

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Akuisisi Data

Akuisisi data sinyal getaran pada penelitian ini dilakukan dengan 4 variasi kondisi, yaitu kondisi normal, kondisi kavitasi level 1 pada tutupan katup (720°) kondisi kavitasi level 2 pada tutupan katup (1440°), dan kondisi kavitasi level 3 pada tutupan katup (2160°). Hasil akuisisi data pada setiap variasi kondisi seperti yang di tampilkan pada Tabel 4.1 menghasilkan 500 *file* data mentah pada setiap variasi kondisi, sehingga total diperoleh 2000 *file* data mentah. Data mentah yang dihasilkan pada proses akuisisi data adalah dalam bentuk domain waktu.

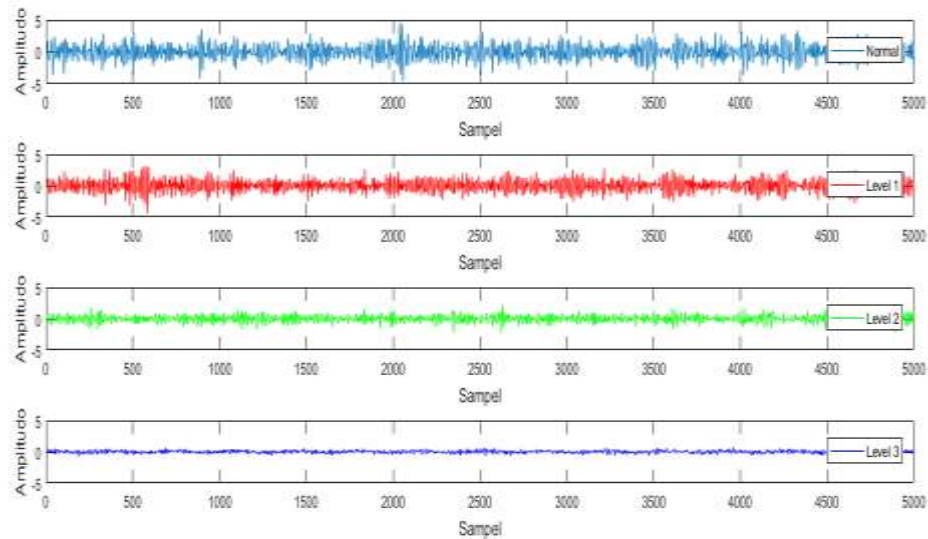
Tabel 4. 1 Hasil akuisisi data

Variasi Kondisi	Pengaturan Operasi			Output		
	Tutupan Katup ($^\circ$)	Kecepatan Poros (RPM)	Sampling Rate (Hz)	Laju Aliran Air (l/m)	Tekanan Discharge (bar)	Tekanan Suction (bar)
Normal	0	2850	17066	110	0.7	0.1
Kavitasi Level 1	720	2850	17066	110	0.8	0.12
Kavitasi Level 2	1440	2850	17066	102.5	0.8	0.22
Kavitasi Level 3	2160	2850	17066	60	1.2	0.4

Hasil yang diperoleh terlihat memiliki perbedaan seperti laju aliran air yang nilainya semakin berkurang pada setiap kondisi. Hal ini terjadi dikarenakan terhambatnya laju aliran fluida pada sisi *suction* pompa, sehingga berdampak pada berkurangnya volume air yang mengalir pada saluran pipa. Sedangkan nilai tekanan yang di hasilkan berbanding terbalik dengan berkurangnya nilai laju aliran. Dengan berkurangnya volume air yang dialirkan, tekanan *vacuum* pada sisi *suction* dan *discharge* akan semakin menungkat.

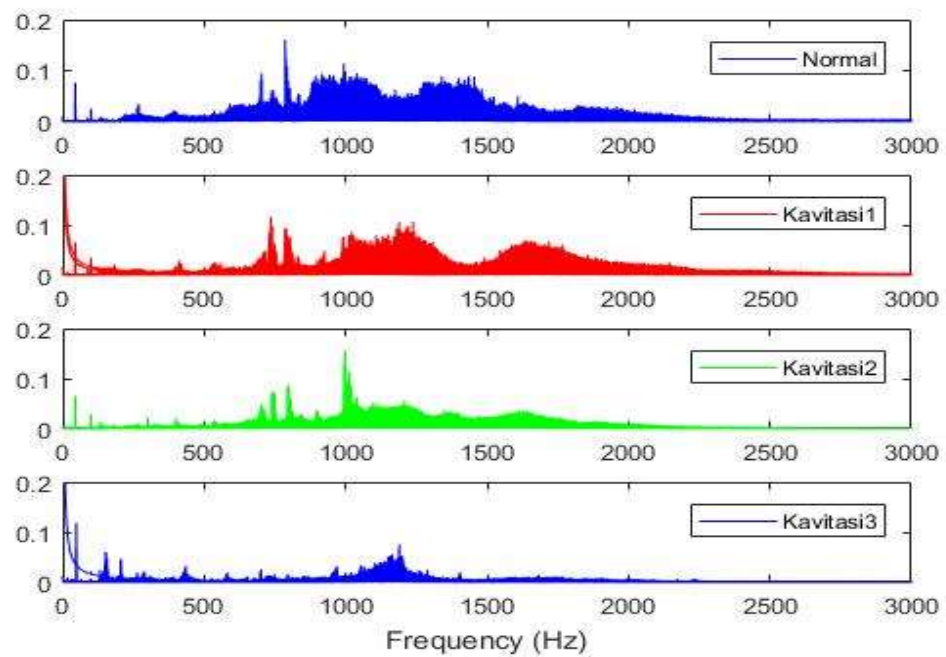
Perbandingan nilai amplitudo dari sinyal getaran pada variasi setiap tingkat kondisi ditampilkan pada Gambar 4.1. Dapat terlihat bahwa hasil plot sinyal getaran pada setiap kondisi berebeda, namun pada kondisi dan kavitasi level 1 terlihat

perbedaan yang kurang signifikan. Sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut, yaitu dengan menggunakan parameter statistik.



Gambar 4. 1 Hasil plot data dalam domain waktu

Kemudian untuk mendapatkan data akuisisi dalam bentuk domain frekuensi dilakukan kalkulasi FFT yang akan ditampilkan pada Gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4. 2 Hasil plot data dalam domain frekuensi

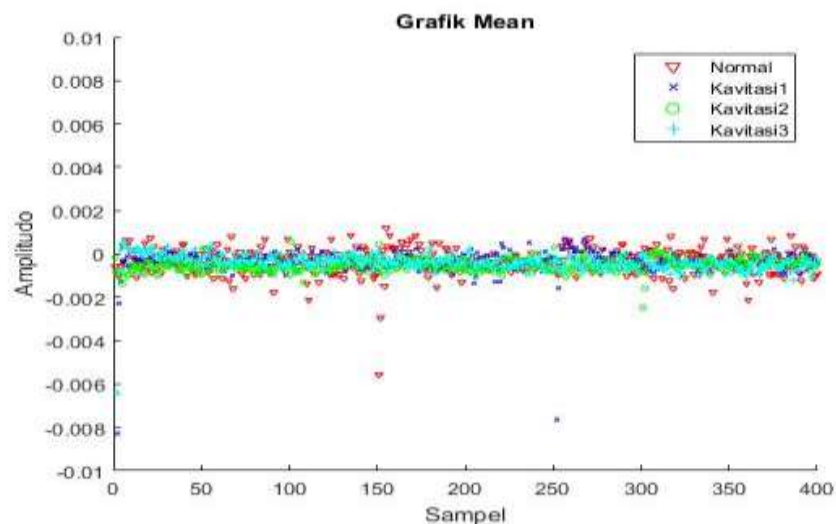
Dapat dilihat pada plot data dalam domain frekuensi, hasil terlihat bahwa pada kondisi normal nilai amplitudo relative paling besar dibandingkan dengan kondisi kavitasi level 1, level 2, dan level 3. Hal tersebut terjadi dikarenakan volume fluida air yang mengalir semakin sedikit dengan semakin besarnya juga tutupan katup. Sehingga tumbukan fluida air dengan impeller mengecil, oleh karena itu sinyal frekuensi yang semakin rendah.

4.2 Analisis Parameter Statistik

4.2.1 Hasil Ekstraksi Parameter Statistik Domain Waktu

a. *Mean*

Parameter statistik *mean* tidak efektif untuk membedakan antara kondisi normal dan 3 tingkat level kavitasi yang terjadi. Hal ini jelas terlihat pada Gambar 4.3, yang menunjukkan bahwa sebagian besar data hasil ekstraksi saling bertumpuk pada nilai amplitudo antara (-0.001 - 0.001).

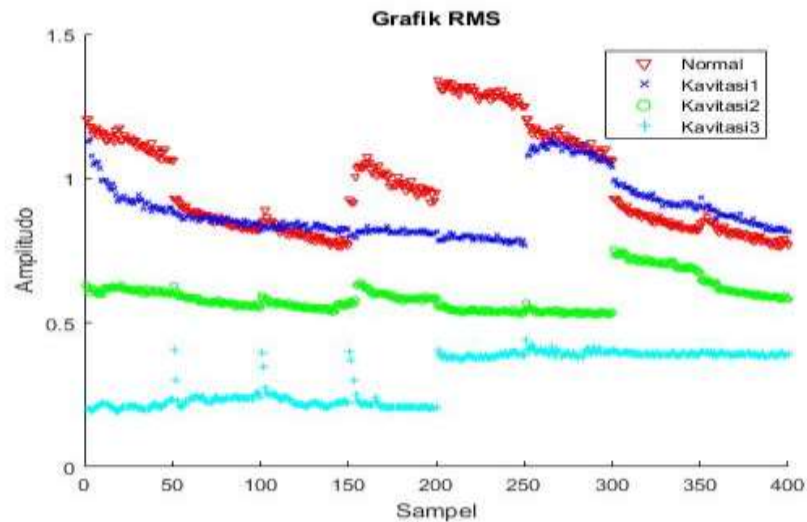


Gambar 4. 3 Plot ekstraksi parameter statistik *mean*

b. *Root Mean Square (RMS)*

Gambar 4.4 adalah hasil plot dari parameter RMS, terlihat pada setiap kondisi terpisah dengan jelas. Namun saat kondisi normal dan kavitasi level 1 masih

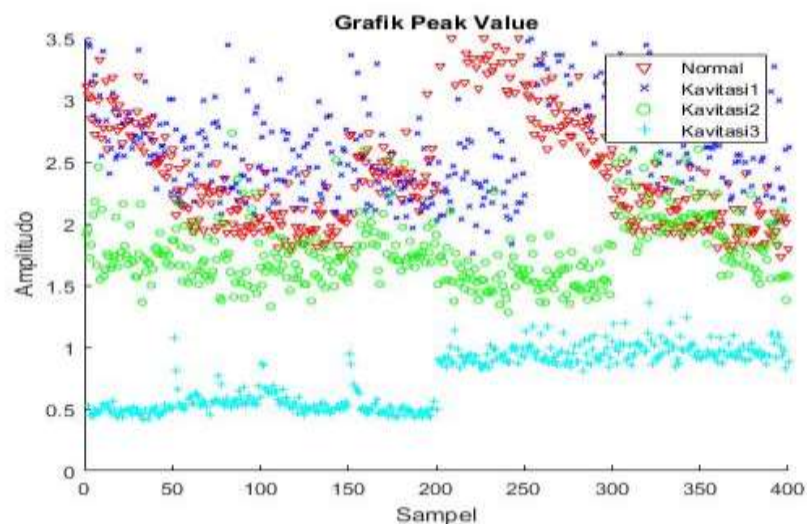
terdapat beberapa data yang bersinggungan. Dapat disimpulkan bahwa parameter RMS cukup efektif untuk mendeteksi kavitasi.



Gambar 4. 4 Plot ekstraksi parameter statistik RMS

c. *Peak Value*

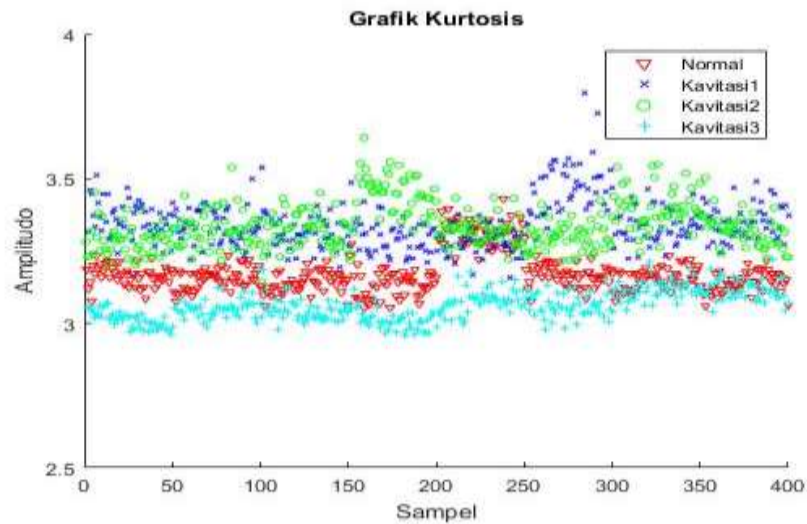
Plot hasil ekstraksi dari *peak value* dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4. 5 Plot ekstraksi parameter statistik *peak value*

Distribusi penyebaran data dari parameter ini menunjukkan bahwa pada kondisi kavitasi level 3 terlihat jelas, akan tetapi kurang efektif untuk mendeteksi kondisi kavitasi awal karena nilai amplitudo yang kurang seragam.

d. *Kurtosis*

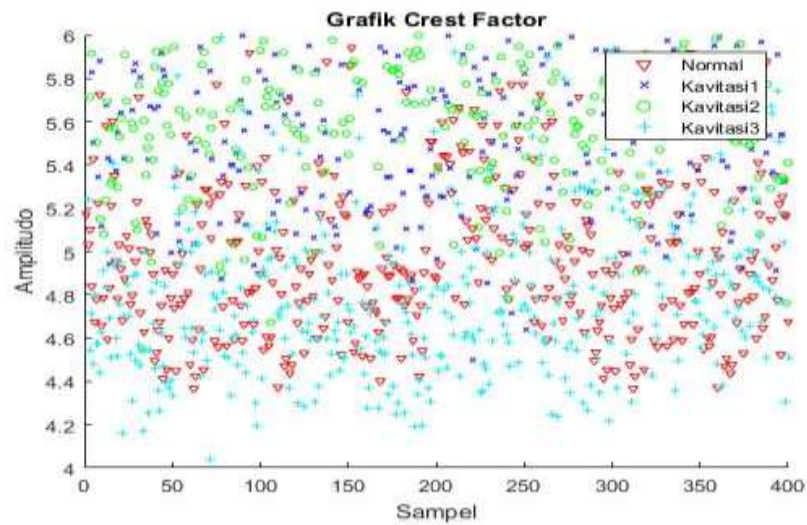


Gambar 4. 6 Plot ekstraksi parameter statistik *kurtosis*

Parameter *kurtosis*, pada setiap variasi kondisi terlihat tidak bisa terpisahkan secara signifikan. Walau pada Gambar 4.6 kondisi kavitasi level 3 terlihat jelas, namun pamater ini jelas kurang efektif untuk mendeteksi gejala kavitasi awal pada pompa sentrifugal.

e. *Crest Factor*

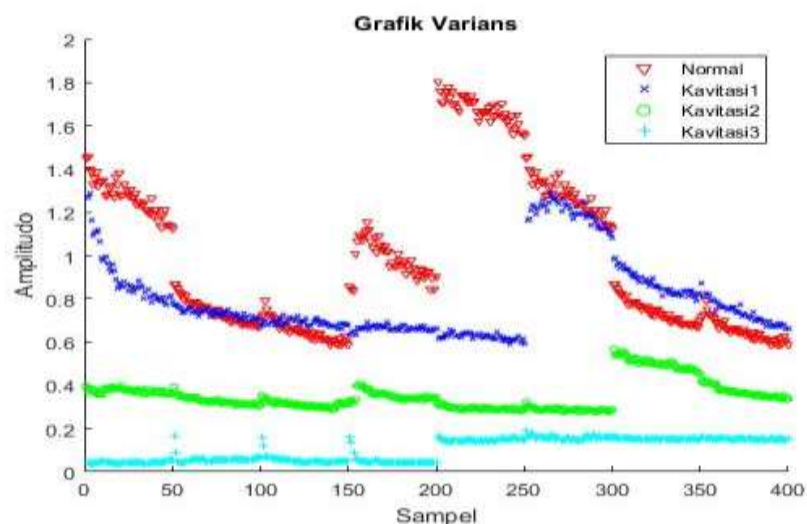
Dari kalkulasi parameter statistik *crest factor*, hasil menunjukan bahwa nilai amplitudo mengalami kenaikan dan penurunan yang tidak seragam, sehingga distribusi data menjadi acak. Bisa disimpulkan parameter ini tidak efektif, karena sama sekali tidak bisa membedakan kondisi normal dan kavitasi yang ditunjukan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Plot ekstraksi parameter statistik *crest factor*

f. *Variance*

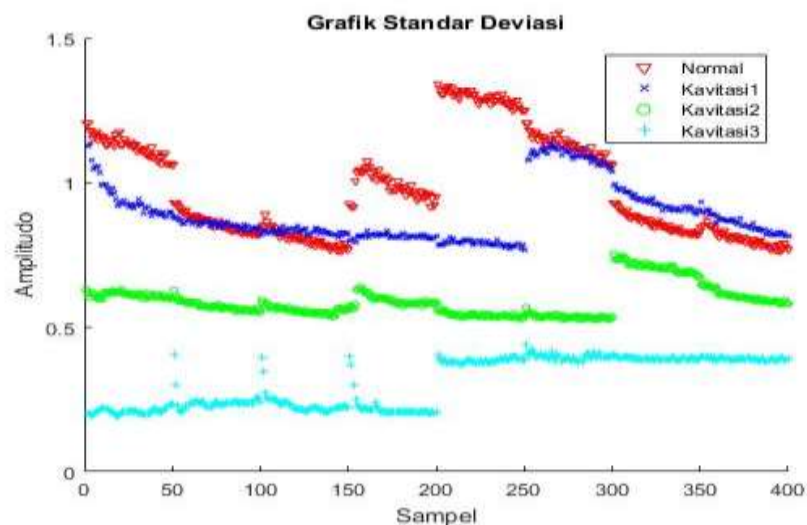
Gambar 4.8 adalah hasil ekstraksi parameter *variance*. Parameter ini memiliki karakteristik yang sama dengan RMS, yaitu kurang bisa menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi level 1. Walau pada kondisi kavitasi level 2 dan 3 kelompok data terpisah dengan jelas.



Gambar 4. 8 Plot ekstraksi parameter statistik *variance*

g. *Standard Deviation*

Parameter statistik *standard deviation* juga memiliki karakteristik yang sama dengan RMS dan variance, hasil plot grafik yang dihasilkan terlihat mirip yang bisa dilihat pada Gambar 4.9 di bawah ini. Parameter ini bagus untuk mendeteksi kondisi kavitasi lanjut, namun belum cukup efektif dalam memisahkan kelompok data kondisi normal dan kondisi kavitasi awal.



Gambar 4. 9 Plot ekstraksi parameter statistik *standard deviation*

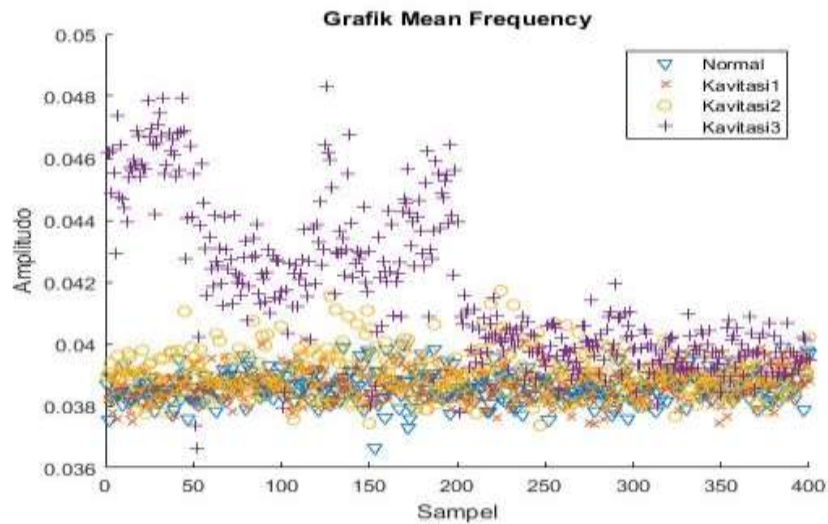
Dari hasil plot grafik tujuh parameter statistik domain waktu yang diusulkan yaitu *mean*, *RMS*, *peak value*, *kurtosis*, *crest factor*, *variance*, dan *standard deviation* dapat diketahui bahwa tidak semua parameter statistik secara efektif dapat membedakan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi level 1, kavitasi level 2, dan kondisi kavitasi level 3.

4.2.2 Hasil Ekstraksi Parameter Statistik Domain Frekuensi

a. *Mean frequency*

Parameter statistik mean frequency seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.10 menunjukkan, bahwa distribusi penyebaran kelompok data dari setiap kondisi saling bertumpuk. Kondisi kavitasi level 3 sebenarnya terlihat memiliki nilai

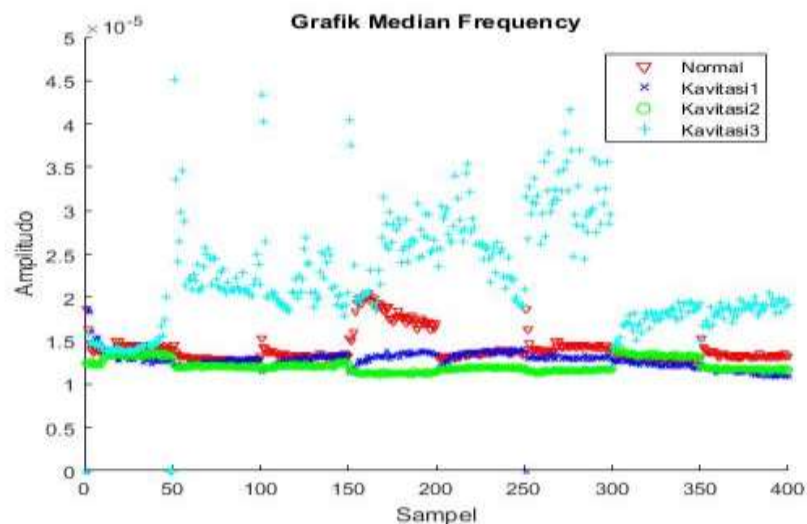
amplitudo yang lebih tinggi, namun tetap saja distribusi data masih terlalu acak. Sehingga parameter ini kurang efektif untuk mendeteksi fenomena kavitasi.



Gambar 4. 10 Plot ekstraksi parameter statistik *mean frequency*

b. *Median Frequency*

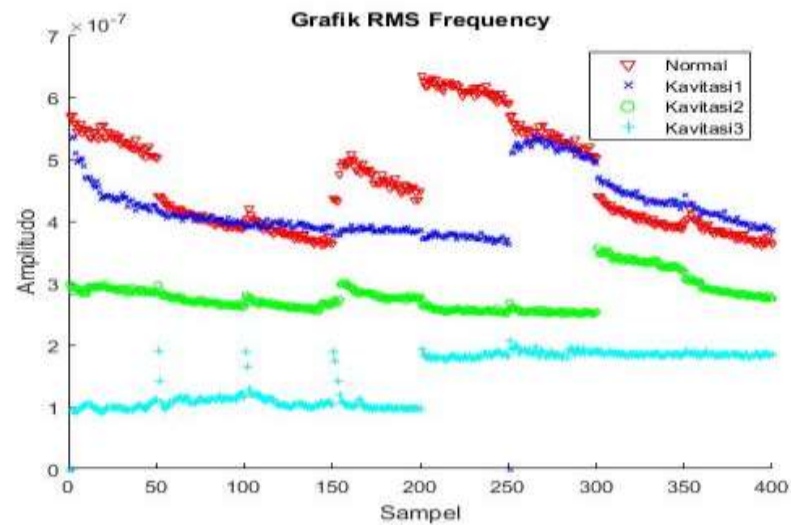
Parameter statistik ini dapat menunjukkan kelompok data dengan lebih jelas dibandingkan parameter statistik *mean frequency*. Walaupun demikian, parameter ini belum bisa dikatakan efektif untuk membedakan kondisi normal dan kondisi kavitasi, hal ini dikarenakan sebagian besar kelompok data masih terlihat saling bertumpuk, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Plot ekstraksi parameter statistik *median frequency*

c. *RMS Frequency*

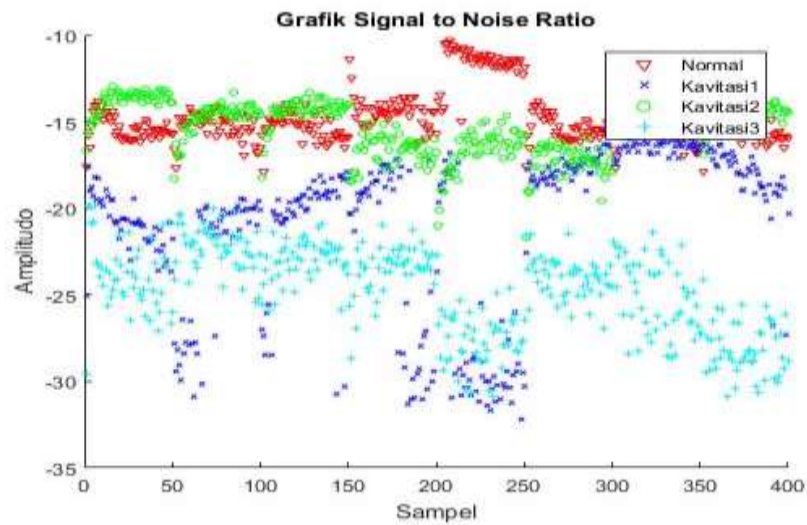
Gambar 4.12 menunjukkan hasil grafik dari ekstraksi parameter statistik *RMS frequency*. Terlihat jelas bahwa parameter ini dapat membedakan keempat variasi kondisi. Namun untuk mendeteksi kondisi normal dan kavitasi awal kurang, karena masih terlihat ada sebagian data yang memiliki nilai amplitudo yang sama. Walaupun begitu secara garis besar parameter ini bisa dikategorikan efektif.



Gambar 4. 12 Plot ekstraksi parameter statistik *RMS frequency*

d. *Signal to Noise Ratio (SNR)*

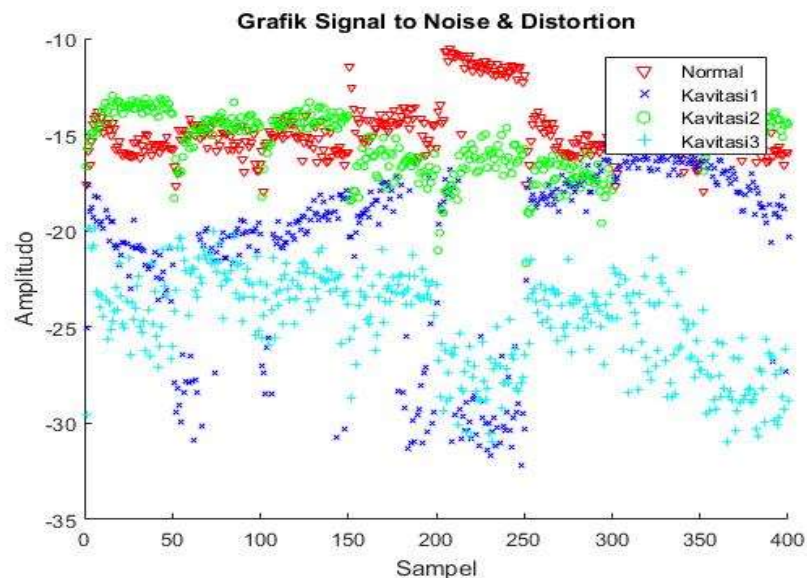
Hasil dari pengolahan data parameter ini kurang efektif untuk membedakan kondisi normal dan kavitasi awal yang terjadi. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.13, terlihat kelompok data tidak terpisah secara signifikan.



Gambar 4. 13 Plot ekstraksi parameter statistik SNR

e. *Signal to Noise Ratio and Distortion (SINAD)*

Parameter statistik ini memiliki karakteristik yang sama dengan parameter statistik SNR. Pada kondisi kavitasi level 2 dan level 3 terlihat kelompok data mulai terpisah, akan tetapi untuk kondisi normal dan kavitasi level 1 tidak terpisah secara signifikan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Plot ekstraksi parameter statistik SINAD

Seperti sebelumnya, parameter statistik yang diekstrak dari domain waktu. Hasil yang diperoleh juga menunjukkan jika tidak seluruh parameter statistik dapat secara signifikan memisahkan antara kondisi normal dan kondisi awal terjadinya kavitasi.

Hal ini menyatakan bahwa setiap parameter statistik dari domain waktu dan domain frekuensi memiliki karakteristik tersendiri, setiap parameter memberikan informasi yang spesifik terhadap data sinyal getaran. Hasil yang didapat belum bisa memisahkan dengan jelas, khususnya pada saat pompa dalam kondisi normal dan kondisi kavitasi level 1. Oleh karena itu diusulkan pengolahan data lebih lanjut menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) agar dapat mengoptimalkan seluruh informasi penting dari setiap parameter statistik. Dengan tujuan dapat dengan jelas membedakan antara kondisi normal dan kondisi awal kavitasi.

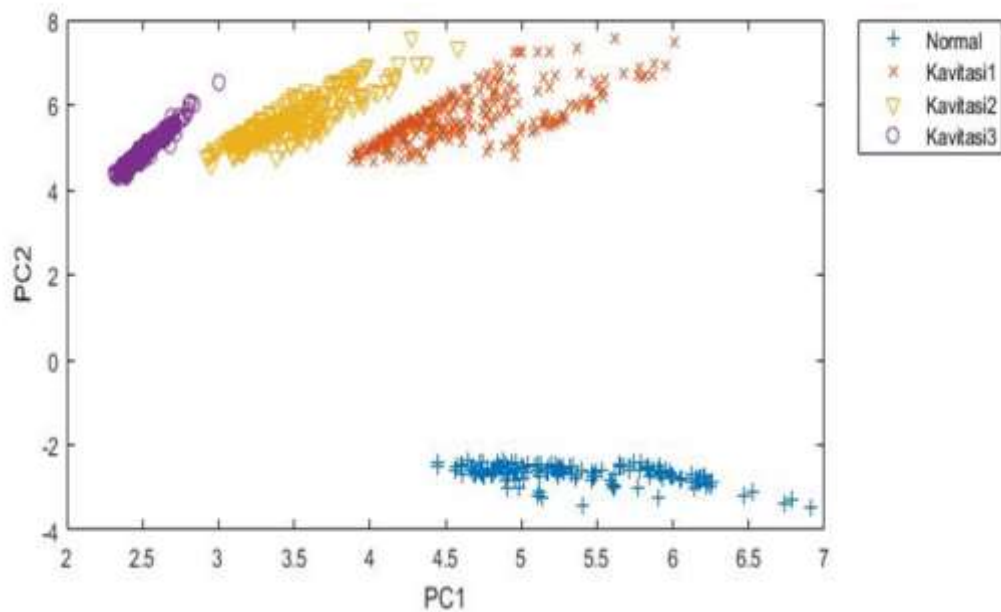
4.3 Analisis *Principal Component Analysis*

4.3.1 Analisis *Principal Component Analysis* Berbasis Domain Waktu

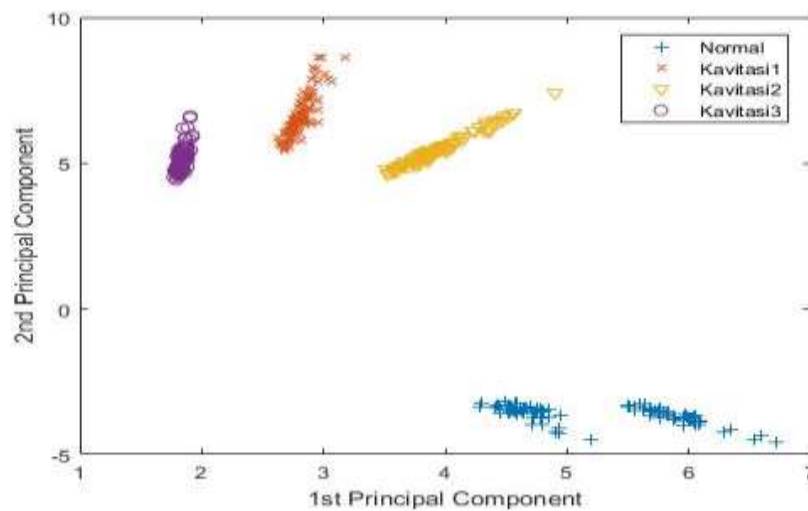
Pada analisis menggunakan metode PCA ini yang pertama kali dilakukan adalah menentukan pembagian antara data *training* dan data *testing* dari total 500 data pada setiap variasi kondisi. Dengan input data hasil ekstraksi dai 7 parameter statistik domain waktu yang telah diusulkan.

Saat awal melakukan proses pengolahan data dilakukan pembagian data dengan 250 data *training* dan 250 data *testing*. Setelah itu dilakukan percobaan lagi dengan menggunakan lebih banyak informasi pada data *training*, dengan pembagian 400 data *training* dan 100 data *testing* yang hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.16.

Kemudian data *training* pada setiap kondisi dinormalisasi melalui proses PCA dan menghasilkan data *loading* matriks. Setelah itu, data *loading* matriks tersebut dikalikan dengan data *testing* pada setiap kondisi sehingga menghasilkan *score*, yang akan digunakan untuk mengklasifikasikan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi.



Gambar 4. 15 Plot grafik PCA 250 data *training* dan 250 data *testing* dengan PC1 dan PC2

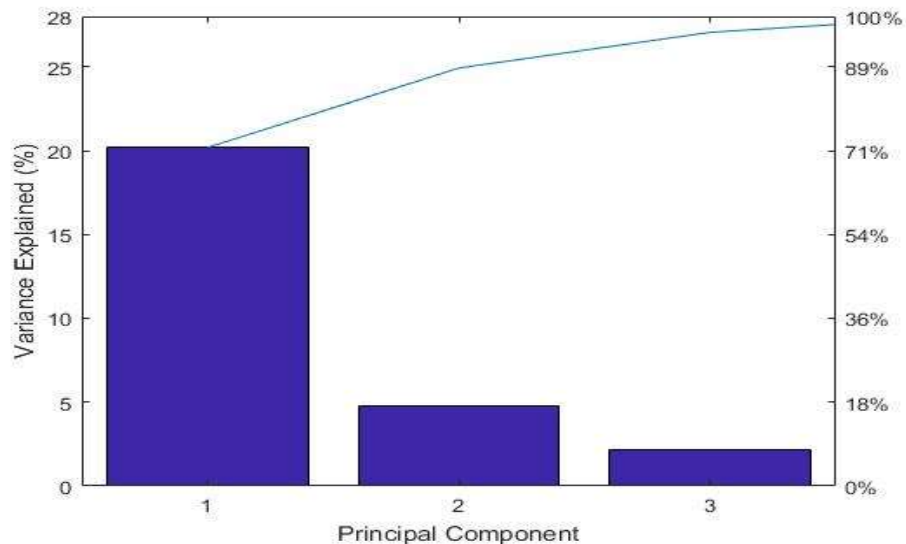


Gambar 4. 16 Plot grafik PCA 400 data *training* dan 100 data *testing* dengan PC1 dan PC2

Hasil plot grafik dengan menggunakan 2 PC yang mengandung 88,01% varians data pada Gambar 4.15, menunjukkan data sudah terlihat memisah dan membentuk kelompok tersendiri pada setiap kondisi dibandingkan dengan sebelum menggunakan proses PCA. Hal ini membuktikan bahwa metode PCA yang

memanfaatkan ekstraksi parameter statistik dari domain waktu dapat dengan baik membedakan setiap variasi kondisi, bahkan pada saat pompa kondisi normal dan kondisi kavitasi tahap awal dapat terlihat jelas.

Selanjutnya hasil plot grafik pada Gambar 4.16 memperlihatkan bahwa data sudah dengan baik memisah dan berkelompok seperti sebelumnya. Yang membedakan antara plot kedua grafik tersebut adalah bentang jarak antara data pada setiap variasi kondisi. Gambar 4.16 data memisah lebih jauh dan berkelompok lebih padat dibandingkan pada Gambar 4.15. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak data informasi yang digunakan, maka akan semakin baik juga hasil yang diperoleh.



Gambar 4. 17 grafik pareto parameter statistik domain waktu dari 3 PC

Untuk mengetahui efisiensi metode PCA, selanjutnya akan ditampilkan dalam bagan grafik pareto pada gambar 4.17. Terlihat PC1 menghasilkan persentase paling dominan dengan 72,09%, PC2 sebesar 16,92% dan PC3 sebesar 7,60%. Dengan jumlah total 96,61 dari 3 PC.

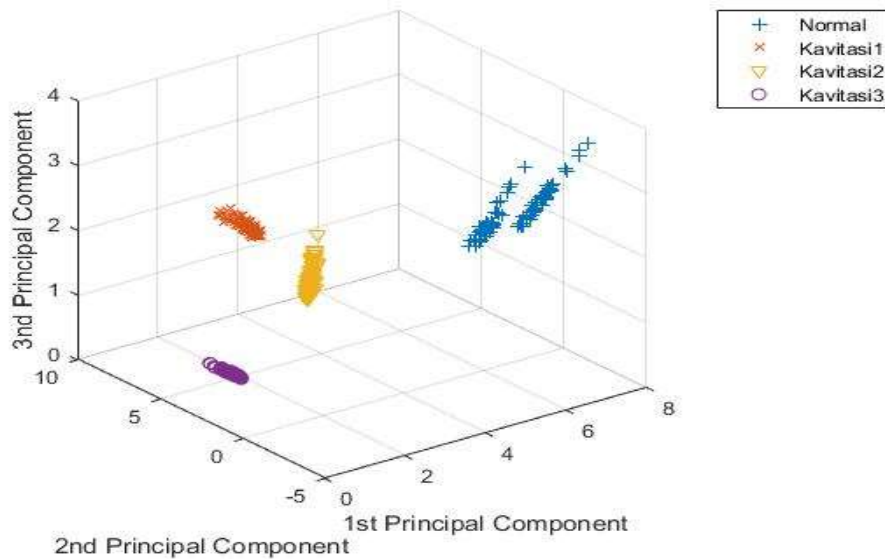
Untuk mengetahui distribusi kontribusi parameter statistik secara lengkap pada setiap PC, dapat dilihat pada Tabel 4.2. Ditampilkan parameter apa saja yang dominan pada PC1 adalah parameter statistik *RMS*, *standard deviation*, *peak value*,

variance, dan *kurtosis*. Nilai data yang dominan pada PC2 adalah *mean*, pada PC3 adalah *mean* dan *crest factor*.

Tabel 4. 2 Kontribusi parameter statistik domain waktu pada setiap PC

Parameter Statistik	PC1	PC2	PC3
RMS	0.450530699	0.204778	0.16372
standard deviation	0.450530628	0.20478	0.16372
peak value	0.461111546	0.06966	0.086521
kurtosis	0.354973728	-0.31206	0.104877
variance	0.454527199	0.178859	0.15376
crest factor	0.22033608	-0.606	0.580426
mean	0.016464327	0.643951	0.753237

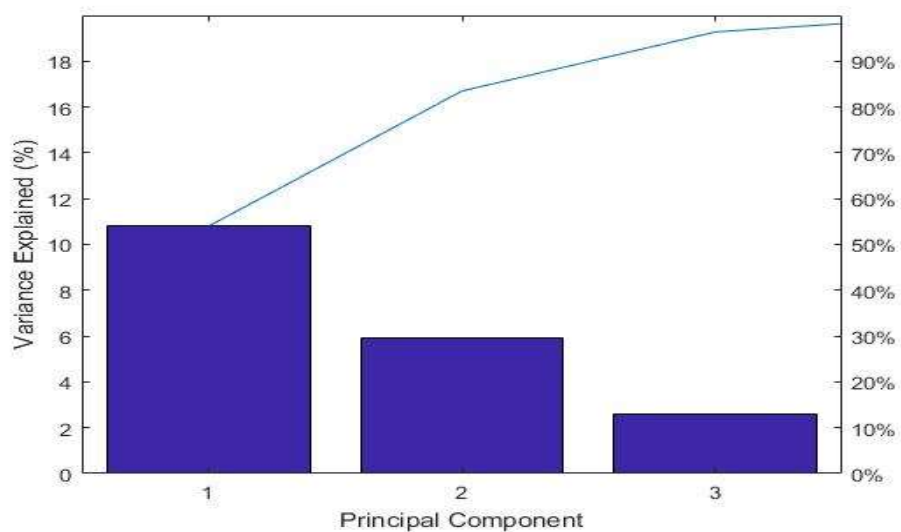
Agar informasi yang di didapatkan pada proses *PCA* semakin akurat, maka dilakukan penambahan satu PC lagi, yaitu PC ke 3 yang memiliki nilai sebesar 7,60% varians data sehingga informasi pada data menjadi 96,61%. Gambar 4.18 menunjukkan adanya perbedaan dari gambar 4.16, terlihat data pada masing masing kondisi sudah berkelompok dan tidak ada data yang bertumbuk. Hasilnya terlihat jelas bahwa *PCA* berhasil mengklasifikasi antara kondisi normal, kavitasi awal, kavitasi menengah dan kavitasi lanjut.



Gambar 4. 18 Plot grafik PCA domain waktu dengan PC 1, PC 2, dan PC 3

4.3.2 Analisis *Principal Component Analysis* Berbasis Domain Frekuensi

Kemudian dilakukan juga proses PCA dengan menjadikan input data parameter statistik yang di ekstraksi dari domain frekuensi. Disini pembagian data langsung diputuskan dengan 400 data *training* dan 100 data *testing*, karena dari hasil pada parameter proses PCA pada domain waktu sudah membuktikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan pembagian data 250 data *training* dan 250 data *testing*.



Gambar 4. 19 grafik pareto parameter statistik domain frekuensi dari 3 PC

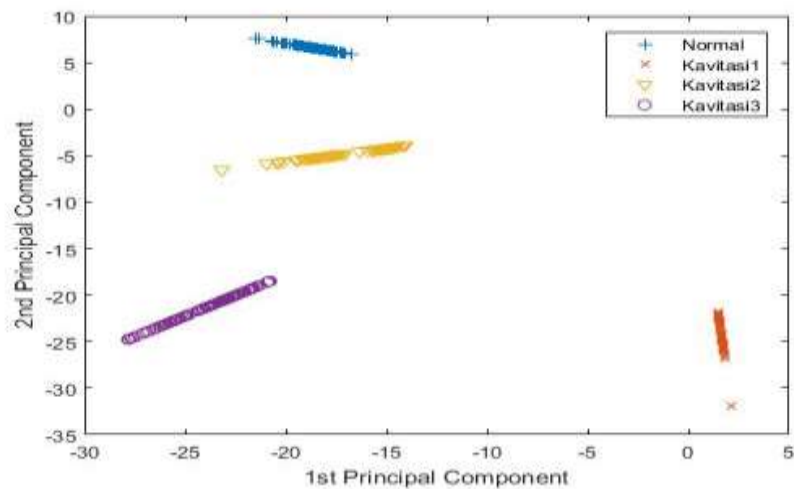
Hasil plot grafik pareto yang ditampilkan dari informasi yang diambil dari ekstraksi parameter statistik domain frekuensi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19, yaitu PC1 menampilkan persentase sebesar, 53,99%, PC2 sebesar 24,49%, dan PC3 sebesar 12,89%.

Setiap kontribusi parameter statistik pada masing-masing PC dapat dilihat pada Tabel 4.3. Pada PC1 kontribusi parameter statistik yang paling dominan yaitu *RMS Frequency*, *SNR*, dan *SINAD*. Pada PC2 adalah *median frequency*, dan terakhir pada PC3 adalah *mean frequency* dan *median frequency*.

Tabel 4. 3 Kontribusi parameter statistik domain frekuensi pada setiap PC

Parameter Statistik	PC1	PC2	PC3
mean frequency	-0.13241	-0.48138	0.852371
median frequency	0.074971	0.779828	0.515437
RMS frequency	0.489754	0.269316	0.077477
SNR	0.60757	-0.20856	0.030239
SINAD	0.606504	-0.21003	0.029514

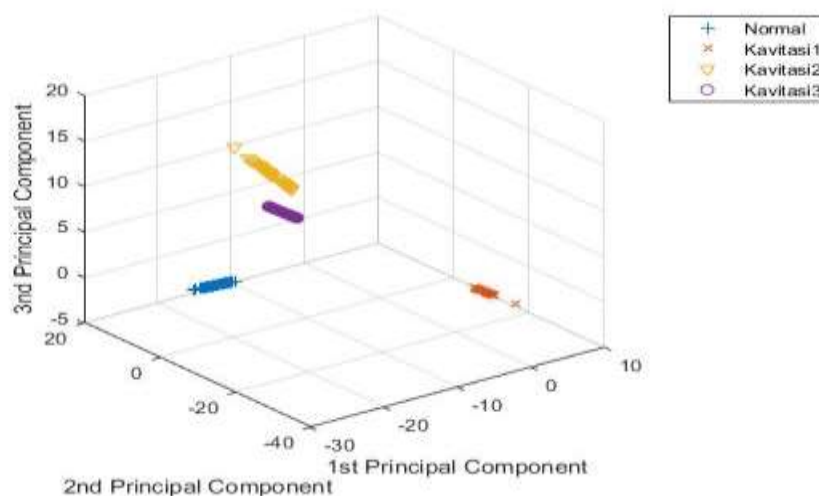
Berikutnya analisis dilanjutkan dengan membuat plot grafik dari PC1 dan PC2 yang dapat dilihat pada Gambar 4.20. Persentase nilai varians data dari jumlah 2 PC tersebut adalah 83.48% dari total 100% varians data. Hasilnya terlihat sangat baik dapat membedakan setiap kondisi, pada domain frekuensi jarak data yang memisah pada setiap kondisi terlihat lebih jauh dibandingkan hasil PCA dengan domain waktu, data juga berada dalam satu garis lurus sehingga diperoleh gambar grafik sangat rapih dan teratur. Namun pada kavitas 2 terlihat ada data yang terpotong pada tampilan grafik, kemudian dilakukan plot grafik menggunakan 3PC.



Gambar 4. 20 grafik PCA parameter statistik domain frekuensi dengan PC 1, dan PC 2

Dilanjutkan kembali plot grafik dengan menggunakan 3 PC, menambahkan PC ketiga yang memiliki nilai varians data sebesar 12,90%. Menjadikan total keseluruhan varians data yang terkandung dalam 3 PC adalah 96,39%.

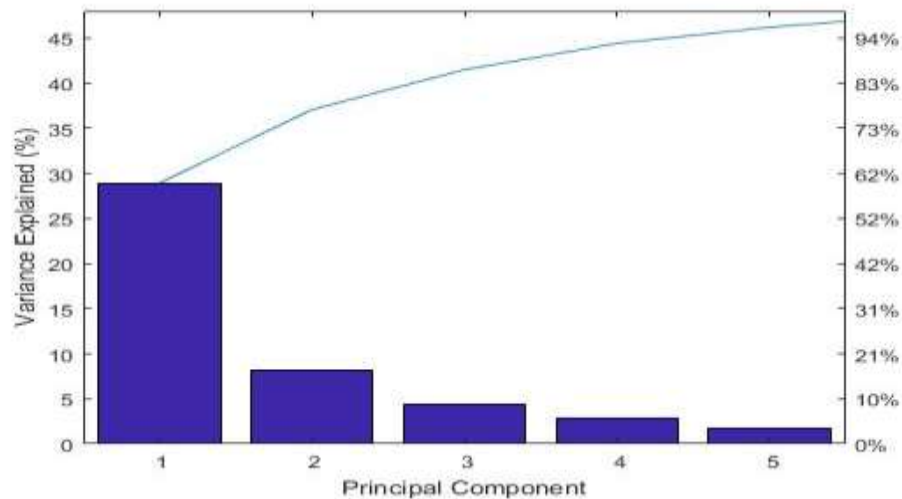
Pada Gambar 4.21 terlihat pada grafik bahwa data terlihat tetap pada 1 line lurus dan data terlihat menjadi lebih padat. Hal ini menunjukkan bahwa hasil ekstraksi parameter dari domain frekuensi bisa dengan sangat baik membedakan antara kondisi normal dan kondisi kavitasi, bahkan pada level kavitasi awalpun sudah terlihat jelas.



Gambar 4. 21 grafik PCA parameter statistik domain frekuensi dengan PC 1, PC 2, dan PC 3

4.3.3 Analisis *Principal Component Analysis* Berbasis Domain Waktu-Domain Frekuensi

Pada tahap akhir analisis ini dilakukan penggabungan antara hasil ekstraksi parameter statistik dari domain waktu dan domain frekuensi untuk mengetahui perbandingan dari ketiga metode yang diusulkan. Pertama ditampilkan plot hasil grafik pareto yang memanfaatkan input dari 7 parameter domain waktu dan 5 domain frekuensi, menjadi total keseluruhan ada 12 parameter statistik.



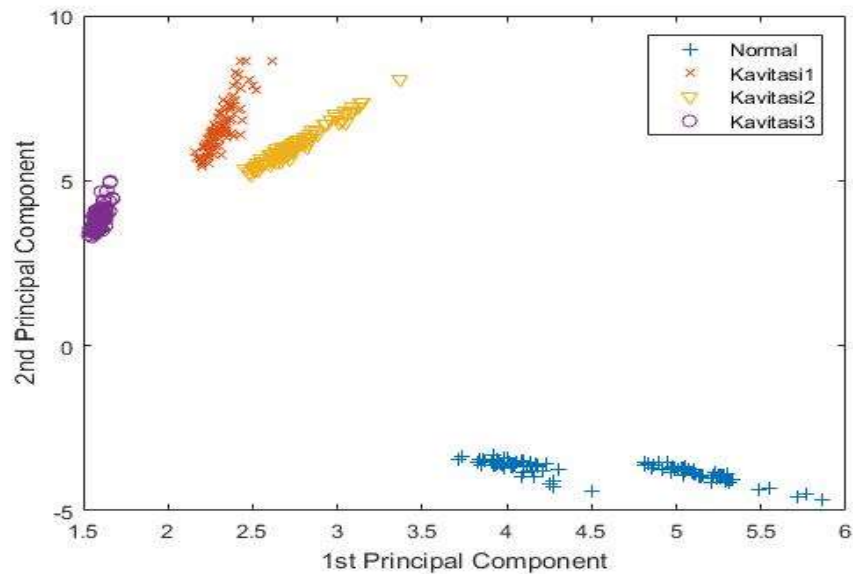
Gambar 4. 22 grafik pareto parameter statistik domain waktu dan domain frekuensi dari 3 PC

Plot grafik pareto pada Gambar 4.22 memperlihatkan terbagi menjadi 5 PC. Dengan PC1 memiliki nilai varians data sebesar 60,26% dengan kontribusi parameter statistik paling dominan terdapat *RMS*, *Standard Deviation* dan *Peak Value*. Pada PC2 sebesar 16,97% dengan kontribusi parameter statistik dari *RMS* dan *median frequency*. Kemudian informasi selanjutnya memiliki persentase yang kecil pada PC3 sebesar 9,23% , PC4 6,08%, dan PC5 3,72%. Total persentase dari penggabungan parameter ini mencapai 96,27%.

Tabel 4. 4 Kontribusi parameter statistik domain waktu dan parameter statistik domain frekuensi pada setiap PC

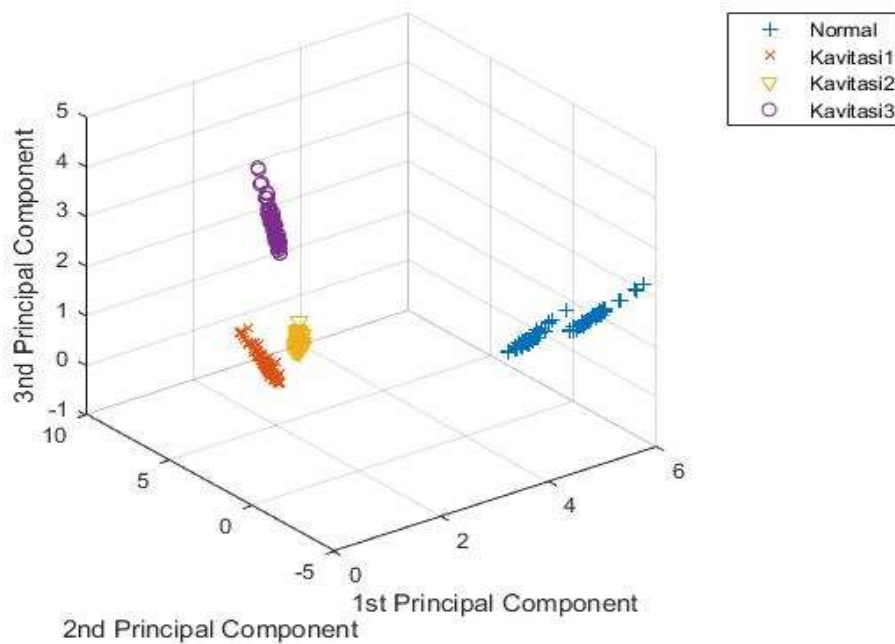
Parameter Statistik	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
RMS	0.371426	0.208172	-0.03715	-0.02276	-0.14964
standard deviation	0.371426	0.208173	-0.03715	-0.02276	-0.14964
peak value	0.375904	0.04204	0.169251	0.04327	-0.1584
Kurtosis	0.300502	-0.34421	0.098081	0.111724	-0.05151
Variance	0.375667	0.172663	-0.03116	-0.01499	-0.14771
crest factor	0.168276	-0.30206	0.536369	0.149859	-0.10426
Mean	0.000837	0.325236	0.392312	0.689957	0.439116
mean frequency	-7.94E-02	-0.18789	-5.09E-01	0.695699	-0.445
median frequency	5.20E-02	0.510082	-3.52E-01	0.030052	0.293685
RMS frequency	0.371452	2.08E-01	-3.71E-02	-0.02276	-0.14964
SNR	2.98E-01	-3.36E-01	-2.56E-01	0.015593	0.442212
SINAD	2.96E-01	-3.38E-01	-2.59E-01	0.014979	0.446918

Setiap kontribusi parameter statistik pada masing-masing PC dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada PC1 kontribusi parameter statistik paling dominan yaitu *RMS*, *standard deviation*, *peak value*, *kurtosis*, *variance*, *RMS frequency*. Pada PC2 adalah *mean*, *median frequency*, dan pada PC3 adalah *mean* dan *crest factor*. PC 4 adalah *mean & mean frequency*, dan terakhir PC 5 yaitu *mean*, *SNR* dan *SINAD*.



Gambar 4. 23 grafik PCA parameter statistik domain waktu dan domain frekuensi dengan PC 1, dan PC 2

Selanjutnya dilakukan plot menggunakan informasi dari 2 PC paling tinggi dengan persentase 77.23%. Hasil dapat dilihat pada Gambar 4.23 bahwa data pada setiap variasi kondisi sudah terlihat memisah, namun pada kondisi normal data terlihat terbagi menjadi 2 kelompok data. Kemudian ditambahkan lagi 1 PC lagi yaitu PC3 menjadi total persentase 86% yang ditunjukkan pada Gambar 4.24. hasil memperlihatkan bahwa pada data terlihat masih memisah dan berkelompok.



Gambar 4. 24 grafik PCA parameter statistik domain waktu dan domain frekuensi dengan PC 1, PC 2, dan PC 3

Dapat disimpulkan bahwa dengan menggabungkan input dari hasil ekstraksi parameter statistik dari domain waktu dan domain frekuensi dapat membedakan setiap kondisi variasi. Namun hasil yang paling efektif adalah hasil dari PCA yang diekstraksi menggunakan domain frekuensi, karena menampilkan grafik dengan rentang pemisahan data pada paling jauh dan pengelompokan data paling padat pada setiap variasi kondisi.