

Multivariate Statistical Process Control untuk Mendeteksi Kerusakan Bearing

Hani Nurhapilah*, Sutawanir Darwis

Prodi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Islam Bandung, Indonesia.

*haninurhapilah52@gmail.com, std.darwis@gmail.com

Abstract. Multivariate Statistical Process Control is intended to see the stability of a production process so that it becomes effective. This method was developed to detect bearing damage through the T^2 Hotelling control chart. Out-of-control is used as a tool to detect bearing condition. The machine is a unit of various interrelated components, resulting in a series of movements. Bearings are important machine components, supporting the shaft to rotate without experiencing excessive friction. Bearing damage detection is important to ensure optimal performance in an industry. The data used is secondary data from the results of bearing vibration experimental tests from the FEMTO-ST Institute. The vibration data used consists of seven bearings with various conditions, each of which consists of two directions, namely horizontal and vertical. Then, the variance features and RMS bearing1_2 and bearing1_4 are taken for data processing. Furthermore, the data is divided into two phases, namely phase-I which is assumed to be the bearing under normal conditions and phase-II which is assumed to be the bearing to be tested. After that, the calculation of the upper control limit (UCL) is carried out in phase-I, and is used in phase-II to detect bearing conditions. The results of tests carried out in phase-II show that there are points that are out-of-control so that it can be said that there are abnormalities in the bearings which may indicate that there are bearings that are abnormal but not necessarily damaged.

Keywords: *Multivariate Statistical Process Control, T2 Hotelling Control Chart, Bearing Fault Detection, Out-of-Control.*

Abstrak. *Multivariate Statistical Process Control* diperuntukkan untuk melihat stabilitas proses dari suatu produksi agar menjadi efektif. Metode ini dikembangkan untuk mendeteksi kerusakan *bearing* melalui diagram kendali T^2 Hotelling. *Out-of-control* digunakan sebagai alat untuk mendeteksi kondisi *bearing*. Mesin merupakan kesatuan dari berbagai komponen yang saling berkaitan, sehingga menghasilkan suatu rangkaian gerakan. *Bearing* merupakan komponen mesin yang penting, menumpu agar poros dapat berputar tanpa mengalami gesekan yang berlebihan. Deteksi kerusakan *bearing* penting dilakukan untuk menjamin performa optimal sebuah industri. Data yang digunakan adalah data sekunder hasil uji eksperimen vibrasi *bearing* dari FEMTO-ST Institute. Data vibrasi yang digunakan terdiri dari tujuh *bearing* berbagai kondisi yang masing-masingnya terdiri dari dua arah yaitu horizontal dan vertikal. Kemudian, diambil fitur variansi dan RMS *bearing1_2* dan *bearing1_4* untuk pengolahan data. Selanjutnya, data tersebut dibagi menjadi dua fase yaitu fase-I yang diasumsikan sebagai *bearing* kondisi normal dan fase-II diasumsikan sebagai *bearing* yang akan diuji. Setelah itu, dilakukan perhitungan batas kendali atas (BKA) pada fase-I, dan digunakan pada fase-II untuk mendeteksi kondisi *bearing*. Hasil pengujian yang dilakukan pada fase-II menunjukkan bahwa terdapat titik-titik yang berada di luar batas kendali (*out-of-control*) sehingga dapat dikatakan bahwa terdapat ketidaknormalan pada *bearing* yang mungkin berindikasi terdapat *bearing* yang tidak normal namun belum tentu rusak.

Kata Kunci: *Multivariate Statistical Process Control, Diagram Kendali T2 Hotelling, Bearing Fault Detection, Out-of-Control.*

A. Pendahuluan

Penggunaan statistika semakin dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari. Statistika digunakan untuk membantu pemecahan masalah di beberapa bidang kehidupan, seperti bidang ekonomi, bisnis, kedokteran, psikologi, farmasi, pendidikan, pertanian, peternakan, teknik, serta bidang spesifik lainnya. Dari banyaknya metode statistika yang ada, salah satu metode yang banyak dipakai adalah statistika multivariat. Santoso [1] menyatakan statistika multivariat adalah metode statistika yang secara simultan atau bersama-sama melakukan analisis terhadap dua variabel atau lebih untuk sekelompok individu. Teknik analisis ini digunakan meneliti korelasi, pengaruh perlakuan, perbandingan variabel dalam waktu yang bersamaan.

Statistical Process Control (SPC) adalah seperangkat strategi, teknik, dan tindakan yang diterapkan perusahaan untuk memastikan bahwa strategi yang digunakan dapat memperoleh hasil produk yang berkualitas tinggi [2]. Analisis multivariat digunakan ketika terdapat kasus yang memerlukan dua atau lebih karakteristik secara bersama-sama atau simultan. *Multivariate Statistical Process Control* digunakan untuk melihat kestabilan proses dari suatu produksi agar menjadi lebih efektif. Metode ini adalah metode pengendalian kualitas pertama yang digunakan di bidang industri modern [3].

Diagram kendali merupakan salah satu alat yang digunakan dalam pengendalian kualitas. Diagram kendali T^2 Hotelling dilakukan untuk mendeteksi perubahan rata-rata proses menggunakan vektor rata-rata sampel dan matriks kovariansi. Uji T^2 Hotelling dapat digunakan untuk melihat adanya perbedaan antara dua kelompok variabel, selanjutnya dilakukan analisis statistik pada variabel tersebut secara simultan atau serentak. Metode ini baik digunakan pada dua kelompok variabel yang saling bebas. Pengaruh terhadap model akan semakin besar apabila nilai statistik T^2 Hotelling juga tinggi.

Mesin adalah unit yang terdiri dari beberapa komponen yang saling terhubung secara kompak untuk menghasilkan gerakan tertentu. Mesin dapat bekerja dengan optimal apabila didukung dengan pendeteksian kondisi dan kerusakan pada mesin. Deteksi kondisi dan kerusakan mesin penting dilakukan untuk menjamin performa yang optimal dari sebuah industri. Untuk mencapai performa yang baik diperlukan kerja mesin yang baik. Dalam dunia industri, keuntungan perusahaan serta kemampuan daya saing perusahaan dapat dipengaruhi oleh sistem operasi yang baik dari mesin-mesin industri dan sistem produksi. Berdasarkan hal tersebut aktivitas pemantauan, diagnosis, dan peramalan mesin dalam industri semakin penting untuk dilakukan, salah satu elemen mesin diantaranya adalah *bearing*.

Menurut ilmu mekanika, *bearing* merupakan sebuah elemen yang memungkinkan mesin menyeimbangkan gerakan relatif antara dua atau lebih komponen sehingga selalu mempertahankan ketinggian yang diinginkan, selain itu berfungsi untuk menghasilkan poros yang berputar tanpa mengalami gesekan. *Bearing* mobil dipasang di as roda dan ditempat roda berputar lainnya, agar *bearing* dapat bertahan lama maka dibutuhkan perawatan yang baik. Pelumasan merupakan salah satu jenis perawatan *bearing*. *Bearing* yang rusak akan menghasilkan sinyal getaran menyimpang dari yang seharusnya. Teknik pemrosesan sinyal banyak digunakan untuk mengekstrak fitur terkait sinyal getaran untuk mengevaluasi kondisi *bearing*. Dalam penelitian ini, proses multivariat berbasis kontrol diusulkan untuk melakukan diagnosis kondisi *bearing* [4].

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah penerapan *Multivariate Statistical Process Control* menggunakan diagram kendali T^2 Hotelling untuk mendeteksi kondisi *bearing*. *Run-to-failure* dari eksperimen vibrasi *bearing* merupakan objek penelitian skripsi ini, diperoleh dari FEMTO-ST Institute, dari dua perlakuan dengan beban berbeda.

B. Metodologi Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat sekunder, yang didapatkan dari *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Prognostics and Health Management (PHM)* 2012 dari FEMTO-ST Institute. Data tersebut merupakan data eksperimen uji *bearing* yang menghasilkan data *run to failure* dengan memperhatikan vibrasi dari *bearing* tersebut.

Data vibrasi bearing yang digunakan pada penelitian ini berasal dari rekaman data

vibrasi yang menggambarkan kecacatan pada elemen bergulir pada *bearing*. Sinyal getaran dikumpulkan setiap 10 detik dengan batas data sampling sebesar 2560 sampel dan frekuensi getaran sebesar 25,6 kHz. Data vibrasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data set satu yang terdiri dari tujuh *bearing* dengan dua arah yaitu arah horizontal dan vertikal dengan total 14 *bearing*. Kondisi *bearing* data set satu memiliki kecepatan sebesar 1800 rpm dengan beban sebesar 4000 N, dua *bearing* digunakan sebagai *training* dan lima *bearing* digunakan sebagai *testing*. Eksplorasi dan analisis data dilakukan dengan menggunakan beberapa *software* yaitu, *Microsoft Excel*, *Matlab*, *Minitab* dan *R studio*.

Prosedur dan teknis pengolahan yang dilakukan dalam penelitian skripsi ini yaitu:

1. Mengambil data bearing dari FEMTO-ST Institute.
2. Membuat plot vibrasi bearing data set satu untuk melihat pola degradasi kerusakan bearing.
3. Melakukan ekstraksi fitur dan membuat plot fitur yang digunakan dengan menggunakan bantuan software Matlab.

Ekstraksi fitur adalah melakukan penarikan data tertentu yang signifikan dalam beberapa fakta yang berhubungan [5]. Tujuan dari ekstraksi fitur yaitu untuk mendapatkan informasi penting dari sinyal dengan menggunakan transformasi sederhana dan efektif data sinyal asli.

a. Mean

Penghitungan nilai *mean* atau rata-rata dilakukan dengan menjumlahkan seluruh nilai data suatu kelompok sampel, kemudian dibagi dengan jumlah sampel tersebut.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

b. Median

Median adalah nilai tengah suatu kumpulan data setelah diurutkan dari terkecil sampai terbesar. Median menentukan letak data setelah disusun menurut urutan nilai [6]. Pada data tunggal, jika jumlah datanya ganjil maka letak median dapat dihitung menggunakan:

$$Me = X_{\frac{n+1}{2}}$$

Apabila jumlah datanya genap maka letak median dapat dihitung menggunakan:

$$Me = \frac{X_{n/2} + X_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$$

c. Variansi

Variansi didefinisikan sebagai nilai yang mendeskripsikan seberapa besar data tersebar dari nilai rata-ratanya. Nilai variansi besar menggambarkan sebaran data jauh dari nilai rerata. Variansi merupakan pangkat dua simpangan baku:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

d. Kurtosis

Kurtosis adalah suatu bilangan menunjukkan keruncingan kurva distribusi frekuensi, diukur relatif terhadap distribusi normal. Semakin besar nilai *kurtosis* maka kurva semakin runcing:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4}$$

e. Root Mean Square (RMS)

Root Mean Square (RMS) adalah akar kuadrat dari rata-rata kuadrat. RMS digunakan untuk mengklasifikasikan keparahan getaran dari suatu mesin untuk menghitung sensor vibrasi *bearing*. Nilai RMS berfungsi mengukur nilai energi efektif yang dipakai untuk menghasilkan getaran:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n x_i^2}$$

f. Skewness

Skewness atau kemiringan suatu kurva adalah ukuran kecenderungan dalam menentukan melencengnya suatu kurva, berdasarkan konsep hubungan pemusatan data antara nilai *mean* (rata-rata), modus dan mediannya.

$$skewness = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3}$$

4. Melakukan eksplorasi data fitur pada *bearing* data set satu untuk memperoleh *trend* atau kecenderungan pada *bearing* serta menyajikan deskriptif data penelitian.
5. Melakukan seleksi fitur dan pemilihan *bearing* yang akan digunakan pada penelitian serta menyajikan deskriptif data penelitian.
6. Membagi data menjadi dua fase, yaitu fase-I sebagai *bearing* normal dan fase-II sebagai *bearing* yang akan diuji dengan melihat plot vibrasi *bearing* pada fitur variansi dan RMS pada *bearing1_2* dan *bearing1_4*.
7. Melakukan pengujian normalitas multivariat dengan menggunakan software *R studio*. Hipotesis yang diuji yaitu sebagai berikut:

H_0 : data berdistribusi normal multivariat

H_1 : data tidak berdistribusi normal multivariat

Kemiringan multivariat atau *skewness* multivariat dapat dijelaskan dengan rumus

$$z_1 = \frac{(p+1)(n+1)(n+3)}{6[(n+1)(p+1)-6]} b_{1,p}$$

Dengan $\alpha=5\%$, kriteria uji untuk *skewness* adalah terima H_0 jika $\frac{z_\alpha}{2} < z_1 < \frac{z_\alpha}{2}$

Sedangkan *kurtosis* multivariat dapat dijelaskan dengan rumus:

$$z_1 = \frac{b_{2,p} - p(p+2)}{\sqrt{8p(p+2)/n}}$$

Dengan $\alpha=5\%$, kriteria uji untuk *skewness* adalah terima H_0 jika $\frac{z_\alpha}{2} < z_1 < \frac{z_\alpha}{2}$

8. Melakukan pengujian *Multivariate Statistical Process Control* dengan statistik T^2 *Hotelling*, menentukan nilai Batas Kendali Atas (BKA/UCL), serta membuat diagram kendali T^2 *Hotelling* dengan bantuan software *Minitab*.

Uji T^2 *Hotelling* merupakan statistik yang digunakan untuk mengombinasikan informasi dari dispersi dan rata-rata untuk beberapa variabel. T^2 *Hotelling* untuk data individual merupakan pengendalian data multivariat yang digunakan apabila nilai tiap sampel (m) diperoleh secara langsung dengan observasi yang hanya dilakukan 1 kali saja pada setiap sampel. Adapun nilai statistik T^2 *Hotelling* untuk pengamatan individual adalah sebagai berikut:

$$T_i^2 = (x_{ij} - \bar{x}_j)' S_i^{-1} (x_{ij} - \bar{x}_j) \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, p \end{cases}$$

Terdapat tiga batas kendali dalam diagram kendali T^2 *Hotelling*: *Upper Control Limit* (UCL) atau Batas Kendali Atas (BKA), *Central Line* (CL) atau Garis sentral (GS), dan *Lower Control Limit* (LCL) atau Batas Kendali Bawah (BKB). Batas Kendali Atas (BKA)/ *Upper Control Limit* (UCL) pada diagram kendali T^2 *Hotelling*:

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha, \frac{p}{2}, \frac{q-p-1}{2}}$$

di mana $\beta_{\alpha, \frac{p}{2}, \frac{q-p-1}{2}}$ merupakan nilai diperoleh dari tabel distribusi β menggunakan *Microsoft Excel* dengan taraf signifikansi α dan parameter $\frac{p}{2}$ dan $\frac{q-p-1}{2}$, dan nilai q diperoleh dari:

$$q = \frac{2(m-1)^2}{3m-4}$$

Fungsi batas kendali merupakan fungsi kuadrat yang memungkinkan tidak adanya nilai di bawah nol atau bernilai negatif, sehingga Batas Kendali Bawah (BKB) / *Lower Control Limit* (LCL) bernilai 0 (nol).

$$LCL = 0$$

9. Membahas dan menyimpulkan hasil penelitian.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Seleksi Fitur

Dengan memperhatikan hasil ekstraksi fitur, diperoleh enam jenis fitur yaitu *mean*, median, variansi, kurtosis, *root mean square* (RMS), dan *skewness* untuk masing-masing bearing. Dari keenam fitur tersebut ekstraksi fitur yang digunakan dalam skripsi ini adalah fitur variansi dan RMS karena memiliki pola monoton naik, artinya keadaan ini menunjukkan keadaan vibrasi *bearing* pada keadaan normal menuju vibrasi bearing rusak. Dataset yang digunakan yaitu *bearing1_2* dan *bearing1_4* horizontal.

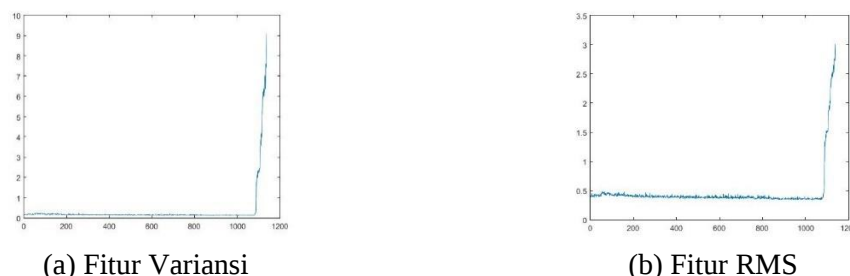
Data Vibrasi *Bearing1_2*



Gambar 1. Plot ekstraksi fitur variansi dan RMS vibrasi *Bearing1_2* horizontal

Dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa jumlah data fitur variansi dan RMS *bearing1_2* memiliki data sebanyak 871, kemudian dari data tersebut dilakukan pembagian data menjadi dua kelompok berdasarkan plot di atas. Pada bagian pertama sebanyak 577 data awal pada plot terlihat keadaan yang cenderung datar sehingga diasumsikan sebagai *bearing* normal yang disebut sebagai fase-I, sedangkan bagian kedua sebanyak 294 data akhir pada plot terlihat bahwa keadaan yang mulai naik sehingga diasumsikan sebagai *bearing* rusak yang disebut sebagai fase-II.

Data Vibrasi *Bearing1_4*



Gambar 2. Plot ekstraksi fitur variansi dan RMS vibrasi *Bearing1_4* horizontal

Dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa jumlah data fitur variansi dan RMS *bearing1_4* memiliki data sebanyak 1139, kemudian dari data tersebut dilakukan pembagian data menjadi dua kelompok berdasarkan plot di atas. Pada bagian pertama sebanyak 1069 data awal pada plot terlihat keadaan yang cenderung datar sehingga diasumsikan sebagai *bearing* normal yang disebut sebagai fase-I, sedangkan bagian kedua sebanyak 70 data akhir pada plot terlihat bahwa

keadaan yang mulai naik sehingga diasumsikan sebagai *bearing* rusak yang disebut sebagai fase-II.

Uji Normalitas Multivariat *Bearing1_2*

Pengujian normalitas multivariat dilakukan dengan menggunakan *software R studio* dan ditransformasi menggunakan transformasi *box-cox* didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Uji Normalitas Multivariat Fase-I

Test	<i>Beta-hat</i>	<i>kappa</i>	<i>p-value</i>
Mardia Skewness	9.136884	878.66365	0
Mardia Kurtosis	21.181066	39.57751	0

Kriteria uji adalah Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$ dan digunakan taraf nyata $\alpha = 0.05$. Berdasarkan Tabel 1 di atas terlihat bahwa hasil uji *skewness* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$ dan hasil uji *kurtosis* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$. Karena uji *skewness* dan *kurtosis* tolak H_0 , dapat dikatakan bahwa data tidak berdistribusi normal pada taraf nyata 5%.

Tabel 2. Uji Normalitas Multivariat Fase-II

Test	<i>Beta-hat</i>	<i>kappa</i>	<i>p-value</i>
Mardia Skewness	14.43752	707.43833	0
Mardia Kurtosis	25.40516	37.30453	0

Kriteria uji adalah Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$ dan digunakan taraf nyata $\alpha = 0.05$. Berdasarkan Tabel 2 di atas terlihat bahwa hasil uji *skewness* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$ dan hasil uji *kurtosis* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$. Karena uji *skewness* dan *kurtosis* tolak H_0 , dapat dikatakan bahwa data tidak berdistribusi normal pada taraf nyata 5%.

Uji Normalitas Multivariat *Bearing1_4*

Pengujian normalitas multivariat dilakukan dengan menggunakan *software R studio* dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 3. Uji Normalitas Multivariat Fase-I

Test	<i>Beta-hat</i>	<i>kappa</i>	<i>p-value</i>
Mardia Skewness	30.91083	5507.2793	0
Mardia Kurtosis	76.97941	76.97941	0

Kriteria uji adalah Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$ dan digunakan taraf nyata $\alpha = 0.05$. Berdasarkan Tabel 3 di atas terlihat bahwa hasil uji *skewness* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$ dan hasil uji *kurtosis* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$. Karena uji *skewness* dan *kurtosis* tolak H_0 , dapat dikatakan bahwa data tidak berdistribusi normal pada taraf nyata 5%.

Tabel 4. Uji Normalitas Multivariat Fase-II

Test	<i>Beta-hat</i>	<i>kappa</i>	<i>p-value</i>
Mardia Skewness	16.87928	196.92494	0
Mardia Kurtosis	25.57328	18.37858	0

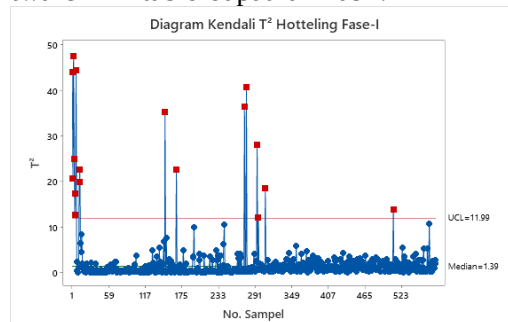
Kriteria uji adalah Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$ dan digunakan taraf nyata $\alpha = 0.05$. Berdasarkan Tabel 4 di atas terlihat bahwa hasil uji *skewness* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$ dan hasil uji *kurtosis* memiliki nilai $p\text{-value} = 0$, maka $p\text{-value} < \alpha$ atau $0 < 0.05$. Karena uji *skewness* dan *kurtosis* tolak H_0 , dapat dikatakan bahwa data tidak berdistribusi normal pada taraf nyata 5%.

Berdasarkan pengujian normal multivariat menggunakan *Mardia skewness* dan *Mardia kurtosis* didapatkan hasil bahwa data *bearing1_2* dan *bearing1_4* tidak berdistribusi normal

multivariat. Namun, pada kasus ini data diasumsikan mengikuti distribusi normal multivariat.

Diagram Kendali T^2 Hotelling Bearing1_2

Dengan menggunakan software Minitab didapatkan hasil:

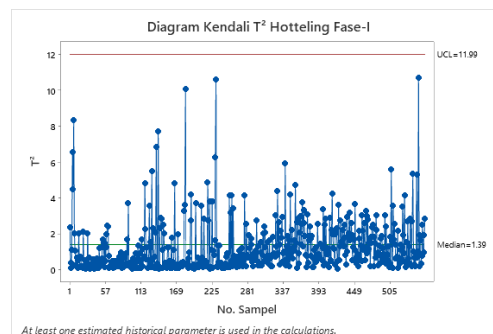


Gambar 3. Diagram kendali T^2 Hotelling fase-I Bearing1_2 horizontal

Didapatkan nilai:

BKA = 11.9921 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa dari 577 titik pengamatan terdeteksi adanya 17 titik yang keluar (*out of control*) dari Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL). Selanjutnya titik-titik yang berada di luar Batas Kendali Atas (BKA)/ *Upper Control Limit* (UCL) dari diagram kendali dihapus, lalu dihitung kembali nilai Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL) dan dibuat kembali diagram kendali T^2 Hotelling dengan data baru.

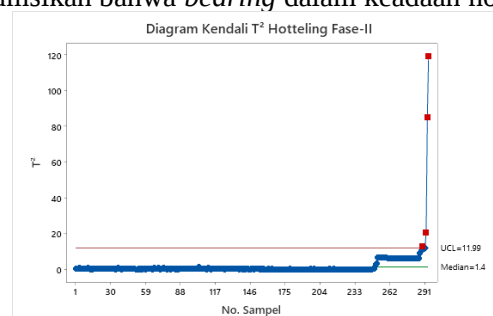


Gambar 4. Diagram kendali baru T^2 Hotelling fase-I Bearing1_2 horizontal

Didapatkan nilai:

BKA = 11.9903 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa dari total 560 titik pengamatan, semua titik sudah berada di dalam batas kendali atau dalam keadaan *in control*, sehingga proses sudah terkendali dan dapat diasumsikan bahwa *bearing* dalam keadaan normal.



Gambar 5. Diagram kendali T^2 Hotelling fase-II Bearing1_2 horizontal

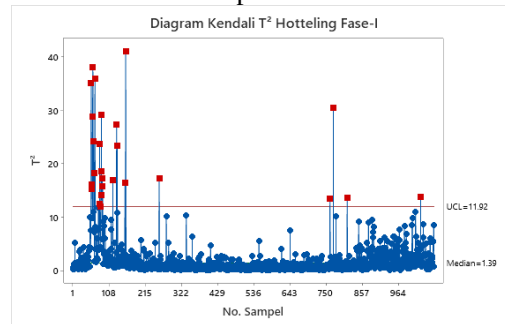
Didapatkan nilai:

BKA = 11.9903 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa dari 294 titik pengamatan titik-titik ada yang berada di dalam batas kendali atau dalam keadaan *in control*, namun terdapat titik-titik yang berada di luar batas kendali (*out of control*) sehingga dapat dikatakan bahwa terdapat ketidaknormalan pada *bearing* yang mungkin berindikasi terdapat *bearing* yang tidak normal namun belum tentu rusak yaitu pada data ke-289, 292, 293, dan 294.

Diagram Kendali T^2 Hotelling Bearing1_4

Dengan menggunakan software Minitab didapatkan hasil:

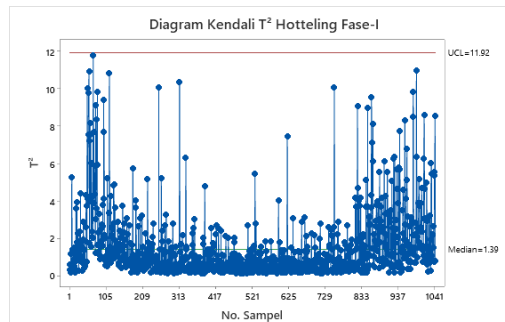


Gambar 6. Diagram kendali T^2 Hotelling fase-I Bearing1_4 horizontal

Didapatkan nilai:

BKA = 11.9223 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa dari 1069 titik pengamatan terdeteksi adanya 22 titik yang keluar (*out of control*) dari Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL). Selanjutnya titik-titik yang berada di luar Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL) dari diagram kendali dihapus, lalu dihitung kembali nilai Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL) dan dibuat kembali diagram kendali T^2 Hotelling dengan data baru.

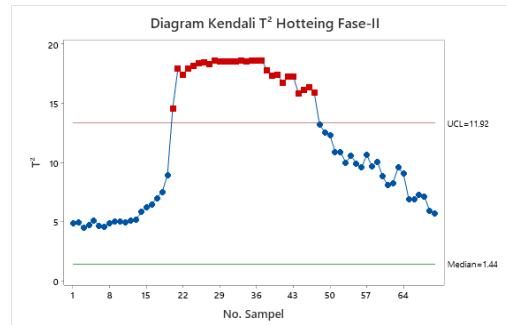


Gambar 7. Diagram kendali baru T^2 Hotelling fase-I Bearing1_4 horizontal

Didapatkan nilai:

BKA = 11.9215 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa dari total 1043 titik pengamatan, semua titik sudah berada di dalam batas kendali atau dalam keadaan *in control*, sehingga proses sudah terkendali dan dapat diasumsikan bahwa *bearing* dalam keadaan normal.



Gambar 8. Diagram kendali T^2 Hotelling fase-II Bearing1_4 horizontal

Didapatkan nilai:

BKA = 11.9215 dan BKB = 0

Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa dari 70 titik pengamatan titik-titik ada yang berada di dalam batas kendali atau dalam keadaan *in control*, namun terdapat titik-titik yang berada di luar batas kendali (*out of control*) sehingga dapat dikatakan bahwa terdapat ketidaknormalan pada *bearing* yang mungkin berindikasi terdapat *bearing* yang tidak normal namun belum tentu rusak yaitu pada data ke-20 sampai dengan data ke-47.

D. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dalam penelitian ini, peneliti menyimpulkan beberapa hasil penelitian sebagai berikut:

1. Proses pembentukan diagram kendali T^2 Hotelling pada *bearing1_2* dan *bearing1_4* dibagi menjadi dua fase yaitu fase-I (*bearing normal*) sebagai *training* dan fase-II (*bearing tidak normal*) sebagai *testing* yang dijalankan menggunakan *software* Minitab.
2. Tahapan pembuatan diagram kendali T^2 Hotelling pada *bearing1_2* dan *bearing1_4* dilakukan menggunakan 2 tahap. Tahap pertama yaitu dilakukan proses penyesuaian data sehingga diperoleh proses *in control* (*bearing normal*) dengan nilai Batas Kendali Atas (BKA) / *Upper Control Limit* (UCL) yang dihitung berdasarkan data yang sudah *in control*. Dengan nilai BKA untuk *bearing1_2* adalah 11.9903 dan untuk *bearing1_4* adalah 11.9215. Hasil dari tahapan ini kemudian digunakan untuk melihat apakah data fase-II terkendali atau tidak.
3. Berdasarkan diagram kendali T^2 Hotelling dapat dilihat terdapat titik-titik yang berada di luar batas kendali (*out of control*). Jadi dapat disimpulkan bahwa pengujian *Multivariate Statistical Process Control* menggunakan diagram kendali T^2 Hotelling dapat dikatakan bahwa terdapat ketidaknormalan pada *bearing* yang mungkin berindikasi terdapat *bearing* yang tidak normal namun belum tentu rusak, dengan ditandai oleh adanya *out of control* pada diagram kendali T^2 Hotelling.

Acknowledge

Penulis mengucapkan terimakasih kepada para Dosen UNISBA yang telah membimbing dalam proses penelitian ini, dan teman-teman STATISTIKA UNISBA Angkatan 2018 yang telah memberi semangat dan dukungan kepada penulis.

Daftar Pustaka

- [1] S. Santoso. (2012). *Aplikasi spss pada statistik multivariat*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo,.
- [2] D. A. Lind, W. G. Marchal and S. A. Wathen. (2007). *Teknik-teknik Statistika dalam Bisnis dan Ekonomi Menggunakan Data Global Buku 1. -13/E*. Jakarta: Salemba Empat.
- [3] D. C. Montgomery. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control 7th edition*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [4] D. Pudyastuti. (2016). *DIAGNOSA KERUSAKAN BEARING MENGGUNAKAN PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS(PCA) DAN NAÏVE BAYES CLASSIFIER*.

- [Online]. Available: <http://eprints.undip.ac.id/56014/>.
- [5] J. Qin. (2003). *Kernel hierarchical gene clustering from microarray expression data*. *Bioinformatics* 19(16), pp. 2097-104,.
- [6] Nugroho, Dimas Andhika, Suwanda. (2022). *Diagram Kontrol T2 Hotelling Minimum Volume Ellipsoid (Penerapan pada Pengontrolan Fluktuasi Saham)*. *Jurnal Riset Statistika* 2(1). 19-26.
- [7] Sudjana. (2013). *Metoda Statistika*. Bandung: Tarsito.