

## Deteksi Kavitas Berbasis Getaran Pada Pompa Sentrifugal Menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA)

(Vibration Based Cavitation Detection In A Centrifugal Pump Using Principal Component Analysis (PCA))

BERLI P KAMIEL, IKHSAN A KAUSAR

### ABSTRACT

A centrifugal pump is one type of pumps that widely used in industries. Its mechanism which creates pressure changes may cause cavitation. Cavitation phenomenon that is not properly maintained may results fatal breakdown leading to high economic losses. Therefore, research is needed to find and develop a method that can detect early cavitation phenomena and identify it at several levels as well. This paper presents a method that can detect cavitation by monitoring the vibrations level of the pump based on statistical analysis of time domain and Principal Component Analysis (PCA). Vibration data is collected, trained and tested for each cavitation level. Training data is normalized and trained for each cavitation level using PCA which produces data loading matrix. The loading matrix is then multiplied by the testing data which gives a score matrix used to classify cavitation level of the centrifugal pump. The result shows that the method of domain-based PCA is successful in transforming the original data of 7 statistical parameters to 7 principal components (PC) with maximum variant. Three PCs gives 93.68% variants which can clearly identify and classify the differences between normal, early, intermediate and fully developed cavitation in the centrifugal pumps.

**Keywords:** statistical parameters, cavitation, centrifugal pumps, Principal Component Analysis, vibration signals.

### PENDAHULUAN

Pompa sentrifugal adalah jenis pompa yang paling umum digunakan di industri untuk memindahkan cairan. Hal ini dikarenakan, pemasangan dan pengoperasiannya yang mudah dan sederhana. Selama pompa beroperasi, dapat terjadinya penurunan performa. Salah satu dari penyebab turunnya performa pompa adalah terjadinya kavitas (Sukardi dkk, 2012).

Kavitas adalah gejala menguapnya zat cair yang sedang mengalir karena tekanannya berkurang sampai dibawah tekanan uap jenuhnya (Sularso, 1983). Menurut Thobiani dkk (2011), sekitar 70% total biaya perawatan pada mesin diakibatkan oleh kerusakan pada pompa. Diperkirakan dana yang digunakan tiap tahunnya untuk perawatan pompa adalah sebesar 70 juta US\$ (sekitar 1 triliun rupiah). Oleh karena itu dibutuhkan metode yang efektif dalam mendeteksi kavitas dini pada pompa.

Berbagai metode untuk mendeteksi kesalahan dalam pompa sentrifugal telah dikembangkan oleh banyak peneliti, diantaranya Al-Hashmi (2009) menggunakan metode deteksi berbasis sinyal getaran pada pompa sentrifugal menggunakan analisis parameter statistik. Al-Tobi and Al-Sabari (2016) meneliti tentang bagaimana mendeteksi kavitas menggunakan metode domain waktu untuk membuktikan bahwa metode domain waktu dapat digunakan dalam mendeteksi kavitas. Penelitian lain dari Ramadhan (2017) membuktikan tidak semua parameter statistik dapat memberikan informasi dalam membedakan kondisi normal dan kavitas.

Kemudian peneliti lain mengkombinasikan metode domain waktu dengan salah satu metode berbasis *Pattern Recognition* (Pencocokan Pola) yaitu *Principal Components Analysis* (PCA). PCA adalah teknik statistik yang digunakan untuk mengurangi besarnya dimensi dari data yang diobservasi, menjadi dimensi yang lebih kecil tanpa kehilangan informasi keseluruhan data

(Susantyo 2013). Jumlah dimensi yang lebih kecil membuat analisis data menjadi mudah dan sederhana serta mengurangi biaya komputasi. Penelitian yang dilakukan dalam membuktikan tingkat keakuratan hasil deteksi kavitas pada pompa sentrifugal menggunakan PCA diantaranya oleh Sakthivel dkk (2010) berhasil menunjukkan bahwa keakuratan kombinasi metode PCA-fuzzy. Kamiel (2015) menunjukkan bahwa metode berbasis wavelet-PCA yang diusulkan dapat digunakan untuk diagnosis multi-kesalahan untuk pompa sentrifugal dengan klasifikasi kerusakan terlihat jelas.

Namun berdasarkan penelitian sebelumnya, dapat dilihat bahwa belum ada suatu standar dalam menentukan parameter statistik yang tepat untuk mendeteksi kavitas pada pompa sentrifugal. Sehingga masih terbuka ruang penelitian lebih lanjut untuk memilih parameter statistik yang tepat untuk mendeteksi kavitas. PCA adalah metode yang dapat digunakan untuk melakukan seleksi, mereduksi dimensi data dan sekaligus juga dapat digunakan untuk mengklasifikasikan kerusakan. Penelitian ini bertujuan mendeteksi kavitas dini pada pompa sentrifugal menggunakan parameter statistik yang diseleksi menggunakan PCA. Dengan 3 PC yang memiliki varians terbesar, dapat digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi normal atau kavitas pada pompa sentrifugal.

#### Principal Component Analysis (PCA)

Metoda PCA sangat berguna digunakan jika data yang ada memiliki jumlah variabel yang besar dan memiliki korelasi antar variabelnya. Perhitungan dari *principal component analysis* didasarkan pada perhitungan nilai eigen dan vektor eigen yang menyatakan penyebaran data dari suatu dataset. Tujuan dari analisa PCA adalah untuk mereduksi variabel yang ada menjadi lebih sedikit tanpa harus kehilangan informasi yang termuat dalam data asli/awal.

Dengan menggunakan PCA, variabel yang tadinya sebanyak  $n$  variabel akan direduksi menjadi  $k$  variabel baru (*principal component*) dengan jumlah  $k$  lebih sedikit dari  $n$  dan dengan hanya menggunakan  $k$  *principal component* akan menghasilkan nilai yang sama dengan menggunakan  $n$  variabel (Johnson dan Wichern, 2007). Variabel hasil dari reduksi tersebut dinamakan *principal component* (komponen utama). Sifat dari variabel baru yang terbentuk dengan analisa PCA nantinya selain memiliki

jumlah variabel yang berjumlah lebih sedikit tetapi juga menghilangkan korelasi antar variabel yang terbentuk.

Penyelesaian dengan PCA seringkali cukup hanya dengan beberapa *principal component* (PC) untuk menjelaskan struktur data asli. Jika data dalam dimensi asli sulit untuk direpresentasikan melalui grafik, maka dengan dua atau satu PC bisa dicitrakan melalui grafik (Santosa 2007). Misalkan terdapat data dengan susunan sebagai berikut:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Hitung nilai rata-rata

$$\mu_{wj} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (2)$$

Hitung matriks covarian C dari vektor eigen

$$C_x = \frac{1}{m-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (3)$$

Hitung nilai eigen  $i\lambda$  dan vektor eigen  $v_i$  ( $1, 2, \dots, n$ ) dari C

$$C_X P = P \Lambda \quad (4)$$

$$\Lambda = (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0)$$

adalah matriks diagonal yang memiliki eigenvalues yang positif dari yang terbesar hingga yang terkecil.

Tentukan variabel baru (*principal component*) dengan mengalikan variabel asli dengan matriks vektor eigen.

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \mathbf{P}^T \quad (5)$$

#### Parameter Statistik

Ada banyak parameter statistik yang dapat diekstraksi dari sinyal getaran untuk deteksi kerusakan. Untuk menentukan dan memilih parameter statistik domain waktu yang efektif pada pompa sentrifugal, akan dipaparkan berdasarkan beberapa tinjauan penelitian sebelumnya. Setiap penelitian memiliki latar belakang teoritis yang berbeda dan memberikan hasil yang berbeda. Pada Tabel 1 ditunjukkan beberapa penelitian yang menggunakan parameter statistik domain waktu pada pompa sentrifugal.

TABEL 1. Tinjauan penelitian

Tahun	Author (s)	Objek	Metode	Parameter Statistik
2003	Li dkk	Gearbox	PCA	<i>SD, kurtosis, peak, mean, RMS, crest factor, impulse factor, clearance factor</i>
2009	Al-Hashmi	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>PDF, RMS, SD</i>
2011	Pirra dkk	Bearing	PCA	<i>Mean, RMS, peak value</i>
2015	Luo, dkk.	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>RMS, Crest Factor, Peak, PDF</i>
2015	Kamiel	Pompa Sentrifugal	PCA	<i>energy level, SD, RMS, kurtosis, variance, crest factor</i>
2016	Al-Tobi & Al-Sabari	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>RMS &amp; Peak value</i>
2017	Ramadhan	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>PDF, Variance, SD, RMS, peak value, crest factor, dan kurtosis</i>
2017	Pratama	Pompa Sentrifugal	Analisis Statistik	<i>Variance, Mean, SD, RMS, Kurtosis, Skewness</i>

Dari hasil beberapa tinjauan penelitian pada Tabel 1, maka dirangkum jumlah penelitian dengan masing-masing parameter statistik. Dari hasil tersebut di pilih parameter yang paling banyak digunakan dan cocok untuk pemodelan PCA, yaitu *RMS, SD, peak value, kurtosis, variance, crest factor dan mean*. Namun parameter *PDF* tidak dipilih karena pada Tabel 1 tidak ada peneliti yang menggunakan *PDF* untuk PCA. Fitur-fitur dapat direpresentasikan secara matematis sebagai berikut,

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$Peak\ Value = \frac{\max(x) - \min(x)}{2} \quad (7)$$

$$Standard\ Deviation = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (8)$$

$$Variance = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (9)$$

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N - 1)\sigma^4} \quad (10)$$

$$CrestFactor = \frac{\max(|x(n)|)}{\sigma} \quad (11)$$

$$Mean = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x(k) \quad (12)$$

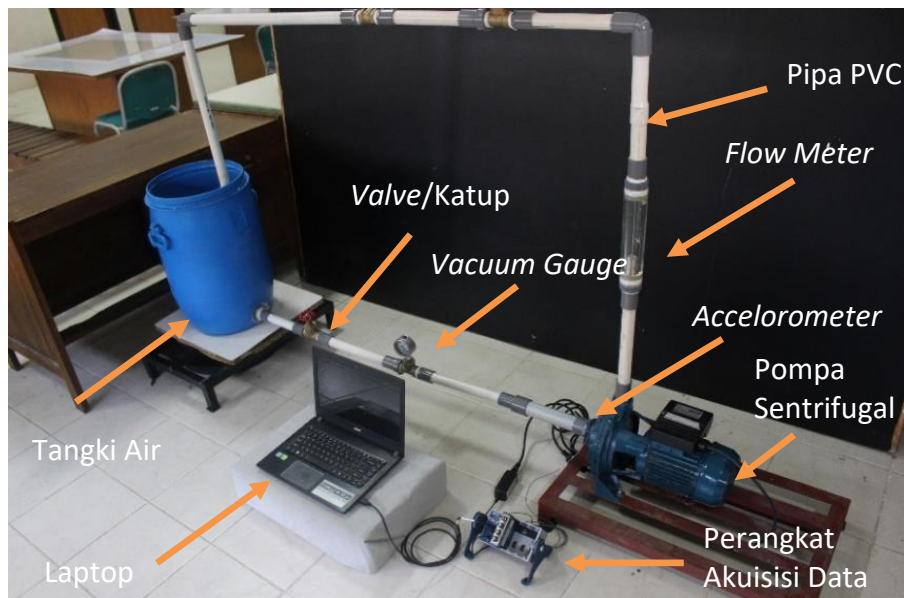
#### METODOLOGI PENELITIAN

Data sinyal getaran diambil melalui simulator *tes-rig* kavitasi pada pompa sentrifugal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Simulator ini bertujuan untuk mempermudah pengamatan kavitasi yang ada pada pompa sentrifugal. *Test rig* kavitasi pompa sentrifugal terdiri dari beberapa komponen utama diantaranya pompa sentrifugal 1,5 HP. Sirkulasi fluida terjadi melalui *discharge* dan *suction* pompa. Tangki diletakkan diantara *discharge* dan *suction* yang bertujuan untuk menjaga *suction* mendapatkan fluida yang cukup selama proses pengoperasian pompa. Sebuah *flowmeter* dipasang di sisi *discharge* sebagai laju aliran fluida. Sebuah katup pada sisi *suction* dipasang sebagai pengatur variasi kondisi normal dengan bukaan katup 25% untuk kavitasi dini, 50% untuk kavitasi level menengah dan 75% untuk kavitasi lanjut. *Pressure gauge* dipasang pada

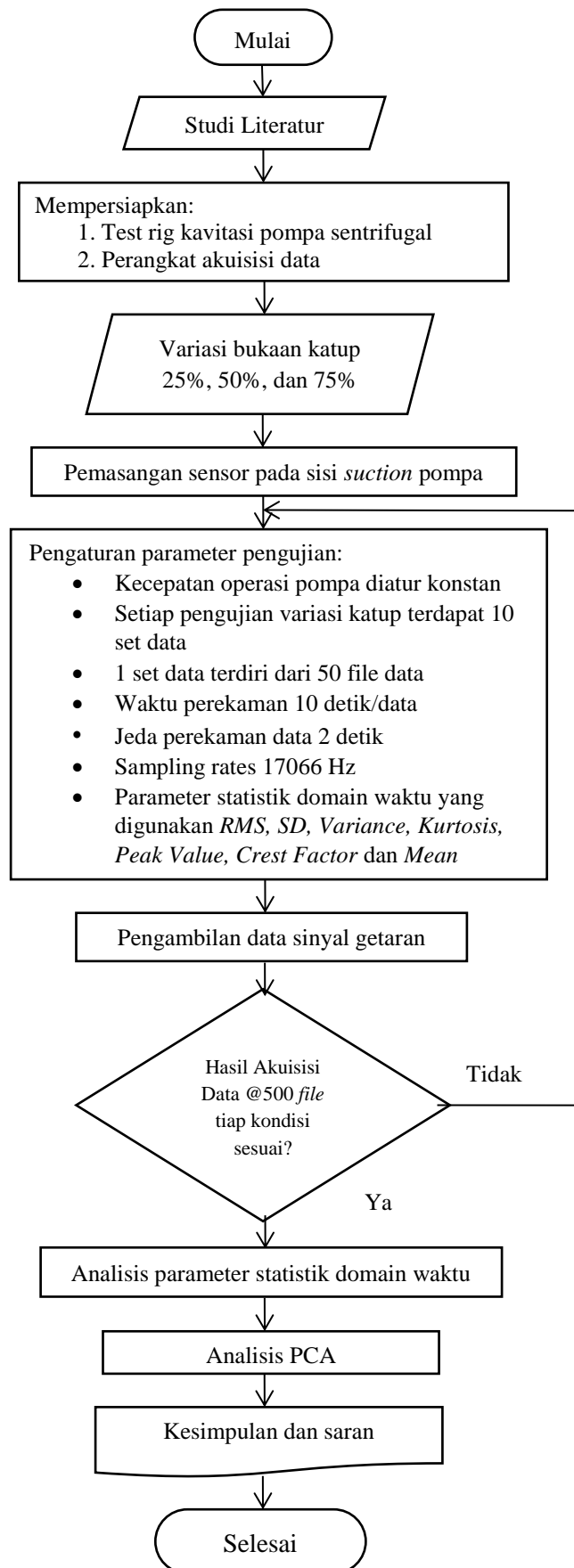
sisi *discharge* untuk mengetahui nilai tekanan fluida dan *vacuum gauge* dipasang pada sisi *suction* untuk mengetahui nilai tekanan *vacuum* yang terjadi.

Diagram alir proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian ini dimulai dengan melakukan identifikasi masalah yang telah disebutkan pada latar belakang penelitian yang kemudian diuji dengan *test-rig*. Alat simulasi dibuat berdasarkan dari tinjauan pustaka yang telah ada dalam penelitian tentang deteksi kavitasi pada pompa sentrifugal. Setelah itu dilakukan proses akuisisi data sinyal *vibrasi* sebanyak 500 *file*. Banyaknya data yang diambil bertujuan untuk membuktikan dengan menggunakan metode *PCA*, data yang banyak tersebut dapat direduksi sehingga mengurangi besarnya dimensi menjadi dimensi yang lebih kecil tanpa kehilangan informasi yang signifikan. Hasil dari penelitian ditutup dengan hasil dari diagnosis berupa kesimpulan dan saran.

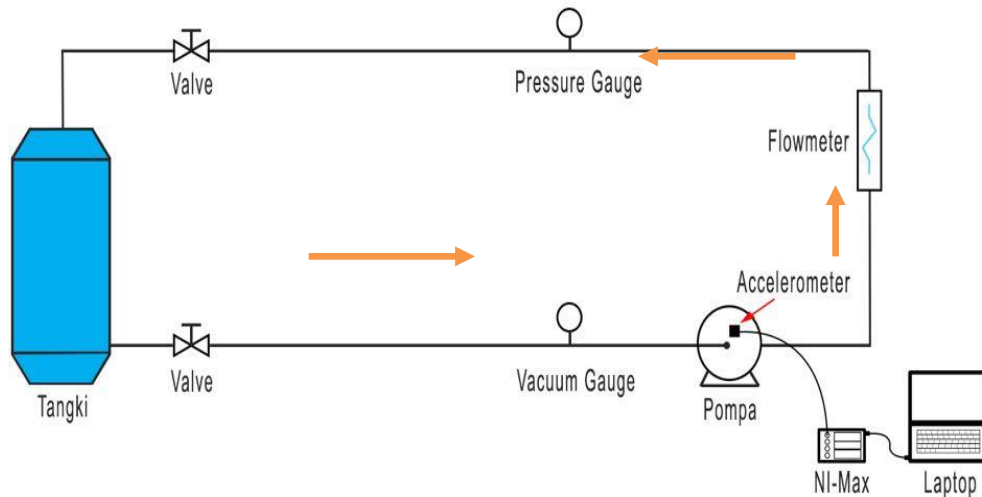
Gambar 3 merupakan skematik rangkaian simulator uji yang menunjukkan lokasi pemasangan *accelerometer* dan sistem akuisisi data yang digunakan dalam merekam sinyal getaran pompa sentrifugal. Skema akuisisi data dapat dilihat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Untuk setiap kondisinya perekaman dilakukan sebanyak 500 *file*, dengan waktu 10 detik setiap *file* nya dan jeda selama 2 detik. Agar perbandingan data akuisisi yang dihasilkan pada tiap kondisi mengalami perubahan yang stabil, maka kecepatan putar pompa diatur konstan sebesar 2850 *rpm*. *Sampling rate* yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan sebesar 17066 Hz. Sensor yang digunakan berupa *accelerometer type 4507* yang diletakkan pada sisi *suction* dan *discharge* pompa. Sensor tersebut dihubungkan ke perangkat akuisisi data *NI 9234* yang terpasang pada *chassis NI Compact DAQ 9174* dan terhubung dengan laptop yang memiliki *software Matlab* untuk menyimpan data akuisisi.



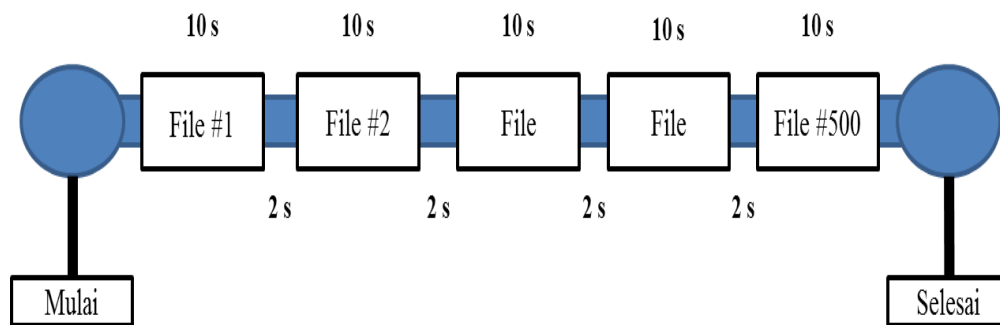
GAMBAR 1. *Test-rig* kavitasi pompa sentrifugal



GAMBAR 2. Diagram alir penelitian



GAMBAR 3. Skema alat uji



GAMBAR 4. Skema perekaman file data sinyal getaran

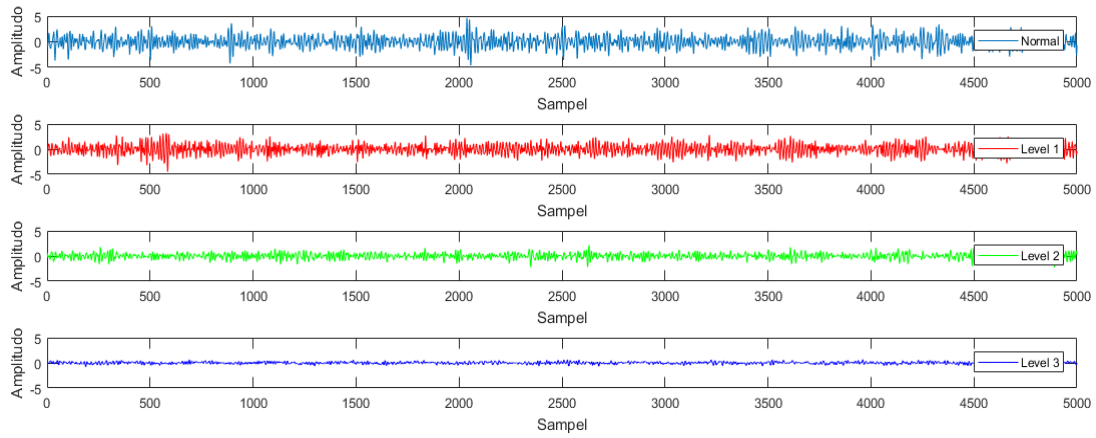
#### HASIL DAN PEMBAHASAN

Sinyal mentah getaran ditampilkan pada Gambar 5. Terlihat jelas ada perbedaan antara sinyal getaran dari pompa normal dan kavitasi, tetapi sangat sulit untuk membedakan sinyal kondisi normal dan kavitasi dini. Maka perlu digunakan analisa lebih mendalam dengan menggunakan parameter statistik.

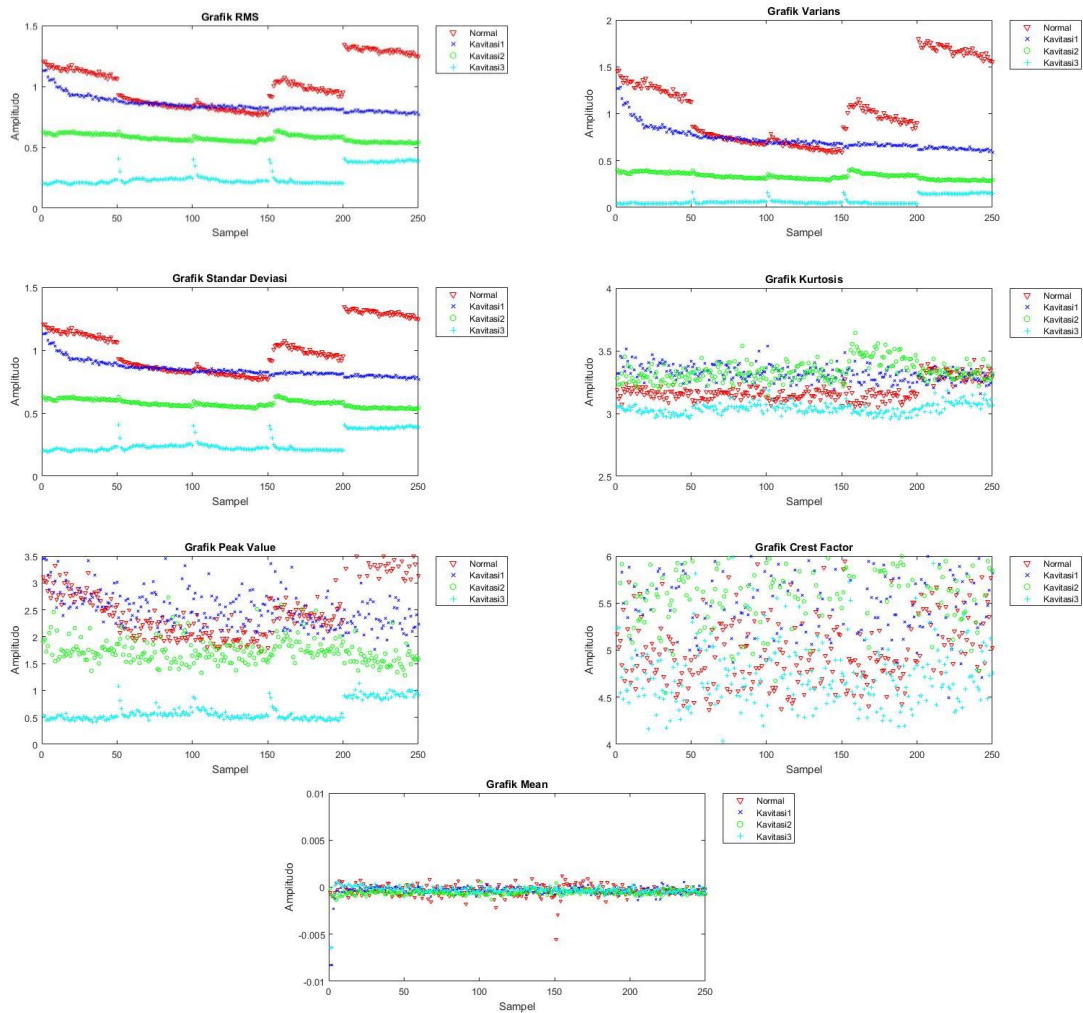
Tujuh parameter statistik dari setiap sinyal getaran dianalisa dan di bandingkan pada Gambar 6. Parameter statistik *RMS*, *SD*, *variance* mampu menunjukkan perbedaan kondisi normal, kavitasi menengah dan kavitasi

lanjut, namun belum sempurna terhadap kavitasi dini. *Peak value* dan *kurtosis* hanya mampu untuk mendeteksi kavitasi lanjut. *Crest factor* dan *mean* sama sekali tidak dapat untuk mendeteksi kavitasi pada data sinyal vibrasi. Hasil 7 parameter statistik menunjukkan bahwa tidak ada parameter statistik yang mampu untuk membedakan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi dini.

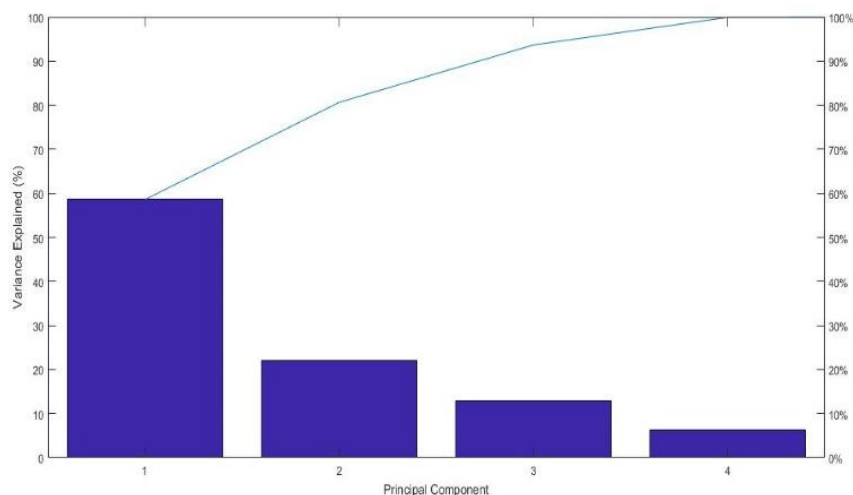
Oleh karena itu perlu metode yang lebih efisien yaitu metode yang bisa memanfaatkan semua informasi dari tujuh parameter statistik tersebut dengan melakukan kombinasi domain waktu dengan *PCA*.



GAMBAR 5. Sinyal getaran domain waktu



GAMBAR 6. Hasil parameter statistik

GAMBAR 7. Grafik pareto dari 4 *principal component*TABEL 2. Kontribusi parameter statistik pada masing-masing *principal component*

Paramater	PC1	PC2	PC3	PC4
<i>RMS</i>	0,441997	0,18168	-0,2051	-0,13667
<i>SD</i>	0,441996	0,181684	-0,2051	-0,13666
<i>Peak Value</i>	0,453976	-0,04195	0,106258	-0,20982
<i>Kurtosis</i>	0,377474	-0,22962	0,128974	0,886271
<i>Variance</i>	0,44605	0,159481	-0,18906	-0,07637
<i>Crest Factor</i>	0,248331	-0,48124	0,699428	-0,33594
<i>Mean</i>	-0,00826	0,788966	0,602493	0,120253

Dari hasil ekstraksi 7 parameter statistik menghasilkan data sebanyak 3500 untuk masing-masing kondisi, 1750 data di *training* dan 1750 di *testing* pada masing-masing kondisi. Data *training* dinormalisasi dan dilatih dari tiap kondisi dengan menggunakan *PCA* dan akan menghasilkan data *loading* matriks. Setelah itu, *loading* matriks dikalikan dengan data *testing* pada setiap kondisi sehingga menghasilkan *score* yang digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi normal dan kondisi kavitasi pada pompa.

Hasil *PCA* digambarkan dalam bagan Pareto pada Gambar 7, *PC 1* menyimpan data dengan nilai variansi sebesar 58,6%, *PC 2* menyimpan data dengan nilai variansi sebesar 22%, *PC 3* menyimpan dengan nilai variansi data sebesar

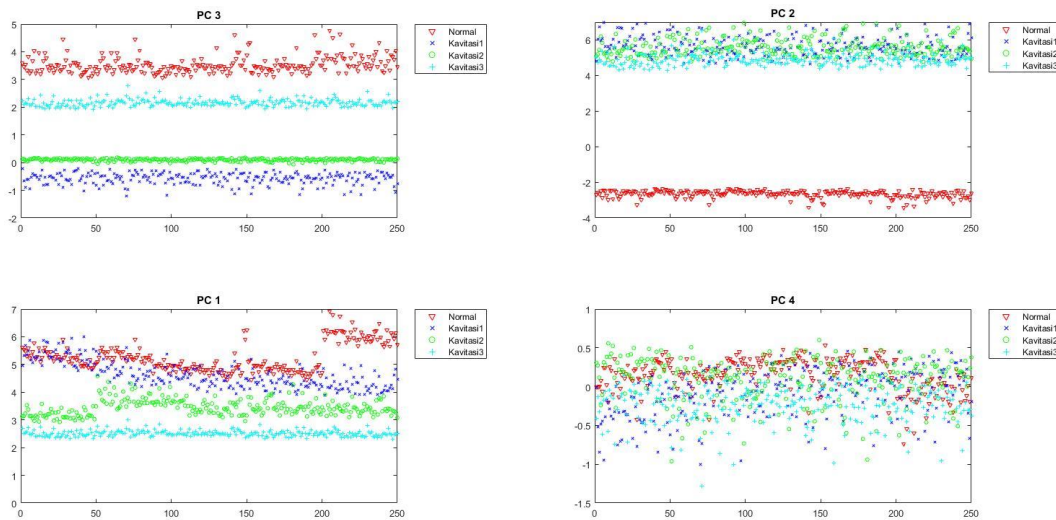
13% dan *PC 4* menyimpan data dengan nilai variansi sebesar 6,2%. Dengan jumlah variansi data dari 3 *PC* sebesar 93,68%, sudah mampu untuk memberikan informasi yang cukup untuk mewakili semua data.

Dari hasil grafik Pareto dapat dilihat kontribusi 7 parameter statistik pada masing-masing *PC*. Pada Tabel 2, tiap parameter mempunyai karakteristik yang berbeda untuk memberikan tingkat kontribusinya. Hasil data yang dominan pada *PC 1* adalah parameter statistik *peak value*, *variance*, *RMS* dan *standard deviation*. Nilai data yang dominan pada *PC 2* adalah *crest factor*, pada *PC 3* adalah *mean* dan pada *PC 4* adalah *kurtosis*. Selanjutnya 4 *PC* tersebut di plot untuk melihat perbandingan pada masing-masing kondisi setelah di *PCA*.

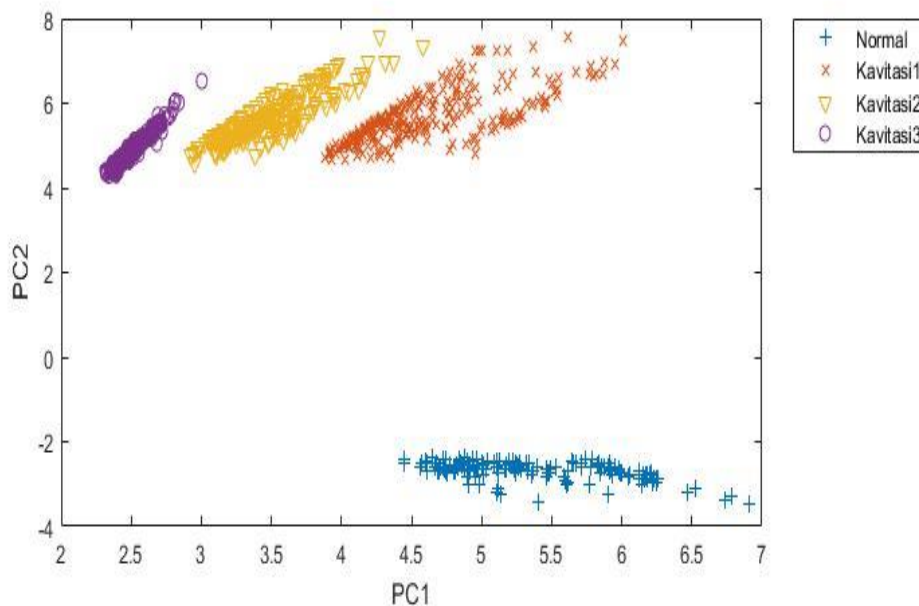


Gambar 8 menunjukkan pada  $PC 1$ ,  $PC 2$ ,  $PC 3$  dan  $PC 4$  terlihat data mirip dengan kontribusi parameter statistik yang paling dominan. Namun dengan hanya satu  $PC$  terlihat tidak dapat memberikan informasi yang cukup untuk membedakan antara normal dan kavitasi. Hal ini dikarenakan informasi data yang berbeda-beda tersimpan dalam  $PC$ . Sehingga perlu menggabungkan beberapa  $PC$  untuk dapat memberikan informasi yang maksimum untuk mengidentifikasi antara kondisi normal dengan kondisi kavitasi.

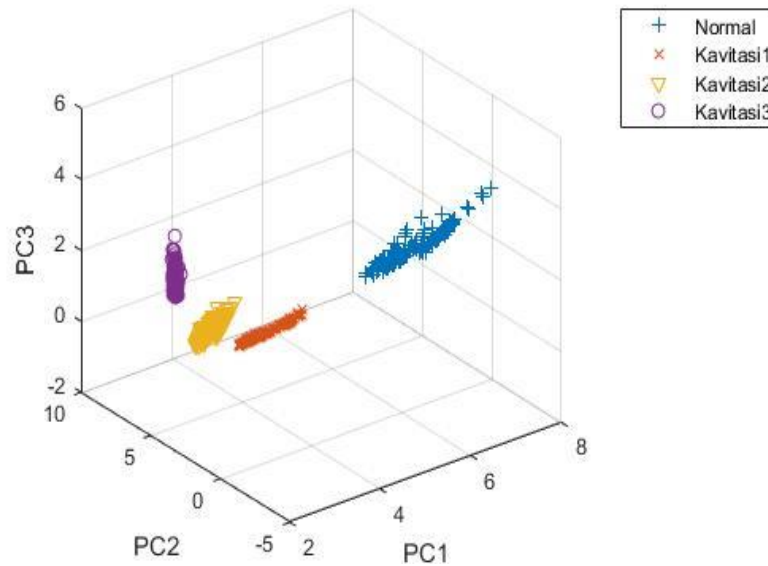
Selanjutnya dapat dilihat pada gambar,  $PC 1$  dan  $PC 2$  menyimpan varians data paling besar. Hasilnya 2  $PC$  tersebut sudah mengandung 80,6% informasi dari 100% varians data. Dengan menggunakan 2  $PC$  ini, dapat dilihat pada Gambar 9 sudah mampu membedakan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi, namun pada kondisi kavitasi ini terlihat data masih belum saling berkelompok. Oleh karena itu perlu ditambahkan lagi beberapa  $PC$  yang lain untuk memberikan informasi lebih pada varians data.



GAMBAR 8. Plot baru setelah di  $PCA$



GAMBAR 9. Klasifikasi kondisi pompa  $PC 1$  dan  $PC 2$



GAMBAR 10. Klasifikasi kondisi pompa PC 1, PC 2 dan PC 3

Agar informasi yang di dapatkan pada proses PCA semakin akurat, maka dilakukan penambahan satu PC lagi, yaitu PC ke 3 yang memiliki nilai sebesar 13% varians, sehingga informasi pada data menjadi 93,68%. Gambar 10 menunjukkan adanya perbedaan, terlihat data pada masing masing kondisi sudah berkelompok dan tidak ada data yang saling *overlap*. Hasilnya terlihat jelas bahwa PCA berhasil mengklasifikasikan antara kondisi normal, kavitasi dini, kavitasi menengah dan kavitasi lanjut. Hal ini disebabkan oleh penambahan PC 3 yang berhasil menambahkan informasi pada varians data. Hasil ini sesuai dengan temuan Kamiel (2015) dan teori dimana semakin besar jumlah varians yang disimpan di dalam PC, maka akan memberikan akurasi identifikasi yang lebih tinggi.

#### KESIMPULAN

Setiap parameter statistik domain waktu menghasilkan karakteristik dan informasi spesifik yang berbeda terhadap distribusi data sinyal vibrasi, yaitu:

- RMS*, *SD*, *variance* mampu menunjukkan perbedaan kondisi normal, kavitasi menengah dan kavitasi lanjut, namun belum sempurna terhadap kavitasi dini.
- Peak value* dan *kurtosis* hanya dapat mendeteksi kavitasi lanjut. Namun tidak dapat mendeteksi kavitasi dini dan kavitasi menengah.

- Crest factor* dan *mean* sama sekali tidak dapat untuk mendeteksi kavitasi pada data sinyal vibrasi.

Metode analisa sinyal vibrasi berbasis *Principal Component Analysis (PCA)* dapat digunakan dalam mendeteksi fenomena kavitasi dini pada pompa sentrifugal. Metode ini berhasil dalam mentransformasikan 3500 set data dari 7 parameter statistik menjadi 7 *principal component (PC)*. Setiap PC memiliki nilai varians yang berbeda, dimana PC pertama memiliki varians paling besar dan PC terakhir memiliki varians paling kecil. Dengan 3 PC yang memiliki varians terbesar, menghasilkan akurasi identifikasinya mencapai 93,68% varians. Sehingga PCA mampu mengklasifikasi dengan jelas antara kondisi normal, kavitasi dini, kavitasi menengah dan kavitasi lanjut pada pompa sentrifugal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Al Hashmi, S.A. (2009). Statistical Analysis of Vibration Signals for Cavitation Detection. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Application* (pp.78 – 82). Kuala Lumpur, Malaysia.
- Al Tobi, M.A.S., & Al Sabari, M.H.J. (2016). Cavitation Detection of Centrifugal Pump Using Time-Domain Method. *International Journal Of Engineering Research and General Science*, 4 (5), 161-167.

- Johnson, R.R., & Wichern, D.A. (2007) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall.
- Kamiel, B.P. (2015). *Vibration-Based Multi-Fault Diagnosis for Centrifugal Pumps*. (Doctoral thesis, Curtin University, Perth, Australia).
- Li, W., Shi, T., Liao, G., & Yang, S. (2003). Feature Extraction and Classification of Gear Faults Using Principal Component Analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 9(2), 132-143.
- Luo, Y., Zhixiang, X., Sun, H., Yuan, S., & Yuan, J. (2015). Research on Statistical Characteristics of Vibration in Centrifugal Pump. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11).
- Pirra, M., Gandino, M., Torri, A., Garibaldi, L., & Machorro-Lopez, J.M. (2011). PCA Algorithm for Detection, Localisation and Evolution of Damages in Gearbox Bearings. *Journal of Physics: Conference Series*, 305(1).
- Pratama, M.S.B. (2017). *Metode Deteksi Fenomena Kavitas Pompa Sentrifugal Berbasis Domain Waktu Dan Domain Frekuensi Sinyal Getaran*. (Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia).
- Ramadhan, R.S. (2017). *Pengaruh Kecepatan Operasi Pompa Sentrifugal Terhadap Sensitifitas Metode Deteksi Fenomena Kavitas Berbasis Parameter Statistik Domain Waktu*. (Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia).
- Sakthivel, N.R., Sugumaran, V., & Babudevasenapati, S. (2010). Vibration Based Fault Diagnosis of Monoblock Centrifugal Pump Using Decision Tree. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4040-4049.
- Santosa B. (2007). *Data Mining (Teori dan Aplikasi)*. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Sukardi, I. A., Isranuri, I., & Lubis, Z. (2012). Studi Awal Kajian Bubble Pada Pompa Sentrifugal Yang Diukur dengan Sinyal Vibrasi. *Jurnal Dinamis*, 1(11), 1-13.
- Sularso (1993). *Pompa dan Kompresor*. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Susantyo (2013). *Ekstraksi Fitur Untuk Pengenalan Wajah Pada Ras Mongoloid Menggunakan Principal Component Analysis (PCA)*. (Skripsi, Universitas Dian Nuswantoro, Semarang, Indonesia).
- Al-Thobiani, F. (2011). *The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps*. (Doctoral thesis, University of Huddersfield, England).

---

 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

Ikhsan Aprima Kausar

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

Email: isankausar@gmail.com