Estimasi *Failure Degradation Bearing* Dengan Metode Kaplan-Meier

Estimation of Degradation Failure Bearings with Kaplan-Meier Method

[1]Arinda Suciati Ningsih, [2]Sutawanir Darwis

[1,2]Prodi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Bandung, Jl. Tamansari No.1 Bandung 40116

email: [1]arindasuci03@gmail.com, [2]std.darwis@gmail.com

Abstract. The health prognostic of the machine can be defined as the ability to observe future conditions of a part or component of the machine and the time remaining before the failure of the engine component. This is related to the prediction of the health condition of the machine, especially on the bearing, so an analysis is needed to predict the condition of the machine by using survival analysis. In mechanical components, such as bearings, the output observed is the final failure or the occurrence of bearing faults or failure degradation on the bearing. Statistical approach using the Kaplan-Meier method is one of the methods used in survival analysis in this case. The use of the Kaplan-Meier method in machine maintenance is due to predicting bearing resistance and failure degradation in bearings from NASA bearing vibration experimental data which has calculated the kurtosis value supported by the Matlab program. Estimator of resistance function, failure function, and cumulative bearing failure function with Kaplan-Meier method directly applied to NASA bearing vibration experimental data which has calculated the kurtosis value supported by Matlab program. From the discussion, three conclusions were obtained. First, obtained 16 data time to failure bearing from 3 data sets taken based on the first kurtosis data that exceeds 20, from 16 data time to failure bearing there are 4 censored data, namely data set 3 and 12 uncensored data, namely data set 1 and data set 2. Second, the estimation of bearing resistance function is getting smaller for a longer time. This means that the longer the bearing degradation failure time, the smaller the bearing probability can last up to time t = 4448. Third, Kaplan-Meier Estimates for bearing failure functions are increasing or increasing for a longer time. This means that the longer the failure degradation bearing time, the greater the chance of failure of the bearing or the rate of bearing failure increases. While Kaplan-Meier estimates for cumulative bearing failure function, it is seen that the longer the bearing failure time, the cumulative bearing degradation will increase.

Keywords: Bearing, Survival Analysis, Kaplan-Meier Method, Kaplan-Meier Estimator for Failure Function and Cumlative Failure Function.

Abstrak. Prognostik kesehatan pada mesin dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk mengamati kondisi dimasa depan suatu bagian atau komponen mesin tersebut dan waktu yang tersisa sebelum terjadinya kegagalan pada komponen mesin. Ini berkaitan dengan prediksi kondisi kesehatan mesin khususnya pada *bearing,* maka dibutuhkanlah suatu analisis untuk memprekdiksi kondisi mesin tersebut yaitu dengan menggunakan analisis survival. Pada komponen mekanis, misalnya *bearing*, *output* yang diamati adalah kegagalan akhir atau terjadinya *bearing fault* atau *failure degradation* pada *bearing*. Pendekatan statistik dengan menggunakan metode Kaplan-Meier merupakan salah satu metode yang digunakan dalam analisis survival dalam kasus ini. Pemakaian metode Kaplan-Meier dalam pemeliharaan mesin dikarenakan untuk memprediksi ketahanan *bearing* dan *failure degradation* pada *bearing* dari data eksperimen vibrasi *bearing* NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya yang di dukung oleh program Matlab. Penduga fungsi ketahanan, fungsi kegagalan, serta fungsi kegagalan kumulatif *bearing* dengan metode Kaplan-Meier langsung diaplikasikan pada data eksperimen vibrasi *bearing* NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya yang di dukung oleh program Matlab. Dari pembahasan diperoleh tiga kesimpulan. Pertama, diperoleh 16 data *time to failure bearing* dari 3 set data yang diambil berdasarkan data kurtosis pertama yang melebihi 20, dari 16 data *time to failure bearing* ada sebanyak 4 data tersensor yaitu pada data set 3 dan 12 data tidak tersensor yaitu pada data set 1 dan data set 2. Kedua, estimasi fungsi ketahanan bearing semakin mengecil untuk waktu yang semakin lama. Ini berarti semakin lama waktu *failure degradation bearing* tersebut maka semakin kecil probabilitas bearing dapat bertahan hingga waktu $t = 4448$. Ketiga, Taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan *bearing* semakin besar atau meningkat untuk waktu yang semakin lama. Ini berarti semakin lama waktu *failure degradation bearing* tersebut maka peluang gagal bearing tersebut semakin besar atau laju kegagalan bearing tersebut semakin meningkat. Sedangkan taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan kumulatif *bearing,* terlihat bahwa semakin lama waktu kegagalan *bearing* tersebut maka degradasi *bearing* secara kumulatif akan semakin meningkat.

Kata Kunci: Bearing, Analisis Survival, Metode Kaplan-Meier, Estimator Kaplan-Meier bagi Fungsi Kegagalan dan Fungsi Kegagalan Kumlatif.

A. Pendahuluan

Peningkatan produktifitas dari suatu perusahaan merupakan salah satu target perusahaan tiap tahunnya. Salah satu usaha yang dilakukan perusahaan untuk mencapai hal tersebut dapat dilakukan dengan memantau kesehatan mesin yang digunakan. Kesehatan mesin di pantau dan di perhitungkan secara prognostik sebagai prioritas untuk menghindari *downtime* operasi atau pekerjaan pemeliharaan yang tak terduga. Prognostik kesehatan pada mesin dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk mengamati kondisi dimasa depan suatu bagian atau komponen mesin tersebut dan waktu yang tersisa sebelum terjadinya kegagalan pada komponen mesin.

Dalam kasus ini istilah prognostik awalnya diperkenalkan dan banyak digunakan dibidang ilmu kedokteran. Pendekatan prognostic secara umum di bidang ilmu kedokteran yang sedang mencoba untuk diterapkan dalam penelitian ini adalah analisis survival. Analisis survival atau analisis kelangsungan hidup adalah prosedur dalam ilmu statistik untuk analisis data dimana datanya adalah lamanya waktu yang dimulai dari suatu titik asal sampai terjadinya suatu kejadian atau titik akhir (waktu sampai suatu peristiwa terjadi). Dalam analisis survival data kelangsungan hidup umumnya mencakup variabel yang disensor. Pada komponen mekanis, misalnya *bearing*, *output* yang diamati adalah kegagalan akhir atau terjadinya *bearing fault* atau *failure degradation* pada *bearing*.

Dalam penelitian mengenai ketahanan hidup umumnya data yang diperoleh merupakan selang waktu yang tidak lengkap atau tersensor. Karena itu, diperlukan suatu metode yang dapat mengakomodasi data tersensor. Pendekatan statistik dengan menggunakan metode Kaplan-Meier merupakan salah satu metode yang digunakan dalam analisis survival dalam kasus ini. Penaksir Kaplan-Meier diperkenalkan pertama kali oleh Kaplan dan Meier (1958), metode Kaplan-Meier itu sendiri yaitu komputasi statistik yang digunakan untuk menghitung peluang survival berdasarkan pada waktu kelangsungan hidup dan mengasumsikan bahwa data sensor adalah independen berdasarkan waktu kelangsungan hidup tersebut sampai time-failur. Pemakaian metode Kaplan-Meier dalam pemeliharaan mesin dikarenakan untuk memprediksi ketahanan *bearing* dan laju kerusakan atau laju kegagalan *bearing* pada tingkat kegagalan. Kelebihan metode ini salah satunya adalah dapat digunakan pada data dengan jumlah subjek yang sedikit. Dimana data yang akan digunakan dalam skripsi ini adalah waktu kegagalan atau *time-to-failur* dari data eksperimen vibrasi *bearing* NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya untuk lebih mempermudah yang di dukung oleh program Matlab.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan waktu kegagalan atau *time-to-failure* dari data eksperimen vibrasi *bearing* NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya dengan bantuan program Matlab?
2. Bagaimana menerapkan estimator Kaplan-Meier untuk transformasi perubahan ketahanan kondisi *bearing* ?
3. Bagaimana menghitung estimator Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan dan kegagalan kumulatif *bearing* ?

Berdasarkan perumusan masalah yang telah dibahas sebelumnya, maka tujuan dari penulisan skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui waktu kegagalan atau *time-to-failur* dari data eksperimen vibrasi *bearing* NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya dengan bantuan program Matlab.

2. Untuk mengetahui penerapan estimator Kaplan-Meier untuk transformasi perubahan ketahanan kondisi *bearing*.
3. Untuk mengetahui estimator Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan dan kegagalan kumulatif *bearing*.

B. Landasan Teori

Dalam ilmu mekanika *bearing* adalah sebuah elemen mesin yang berfungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua atau lebih komponen mesin agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. *Bearing* menjaga poros (shaft) agar selalu berputar terhadap sumbu porosnya, atau juga menjaga suatu komponen yang bergerak linier agar selalu berada pada jalurnya. Adapun benda yang berputar mengurangi gesekan dan memperkecil gesekan awal pada permukaan *bearing* menurut Widodo (2009) terdiri dari 4 komponen yaitu *inner race*, *outer race*, *ball*, dan *cage*.

Menurut Sujana (2005) kurtosis adalah tingkat kepuncakan dari sebuah distribusi yang biasanya diambil secara relatif terhadap suatu distribusi normal. Bertitik tolak dari kurva model normal tinggih rendahnya atau runcing datarnya bentuk kurva dapat ditentukan. Untuk mencari nilai koefisien kurtosis adalah sebagai berikut :

$$\alpha^4 = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4}{S^4} \tag{1}$$

Dimana S adalah simpangan baku yang merupakan akar kuadrat dari variansi dengan rumus: $S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$

Menurut Kleinbaum dan Klein (2012) analisis survival atau analisis uji data hidup merupakan salah satu teknik statistika yang berguna untuk melakukan pengujian tentang tahan hidup atau keandalan suatu komponen. Atau “lamanya waktu” yang dimulai dari suatu “titik asal” sampai terjadinya suatu “kejadian” atau titik akhir. Variabel responnya sering disebut sebagai waktu masa hidup (survival time), waktu kerusakan (failure time), atau waktu sampai terjadinya kejadian (time-to-event).Perbedaan antara analisis survival dengan analisis statistik lainnya adalah adanya data tersensor. Data dikatakan tersensor apabila data tidak dapat diamati secara lengkap karena subjek penelitian hilang atau mengundurkan diri atau sampai akhir penelitian subjek tersebut belum mengalami kejadian tertentu dengan simbol 0, sedangkan data yang dapat diamati secara lengkap sampai penelitian berakhir disebut data yang tidak tersensor dengan simbol 1. Sedangkan pada *threshold* untuk menentukan *time-to-failure* pada *bearing* dalam analisis yang dilihat dari plot nilai kurtosis terhadap nilai *measurement point*-nya, menurut Widodo (2011) jika *threshold* melebihi 20 maka menandakan *bearing* rusak sedangkan jika *threshold* tidak melebihi 20 maka menandakan *bearing* tidak rusak (tersensor). Dan menurut David Collet (2003) dalam analisis survival terdapat 3 tipe penyensoran yaitu sensor kanan, sensor kiri, dan sensor interval.

Penaksiran peluang hidup dapat digunakan untuk membantu menaksirkan daya tahan hidup suatu unit atau individu pada suatu keadaan tertentu. Alat untuk menaksir peluang hidup dikenal dengan fungsi survival. Misalkan waktu ketahanan T mempunyai fungsi distribusi peluang dengan fungsi densitas $f(t)$. Maka fungsi ketahanan atau fungsi survival dari T adalah sebagai berikut :

$$\mathrm{S}\,(t) = P\,(\,T \geq t\,) = 1 - F\,(t) \tag{2}$$

Fungsi kegagalan $h(t)$ menyatakan laju kegagalan sesaat pada waktu t dengan syarat bahwa individu tersebut mampu bertahan sampai t. Maka fungsi hazard adalah sebagai berikut:

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \tag{3}$$

Kaplan-Meier adalah komputasi statistik untuk menghitung peluang survival. Metode Kaplan-Meier didasarkan pada waktu kelangsungan hidup individu dan mengasumsikan bahwa data sensor adalah independen berdasarkan waktu kelangsungan hidup (alasan observasi yang disensor tidak berhubungan dengan penyebab *failure time*. Misal T variabel random kontinu nonnegatif, dimana fungsi yang berkaitan dengan T didefinisikan dalam interval $[t_j\ ,\ t_{j+1})$. Misal $t_1 < t_2 < \cdots < t_k$ menggambarkan observasi waktu kematian dalam sampel berukuran n dari populasi homogen dari fungsi tahan hidup s. Dengan asumsi bahwa d_j adalah jumlah kematian pada saat t_j ($j = 1,2,\dots.,k$), m_j adalah jumlah tersensor dalam interval $[t_j, t_{j+1})$ pada waktu t_{j1} , t_{j2} , $\dots$, t_{jm_j} untuk $j = 1,2,\dots,k$ dimana $t_0 = 0$ dan $t_{k+1} = \infty$ dan n_j adalah jumlah individu yang masih hidup sesaat sebelum t_j (jumlah individu berisiko pada saat t_j) termasuk yang meninggal pada saat t_j. Untuk $t_k \le t < t_{k+1}$ dimana $k = 1,2,\dots,r,$ estimasi Kaplan-Meier untuk fungsi tahan hidup didefinisikan sebagai:

$$\hat{S}(t) = \prod_{j=1}^{k} \frac{n_j - d_j}{n_j} \tag{4}$$

Penduga variansi bagi nilai dari fungsi ketahanan adalah

$$\hat{V}\left[\hat{S}(t)\right] = \left[\hat{S}(t)\right]^2 \sum_{j:t_j \le t} \frac{d_j}{(n_j - d_j)n_j} \tag{5}$$

Standar eror bagi penduga Kaplan-Meier adalah akar kuadrat dari penduga variansi untuk penduga Kaplan-Meier. Selang kepercayaan adalah suatu selang yang sedemikian sehingga ada peluang tertentu bahwa nilai fungsi ketahanan yang sebenarnya tergantung dalam selang ini. Sehingga sedangkan selang kepercayaan bagi $\hat{S}(t)$ diperoleh dengan menganSumsikan bahwa nilai penduga dari fungsi ketahan hidup pada t berdistribusi normal dengan rata-rata $S(t)$ dan standar eror $\sqrt{\hat{V}\left[\hat{S}(t)\right]}$. Selang kepercyaan 100(1$-\alpha$)% bagi $S(t)$ untuk t tertentu adalah

$$\hat{S}(t) - Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\hat{V}\left[\hat{S}(t)\right]} \le\ S(t)\ \le \hat{S}(t) + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\hat{V}\left[\hat{S}(t)\right]} \tag{6}$$

Taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan bearing yaitu

$$h\left(t_j\right) = \frac{d_j}{n_j} \tag{7}$$

Sedangkan taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan kumulatif bearing yaitu, dengan $H(t) = -\log S(t)$ dan jika $\hat{S}(t)$ adalah taksiran Kaplan-Meier dari fungsi kegagalan, maka $\widehat{H}(t) = -\log \hat{S}\ (t)$ adalah taksiran kegagalan kumulatif sampai waktu t.

$$\widehat{H}(t) = -\sum_{j=1}^{k} \log\left(\frac{n_j - d_j}{n_j}\right) \tag{8}$$

Karena $\log\left(\frac{n_j - d_j}{n_j}\right) \approx -\frac{d_j}{n_j}$, maka taksirannya :

$$\widetilde{H}(t) = \sum_{j=1}^{k} \frac{d_j}{n_j} \tag{9}$$

yakni jumlah kumulatif dari taksiran peluang mati dari selang pertama sampai selang ke- k, $k = 1,2,\dots,r$.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Data Time-To-Failure

Diperoleh 16 data *time to failure bearing* dari 3 set data yang diambil berdasarkan data kurtosis pertama yang melebihi 20, pada data set 1 dan data set 2 untuk semua *bearing* melewati 20 sebelum waktu yang telah ditentukan sedangkan untuk data set 3 ke empat *bearing* tidak ada yang melebihi 20. Jadi, dapat dikatakan bahwa dari 16 data *time to failure bearing* ada sebanyak 4 data tersensor yaitu pada data set 3 dan 12 data tidak tersensor yaitu pada data set 1 dan data set 2. Berikut ini adalah data *time-to-failure* yang dihasilkan dengan bantuan progam Matlab dari masing-masing kurtosis dataset yang akan digunakan dengan tanda plus (+) merupakan data tersensor, data *time-to-failure* bearing pada mesin dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Time-to-failure

No.	Measurement Point Sebelum Diurutkan	Measurement Point Setelah Diurutkan	Menit	Jam	Hari
1.	1723	974	9730	162,17	6,75708
2.	1468	974	9730	162,17	6,75708
3.	1722	974	9730	162,17	6,75708
4.	1747	974	9730	162,17	6,75708
5.	1731	1468	14670	244,50	10,18750
6.	1732	1675	16740	279	11,62500
7.	1675	1682	16810	280,17	11,67375
8.	1682	1722	17210	286,83	11,95125
9.	974	1723	17220	287	11,95833
10.	974	1731	17300	288,33	12,01375
11.	974	1732	17310	288,50	12,02083
12.	974	1747	17460	291	12,12500
13.	4448^{+}	4448^{+}	44470^{+}	$741,17^{+}$	$30,88208^{+}$
14.	4448^{+}	4448^{+}	44470^{+}	$741,17^{+}$	$30,88208^{+}$
15.	4448^{+}	4448^{+}	44470^{+}	$741,17^{+}$	$30,88208^{+}$
16.	4448^{+}	4448^{+}	44470^{+}	$741,17^{+}$	$30,88208^{+}$

Sumber: NASA Ames Prognostics Data Repository

Estimasi Kaplan-Meier

Berdasarkan fungsi tahan hidup persamaan (3), dimana t_j menyatakan *time-to-failure bearing* dalam hari, d_j adalah jumlah kerusakan pada saat t_j $(j = 1,2, \dots, k)$ dan n_j adalah jumlah *bearing* yang masih dapat digunakan sesaat sebelum t_j (jumlah *bearing* berisiko pada saat t_j) termasuk yang rusak atau gagal pada saat t_j, hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan untuk $\hat{S}(t)$

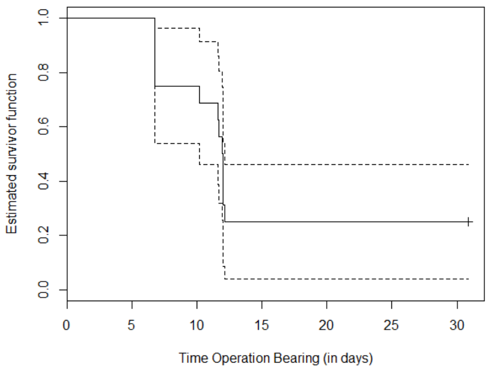
j	t_j	n_j	d_j	$(n_j - d_j)/n_j$	$\hat{S}(t)$
0	0	16	0	1	1
1	6,75708	16	4	0, 75	0,75
5	10,1875	12	1	0,916667	0,6875
6	11,625	11	1	0,909091	0,625
7	11,67375	10	1	0,9	0,5625
8	11,95125	9	1	0,888889	0,5
9	11,95833	8	1	0,875	0,4375
10	12,01375	7	1	0,857143	0,375
11	12,02083	6	1	0,833333	0,3125
12	12,125	5	1	0,8	0,25

Untuk hasil perhitungan selang kepercayaan dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Selang Kepercayaan 95%

t_j	$\hat{S}(t)$	$\sqrt{\hat{V}[\hat{S}(t)]}$	$\hat{S}(t) - Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\hat{V}[\hat{S}(t)]}$	$\hat{S}(t) + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\hat{V}[\hat{S}(t)]}$
6,75708	0,7500	0,108	0,5378	0,9622
10,1875	0,6875	0,116	0,4604	0,9146
11,6250	0,6250	0,121	0,3878	0,8622
11,67375	0,5625	0,124	0,3194	0,8056
11,95125	0,5000	0,125	0,255	0,745
11,95833	0,4375	0,124	0,1944	0,6806
12,01375	0,3750	0,121	0,1378	0,6122
12,02083	0,3125	0,116	0,0854	0,5396
12,12500	0,2500	0,108	0,0378	0,4622

Dengan hasil estimasi fungsi ketahanan bearing pada Tabel 3, diberikan plot estimasi fungsi ketahanan bearing terhadap time-to-failure bearing (dalam hari), yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot Estimasi Ketahan *Bearing*

Dari Gambar 1, plot tersebut diperoleh dari hasil pengurutan data terkecil ke data terbesar dengan tanda plus (+) merupakan data tersensor. Berdasarkan plot diatas dapat dilihat bahwa pada hari ke-0 hingga hari ke-6 kurva survival turun cepat dengan peluang antara 1 hingga 0,75. Ini artinya peluang *bearing* tidak mengalami *failure degradation*-nya kecil. Berbeda halnya pada hari ke-6 sampai hari ke-12 kurva survival turun secara perlahan dengan peluang antara 0,75 hingga 0,25. Ini artinya peluang *bearing* tidak mengalami *failure degradation*-nya besar. Dengan estimasi fungsi tahan hidup atau fungsi survival bearing semakin mengecil untuk waktu yang semakin lama. Ini berarti semakin lama waktu failure degradation bearing tersebut maka semakin kecil probabilitas bearing dapat bertahan hingga waktu t (semakin mendekati nol). Demikian juga nilai dari lebar interval dari batas atas dan batas bawah fungsi survival dari data bergerak terus menurun.

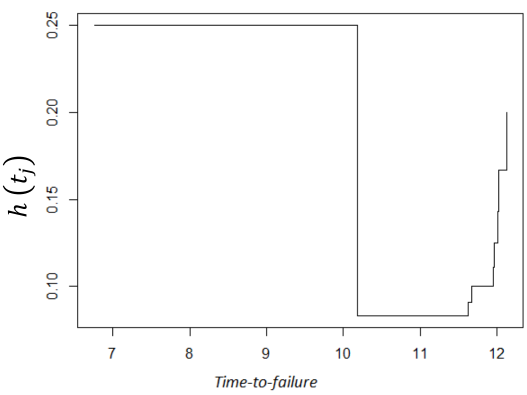
Taksiran Kaplan-Meier bagi Fungsi Kegagalan

Berdasarkan taksiran Kaplan-meier bagi fungsi kegagalan *bearing* pada persamaan (7), dimana t_j menyatakan *time-to-failure bearing* dalam hari, d_j adalah jumlah kerusakan pada saat t_j $(j = 1,2, \ldots, k)$ dan n_j adalah jumlah *bearing* yang masih dapat digunakan sesaat sebelum t_j (jumlah *bearing* berisiko pada saat t_j) termasuk yang rusak atau gagal pada saat t_j, maka diperoeh hasil seperti Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Hasil Perhitungan untuk $h\left(t_j\right)$

j	t_j	n_j	d_j	$h\left(t_j\right) = d_j/n_j$
0	0	16	0	0
1	6,75708	16	4	0,25
5	10,1875	12	1	0,0833
6	11,625	11	1	0,0909
7	11,67375	10	1	0,1
8	11,95125	9	1	0,1111
9	11,95833	8	1	0,125
10	12,01375	7	1	0,1429
11	12,02083	6	1	0,1667
12	12,125	5	1	0,2

Berdasarkan taksiran Kaplan-meier bagi fungsi kegagalan pada persamaan (7), dengan hasil fungsi kegagalan bearing pada Tabel 4, diberikan plot fungsi kegagalan bearing terhadap time-to-failure bearing (dalam hari), yang dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Plot Taksiran Kaplan-Meier bagi Fungsi Kegagalan *Bearing*

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa dari t_j = 6,75708 sampai sebelum t_j =10,1875 laju kegagalan atau tingkat kerusakan *bearing* stabil sebesar 0,25. Namun pada t_j = 10,1875 laju kegagalan atau tingkat kerusakan *bearing* menurun secara drastis dari 0,25 menjadi 0,0833. Kemudian laju kegagalan atau tingkat kerusakan *bearing* cenderung bergerak naik secara perlahan sampai t_j = 12,125.

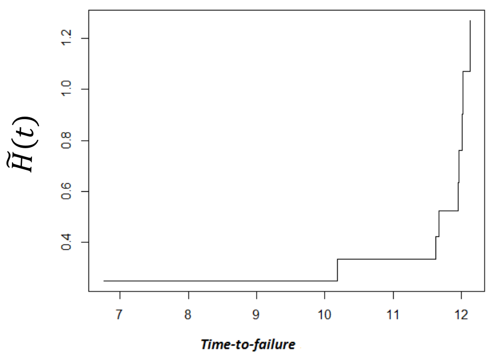
Taksiran Kaplan-Meier bagi Fungsi Kegagalan Kumulatif

Berdasarkan taksiran Kaplan-meier bagi fungsi kegagalan kumulatif *bearing* pada persamaan (8) dan persamaan (9), dimana t_j menyatakan *time-to-failure bearing* dalam hari, d_j adalah jumlah kerusakan pada saat t_j $(j = 1,2, \ldots, k)$ dan n_j adalah jumlah *bearing* yang masih dapat digunakan sesaat sebelum t_j (jumlah *bearing* berisiko pada saat t_j) termasuk yang rusak atau gagal pada saat t_j, hasilnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan untuk $\widetilde{H}(t)$

t_j	n_j	d_j	d_j/n_j	$-\log\left(\frac{n_j-d_j}{n_j}\right)$	$\widetilde{H}(t)=\sum_{j=1}^{k}\frac{d_j}{n_j}$	$\widehat{H}(t)=-\sum_{j=1}^{k}\log\left(\frac{n_j-d_j}{n_j}\right)$
0	16	0	0	0	0	0
6,757080	16	4	0,2500	0,2877	0,25	0,2877
10,18750	12	1	0,0833	0,0870	0,3333	0,3747
11,62500	11	1	0,0909	0,0953	0,4242	0,4700
11,67375	10	1	0,1000	0,1054	0,5242	0,5754
11,95125	9	1	0,1111	0,1178	0,6353	0,6932
11,95833	8	1	0,1250	0,1335	0,7603	0,8267
12,01375	7	1	0,1429	0,1542	0,9032	0,9809
12,02083	6	1	0,1667	0,1823	1,0699	1,1632
12,12500	5	1	0,2000	0,2231	1,2699	1,3863

Berdasarkan taksiran Kaplan-meier bagi fungsi kegagalan kumulatif pada persamaan (9), dengan hasil fungsi kegagalan kumulatif bearing pada Tabel 5, diberikan plot fungsi kegagalan kumulatif bearing terhadap time-to-failure bearing (dalam hari), yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Plot Taksiran Kaplan-Meier bagi Fungsi Kegagalan Kumulatif *Bearing*

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin lama waktu kegagalan *bearing* tersebut maka degradasi *bearing* secara kumulatif akan semakin meningkat atau semakin lama waktu kegagalan *bearing* maka laju kegagalannya secara kumulatif akan terus naik.

D. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dalam skripsi ini telah dibahas *failure degradation bearing* dengan metode Kaplan-Meier. Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Diperoleh 16 data *time to failure bearing* dari 3 set data yang diambil berdasarkan data kurtosis pertama yang melebihi 20, pada data set 1 dan data set 2 untuk semua *bearing* melewati 20 sebelum waktu yang telah ditentukan sedangkan untuk data set 3 ke empat *bearing* tidak ada yang melebihi 20. Dari 16 data *time to failure bearing* ada sebanyak 4 data tersensor yaitu pada data set 3 dan 12 data tidak tersensor yaitu pada data set 1 dan data set 2.

2. Estimasi fungsi ketahanan bearing semakin mengecil untuk waktu yang semakin lama. Ini berarti semakin lama waktu *failure degradation bearing* tersebut maka semakin kecil probabilitas bearing dapat bertahan hingga waktu $t = 4448$.
3. Taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan *bearing* semakin besar atau meningkat untuk waktu yang semakin lama. Ini berarti semakin lama waktu *failure degradation bearing* tersebut maka peluang gagal bearing tersebut semakin besar atau laju kegagalan bearing tersebut semakin meningkat. Sedangkan taksiran Kaplan-Meier bagi fungsi kegagalan kumulatif *bearing*, terlihat bahwa semakin lama waktu kegagalan *bearing* tersebut maka degradasi *bearing* secara kumulatif akan semakin meningkat.

Dari kelseluruhan hasil yang di peroleh dapat di tarik kesimpulan bahwa pendekatan Kaplan-Meier dapatdigunakan untuk memprediksi failure degradation bearing atau kegagalan bering dari data eksperimen vibrasi bearing NASA yang telah dihitung nilai kurtosisnya dengan bantuan program Matlab dalam satuan waktu hari.

Saran

Saran yang dapat dikemukakan dalam penulisan skripsi ini adalah:

1. Disarankan kepada peneliti lain untuk meneliti masalah estimasi failure degradation bearing dengan metode Kaplan-Meier, dengan menggunkan data yang lebih banyak lagi untuk dianalisis dan menambah beberapa variabel kovariat pendukung lainnya. Atau dengan menggunakan data hasil simulasi.
2. Data set vibrasi bearing disarankan untuk lebih diperjelas informasi tentang proses dari setiap set data agar lebih mudah dipahami dan digunakan secara optimal jika ada penelitian selanjutnya.
3. Disarankan untuk peneliti lain menggunakan nilai pengukuran yang lain (selain kurtosis) agar dapat membandingkan pengukuran mana yang terbaik untuk digunakan dalam mengestimasi failure degradation bearing.

Daftar Pustaka

Caesarendra, W., Widodo, A., and Yang, B.S. (2011). Combination of Probability Approach and Support Vector Machine Towards Machine Health Prognostic. Probabilistic Engineering Mechanics, 26(2), 165-173.

Collett, D. (2003). Modelling Survival Data In Medical Research, 3rd Edition. London: Taylor and Francis Group.

Harris, T.A. and Kotzalas, M.N. (2007). Rolling Bearing Analysis, 5rd Edition. USA: Taylor and Francis Group, LLC.

Kleinbaum, D.G. and Klein. (2012). Survival Analysis – A Self-Learning Text. 3rd Edition. New York: Springer.

Klein and Moschberger . (2003). Survival Analysis: Techniques for Censored and Truncated Data, 2nd Edition. New York: Springer.

Sudjana, M.A. (2005). Metode Statistika. Bandung: PT. Tarsito Bandung.

Widodo, A. (2009). Application Of Intelligent System For Machine Fault Diagnosis And Prognosis. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro Semarang.