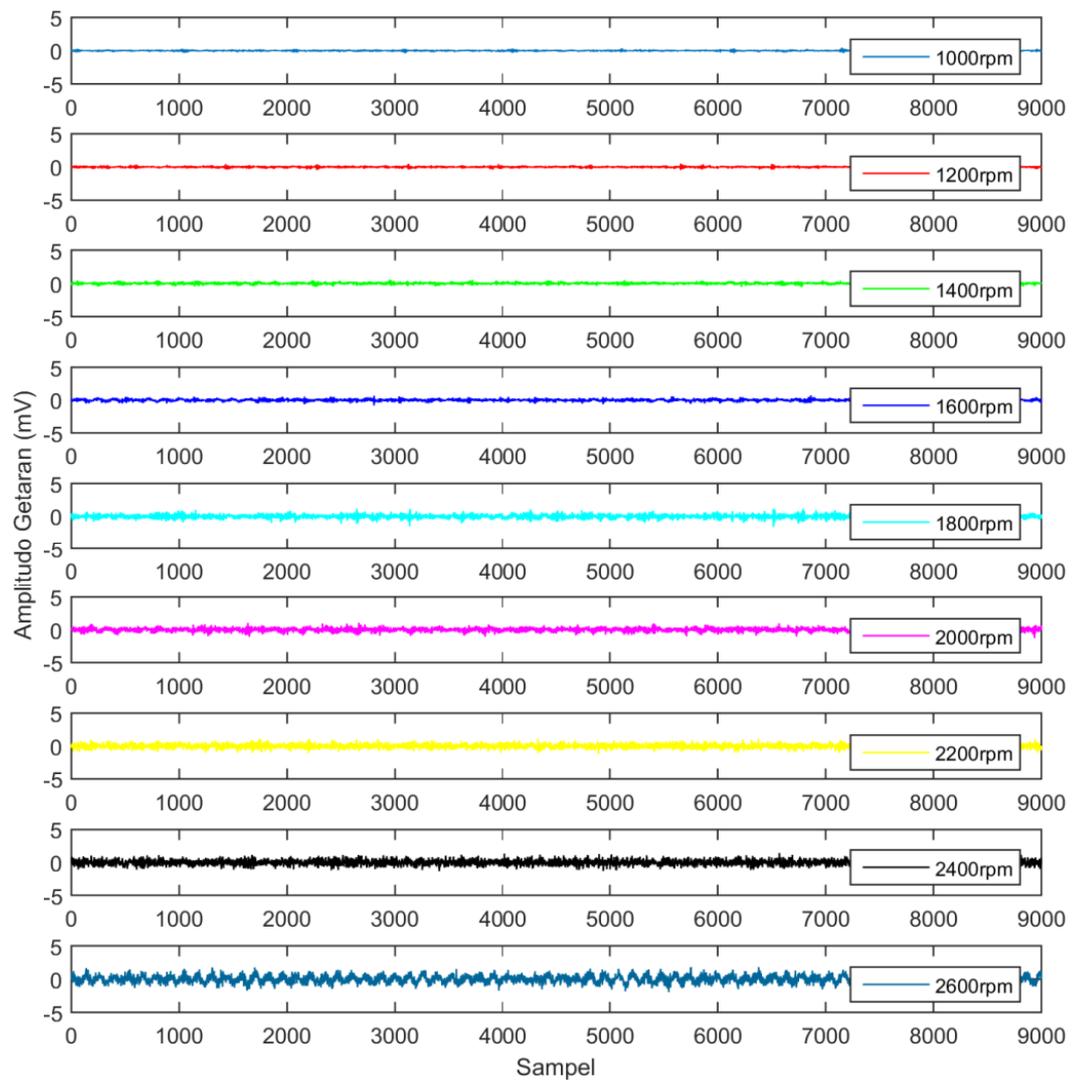
Pada kecepatan operasi sebesar 1800 RPM mulai terlihat amplitudo mengalami perubahan dibandingkan kecepatan operasi dibawahnya. Hal ini mengindikasikan bahwa *impeller* pada kecepatan tersebut telah mengalami fluktuasi getaran yang dihasilkan oleh adanya komplikasi hidrolis saat mengangkat cairan. Tidak jauh berbeda dengan variasi katup bukaan penuh, pada Gambar 4.2 merupakan variasi katup bukaan setengah dimana besarnya perubahan tipikal

domain waktu hampir menyerupai tipikal yang dihasilkan oleh variasi katup bukaan penuh.



Gambar 4. 2 Tipikal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan setengah

Berbeda dengan dua variasi bukaan katup sebelumnya, pada Gambar 4.3 rentang amplitudo yang dihasilkan lebih kecil pada variasi katup bukaan seperempat. Dari variasi bukaan katup yang dilakukan, data mentah dari domain waktu masih belum bisa menjelaskan secara lebih jelas tentang awal mula terjadinya kavitasi. Oleh karena itu diperlukan metode yang lebih tepat dalam menjelaskan perubahan yang ditunjukkan pada domain waktu.



Gambar 4. 3 Tipikal getaran pada domain waktu 1000-2600 RPM katup bukaan seperempat

Dalam mendukung analisis yang dilakukan pada domain waktu, parameter statistik sering kali digunakan untuk memperjelas perubahan yang terjadi akibat gejala kavitasi seperti PDF, *variance*, standar deviasi, RMS, kurtosis dan *crest factor*. Penggunaan parameter analisis tersebut didapat dari rujukan penelitian yang telah ada dalam meneliti kavitasi dalam sistem perpompaan.

4.3 Analisis Parameter Statistik Domain Waktu

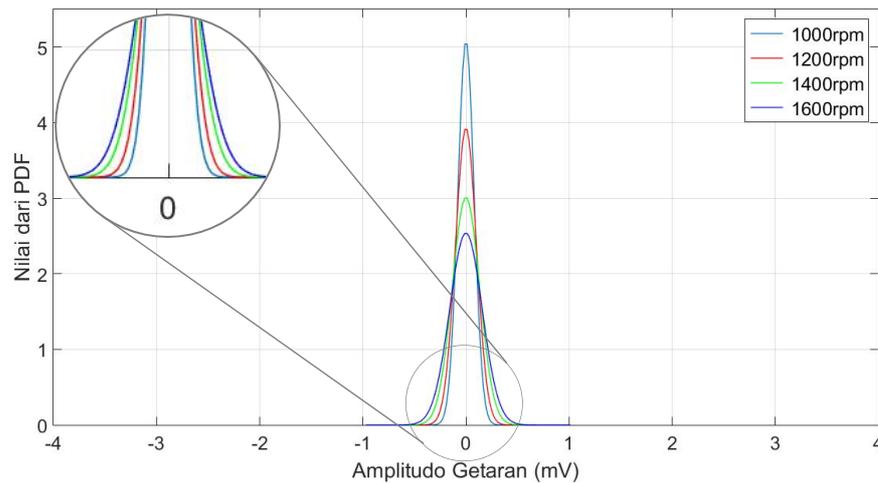
Dalam memahami naiknya level getaran yang dipengaruhi oleh variasi kecepatan dan bukaan katup secara lebih mendalam maka digunakan parameter statistik pada sub-sub bab berikut. Diketahui bahwa variasi kecepatan v merupakan $v_n = (1000 + (n - 1)200)RPM$ dimana n merupakan pengujian dari 1 sampai 9 kecepatan yang dilakukan. Pengujian dengan kecepatan yang bertambah secara konstan menghasilkan level getaran yang akan meningkat dengan laju yang hampir sama pada pompa sentrifugal. Peningkatan level getaran yang signifikan akan terjadi apabila telah terpengaruh oleh komplikasi hidrolika cairan. Kenaikan terhadap intensitas getaran akan berubah bila terpengaruh oleh faktor lain seperti halnya oleh sifat hidrolika yang terdapat pada cairan (air) yang diangkut oleh pompa sentrifugal. Dalam hal ini, kenaikan intensitas getaran yang melonjak dapat diindikasikan sebagai ciri yang menyebabkan telah terjadinya kavitasi pada pompa sentrifugal (De Silva *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2015). Kenaikan intensitas getaran akan dijelaskan secara lebih mendalam pada sub-bab berikut.

4.2.1 Probability Density Function (PDF)

Fungsi kepadatan probabilitas (PDF) merupakan suatu metode yang dapat digunakan dalam menilai seberapa besar distribusi kepadatan yang terdapat pada data secara statistik. Pada Gambar 4.5 dan 4.6 (a)-(b) merupakan hasil pengolahan data statistik PDF yang dikelola dalam bentuk grafik distribusi Gaussian pada setiap bukaan katup penuh, setengah dan seperempat. Pada sumbu x mencerminkan seberapa besar amplitudo getaran mV terhadap sumbu y yang menunjukkan nilai dari kepadatan probabilitas yang ada pada data getaran atau domain waktu.

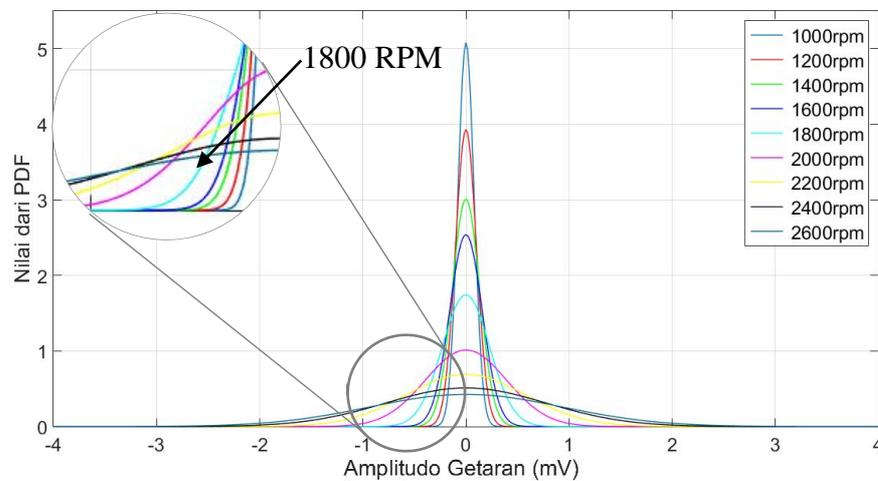
Pada Gambar 4.4 merupakan distribusi kepadatan probabilitas dari kecepatan 1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM dan 1600 RPM pada katup bukaan penuh. Dapat dilihat bahwa setiap distribusi pada tiap kecepatan mengalami kenaikan amplitudo yang hampir sama besar untuk rentang dari nilai PDF dibawah satu. Kenaikan amplitudo yang terjadi sebanding dengan selisih kenaikan kecepatan operasi dari

masing-masing pengujian. Kenaikan yang terjadi juga mengindikasikan bahwa untuk setiap penambahan kecepatan yang sama besar terhadap kecepatan pengujian setelahnya akan menghasilkan distribusi kenaikan intensitas getaran dengan selisih yang sama besar.



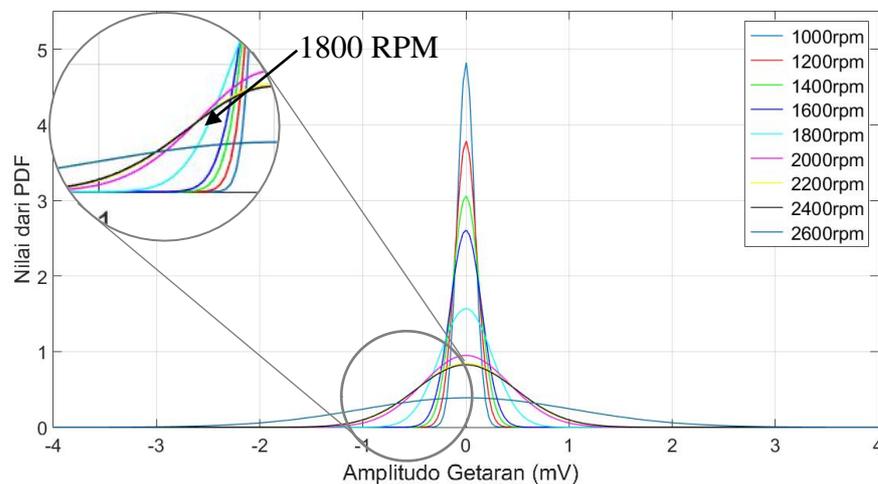
Gambar 4. 4 Kepadatan probabilitas getaran dari domain waktu pada katup bukaan penuh kecepatan 1000-1600 RPM

Sama besarnya selisih yang dihasilkan tiap kecepatan 1000-1600 RPM disebabkan oleh tidak adanya pengaruh hidrolika yang dapat menyebabkan bertambah tingginya amplitudo getaran yang dihasilkan. Gambar 4.5 merupakan grafik distribusi kepadatan probabilitas dari seluruh pengujian kecepatan pada katup bukaan penuh. Terlihat bahwa untuk kecepatan dari 1600 RPM sampai dengan 1800 RPM telah mengalami perubahan distribusi dari kepadatan probabilitas amplitudo yang lebih besar dari selisih kecepatan dibawah 1600 RPM pada satu garis yang sama dari nilai PDF. Hal ini di indikasikan sebagai awal mula terjadinya kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal.

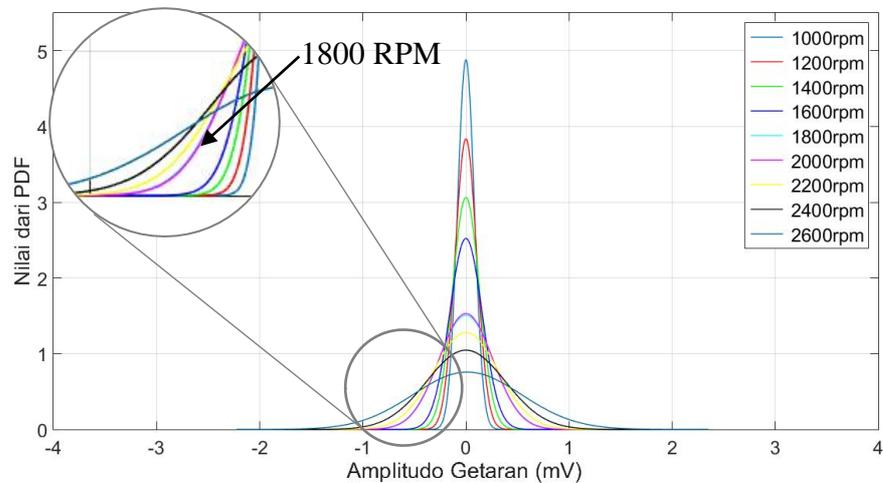


Gambar 4. 5 Kepadatan probabilitas getaran dari domain waktu pada katup bukaan penuh

Pada Gambar 4.6, variasi katup bukaan setengah dan Gambar 4.7, variasi katup bukaan seperempat juga menunjukkan hal serupa seperti pada variasi bukaan penuh yaitu memiliki selisih kenaikan amplitudo yang tidak jauh berbeda untuk rentang pengujian 1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM, 1600 RPM.

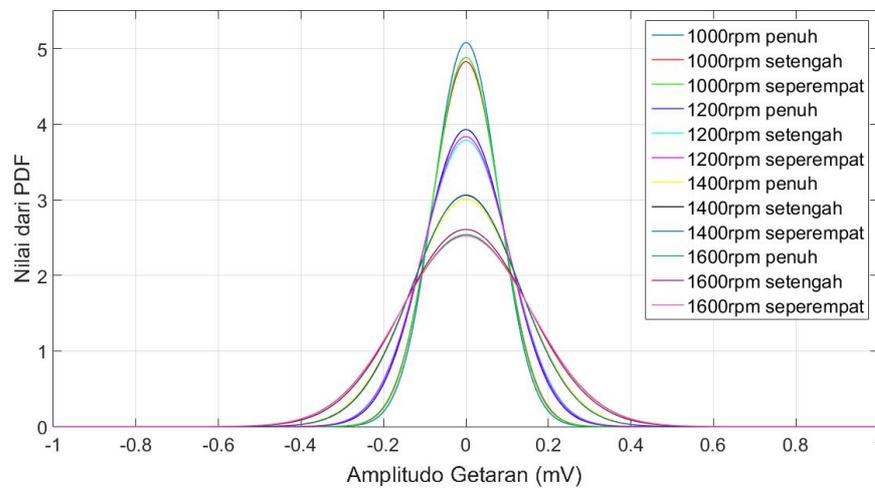


Gambar 4. 6 Kepadatan probabilitas getaran dari domain waktu pada katup bukaan setengah



Gambar 4. 7 Kepadatan probabilitas getaran dari domain waktu pada katup bukaan seperempat

Pada gambar 4.8 merupakan histogram dari ketiga bukaan katup pada 4 kecepatan operasi dari 1000 RPM-1600 RPM. Variasi bukaan katup dan peningkatan kecepatan operasi yang dilakukan pada setiap pengujian akan mempengaruhi kecepatan aliran yang diangkut oleh pompa. Baik pada turunnya kecepatan aliran dan naiknya kecepatan operasi pada pompa dapat mempengaruhi besarnya kemungkinan akan terjadinya kavitasi. Ketika kecepatan aliran meningkat dan mendekati awal mula terjadinya kavitasi akan menyebabkan sinyal getaran berubah seperti halnya pada Gambar 4.1 dan tentunya juga pada distribusi nilai kepadatan probabilitas (Thobiani et al., 2011).



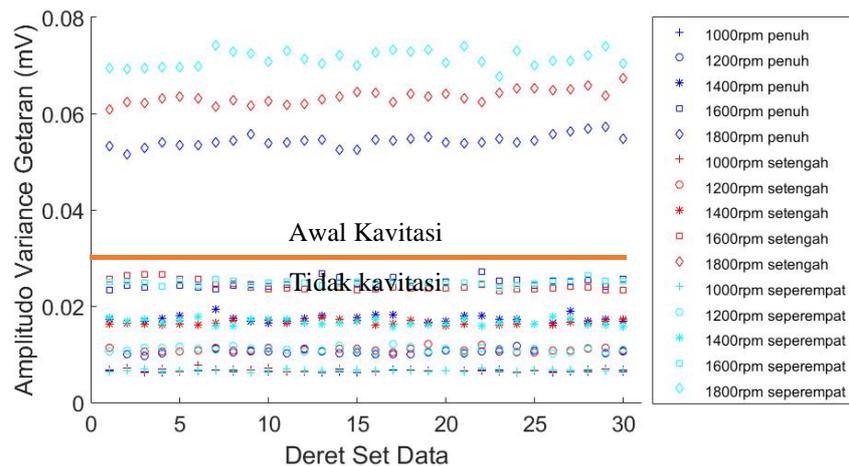
Gambar 4. 8 Distribusi kepadatan probailitas pada tiga bukaan katup kecepatan 1000-1600 RPM

Dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa masing-masing bukaan katup pada kecepatan operasi yang sama mempunyai distribusi kepadatan yang hampir sama. Walaupun sedikit menurun saat mengecilnya luas bukaan katup, besarnya distribusi yang hampir sama menandakan bahwa operasi pompa menghasilkan level getaran yang masih dalam keadaan normal dan belum terpengaruh oleh kavitasi. Dari 4 kecepatan ini dapat di indikasikan sebagai batas dari sensitivitas dari parameter PDF dalam mendeteksi getaran. Dari ketiga histogram pada ketiga 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. Dari kecepatan operasi diatas 1600 RPM tersebut maka dapat di indikasikan bahwa kinerja pompa telah terpengaruh oleh gejala hidrolika yang dalam hal ini merupakan awal fenomena kavitasi.

4.2.2 Varians

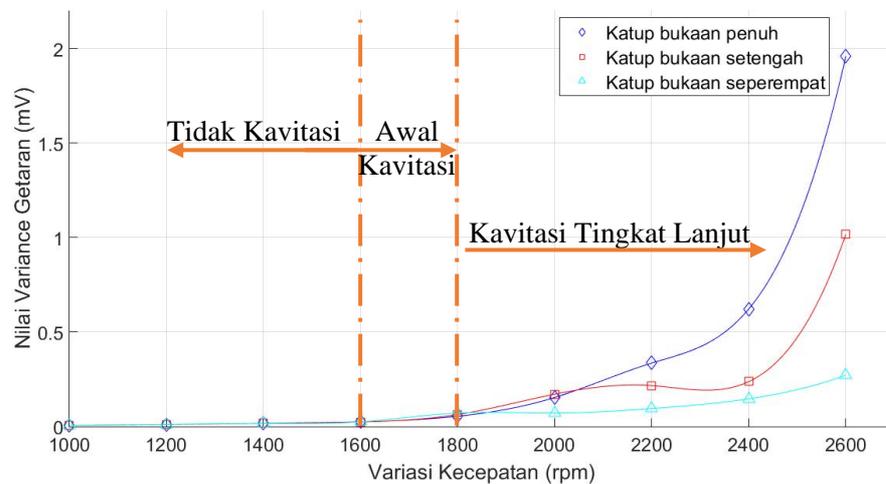
Varians merupakan parameter statistik yang menunjukkan seberapa besar keberagam suatu kelompok data. Pada Gambar 4.9 menunjukkan nilai varians dari ke-30 set data dari setiap pengujian kecepatan operasi 1000-2600 RPM pada

masing-masing variasi bukaan katup. Seperti halnya pada parameter kepadatan probabilitas (PDF) terlihat bahwa distribusi dari nilai varians merata pada satu garis distribusi pada tiga bukaan katup misal pada kecepatan 1200 RPM dimana nilai varians merata pada kisaran amplitudo 0.01 mV .



Gambar 4. 9 Distribusi nilai *variance* getaran pada set data

Dimulai dari kecepatan operasi 1000 RPM, amplitudo getaran bertambah besar dan sedikit meninggi untuk kecepatan operasi setelahnya sampai dengan 1600 RPM. Namun kenaikan amplitudo yang terjadi terdistribus secara merata pada ketiga variasi bukaan katup. Pada kecepatan 1800 RPM terlihat bahwa amplitudo mengalami kenaikan yang lebih besar dibandingkan dengan selisih amplitudo yang dimiliki kecepatan yang ada dibawahnya. Dari hal ini mengindikasikan bahwa operasi pompa sentrifugal telah mengalami gangguan dari adanya komplikasi hidrolis. Jika dilihat dari konsistennya kenaikan dan distribusi amplitudo pada kecepatan 1000-1600 RPM maka dapat ditetapkan bahwa pada kecepatan tersebut merupakan kondisi normal yang dapat dicapai oleh pompa sentrifugal. Pada gambar 4.10 merupakan nilai rata-rata varians dari 30 set data yang di plot berdasarkan masing-masing kecepatan pada tiga bukaan katup. Dari setiap pengujian dari 1000 RPM-1800 RPM terlihat bahwa nilai varians memiliki ketinggian yang hampir sama, namun tidak seperti yang terlihat pada distribusi pada Gambar 4.6 (b) dimana kecepatan 1000 RPM-1600 RPM ditetapkan sebagai kondisi normal operasi pompa.



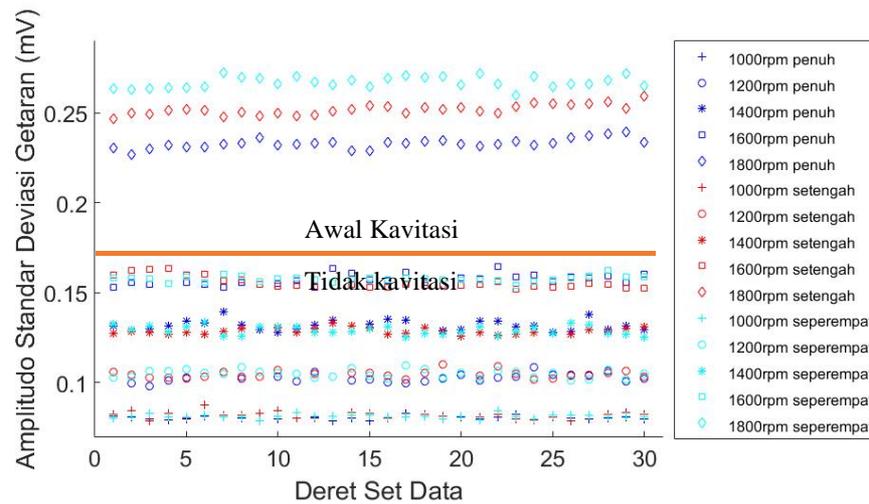
Gambar 4. 10 Grafik hubungan nilai *variance* dengan variasi kecepatan

Pada kecepatan antara 1800 RPM-2000 RPM pada katup bukaan penuh dan setengah, kenaikan nilai varians semakin meninggi maka dalam kecepatan ini dapat dikategorikan sebagai kavitasi tingkat lanjut dari operasi pompa hingga kecepatan selanjutnya. Pada garis bukaan katup seperempat, kenaikan dari nilai varians hampir merata pada 1800 RPM dan 2000 RPM dan mengalami kenaikan yang hampir konstan pada kecepatan selanjutnya. Jika dilihat pada Gambar 4.3 dimana plot domain waktu dari kecepatan tersebut secara visual terlihat bahwa amplitudo yang dihasilkan hampir sama seperti pada plot domain waktu di katup bukaan penuh dan setengah. Rendahnya nilai varians pada katup bukaan setengah ini mengindikasikan bahwa *peak* yang dihasilkan dominan dimiliki oleh sampel beramplitudo rendah yang terdistribusi lebih merata. Akibatnya nilai varians yang dihasilkan hampir sama besar pada kecepatan 1800 RPM dan 2000 RPM.

4.2.3 Standar Deviasi

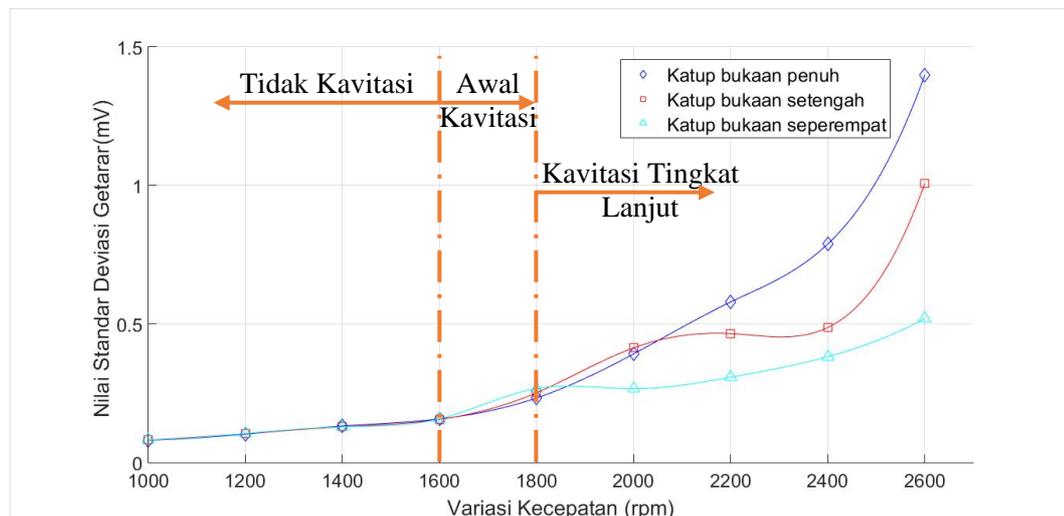
Pada Gambar 4.11 merupakan distribusi nilai standar deviasi dari 30 set data getaran pada ketiga bukaan katup. Seperti halnya nilai varians pada gambar 4.8, distribusi amplitudo yang dihasilkan pada kecepatan 1000 RPM memiliki distribusi nilai standar deviasi berkisar 0.08 mV pada ketiga bukaan katup. 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 4. 11 Distribusi nilai standar deviasi getaran terhadap set data

Dalam kondisi ini maka operasi pompa pada kecepatan 1000-1600 RPM masih dalam keadaan normal dan selisih kenaikan nilai standar deviasi hanya terpengaruhi oleh penambahan kecepatan operasi pompa dan kecepatan antara 1600-1800 RPM dapat ditetapkan sebagai daerah awal terjadinya kavitasi. Pada Gambar 4.12 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. Begitupula yang terjadi pada variasi katup bukaan setengah dimana kecepatan antara 2000 RPM sampai dengan 2400 RPM memiliki kenaikan nilai standar deviasi yang hampir sama.



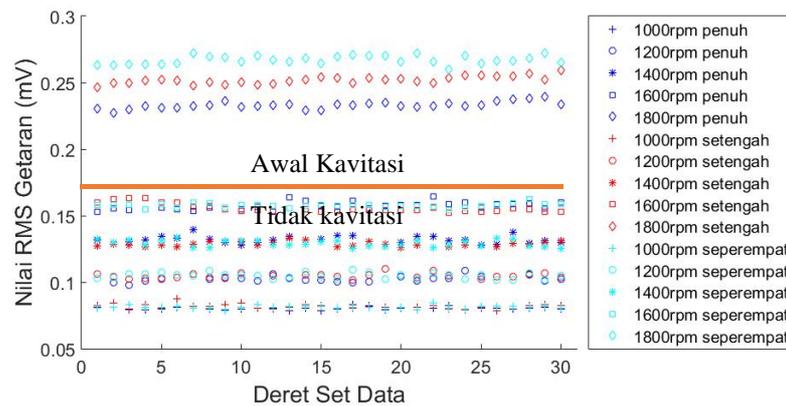
Gambar 4. 12 Grafik hubungan nilai standar deviasi terhadap fungsi kecepatan

Dari peninjauan yang dilakukan terhadap selisih kenaikan yang terjadi maka metode deteksi dini kavitasi menggunakan parameter statistik dapat dilakukan. Hasil yang didapat adalah sensitifitas yang dapat dideteksi oleh pompa sentrifugal yaitu pada kecepatan 1000-1600 RPM operasi pompa masih dalam keadaan normal dan antara kecepatan 1600-1800 RPM terprediksi telah mulai mengalami gejala hidrolika yang mempengaruhi terjadinya kavitasi. pada kecepatan diatas 1800 RPM dapat dikatakan telah mengalami kavitasi tingkat lanjut pada operasi pompa.

4.2.4 Root Mean Square (RMS)

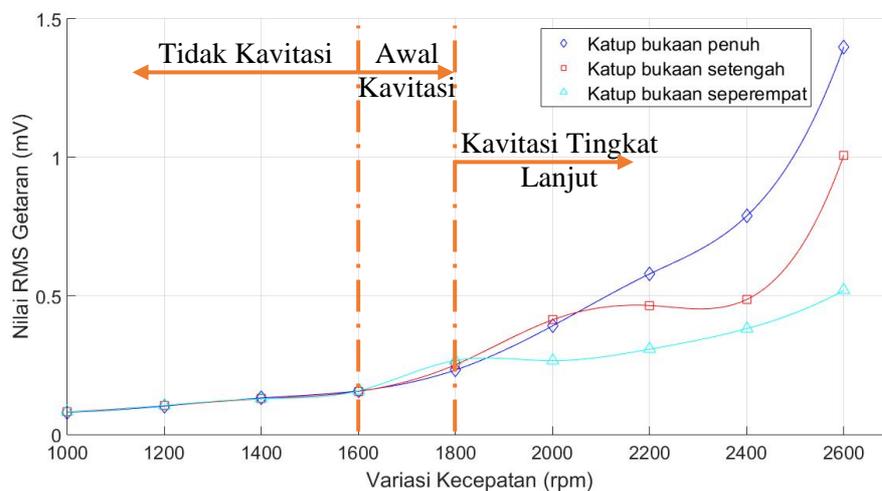
Seperti yang telah disebutkan pada dasar teori, nilai RMS mencerminkan besarnya intensitas energi pada sinyal getaran. Pada Gambar 4.13 merupakan distribusi nilai RMS terhadap pengolahan 30 set data pada tiga variasi bukaan katup. Tidak jauh berbeda dari nilai parameter standar deviasi dan varians, dimulai 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 mengindikasikan bahwa pompa masih bekerja dalam kondisi normal. Dimana kenaikan level getaran hanya

terpengaruh oleh peningkatan kecepatan yang dilakukan pada maing-masing pengujian. Dari indikasi yang didapat maka pada parameter ini semakin menguatkan indikasi kondisi normal pada parameter sebelumnya bahwa pompa pada kecepatan 1000-1600 RPM masih berjalan dalam kondisi normal.



Gambar 4. 13 Distribusi nilai RMS getaran terhadap set data

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 4.14 dimana nilai RMS didapat dengan merata-rata nilai dari ke-30 set data.

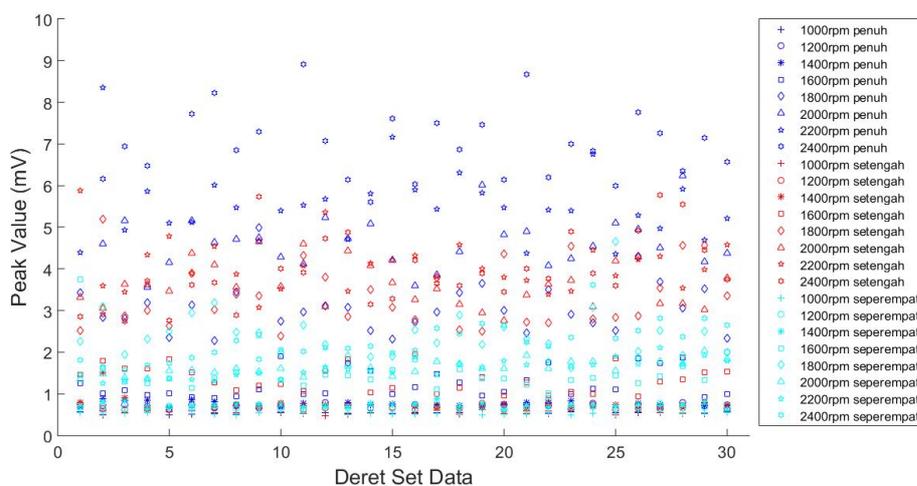


Gambar 4. 14 Grafik hubungan nilai RMS terhadap fungsi kecepatan

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 metode 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.

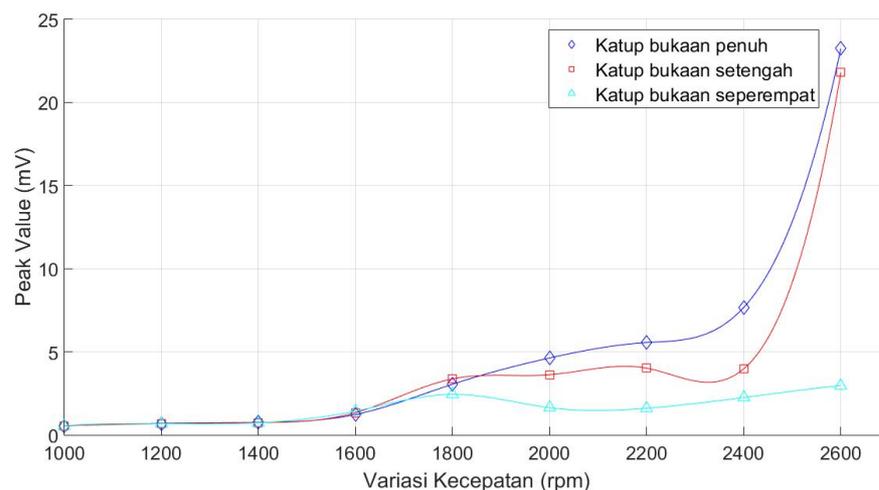
4.2.5 Peak Value

Seperti halnya RMS, *peak value* atau nilai puncak juga mencerminkan intensitas energi dari data sinyal. Pada parameter ini, seperti yang terlihat pada Gambar 4.15 distribusi yang dihasilkan memiliki nilai dengan keseragaman yang acak atau tidak memiliki batas yang jelas 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 4. 15 Distribusi nilai puncak terhadap set data

Berbeda dengan distribusi nilai puncak pada 30 set data, pada Gambar 4.16 merupakan nilai puncak yang didapat dari rata-rata 30 set data pada Gambar 4.15 dari setiap pengujian kecepatan. Terlihat bahwa pada kecepatan 1000-1600 RPM memiliki nilai puncak dengan selisih laju kenaikan yang hampir sama besar dan pada kecepatan 1800 RPM telah mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Apabila dilihat dari variasi bukaan katup yang dilakukan, pada kecepatan 1000-1600 RPM memiliki nilai yang hampir sama besar. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai puncak pada setiap variasi bukaan katup memiliki pola dengan batas kenaikan rata-rata puncak yang cukup seragam pada setiap pengujian 1000-1600 RPM. Namun, yang membuatnya terlihat acak pada Gambar 4.15 hanya disebabkan oleh berbedanya nilai puncak itu sendiri pada masing-masing set data.



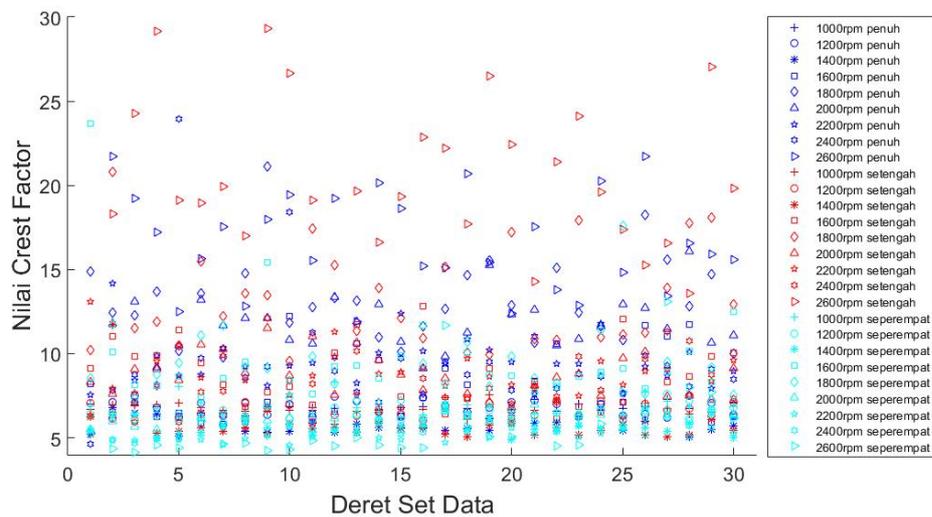
Gambar 4. 16 Grafik hubungan nilai puncak terhadap fungsi kecepatan

Bila dipertimbangkan dari kedua grafik nilai puncak diatas, maka penggunaan parameter dengan pengaruh kecepatan dalam mendeteksi kavitas tidak baik digunakan. Sehingga diagnosis yang dilakukan masih belum bisa ditentukan.

4.2.6 Crest Factor

Crest Factor atau faktor puncak didefinisikan sebagai nilai puncak dibagi dengan nilai RMS dari sinyal getaran. Dikarenakan oleh tingginya sensitifitas yang

dihasilkan oleh nilai puncak dan rendahnya sensitifitas dari nilai RMS terhadap ketidakstabilan domain waktu membuat faktor puncak sangat sensitif terhadap pengaruh perubahan operasi kerja (Luo *et al.*, 2015). Dapat dilihat pada Gambar 4.17, merupakan distribusi dari nilai faktor puncak dari 30 set. Dimana *plotting* dilakukan pada pengujian kecepatan 1000-2400 RPM untuk memperjelas distribusi pada nilai rendah. Terlihat bahwa nilai yang dihasilkan pada setiap set data memiliki pola acak pada setiap pengujian serta tidak memiliki batas yang jelas untuk di diagnosis.

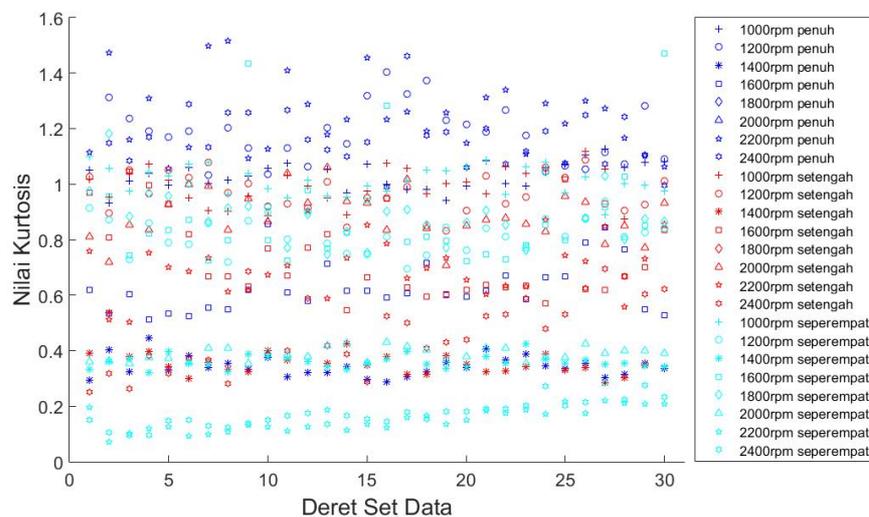


Gambar 4. 17 Distribusi nilai *crest factor* terhadap set data

Pola acak dari setiap pengujian kecepatan ini disebabkan oleh fungsi nilai puncak yang digunakan pada persamaan faktor puncak. Dimana nilai puncak seperti pada Gambar 4.15 memiliki distribusi nilai yang acak. Oleh karena hal tersebut, maka metode memiliki sensitifitas yang sangat rendah dan tidak bisa digunakan dalam mendeteksi fenomena kavitasi pada penelitian ini. Khususnya pada pengujian pengaruh kecepatan operasi pompa sentrifugal.

4.2.7 Kurtosis

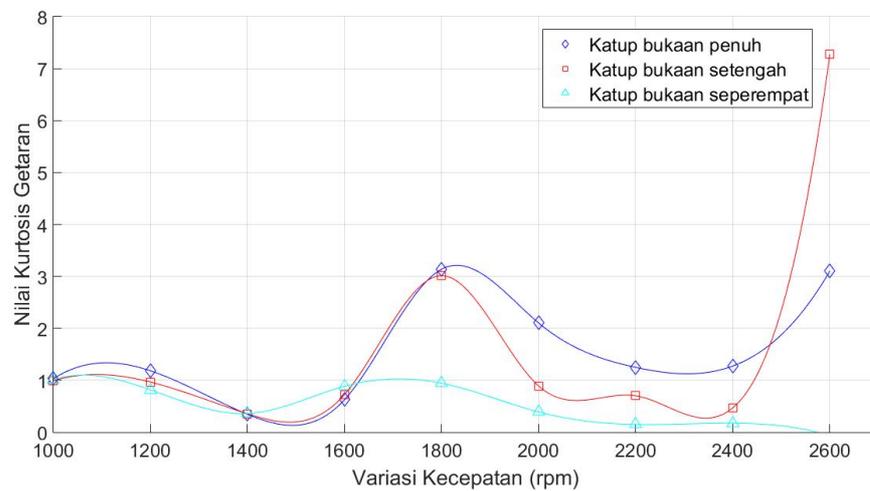
Pada Gambar 4.18 menunjukkan distribusi dari nilai kurtosis terhadap 30 set data kecepatan 1000-2400 RPM pada ketiga variasi bukaan katup. Dapat dilihat bahwa dari setiap data pada masing-masing pengujian memiliki kenaikan nilai yang tidak merata. Hal ini disebabkan oleh fungsi dari kurtosis dimana nilai varians dipangkat 4 yang menyebabkan besar kecilnya kenaikan amplitudo sangat berpengaruh pada nilai yang didapat.



Gambar 4. 18 Distribusi nilai kurtosis terhadap set data

Tidak meratanya kenaikan nilai kurtosis mengindikasikan bahwa pada sampel deret waktu yang dihasilkan dari domain waktu memiliki pola kenaikan cukup berbeda dari tiap set data. Apabila ditinjau dari konsistensi kenaikan nilai kurtosis pada Gambar 4.18, terlihat bahwa nilai kurtosis mengalami kenaikan dan penurunan yang tidak begitu jelas terhadap fungsi kecepatan. Namun, pada kecepatan 1800 RPM baik pada katup bukaan penuh dan setengah mempunyai kenaikan nilai kurtosis yang cukup signifikan. Tingginya kenaikan nilai kurtosis ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan tersebut, domain waktu memiliki perkembangan level getaran yang cukup tinggi dibandingkan dengan nilai rata-rata sinyal. Namun, pada parameter ini masih belum bisa untuk mendiagnosis terjadinya kavitasi. hal ini disebabkan oleh tidak konsistennya distribusi nilai pada setiap data. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada metode ini masih belum cukup sensitif untuk

mendeteksi kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal. Khususnya pada variasi peningkatan kecepatan operasi yang dilakukan.



Gambar 4. 19 Grafik hubungan nilai kurtosis terhadap domain waktu

4.4 Analisis Domain Frekuensi

Selain metode statistik pada domain waktu, analisis dengan menggunakan frekuensi domain atau analisis spektrum juga dapat digunakan dalam mendiagnosis kavitasi. Diagnosis menggunakan metode ini digunakan dalam mendukung serta memvalidasikan analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam mendiagnosis kesalahan yang disebabkan kavitasi pada analisis spektrum adalah dengan menganalisis perubahan nilai *blades passing frequencies/BPF* (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*.

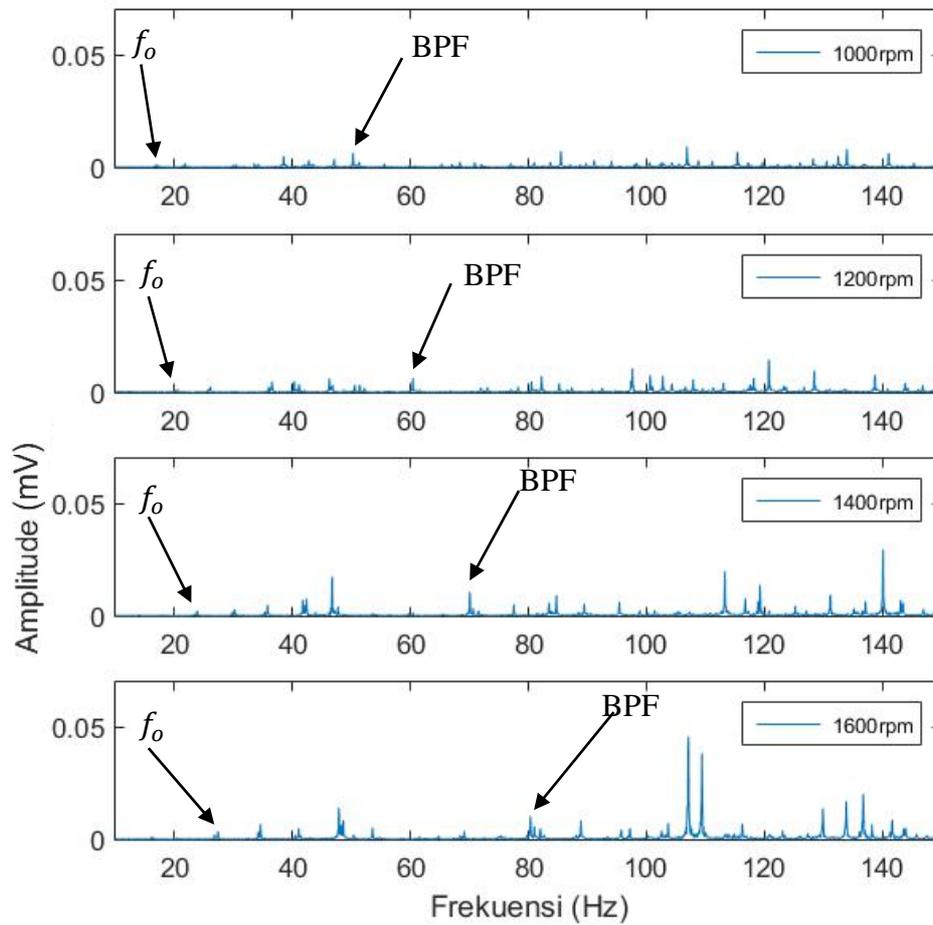
Pada saat pompa bekerja dalam kondisi kavitasi, pengaruh hidrolika yang dihasilkan akan mempengaruhi perubahan besar kecilnya nilai BPF. Hal ini disebabkan karena kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal seringkali berada pada kisi-kisi *impeller* sehingga mempengaruhi besarnya amplitudo yang

dihasilkan (Abdulaziz & Kotb, 2016). Pada Tabel 4.1 merupakan nilai dari tingkat kecepatan dan nilai BPF yang dihasilkan pada tiap pengujian kecepatan.

Tabel 4. 1 Nilai f_R dan BPF pada spektrum analisis 1000-2600 RPM

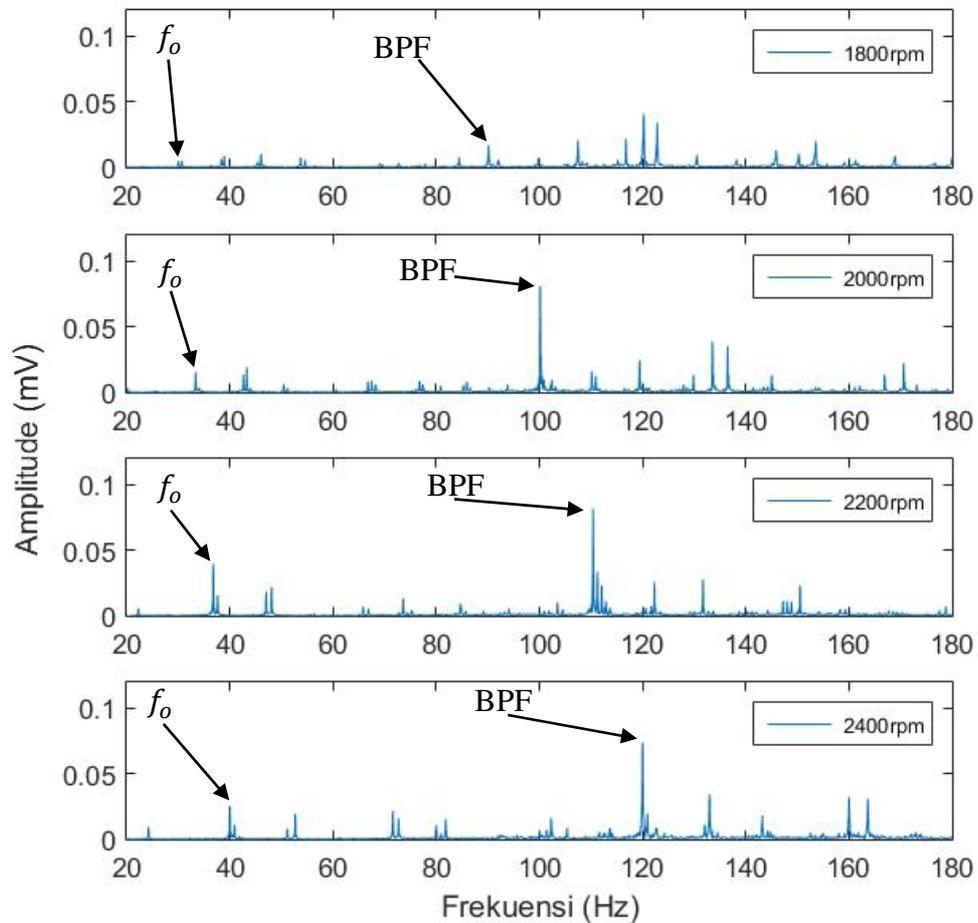
RPM	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
f_o (Hz)	16.67	20.00	23.33	26.67	30.00	33.33	36.67	40.00	43.33
BPF (Hz)	50	60	70	80	90	100	110	120	130

Pada gambar 4.17; 4.18; 4.19 merupakan tipikal spektrum getaran yang dihasilkan dari variasi katup bukaan penuh pengujian kecepatan 1000-2600 RPM. Jika dibandingkan dengan nilai BPF spektrum kecepatan 2000-2600 RPM pada Gambar 4.18; 4.19 terlihat bahwa pada Gambar 4.17 dimana plot spektrum antara 1000-1600 RPM memiliki nilai BPF dengan amplitudo yang rendah kisaran 0.006-0.01 mV. Pada kecepatan ini, kenaikan yang terjadi pada nilai BPF masih terlalu rendah untuk di indikasikan sebagai awal terjadinya kavitasi. Begitu juga yang terjadi pada kecepatan 1800 RPM pada Gambar 4.18 dimana nilai amplitudo BPF berkisar 0.01 mV hanya mengalami kenaikan yang rendah.



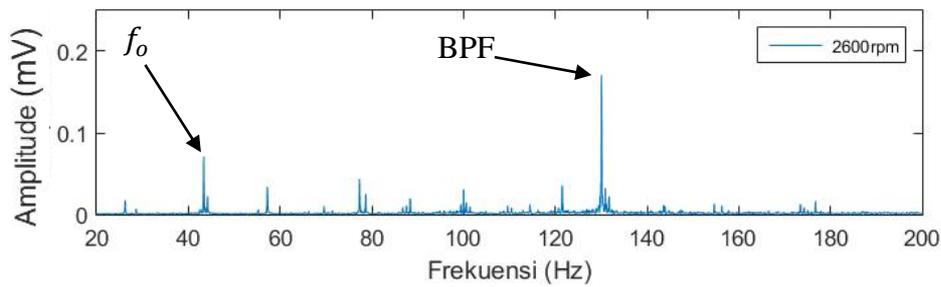
Gambar 4. 20 Tipikal spektrum katup bukaan penuh 1000 RPM-1600 RPM

Namun, pada kecepatan 2000 RPM nilai amplitudo BPF telah mengalami kenaikan yang signifikan dari 0.01 mV pada kecepatan 1800 RPM menjadi 0.08 mV. Setelah kenaikan tersebut pada kecepatan 2000-2400 RPM nilai amplitudo mengalami kestabilan nilai dimana tidak ada kenaikan atau penurunan yang signifikan.



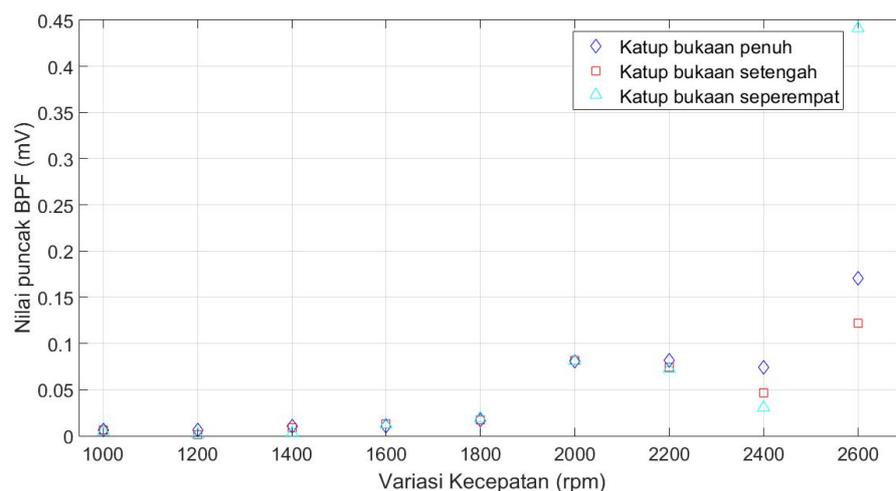
Gambar 4. 21 Tipikal spektrum katup bukaan penuh 1800 RPM-2400 RPM

Stabilnya nilai amplitudo pada kecepatan 2000-2400 RPM ini dapat diindikasikan bahwa pompa sentrifugal telah beroperasi dalam kondisi kavitasi begitupula pada kecepatan 2600 RPM pada Gambar 4.18 dimana nilai amplitudo mengalami kenaikan yang lebih besar. Sedangkan pada kenaikan amplitudo kecepatan 1800 RPM sampai dengan 2000 RPM mengindikasikan bahwa awal mulai terjadinya kavitasi berada diantara rentang kecepatan tersebut.



Gambar 4. 22 Tipikal spektrum katup bukaan penuh 2600 RPM

Dalam memudahkan analisis untuk variasi katup bukaan setengah dan tiga perempat maka digunakan Gambar 4.20 yang menunjukkan nilai puncak BPF dari setiap bukaan katup terhadap fungsi kecepatan dari tiap pengujian. Dapat dilihat bahwa pada kecepatan 1000-1800 RPM nilai BPF mempunyai ketinggian yang hampir sama besar. Hampir sama besarnya nilai pada ketiga bukaan katup ini mempunyai arti bahwa pompa beroperasi dalam kondisi yang hampir sama. Sedangkan antara kecepatan 1800 RPM dan 2000 RPM mengalami kenaikan signifikan dimana nilai BPF yang dihasilkan hampir sama besar. Pada rentang kecepatan ini, seperti yang telah disebutkan sebelumnya pada katup bukaan penuh telah mengalami awal mula terjadinya kavitasi begitu juga pada bukaan katup setengah dan seperempat.



Gambar 4. 23 Nilai puncak BPF pada domain frekuensi dari tiga bukaan katup 1000-2600 RPM

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 kavitas 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. Hal ini mungkin disebabkan oleh errornya pengujian atau mungkin disebabkan pada kecepatan dan variasi bukaan tersebut fenomena kavitas yang terjadi mempunyai level yang lebih besar dibandingkan bukaan katup lainnya.

4.5 Analisis Performa Deteksi Kavitas Parameter Statistik Domain Waktu

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

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 kavitas, karakteristik distribusi amplitudo getaran akan berubah secara drastis jika dibandingkan dengan kondisi pompa tidak mengalami kavitas. Dimana kondisi pompa tidak dalam kondisi kavitas menghasilkan perkembangan laju distribusi amplitudo dengan selisih yang hampir sama besar. Oleh karena itu, metode ini cocok digunakan dalam mendeteksi kavitas, khususnya pada pompa sentrifugal.

2. Pada nilai varians seperti yang terlihat pada Gambar 4.10 bahwa kenaikan yang terjadi pada awal mula kavitasi dibanding dengan kondisi normal pompa memiliki ketinggian yang tidak jauh berbeda. Sehingga sensitifitas pada metode parameter statistik ini kurang baik dalam mendeteksi kavitasi. Hal ini dapat terjadi karena data deret waktu yang dihasilkan pada saat awal terjadi kavitasi memiliki level energi rendah dan belum memiliki ketinggian yang signifikan. Sehingga menyebabkan nilai rata-rata getaran menjadi rendah yang merupakan faktor pembeda utama dari awal mula terjadinya kavitasi pada parameter ini dan menurunkan sensitifitas yang dihasilkan.
3. Baik pada standar deviasi maupun RMS, menghasilkan nilai yang hampir sama besar pada grafik. Namun, pada kedua parameter ini, laju perubahan level getaran akibat awal kavitasi sudah cukup terlihat dibanding kondisi normal sebelumnya, sehingga parameter ini dinilai cukup sensitif dalam membedakan kondisi normal pompa dan kondisi pompa dalam pengaruh kavitasi.
4. Pada analisis parameter nilai puncak (*peak value*), nilai yang dihasilkan dari domain waktu menunjukkan nilai yang tidak begitu seragam. Hal ini dikarenakan pada domain waktu memiliki amplitudo pada nilai maksimum maupun minimum yang tidak seragam pada setiap set data. Sehingga sensitifitas parameter yang dihasilkan menjadi sangat rendah dan tidak cukup baik untuk digunakan dalam mendiagnosis kavitasi. Khususnya pada pengujian pengaruh kecepatan operasi.
5. Pada penggunaan parameter *crest factor*, didapat bahwa nilai distribusi yang dihasilkan mengalami kenaikan dan penurunan. Hal ini disebabkan oleh nilai puncak pada fungsi varians juga memiliki nilai yang tidak seragam. Oleh sebab itu, penggunaan parameter ini memiliki sensitifitas yang sangat rendah dan tidak cukup baik dalam mendeteksi kavitasi.
6. Dari pengolahan data didapat bahwa, pada kurtosis kenaikan nilai yang kecil begitu berpengaruh pada hasil yang didapat. Sehingga apabila pada data statistik memiliki nilai varians sedikit berbeda antara setiap set data akan

mengurangi sensitifitas parameter ini. Oleh karenanya, metode ini masih belum begitu sensitif dalam mendeteksi kavitas.

Dari 4 parameter seperti PDF, varians, standar deviasi dan RMS yang dalam penelitian ini berhasil digunakan dalam mendeteksi kavitas 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 kavitas pada pompa sentrifugal.

Berbeda dengan analisis statistik domain waktu, pada domain frekuensi awal mula kavitas di indikasikan mulai terjadi pada kecepatan diatas 1800 RPM. Apabila dipertimbangkan dari efektifitas metode yang digunakan berdasarkan penelitian terdahulu (Al-Hashmi, 2009; Luo *et al.*, 2015), dimana dinyatakan metode statistik lebih mumpuni maka dapat disimpulkan bahwa awal kavitas terjadi pada kecepatan 1600 RPM. Sedangkan pada kecepatan mulai dari 1800 RPM pompa sentrifugal telah mengalami kavitas tingkat lanjut. Hal ini didukung oleh diagnosis yang dihasilkan pada domain frekuensi dimana pada kecepatan 1800 RPM, nilai BPF telah mengalami kenaikan yang signifikan. Dimana kenaikan signifikan tersebut merupakan indikasi telah terjadinya fenomena kavitas pada pompa sentrifugal. Hal ini juga berlaku terhadap setiap variasi bukaan katup penuh, setengah dan seperempat.