Jurnal Riset Statistika (JRS)
e-ISSN 2798-6578 | p-ISSN 2808-3148
https://journals.unisba.ac.id/index.php/JRS

Tersedia secara online di
Unisba Press
https://publikasi.unisba.ac.id/

Prediksi Sisa Umur *Bearing* Menggunakan Distribusi Weibull

Uun Unaijah, Sutawanir Darwis*

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

A R T I C L E   I N F O

Article history :
Received : 5/4/2022
Revised : 5/7/2022
Published : 17/7/2022

Volume : 2
No. : 1
Halaman : 75 - 84
Terbitan : **Juli 2022**

A B S T R A K

Pemantauan kondisi mesin untuk menghindari adanya kerusakan, mesin harus selalu dipantau agar tidak terjadi penurunan waktu operasi atau kerusakan pada mesin yang tak terduga. Kondisi dari kesehatan mesin dapat mendeteksi, mengklasifikasikan dan memperkirakan kerusakan yang akan datang, hal tersebut sangat penting dalam mengurangi biaya operasi dan pemeliharaan. Terdapat beberapa metode untuk menganalisis masa pakai mesin salah satunya analisis dengan menggunakan distribusi Weibull yang dapat digunakan untuk memperkirakan tentang persoalaan *reliability*, *mantainability* dan dapat digunakan untuk memperkirakan kerusakan *bearing*. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari *Intelligent Maintenance System* (IMS), IEEE PHM 2012 melalui penyimpanan FEMTO-ST Institute dan Jurnal Zhai dengan judul *Analysis of Time-to-Failure Data with Weibull Model in Product Life Cycle Management*. Penentuan *Time to Failure* yaitu dengan menentukan nilai maksimum dalam setiap periode. Berdasarkan hasil analisis data dari penelitian yang dilakukan tentang prediksi sisa umur mesin *bearing* maka didapatkan bahwa distribusi Weibull dapat digunakan untuk menganalisis data waktu kegagalan dengan menggunakan estimasi metode kuadrat terkecil dan maksimum *likelihood*. Namun dalam hal ini metode dengan menggunakan metode kuadrat terkecil lebih akurat dibandingkan metode maksimum *likelihood*.

Kata Kunci : Bearing; Waktu Kegagalan; Distribusi Weibull.

A B S T R A C T

The condition of the machine to avoid damage, the machine must always be monitored so that there is no decrease in operating time or unexpected damage to the machine. The condition of the health of the machine can detect, classify and predict future failures, it is very important in reducing operating and maintenance costs. There are several methods to analyze the life of the machine, one of which is the analysis using the Weibull distribution which can be used to estimate reliability, maintenance, and can be used to estimate damage. The data used in this study is secondary data obtained from the Intelligent Maintenance System (IMS), IEEE PHM 2012 through FEMTO-ST Institute storage and the Zhai Journal with the title Analysis of Time-to-Failure Data with Weibull Model in Product Life Cycle Management. Determine Time to Failure by determining the maximum value in each period. The results of data analysis from research conducted on the prediction of the remaining life of the bearing machine, it is found that the Weibull distribution can be used to analyze failure data using the smallest method based on the maximum probability and probability. However, in this case the method using the least squares method is more accurate than the maximum likelihood method.

Keywords : Bearing; Time Failure; Weibull Distribution.

Corresponding Author : *sutawanir.darwis@unisba.ac.id
Indexed : Garuda, Crossref, Google Scholar
DOI : https://doi.org/10.29313/jrs.vi.909

A. Pendahuluan

Dalam era globalisasi saat ini, aplikasi statistika berkembang dengan pesat sebagai suatu bidang kajian terapan. Beberapa metode aplikasi statistika berkembang sebagai bentuk respons atas berbagai masalah yang ada pada berbagai bidang, seperti di bidang kedokteran, pertanian, teknik, ekonomi dan sebagainya. Salah satu contoh pengaplikasian ilmu statistik dalam bidang teknik mesin adalah menghitung peluang kegagalan suatu mesin, dimana hal tersebut bisa digunakan untuk mengontrol kondisi kesehatan mesin.

Kondisi kesehatan mesin merupakan prioritas utama pada sebuah perusahaan. Sehingga setiap waktunya, mesin harus selalu dipantau agar tidak terjadi penurunan waktu operasi atau kerusakan pada mesin yang tak terduga. Mesin terdiri dari beberapa elemen yang masing-masing elemennya memiliki fungsi tersendiri. *Bearing* atau bantalan merupakan salah satu bagian dari elemen mesin yang memegang peranan penting untuk menjaga kinerja sistem dalam perangkat agar tetap dalam kondisi baik [1]. *Bearing* adalah elemen mesin yang mendukung elemen mesin lainnya bergerak, berfungsi sebagai pembatas gerak *relative* antara dua atau lebih komponen agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan.

Seiring dengan bertambahnya usia mesin dan juga penggunaan mesin, mesin dapat mengalami penurunan performansi yang membuat mesin menjadi tidak operasional lagi. Kegagalan pada perputaran *bearing* merupakan salah satu penyebab utama kerusakan dalam sebuah mesin. Kerusakan *bearing* harus diprediksi dengan akurat karena akan menentukan berapa lama sisa umur fungsi dari sebuah mesin. Oleh karena itu, pemantauan secara dini terhadap kondisi *bearing* menjadi hal yang penting, sehingga *bearing* dapat diganti sebelum mengalami kerusakan secara menyeluruh.

Distribusi Weibull memiliki peranan penting terutama pada persoalaan keandalaan *(reliability)* dan analisis rawatan *(mantainability).* Distribusi Weibull mempunyai sifat ekuivalen dengan distribusi tertentu. Distribusi ini merupakan distribusi serbaguna yang dapat mengambil karakteristik dari jenis lain dari distribusi berdasarkan nilai dari bentuk parameter. Oleh karenanya Weibull menjadi sangat berguna terutama karena fleksibilitasnya mulai dari data yang tidak simetris sampai data yang mendekati distribusi normal (simetris).

Atas dasar itulah maka tujuan dilakukannya penelitian ini untuk memprediksi sisa umur *bearing*, reliabilitas didefinisikan sebagai probabilitas bahwa suatu komponen atau sistem akan menginformasikan suatu fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu tertentu ketika digunakan dalam kondisi operasi dan laju kerusakan dengan menggunakan distribusi Weibull dengan metode kuadrat terkecil dan maksimum *likelihood*.

B. Metode Penelitian

Menurut Heizer dan Render [2] keandalan adalah probabilitas bahwa bagian mesin atau produk dapat bekerja sebagaimana mestinya dalam waktu dan kondisi tertentu. Keandalan suatu mesin akan menurun secara signifikan apabila dipekerjakan di luar batasan yang mesin tersebut memiliki yang mengakibatkan penurunan keandalan.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}}$$

Laju kerusakan (*Failure Rate*) merupakan probabilitas dimana peralatan mengalami kegagalan atau kerusakan dalam suatu interval waktu berikutnya yang diberikan dan diketahui kondisinya baik pada awal interval. Fungsi $\lambda(t)$ adalah probabilitas dimana sistem atau peralatan mengalami kegagalan atau kerusakan selama interval waktu yang pendek Δt. Laju kerusakan dalam distribusi Weibull [3, p. 21].

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

Sisa umur mesin merupakan lamanya mesin masih berfungsi setelah waktu tertentu atau waktu yang tersisa sebelum kegagalan akhir terjadi [4]. Sedangkan Umur mesin merupakan lamanya mesin tersebut mampu berfungsi sampai tiba waktu kegagalannya. Sedangkan Reliabilitas, umur dan sisa umur mesin adalah saling berhubungan. Sehingga dapat dikatakan bahwa mereka merupakan ukuran reliabilitas mesin. Ukuran-ukuran ini menyatakan kemampuan berfungsinya mesin dari awal hingga muncul kegagalannya.

$$MTTF \ = \theta\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right)$$

Distribusi Weibull merupakan distribusi kontinu dan biasanya digunakan untuk representasikan data karena merupakan suatu distribusi yang fleksibel yang dapat meniru karakteristik-karakteristik dari banyak distribusi-distribusi yang lain. Weibull sangat sering digunakan untuk merepresentasikan data uji hidup. Distribusi ini sesuai digunakan dalam menentukan tingkat keandalan *(reliability)* yang mempunyai konsep laju kerusakan dalam penerapannya. Ada dua parameter yang dappat digunakan yaitu β (parameter bentuk/*shape parameter*) dan θ (parameter skala/*scale parameter/*umur) dan juga disebut karakteristik hidup). Fungsi densitas distribusi ini dinyatakan sebagai:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta}(t)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \quad t \geq 0, \theta > 0, \beta > 0$$

Estimasi parameter adalah penaksir atau penduga terhadap nilai-nilai parameter populasi berdasarkan data atau sampel yang diambil dari populasi. Parameter populasi biasanya tidak diketahui, oleh karena itu untuk mengetahuinya dilakukan estimasi terhadap parameter tersebut melalui data sampel menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* menggunakan pendekatan distribusi dengan memaksimumkan fungsi *likelihood* dan *least square method*. Penaksir parameter distribusi Weibull yaitu dengan memaksimumkan probabilitas (*likelihood*) dari data:

Pembentukan Fungsi *Likelihood*

$f(t;\beta;\theta) = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}}$; Untuk $t > 0, \beta > 0, \theta > 0$

$L(t;\beta;\theta) = f(t_1;\beta;\theta)f(t_2;\beta;\theta) \ldots\ f(t_n;\beta;\theta)$

$=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t_1}{\theta}\right) e^{-\left(\frac{t_1}{\theta}\right)^{\beta}} . \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t_2}{\theta}\right) e^{-\left(\frac{t_2}{\theta}\right)^{\beta}} \ldots \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t_n}{\theta}\right) e^{-\left(\frac{t_n}{\theta}\right)^{\beta}}$

Pembentukan Log *Likelihood*

$$\begin{aligned}
&\ln L\,(t;\beta;\theta) = l(\beta;\theta;t) \\
&l(\beta;\theta;t) = n\ln\beta - n\beta\ ln\theta + \ln\prod_{i=1}^{n} t_i^{\,\beta-1} - \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta} \\
&\qquad = n\ln\beta - n\beta\ ln\theta + (\beta-1)\ln\prod_{i=1}^{n} t_i - \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta} \\
&\qquad = n\ln\beta - n\beta\ ln\theta + (\beta-1)\ln\textstyle\prod_{i=1}^{n} t_i - \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}
\end{aligned}$$

Karena $\frac{\partial l(\beta;\theta;t)}{\partial\theta} = 0$, maka

$$\begin{aligned}
&= \frac{\partial}{\partial\theta}\left[nln\beta - n\beta ln\beta + (\beta-1)\sum_{i=1}^{n} lnt_i - \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}\right] \\
&= -\frac{n\beta}{\theta} + \frac{\beta}{\theta^{(\beta+1)}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta} = 0 \\
&-\frac{n\beta}{\theta} = -\frac{\beta}{\theta^{(\beta+1)}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta} \\
&\frac{n\beta}{\theta} = \frac{\beta}{\theta^{(\beta+1)}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}
\end{aligned}$$

$$\frac{n\beta}{\theta}.\theta = \frac{\beta}{\theta^{(\beta+1)}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}.\theta$$
$$n\beta = \frac{\beta}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}$$
$$n = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}}{\theta^{\beta}}$$
$$\theta^{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}}{n}$$
$$\theta = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}}{n}\right]^{\frac{1}{\beta}} \qquad \ldots$$

Karena $\frac{\partial l(\beta;\theta;t)}{\partial\beta} = 0$, maka

$$= \frac{\partial}{\partial\beta}\left[ln\beta - n\beta\, ln\theta + (\beta-1)\sum_{i=1}^{n} lnt_i - \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}\right]$$
$$= \frac{\partial}{\partial\beta}\left[ln\beta - n\beta\, ln\theta + (\beta-1)\sum_{i=1}^{n} lnt_i - \sum_{i=1}^{n}(t_i)^{\beta}\right]$$
$$= \frac{n}{\beta} - nln\theta + \sum_{i=1}^{n} lnt_i - \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta}\ln\left(\frac{t_i}{\theta}\right) = 0$$
$$-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta}\ln\left(\frac{t_i}{\theta}\right) - nln\theta + \frac{n}{\beta} = -\sum_{i=1}^{n} lnt_i$$
$$\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta}\ln\left(\frac{t_i}{\theta}\right) + nln\theta - \frac{n}{\beta} = \sum_{i=1}^{n} lnt_i$$
$$\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta}\ln(t_i) - \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\theta}\right)^{\beta} ln\theta + n\, ln\theta - \frac{n}{\beta} = \sum_{i=1}^{n} lnt_i$$

Subtitusi:

$$= \frac{1}{\theta^{\beta}}\sum_{i=1}^{n} t_i{}^{\beta} lnt_i - nln\theta + nln\theta - \frac{n}{\beta} = \sum_{i=1}^{n} lnt_i$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} t_i{}^{\beta} lnt_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i{}^{\beta}} - \frac{1}{\beta} = \sum_{i=1}^{n} lnt_i$$

Nilai dugaan parameter bagi β diperoleh melalui pendekatan iterasi metode Newton-Raphson dengan mengganggap bahwa:

$$\frac{\partial l(\beta;\theta;t)}{\partial\beta} = 0$$

Langkah-langkah metode Newton-Raphson untuk mencari dugaan parameter adalah sebagai berikut: (1) Menentukan nilai awal β_0; (2) Menentukan persamaan $f(\beta)$; (3) Subtitusi persamaan $f(\beta)$. dan turunan pertamanya $f'(\beta)$. Kedalam rumus metode Newton-Raphson; (4) Iterasi dihentikan jika nilainya telah konvergen Artinya, nilai β_{s+1}. Itulah yang dijadikan nilai aproksimasi untuk β.

Metode Kuadrat Terkecil (MKT) merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk mendapatkan nilai-nilai penduga parameter model regresi. Namun untuk distribusi Weibull harus dilakukan transformasi ke model regresi.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n\ \sum_{i=1}^{n} \ln\ X_i\ \boldsymbol{ln}\left(\boldsymbol{ln}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}-\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{n}}^{\wedge}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{n} ln\, X_i\ \sum_{i=1}^{n}\ \boldsymbol{ln}\left(\boldsymbol{ln}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}-\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{n}}^{\wedge}}\right)\right)}{n\ \sum_{i=1}^{n}\ (\ln X_i)^2 - (\sum_{i=1}^{n} \ln X_i)^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\ Y_i - \hat{\beta}_1\ \sum_{i=1}^{n}\ X_i}{n}$$

Maka persamaan linear adalah:

$y_i = a + bx$; $y_i = \ln\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \beta\ln t - \beta\ln\theta$; $b = \beta$

$x_i = \ln t_i$; $F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$; $a = -\beta\ln\theta$

Persamaan tersebut kemudian dapat ditulis ulang menjadi:

$y_i = \beta x\ - \beta\ln\theta$; $b = \beta$; $\theta =\ e^{-\frac{a}{b}}$

Uji Kecocokan Distribusi (Uji Mann untuk Distribusi Weibull)

Hipotesis untuk uji kecocokan distribusi yaitu H_0: Data kerusakan berdistribusi Weibull dan H_1: Data kerusakan tidak berdistribusi Weibull dimana tingkat signifikansi nya sebesar 5%. Untuk statistik uji – nya yaitu:

$$M = \frac{k_1 \sum_{i=k_1+1}^{r-1}\left(\frac{(\ln t_{i+1} - \ln t_i)}{M_i}\right)}{k_2 \sum_{i=1}^{k_1}\left(\frac{(\ln t_{i+1} - \ln t_i)}{M_i}\right)}\ M_i = Y_{i+1} -\ Y_i$$

$$Y_i = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-\mathrm{F}_{\mathrm{n}}^{\wedge}}\right)\right)$$

$$k_1 =\ \left|\frac{r}{2}\right|; k_2 = \left|\frac{r-1}{2}\right|$$

Dimana:

t_i	: Waktu kerusakan ke-i
M	: Nilai perhitungan distribusi Weibull
M_i	: Nilai pendekatan Mann untuk data ke-i
r	: Banyaknya data
F_{tabel}	: Nilai persentase distribusi F [5]

Untuk kriteria uji yaitu H_0 ditolak jika $M >\ F_{tabel}$ atau P-value < α dan kesimpulan yang didapat adalah Jika H_0 ditolak, maka dapat ditarik kesimpulan Data kerusakan tidak berdistribusi Weibull

Mean Square Error

$$MSE = \sum_{i=1}^{n} \left|\widehat{F(t_i)} - F(t_i)\right|^2$$

Dimana:

$\widehat{F(t_i)} = 1 - e^{-\left(\frac{\mathrm{t}}{\theta}\right)^{\beta}}$; distribusi kumulatif dari distribusi weibull

$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$; Probabilitas Kumulatif.

C. Hasil dan Pembahasan

Data yang digunakan adalah data vibrasi *bearing* yang dibagi menjadi 3 data set, untuk memudahkan dalam perhitungan data tersebut diubah menjadi kurtosis untuk data pertama dan diubah menjadi RMS untuk data ke dua. Menurut Gilli dan Këllezi [6] menyatakan bahwa salah satu metode untuk menentukan nilai-nilai ekstrim dapat dilakukan dengan metode blok maksimal (Block Maxima/BM) yaitu memilih data ekstrim dengan membagi data menjadi beberapa blok kemudian mengambil nilai yang terbesar (nilai maksimum) dalam setiap periode.

Dengan menggunakan rumus yang sama maka diperoleh nilai distribusi kecocokan:

Tabel 1. Uji Kecocokan Distribusi Weibull

Data	M	F- TABEL	Keterangan
IMS	0,3544	4,6001	Data kerusakan berdistribusi Weibull
FEMTO-Institue	1,0901	4,1491	Data kerusakan berdistribusi Weibull
Jurnal Zain	1,1071	5,3176	Data kerusakan berdistribusi Weibull

Setelah diketahui bahwa data berdistribusi Weibull maka langkah selanjutnya mengestimasi parameter dengan menggunakan metode kuadrat terkecil.

Tabel 2. Estimasi Parameter Menggunakan MKT

Estimasi Parameter Menggunakan Metode Kuadrat Terkecil		
Data	θ	β
IMS	15008,0791	0,6094
FEMTO-Institue	8817,6033	0,8461
Jurnal Zain	69341,77	4,2506

Menghitung nilai parameter dengan menggunakan metode *maximum likelihood estimation:*

Tabel 3. Estimasi Parameter Menggunakan MLE

Estimasi Parameter Menggunakan Metode Maximum *Likelihood* Estimation		
Data	**alfa**	**beta**
IMS	12038,86	1,0625
FEMTO-Institue	8463,01	0,9901
Jurnal Zain	$4{,}24 \times 10^{-9}$	1,74106

Dengan menggunakan rumus keandalan, laju kerusakan maka diperoleh nilai laju kerusakan dan keandalan dengan menggunakan data *Intelligent Maintenance System* (IMS), University of Cincinnati yang terdiri dari 16 data kurtosis dan waktu kegagalan.

Tabel 4. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-1

Metode	Kuadrat Terkecil		Maximum *Likelihood*	
t	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**
541	0,000149	0,8763	0,000073	0,9637
407	0,000166	0,8950	0,000071	0,9730
577	0,000145	0,8717	0,000073	0,9611
298	0,000188	0,9123	0,00007	0,9805

Lanjutan Tabel 4. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-1

Metode	**Kuadrat Terkecil**	**Maximum *Likelihood***	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**
t	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**		
9782	0,000048	0,4628	0,000087	0,4484
9792	0,000048	0,4626	0,000087	0,4480
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.

Metode	**Kuadrat Terkecil**		**Maximum *Likelihood***	
t	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**
17529	0000038	0,3331	0,00009	0,2252
17486	0,000038	0,3337	0,00009	0,2261
20190	0,000036	0,3018	0,000091	01769

Setelah melakukan perhitungan dengan menggunakan rumus MSE maka didapatkan

Tabel 5. Perbandingan nilai MSE

Metode Terbaik	MSE	
	MKT	MLE
	0.3485	0.3987

Dapat dilihat pada tabel di atas dengan membandingkan nilai *error* pada masing masing metode maka metode terbaik dalam menaksir parameter pada data ini adalah *Least Square*. Dengan menggunakan MTTF maka rataan sisa umur komponen mesin diesel berfungsi sampai terjadinya kegeagalan yaitu selama $22118,4567\ Menit$. Tingkat keandalan atau peluang suatu mesin agar bisa menjalankan fungsinya untuk dapat hidup lebih dari waktu yang telah ditentukan yaitu dengan batas maksimal sebesar 0,462830. Artinya jika mesin tidak ingin mengalami kegagalan, maka batas keandalan yang disyaratkan minimal 46,2% dalam hal ini kondisi komponen mesin *bearing* dalam keadaan baik. Nilai laju kerusakan dan keandalan dari Institute of Electrical and Electronic Engineers Prognostics and Health Management (IEEE PHM 2012) yang terdiri dari 34 nilai RMS dan waktu kegagalan.

Tabel 6. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-2

Metode	**Kuadrat Terkecil**		**Maximum *Likelihood***	
t	**Laju kerusakan**	**keandalan**	**Laju kerusakan**	**keandalan**
84	0,0001964	0,9807	0,0001225	0,9897
177	0,0001751	0,964	0,0001216	0,9785
227	0,0001685	0,9558	0,0001213	0,9726
881	0,0001368	0,8673	0,0001196	0,899
1216	0,0001302	0,8294	0,0001193	0,8638

Lanjutan Tabel 6. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-2

Metode **t**	**Kuadrat Terkecil** **Laju kerusakan**	**Maximum *Likelihood*** **keandalan**	**Laju kerusakan**	**keandalan**
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
4431	0,0001067	0,572	0,0001177	0,5904
4969	0,0001048	0,5404	0,0001176	0,5542
4969	00001048	0,5404	0,0001176	0,5542
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
28019	0,0000803	0,07	0.0001156	0,0379
28059	0,0000803	0,0697	0.0001156	0,0378

Setelah melakukan perhitungan dengan menggunakan rumus MSE maka didapatkan:

Tabel 7. Perbandingan nilai MSE

Metode Terbaik	MSE	
	MKT	MLE
	0,0432	7,1660

Dapat dilihat pada tabel di atas dengan membandingkan nilai *error* pada masing masing metode maka metode terbaik dalam menaksir parameter pada data ini adalah *Least Square*. Dengan menggunakan MTTF maka rataan sisa umur komponen mesin diesel berfungsi sampai terjadinya kegeagalan yaitu selama 9611,1876 menit. Tingkat keandalan atau peluang suatu mesin agar bisa menjalankan fungsinya untuk dapat hidup lebih dari waktu yang telah ditentukan yaitu dengan batas maksimal sebesar 0,5404. Artinya jika mesin tidak ingin mengalami kegagalan, maka batas keandalan yang disyaratkan minimal 54 % dalam hal ini kondisi komponen mesin *bearing* dalam keadaan baik.

Nilai laju kerusakan dan keandalan Jurnal Zhai dengan judul *Analysis of Time-to-Failure Data with Weibull Model in Product Life Cycle Management.* Yang terdiri dari 10 data komponen mesin diesel:

Tabel 8. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-3

Metode	**Kuadrat Terkecil**		**Maximum *Likelihood***	
t	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**
38456	$9{,}02 \times 10^{-6}$	0,9216	1,64364E+18	0
48334	$1{,}89 \times 10^{-5}$	0,8060	1,94708E+18	0
50806	$2{,}23 \times 10^{-5}$	0,7660	2,0204E+18	0

Lanjutan Tabel 8. Nilai Laju Kerusakan dan Keandalaan Pada Data ke-3

Metode	**Kuadrat Terkecil**	**Maximum *Likelihood***		
t	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**	**Laju Kerusakan**	**Keandalan**
51521	$2{,}33 \times 10^{-5}$	0,7536	2,04143E+18	0
61544	$4{,}16 \times 10^{-5}$	0,5476	2,32887E+18	0
66667	$5{,}39 \times 10^{-5}$	0,4291	2,47104E+18	0
72605	$7{,}12 \times 10^{-5}$	0,2964	2,63233E+18	0
75521	$8{,}09 \times 10^{-5}$	0,2375	2,71027E+18	0
80785	0,000100767	0,1475	2,84904E+18	0
84894	0,000118401	0,0941	2,95574E+18	0

Setelah melakukan perhitungan dengan menggunakan rumus MSE maka didapatkan:

Tabel 9. Perbandingan nilai MSE

Metode Terbaik	MSE	
	MKT	MLE
	0,0192	3,2628

Dapat dilihat pada tabel di atas dengan membandingkan nilai *error* pada masing masing metode maka metode terbaik dalam menaksir parameter pada data ini adalah *Least Square*. Dengan menggunakan MTTF maka rataan sisa umur komponen mesin diesel berfungsi sampai terjadinya kegeagalan yaitu selama 63149,1165 jam.

Tingkat keandalan atau peluang suatu mesin agar bisa menjalankan fungsinya untuk dapat hidup lebih dari waktu yang telah ditentukan yaitu dengan batas maksimal sebesar 0,7536. Artinya jika mesin tidak ingin mengalami kegagalan, maka batas keandalan yang disyaratkan minimal 75,4 %. Dalam hal ini kondisi komponen mesin *bearing* dalam keadaan baik.

Namun dalam hal ini diketahui bahwa nilai $\beta = 4{,}2506$ yang artinya mesin diesel telah digunakan melebihi batas waktu yang telah ditentukan. Periode ini ditandai dengan penurunana performansi komponen atau item pada sebuah mesin yang meningkat tajam, karena memburuknya kondisi peralatan. Sebaiknya dilakukan perawatan pencegahan untuk mengurangi terjadinya kerusakan yang lebih fatal. Fase ini disebabkan oleh komponen atau peralatan yang digunakan sudah melebihi umur teknisnya *(wear out)*.

D. Kesimpulan

Permasalahan penelitian yang dikaji dalam skripsi ini adalah: Estimasi parameter Weibull menggunakan metode kuadrat terkecil dan maksimum *likelihood* dari data eksperimen vibrasi *bearing*, dan menentukan nilai keandalan, laju kerusakan dan sisa umur dari data vibrasi *bearing*. Berdasarkan hasil analisis data dari penelitian yang dilakukan tentang prediksi sisa umur mesin *bearing* maka didapatkan bahwa distribusi Weibull dapat digunakan untuk menganalisis data waktu kegagalan dengan menggunakan estimasi metode kuadrat terkecil dan maksimum *likelihood*. Namun dalam hal ini metode dengan menggunakan metode kuadrat terkecil lebih akurat dibandingkan metode maksimum *likelihood*.

Daftar Pustaka

[1] Anggi Priliani Yulianto and S. Darwis, “Penerapan Metode K-Nearest Neighbors (kNN) pada *Bearing*,” *J. Ris. Stat.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–18, Jul. 2021, doi: 10.29313/jrs.v1i1.16.

[2] J. Heizer and B. Render, *Operations Management*, 10th ed. Pearson Education, Inc. New Jersey, 2011.

[3] C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Singapore: Mc Graw Hill Publishing Company, 1997.

[4] R. E. R. E. Walpole and R. H. Myers, *Ilmu peluang dan statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan*, 2nd ed. Bandung: ITB Press, 1995.

[5] B. D. Famela, V. Lukitosari, and W. F. Doctorina, “Analisa Penentuan Sisa Umur *Bearing* Menggunakan Fungsi Mean Residual Life (Studi Kasus Pada Mesin Sakurai Oliver-66 CV.Bintang Cakra),” *Limits J. Math. Its Appl.*, vol. 14, no. 2, pp. 127–143, 2017, doi: 10.12962/limits.v14i2.2371.

[6] M. Gilli and E. Këllezi, “An Application of Extreme Value Theory for Measuring Financial Risk,” *Comput. Econ.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–23, 2006, doi: 10.1007/s10614-006-9025-7.