

## Prediksi Sisa Umur *Bearing* Menggunakan Regresi Eksponensial

Devila Mustika Prancisca\*

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

\*devilamustika@gmail.com

**Abstract.** Statistics is widely applied in various disciplines, one of which is in the industrial sector. Industry can be used as an indicator of the development of science and technology. Along with the advancement of industrialization and intense competition, a company is required to be able to survive and win the competition with other companies. The problem that is often faced in the industrial world is the existence of a statement that a system that has been designed and made as sophisticated and complex as any will inevitably experience disturbances, whether mild, moderate, or severe. One of the important elements in the machine is the bearing. If the bearing is not functioning properly then the whole system cannot work properly. Bearing damage must be predicted accurately because it will determine how long the remaining functional life of a machine. Exponential regression is the model used in this study. The data used is vibration data from bearing test experiments downloaded from IEE PHM 2012 provided by the FEMTO-ST Institute. By analyzing the extracted data on the RMS feature, the results show that exponential regression can be used to determine or predict the RUL of the bearing. In addition, obtained  $R^2$  in the analysis of all data and the data-cut off is 76.3% and 79.9%, respectively. So, the results of the  $R^2$  value in the exponential regression equation model using the cut-off data are better than the exponential regression equation model by including all data, because it shows a higher level of accuracy.

**Keywords:** *exponential regression, remaining useful life, vibration bearing.*

**Abstrak.** Statistika banyak diterapkan dalam berbagai disiplin ilmu, salah satunya di bidang industri. Industri dapat dijadikan sebagai indikator terjadinya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Seiring dengan majunya industrialisasi dan ketatnya persaingan, sebuah perusahaan dituntut mampu tetap bertahan dan memenangkan persaingan dengan perusahaan lain. Persoalan yang sering dihadapi dalam dunia industri adalah adanya suatu pernyataan bahwa suatu sistem yang telah dirancang dan dibuat secanggih dan sekompleks apapun pasti akan mengalami gangguan, baik gangguan ringan, sedang, maupun berat. Salah satu elemen penting pada mesin yaitu bearing. Bila bearing tidak berfungsi dengan baik maka seluruh sistem tidak bisa bekerja secara semestinya. Kerusakan bearing harus diprediksi dengan akurat sebab akan menentukan berapa lama sisa umur fungsi dari suatu mesin. Regresi eksponensial adalah model yang digunakan dalam penelitian ini. Data yang digunakan adalah data vibrasi dari eksperimen uji bearing yang diunduh dari Institute of Electrical and Electronic Engineers Prognostics and Health Management 2012 yang disediakan oleh FEMTO-ST Institute. Dengan menganalisis data hasil ekstraksi pada fitur RMS, hasilnya menunjukkan bahwa regresi eksponensial bisa digunakan untuk menentukan atau memprediksi RUL pada bearing. Selain itu, didapat  $R^2$  pada analisis seluruh data dan data-cut off 76,3% dan 79,9%. Maka, hasil dari nilai  $R^2$  pada model persamaan regresi eksponensial dengan menggunakan data-cut off lebih bagus daripada model persamaan regresi eksponensial dengan menyertakan seluruh data, karena menunjukkan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

**Kata Kunci:** *regresi eksponensial, remaining useful life, vibrasi bearing.*

## A. Pendahuluan

Statistika banyak diterapkan dalam berbagai disiplin ilmu, salah satunya di bidang industri. Seiring dengan majunya industrialisasi dan ketatnya persaingan, sebuah perusahaan dituntut mampu tetap bertahan dan memenangkan persaingan dengan perusahaan lain. Persoalan yang sering dihadapi dalam dunia industri adalah adanya suatu pernyataan bahwa suatu sistem yang telah dirancang dan dibuat secegang dan sekompleks apapun pasti akan mengalami gangguan, baik gangguan ringan, sedang, maupun berat (Suhardjono, 2005). Salah satu elemen penting pada mesin yaitu bearing. Bila bearing tidak berfungsi dengan baik maka seluruh sistem tidak bisa bekerja sebagaimana mestinya. Kerusakan bearing harus diprediksi secara akurat sebab akan menentukan berapa lama sisa umur fungsi dari suatu mesin. Oleh sebab itu, pemantauan secara dini terhadap kondisi bearing merupakan hal yang tidak kalah penting, sehingga bearing bisa diganti sebelum mengalami kerusakan secara menyeluruh guna menghindari kerusakan pada komponen lain yang berakibat fatal.

Tidak sedikit penelitian yang telah membahas tentang perkiraan sisa umur bearing untuk mendukung sistem perawatan cerdas, topik ini dikenal dengan prognosis mesin. Tingginya kompetisi pasar saat ini mengakibatkan banyaknya sektor industri yang mencoba meminimalkan modal dan biaya operasional dengan cara memanfaatkan siklus hidup dari mesin produksi tanpa mengorbankan pekerja (manusia), hasil produksi maupun keselamatan lingkungan.

Berdasarkan uraian diatas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui model Remaining Useful Life (RUL) pada bearing berdasarkan metode regresi eksponensial dan untuk mengetahui pengaruh pemotongan data dengan mengabaikan kondisi normal yang dimulai dari saat terjadinya kerusakan.

## B. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data vibrasi dari eksperimen uji bearing. Data tersebut diunduh dari Institute of Electrical and Electronic Engineers Prognostics and Health Management 2012 yang disediakan oleh FEMTO-ST Institute.

Data vibrasi yang digunakan diperoleh dari pengembangan data vibrasi yang mempresentasikan perambatan cacat dari elemen bergulir pada bearing yang didukung oleh program matlab. Pengukuran data vibrasi akselerometer diambil secara radial pada arah horizontal dan vertikal. Sinyal getaran dikumpulkan setiap 10 detik dengan batas data sampling sebesar 2560 sampel dan frekuensi getaran sebesar 25,6 kHz.

Pada tabel 1 merupakan contoh data eksperimen vibrasi bearing untuk data bearing1\_1 pada waktu  $t = 2010.12.01.09.39.39$  sampai ke-  $t = 2010.12.01.17.26.39$  yang diperoleh dari FEMTO-ST Institute sebagai berikut:

**Tabel 1.** Data Eksperimen Vibrasi Bearing 1 untuk Kondisi Operasi Pertama

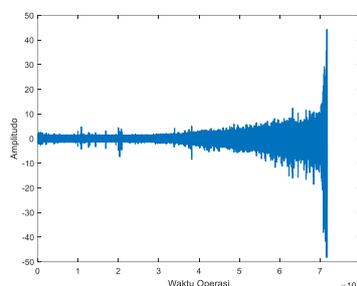
	<i>Bearing 1</i>	
	<b><i>t = 2010.12.01.09.39.39</i></b>	
	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
1	0.552	-0.146
2	0.501	-0.48
⋮	⋮	⋮
2560	-0.134	0.541
	<b><i>t = 2010.12.01.09.39.49</i></b>	
	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
	1	-0.146
2	-0.48	0.313
⋮	⋮	⋮

2560	0.669	-0.125
	⋮	
	<b><math>t = 2010.12.01.17.26.39</math></b>	
	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
1	0.656	5.87
2	-1.217	1.235
⋮	⋮	⋮
2560	-2.709	0.47

Sumber: Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute

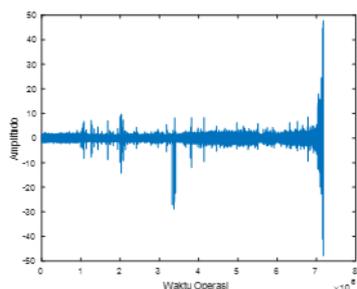
\*)Keterangan: t = tahun.bulan.tanggal.jam.menit.detik

Plot vibrasi bearing 1 untuk kondisi operasi pertama arah horizontal pada waktu  $t = 2010.12.01.09.39.39$  sampai ke-  $t = 2010.12.01.17.26.39$  yang diperlihatkan pada Gambar 1 dibawah ini:



**Gambar 1.** Plot Data Eksperimen Vibrasi Bearing 1 untuk Kondisi Operasi Pertama Arah Horizontal

Plot vibrasi bearing 1 untuk kondisi operasi pertama arah vertikal pada waktu  $t = 2010.12.01.09.39.39$  sampai ke-  $t = 2010.12.01.17.26.39$  yang diperlihatkan pada Gambar 2 dibawah ini:



**Gambar 2.** Plot Data Eksperimen Vibrasi Bearing 1 untuk Kondisi Operasi Pertama Arah Vertikal

Setelah mendapatkan data eksperimen vibrasi bearing, langkah selanjutnya adalah melakukan prosedur dan teknis pengolahan untuk memprediksi sisa umur dari bearing yang dibantu menggunakan microsoft excel, matlab, spss dan minitab.

**Tahapan Analisis**

Tahapan analisis yang digunakan dalam skripsi ini sebagai berikut:

1. Melakukan extraction terhadap keenam fitur vibrasi bearing FEMTO-ST.
2. Melakukan processing terhadap keenam fitur vibrasi bearing FEMTO-ST dengan langkah sebagai berikut:

- a. Melakukan normalisasi terhadap fitur yang telah di ekstraksi menggunakan persamaan berikut:

$$X_{norm} = \frac{(Y_{max}-Y_{min})(X-X_{min})}{(X_{max}-X_{min})} + Y_{min} \tag{1}$$

Dimana  $x_{norm}$  adalah hasil normalisasi,  $Y_{max}= 1$ ,  $Y_{min}= 0$ .,  $X$  adalah nilai fitur,  $X_{min}$  adalah nilai fitur minimum (Wentao Sui et al, 2019).

- b. Melakukan smoothing terhadap fitur yang telah di ekstraksi menggunakan persamaan berikut:

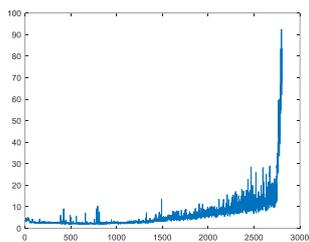
$$x_n^{MA} = \begin{cases} \frac{1}{n+3}(x_1 + \dots + x_{n+3}) & n \leq 3 \\ \frac{1}{7}(x_{n-3} + \dots + x_{n+3}) & 4 \leq n \leq N - 3 \\ \frac{1}{N-n+4}(x_{n-3} + \dots + x_N) & N - 2 \leq n \leq N \end{cases} \tag{2}$$

Dimana  $x_n$  adalah urutan karakteristik asli,  $x_n^{MA}$  adalah hasil *smoothing*, N adalah jumlah total data vibrasi.

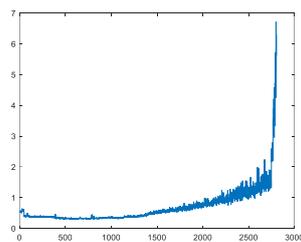
- 3. Menentukan fitur yang akan digunakan untuk analisis pada tahapan selanjutnya.
- 4. Melakukan langkah-langkah pengerjaan analisis regresi non linear sebagai berikut:
  - a. Menentukan analisis deskriptif terhadap variabel bebas dan terikat.
  - b. Menampilkan scatter plot pada variabel bebas (x) dan variabel terikat (y).
  - c. Menentukan model persamaan regresi dengan melakukan analisis regresi eksponensial.
- 5. Melakukan Langkah-langkah pengerjaan Remaining Useful Life (RUL) sebagai berikut:
  - a. Menentukan parameter  $a_1$ ,  $b_1$ , dan  $c_1$  Menentukan failure threshold
  - b. Menentukan invers pada model eksponensial
  - c. Menentukan nilai prediksi Remaining Useful Life (RUL)

**C. Hasil Penelitian dan Pembahasan**

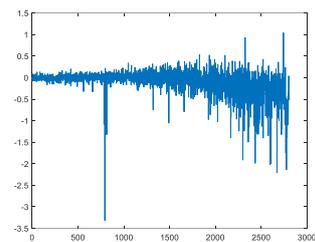
Pada tahapan ini akan disajikan hasil dan pembahasan dari penerapan tahapan analisis pada tahapan sebelumnya. Diawali dengan melakukan ekstraksi dan *processing* terhadap fitur pada vibrasi *bearing FEMTO-ST* dibantu oleh program matlab. Dengan menggunakan program matlab didapatkan plot ekstraksi fitur data vibrasi *bearing1\_1* pada arah *horizontal* sebagai berikut:



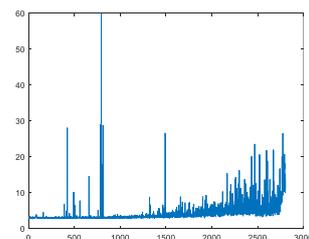
Gambar 3a. Peak to Peak



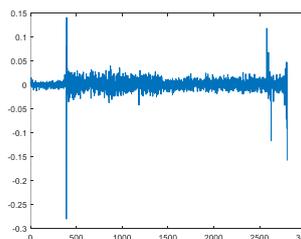
Gambar 3b. Root Mean Square (RMS)



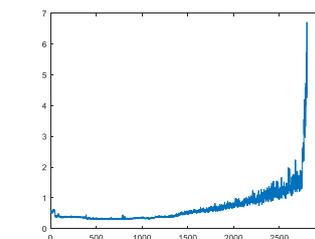
Gambar 3c. Skewness



Gambar 3d. Kurtosis



Gambar 3e. Mean

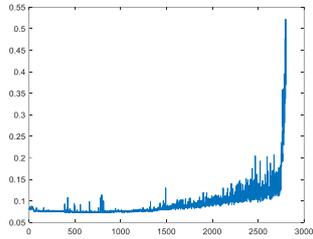


Gambar 3f. Standard Deviation (STD)

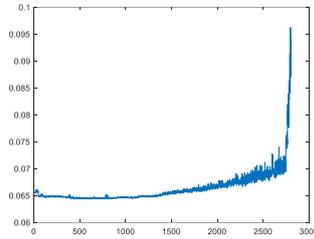
**Gambar 3.** Plot Fitur Data Vibrasi *Bearing1\_1* pada Arah *Horizontal*

Tahapan selanjutnya yaitu memilih fitur yang sensitif terhadap kesalahan untuk memprediksi *Remaining Useful Life* (RUL) dilakukan dengan 2 tahap, yaitu *normalized* dan *smoothing* yang dibantu menggunakan software excel.

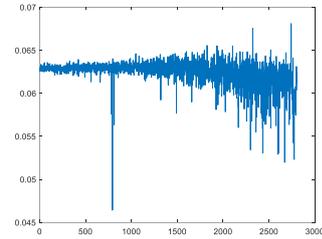
Dengan dibantu *software excel* didapatkan plot *normalized* pada fitur sebagai berikut:



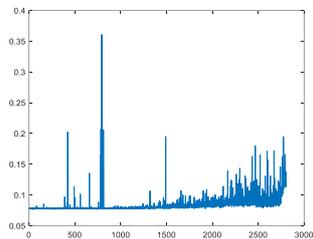
Gambar 4a. *Peak to Peak*



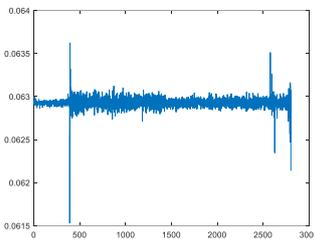
Gambar 4b. *Root Mean Square (RMS)*



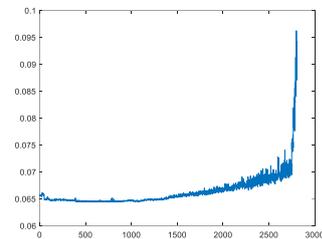
Gambar 4c. *Skewness*



Gambar 4d. *Kurtosis*



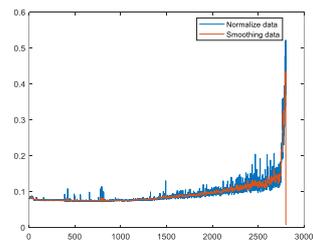
Gambar 4e. *Mean*



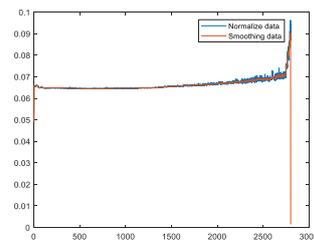
Gambar 4f. *Standard Deviation (STD)*

**Gambar 4.** Plot *Normalized Data* Vibrasi *Bearing1\_1* pada Arah *Horizontal*

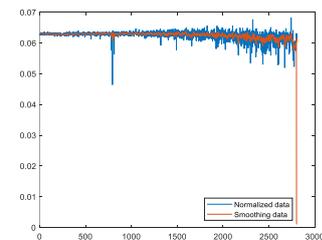
Dengan dibantu *software excel* didapatkan plot *smoothing* pada fitur data vibrasi *bearing1\_1* pada arah *horizontal* sebagai berikut:



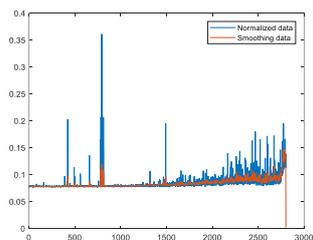
Gambar 5a. *Peak to Peak*



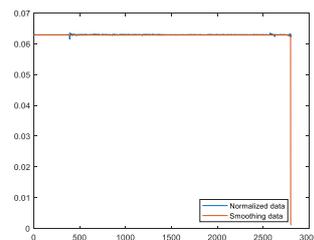
Gambar 5b. *Root Mean Square (RMS)*



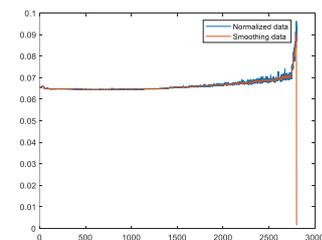
Gambar 5c. *Skewness*



Gambar 5d. *Kurtosis*



Gambar 5e. *Mean*



Gambar 5f. *Standard Deviation (STD)*

**Gambar 5.** Plot *Smoothing Data* Vibrasi *Bearing1\_1* pada Arah *Horizontal*

Dengan memperhatikan hasil *feature extraction* dan *processing* dari keenam jenis fitur diatas maka fitur yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah fitur *Root Mean Square* (RMS) karena memiliki pola monoton naik.

Pola RMS yang akan di analisis ada dua macam, yang pertama, pola fitur ekstraksi RMS dengan keseluruhan data pada keadaan vibrasi bearing normal menuju vibrasi bearing cacat/rusak, yang kedua, pola fitur ekstraksi RMS dengan sebagian data dengan cara di *cut off* bagian yang mengalami kerusakannya saja.

**Analisis pada Seluruh Data**

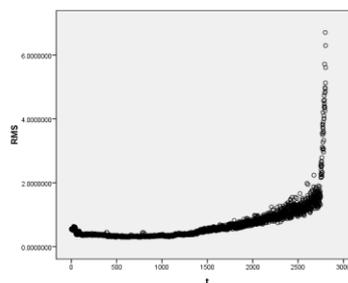
Tahapan analisis data keseluruhan fitur RMS pada keadaan vibrasi bearing normal menuju vibrasi bearing cacat/rusak dianalisis menggunakan bantuan SPSS dan output yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

1. Analisis Deskriptif

**Tabel 2.** *Output* Analisis Deskriptif

Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Sum	Mean
t	2803	1	2803	3929806	1402.00
RMS	2803	.2929754	6.7075595	1895.9266088	.676391940
Valid N (listwise)	2803				

2. Scatter Plot



**Gambar 6.** *Scatter plot* t dan RMS

Berdasarkan Gambar 6 dapat terlihat bahwa Data RMS meningkat searah dengan bertambahnya waktu, plot yang terbentuk terlihat eksponensial. bentuk eksponensial ini termasuk dalam regresi *non linear*.

3. Analisis Regresi Eksponensial

**Tabel 3.** *Output* Model Summary

Model Summary			
R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
.873	.763	.763	.270

The independent variable is t.

Tabel 3 diatas menampilkan nilai R yang merupakan simbol dari nilai koefisien korelasi, dimana R = 0,873. Maka, hubungan kedua variabel penelitian ada di kategori sangat kuat. Melalui tabel ini juga diperoleh nilai *R Square* atau koefisien determinasi (KD), dimana R Square = 0,763. Maka, variabel bebas t memiliki pengaruh kontribusi sebesar 76,3% terhadap fitur RMS dan 23,7% lainnya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain diluar fitur RMS.

**Tabel 4. Output ANOVA**

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	656.238	1	656.238	9009.844	.000
Residual	204.013	2801	.073		
Total	860.251	2802			

The independent variable is t.

Dari hasil output Tabel 4 diatas menunjukkan bahwa hasil signifikansi sebesar 0,000 < 0,05 dan  $F_{hitung} > F_{tabel}$  ( $9009,844 > 3,845$ ). Maka dari analisis diatas dapat disimpulkan bahwa model regresi *non linear* adalah eksponensial.

**Tabel 5. Output Model Exponential**

Coefficients					
	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
t	.001	.000	.873	94.920	.000
(Constant)	.243	.002		98.060	.000

The dependent variable is ln(RMS).

Dari hasil output Tabel 5 diatas didapat hasil persamaan regresi eksponensial dengan sebagai berikut:

$$\hat{y} = 0,243. e^{0,001x}$$

Dapat diinterpretasikan bahwa faktor waktu ( $x$ ) mempengaruhi fitur RMS ( $y$ ). jika ketika waktu 0 detik maka nilai fitur RMS sebesar 0,243 mm. Dan jika terjadi penambahan satu detik pada waktu ( $x$ ), maka nilai fitur RMS ( $y$ ) akan mengalami peningkatan secara eksponensial yaitu sebesar  $e^{0,001.(1)}=1,001005 \approx 1$  mm.

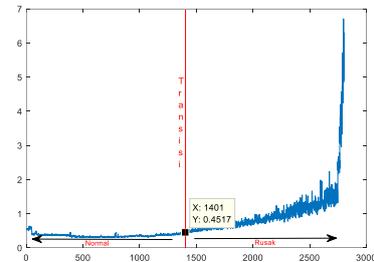
4. Remaining Useful Life (RUL)

Untuk perhitungan RUL menggunakan bantuan *software* excel dan SPSS. Tahapan dalam RUL dapat diuraikan sebagai berikut:

- a. Menentukan Parameter  $a_1, b_1,$  dan  $c_1$

$$\hat{y} = 0,243. e^{0,001x}$$

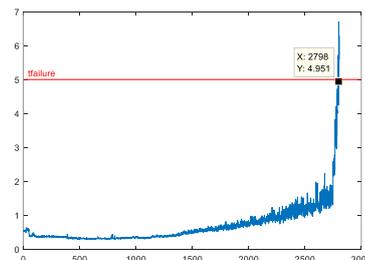
Maka parameter  $a_1 = \beta_0 = 0,243$  dan parameter  $b_1 = \beta_1 = 0,001$ . Sementara untuk parameter  $c_1 = 0,4517$  dilakukan secara visual dilihat dari plot transisi RMS seluruh data seperti pada Gambar 7.



**Gambar 7. Plot Transisi Fitur RMS**

- b. Menentukan Failure Threshold

Dari plot RMS seperti pada Gambar 8 dihasilkan nilai  $t_{failure}$  yang akan digunakan adalah 2798.



**Gambar 8. Plot Antara RMS dengan  $t_{failure}$**

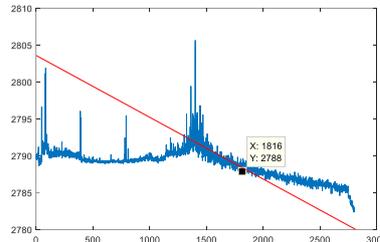
## c. Menentukan Invers

Pada tahapan selanjutnya adalah menentukan invers dari model persamaan

$$y(t) = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot t_j} + c_1, \text{ Sehingga diperoleh persamaan } t_j = \frac{1}{0,001} \ln \left( \frac{y_i - 0,4517}{0,243} \right)$$

## d. Menentukan Nilai Prediksi RUL

Dengan menggunakan persamaan (16) didapatkan plot nilai prediksi RUL pada fitur RMS dengan nilai *real* RUL sebagai berikut:

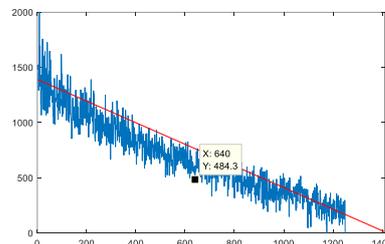


**Gambar 9.** Plot Antara Prediksi RUL dengan *Real* RUL pada Fitur RMS Data Vibrasi *Bearing1\_1* Arah *Horizontal*

Plot diatas dapat diinterpretasikan bahwa, dalam data vibrasi bearing sinyal getaran dikumpulkan setiap 10 detik, maka dalam pola tersebut dapat disimpulkan bahwa jika bearing sudah digunakan selama 18160 detik maka sisa umur bearing 27880 detik atau 7 jam 44 menit 40 detik lagi.

**Analisis pada Data-Cut Off**

Tahapan analisis pada sebagian data fitur RMS dengan cara di cut off bagian yang mengalami kerusakannya saja sama dengan tahapan data keseluruhan fitur di pembahasan sebelumnya, dihasilkan nilai prediksi RUL pada data cut off sebagai berikut :



**Gambar 10.** Plot Antara Prediksi RUL dengan *Real* RUL pada Fitur RMS Data

Vibrasi *Bearing1\_1* Arah *Horizontal*

Plot diatas dapat diinterpretasikan bahwa, dalam data vibrasi bearing sinyal getaran dikumpulkan setiap 10 detik, maka dalam pola tersebut dapat disimpulkan bahwa jika bearing sudah digunakan selama 6400 detik maka sisa umur bearing 4843 detik atau 1 jam 20 menit 43 detik lagi.

**D. Kesimpulan**

1. Bahwa regresi eksponensial bisa digunakan untuk menentukan atau memprediksi *Remaining Useful Life* (RUL) dengan hasil yang sangat memuaskan.
2. Pengaruh pemotongan data dengan mengabaikan kondisi normal yang di mulai dari saat terjadinya kerusakan saja, membuat model dan plot lebih bagus daripada menggunakan data keseluruhan saat kondisi normal menuju terjadinya kerusakan. Dimana model dengan nilai  $R^2$  tertinggi merupakan model dengan tingkat akurasi yang baik. Diperoleh nilai  $R^2$  pada model persamaan regresi eksponensial dengan menggunakan data keseluruhan dan *data-cut off*, yaitu sebesar 76,3% dan 79,9%. Maka, hasil dari nilai  $R^2$  pada model persamaan regresi eksponensial dengan

menggunakan *data-cut off* lebih bagus daripada model persamaan regresi eksponensial dengan menyertakan seluruh data, karena menunjukkan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

### Acknowledge

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan karunia-Nya yang luar biasa sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “**Prediksi Sisa Umur Bearing Menggunakan Regresi Eksponensial**”.

Dalam penyusunan penelitian ini penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Prof. Dr. Sutawanir Darwis, selaku pembimbing yang telah bersedia untuk memberikan arahan, bimbingan, saran dan masukan, serta rela meluangkan waktu terhadap penulis selama dalam penyusunan penelitian ini.

Penulisan penelitian ini juga tidak terlepas dari peran serta dan dukungan dari yang istimewa dan yang tercinta, kedua orang tua penulis yang tak henti-hentinya memberikan dukungan serta do'a kepada penulis. Semoga amal baiknya mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT. Aamiin.

### Daftar Pustaka

- [1] Atmaja, Lukas Setia. 2009. *Statistik untuk Bisnis dan Ekonomi*. CV. Andi Offset: Yogyakarta
- [2] Damanhuri, E. 1995. *Statistika*. FTSP-ITB: Bandung
- [3] Draper, N.R. and Smith, H. (1981). *Applied Regression Analysis, Third Edition*. John Wiley & Sons: Canada
- [4] Handojo, V. A. (2017). *Maintenance Oil Analysis dan Vibration Analysis*. Laporan Kerja Praktek. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Lei, Yaguo. (2017). *Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery*. Oxford: Butterworth-Heinemann. ISBN 9780128115343
- [6] Lyons, R. G. (1997). *Understanding Digital Signal Processing*. Boston: Addison Wesley.
- [7] Medjaher, K., Tobon-Mejia, D. A., & Zerhouni, N. (2012). Remaining useful life estimation of critical components with application to bearings. *IEEE Transactions on Reliability*, **61**(2), 292–302.
- [8] Moura, M. C., E. Zio, I. D. Lins, & E. Droguett. (2011). Failure and reliability prediction by support vector machines regression of time series data. *Reliability Engineering & System Safety*. **96**. 1527-1534. 10.1016/j.ress.2011.06.006.
- [9] Prahestu, M. D. (2015). *Modifikasi Alat Peraga Pengukuran Getaran pada Alignment Poros Motor Listrik - Gearbox – Pompa Studi Kasus pada Pergeseran Motor Listrik ke Sisi Kanan dan Sisi Kiri (Pandangan Dari Sisi Belakang Motor Listrik)*. Skripsi tidak dipublikasikan. Semarang: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- [10] Santosa, B. (2007). *Data Mining Teknik Pemanfaatan Data untuk Keperluan Bisnis*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [11] Scheffer, C. and Girdhar, P. (2004). *Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Oxford: Elsevier.
- [12] Schölkopf, B. and Smola, A. J. (2002). *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. ISBN 0-262-19475-9.
- [13] Sudjana, Prof. Dr. 2003. *Teknik Analisis Regresi dan Korelasi*. PT. Tarsito: Bandung
- [14] Suhardjono. (2005). *Analisis Sinyal Getaran pada Tingkat Kerusakan Bantalan*. Puslit Mechanical Journal. Jurusan Teknik Industri, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [15] Sui, Wentao, D. Zhang, X. Qiu, W. Zhang, & Y. Lin. (2019). Prediction of bearing

remaining useful life based on mutual information and support vector regression model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **533**. 012032. 10.1088/1757-899X/533/1/012032.

- [16] Sularso. and Kiyokatsu, S. (1991). *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. (10th Edition). Jakarta: Pradnya Paramita.
- [17] Vapnik, V. N. (1999). *The Nature of Statistical Learning Theory*. (Second Edition). Hoboken: John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-387-98780-0
- [18] Widodo, A., E. Y. Kim, J. D. Son, B. S. Yang, A. C. C. Tan, D. S. Gu, B. K. Choi, & J. Mathew. (2009). Fault diagnosis of low speed bearing based on relevance vector machine and support vector machine. *Expert Systems with Applications*. **36**. 7252-7261.
- [19] Zhang, Xinghui, J. Kang, J. Zhao, & H. Teng. (2014). Bearing Run-To-Failure Data Simulation for Condition Based Maintenance. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. ISSN: 2302-4046