

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1. Data Time To Failure

Data vibrasi pada setiap bearing diubah menjadi data RMS menggunakan bantuan software Matlab seperti pada Lampiran 2. Kemudian masing-masing *bearing* pada data set di *Threshold* 1, dan diperoleh data time-to-failure sebagai berikut ini:

a) RMS Data set 1

Pada RMS data set 1 terdapat 14 *bearing* dengan dua arah yang berbeda, dan juga memiliki total waktu yang berbeda pada setiap *bearing*-nya.

Kemudian 14 *bearing* tersebut di plot dan di *Threshold* 1 menggunakan bantuan software Matlab, masing-masing data *bearing* yang pertama melebihi 1 akan diambil sebagai data time-to-failure. Berikut merupakan Data RMS arah *horizontal* pada dataset 1 disajikan pada Tabel 4.1 dibawah ini:

Tabel 4.1 RMS Data set 1 *Horizontal*

<i>Bearing 1 Horizontal</i>		<i>Bearing 2 Horizontal</i>		<i>Bearing 3 Horizontal</i>		<i>Bearing 4 Horizontal</i>	
t	RMS	t	RMS	t	RMS	t	RMS
1	0.56175	1	0.53871	1	0.41562	1	0.45485
2	0.53511	2	0.50558	2	0.39114	2	0.45915
3	0.53116	3	0.54244	3	0.38916	3	0.49138
4	0.55483	4	0.51501	4	0.38067	4	0.47463
5	0.56665	5	0.48560	5	0.40081	5	0.51157
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2799	6.70755	867	1.63966	1798	0.79834	1135	3.42273
2800	4.85694	868	1.64649	1799	0.70854	1136	3.47001
2801	5.13033	869	1.78109	1800	0.81733	1137	3.48283
2802	6.29732	870	2.13565	1801	0.84587	1138	3.71298
2803	5.60756	871	2.23438	1802	0.82224	1139	3.87668

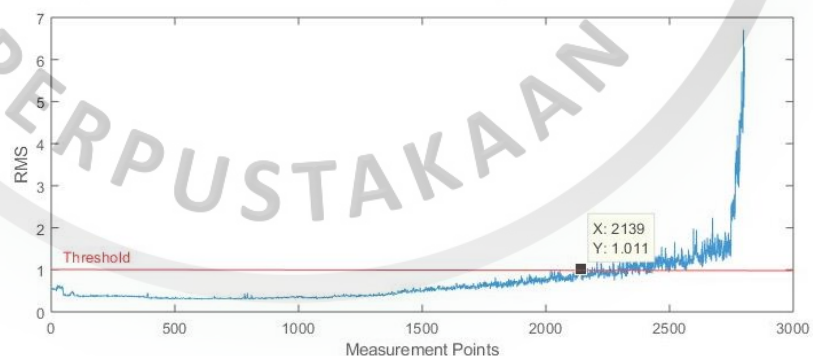
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Tabel 4.1 RMS Data set 1 *Horizontal* (Lanjutan)

<i>Bearing 5 Horizontal</i>		<i>Bearing 6 Horizontal</i>		<i>Bearing 7 Horizontal</i>	
t	RMS	t	RMS	T	RMS
1	0.40065	1	0.47739	1	0.43814
2	0.37576	2	0.40044	2	0.42172
3	0.40177	3	0.46535	3	0.45221
4	0.41222	4	0.43155	4	0.44018
5	0.40282	5	0.42302	5	0.45122
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2298	0.28573	2298	0.35083	1498	0.38058
2299	0.26300	2299	0.28961	1499	0.38413
2300	0.26578	2300	0.30977	1500	0.39866
2301	0.27052	2301	0.31328	1501	0.40956
2302	0.25571	2302	0.32303	1502	0.41677

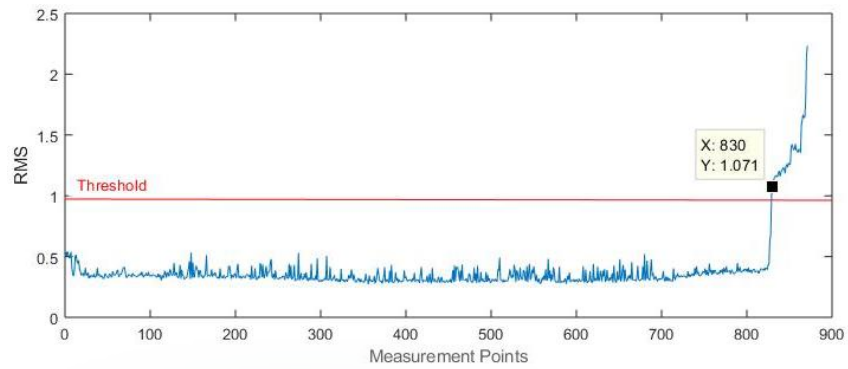
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Terdapat 7 *bearing* dengan jumlah *t* atau *measurement point* yang berbeda-beda. Setelah data RMS pada data set 1 arah *horizontal* diperoleh, data RMS tersebut diplot per-*bearing* dan kemudian di *Threshold* 1. Pada Gambar 4.1 merupakan plot data RMS *bearing 1 horizontal* pada dataset 1 sebagai berikut:



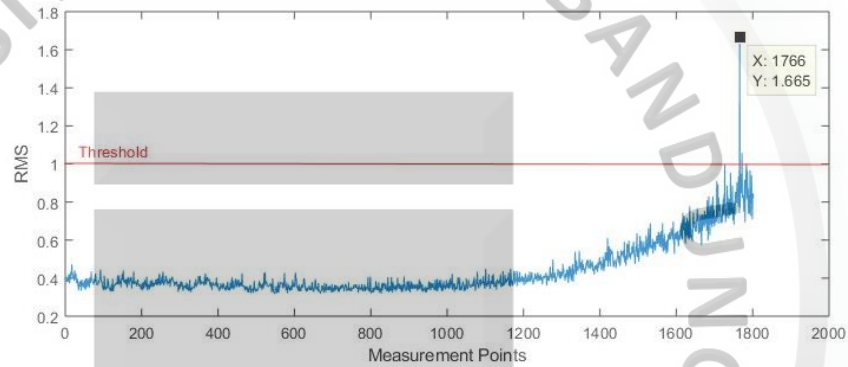
Gambar 4.1 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 1 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.2 merupakan plot data RMS *bearing 2 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



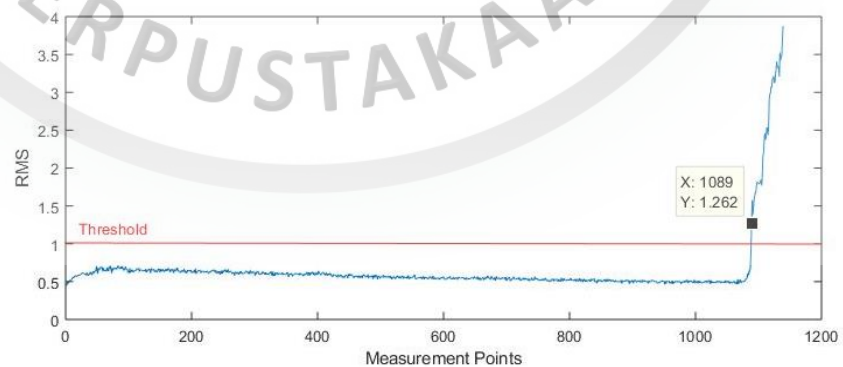
Gambar 4.2 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 2 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.3 merupakan plot data RMS *bearing 3 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



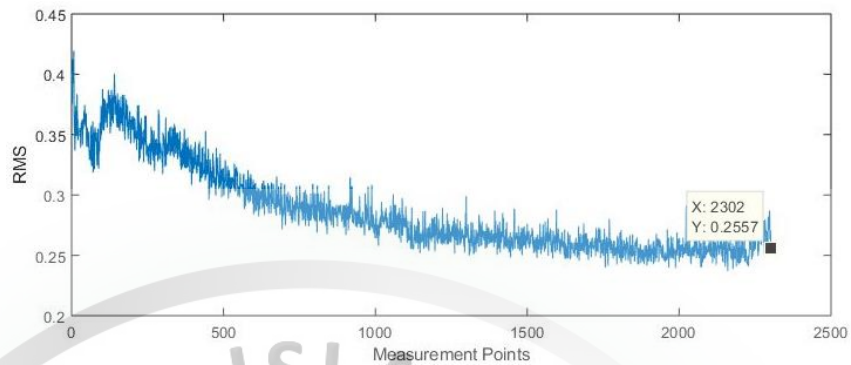
Gambar 4.3 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 3 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.4 merupakan plot data RMS *bearing 4 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



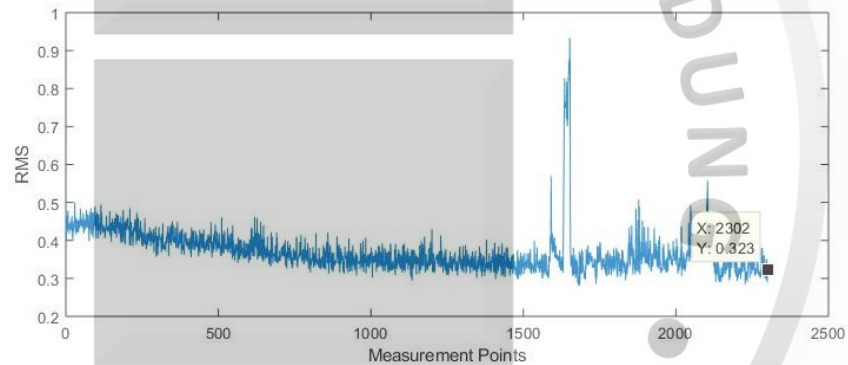
Gambar 4.4 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 4 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.5 merupakan plot data RMS *bearing 5 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



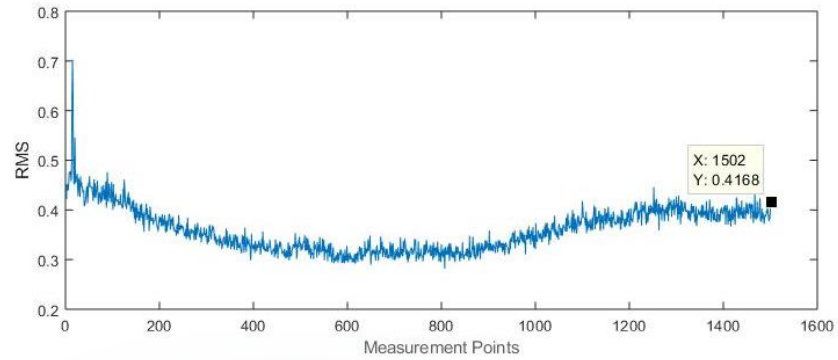
Gambar 4.5 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 5 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.6 merupakan plot data RMS *bearing 6 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



Gambar 4.6 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 6 horizontal* pada data set 1.

Pada Gambar 4.7 merupakan plot data RMS *bearing 7 horizontal* pada data set 1 sebagai berikut:



Gambar 4.7 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 7 horizontal* pada data set 1.

Berikut merupakan Data RMS arah *vertical* pada data set 1 disajikan pada

Tabel 4.2 dibawah ini:

Tabel 4.2 RMS Data set 1 *Vertical*

<i>Bearing 1 Vertical</i>		<i>Bearing 2 Vertical</i>		<i>Bearing 3 Vertical</i>		<i>Bearing 4 Vertical</i>	
t	RMS	t	RMS	t	RMS	t	RMS
1	0.43580	1	0.42071	1	0.30219	1	0.45485
2	0.42097	2	0.43396	2	0.30531	2	0.45915
3	0.42561	3	0.45200	3	0.30104	3	0.49138
4	0.44552	4	0.47387	4	0.29614	4	0.47463
5	0.42385	5	0.45742	5	0.30095	5	0.51157
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2799	4.88292	867	2.70946	1798	1.82826	1135	3.42273
2800	4.17010	868	2.65093	1799	1.27830	1136	3.47001
2801	4.10046	869	2.97312	1800	1.70252	1137	3.48283
2802	4.51100	870	3.93932	1801	4.20104	1138	3.71298
2803	5.11962	871	4.06790	1802	1.53424	1139	3.87668

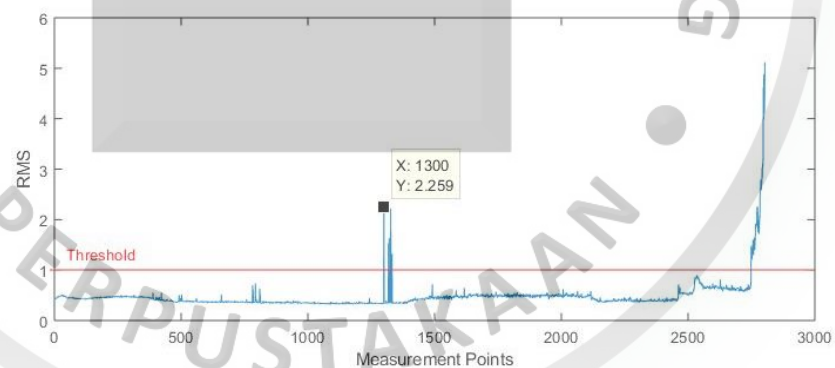
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Tabel 4.2 RMS Data set 1 *Vertical* (Lanjutan)

<i>Bearing 5 Vertical</i>		<i>Bearing 6 Vertical</i>		<i>Bearing 7 Vertical</i>	
t	RMS	T	RMS	t	RMS
1	0.35721	1	0.47793	1	0.39156
2	0.35931	2	0.46384	2	0.40329
3	0.37764	3	0.47812	3	0.41764
4	0.37701	4	0.49423	4	0.41760
5	0.39092	5	0.47236	5	0.42700
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2298	0.42452	2298	0.39052	1498	0.53097
2299	0.40629	2299	0.38074	1499	0.53905
2300	0.42800	2300	0.39076	1500	0.52130
2301	0.40802	2301	0.36761	1501	0.51517
2302	0.42162	2302	0.39524	1502	0.51134

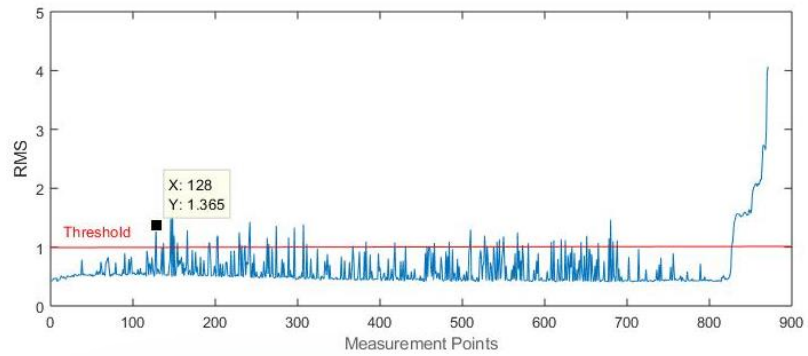
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Setelah data RMS pada data set 1 arah *vertical* didapat, data RMS tersebut diplot per-*bearing* dan kemudian di *Threshold* 1. Pada Gambar 4.8 merupakan plot data RMS *bearing 1 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



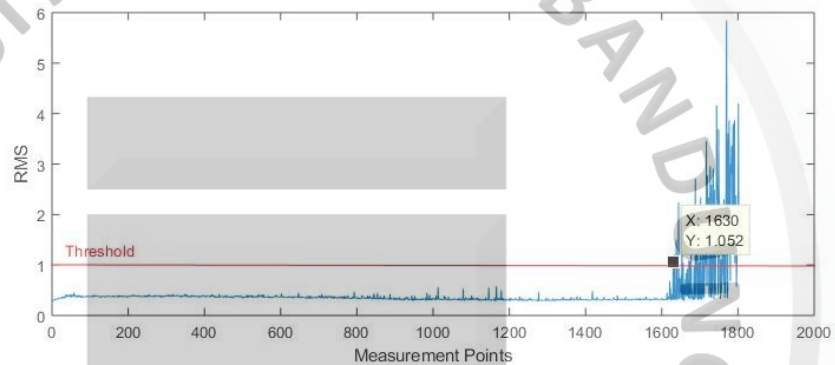
Gambar 4.8 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 1 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.9 merupakan plot data RMS *bearing 2 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



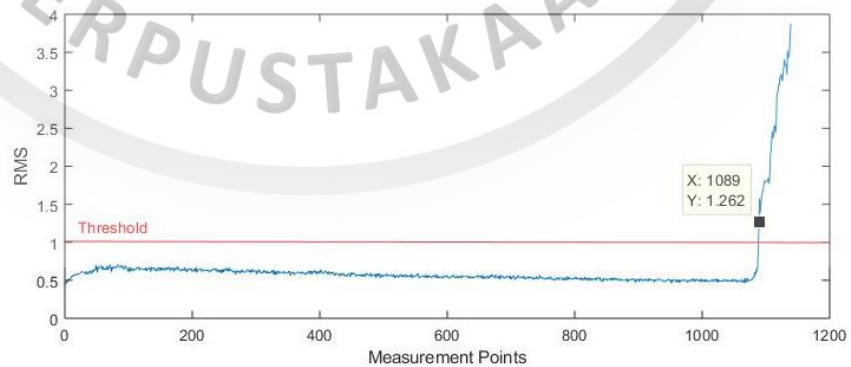
Gambar 4.9 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 2 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.10 merupakan plot data RMS *bearing 3 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



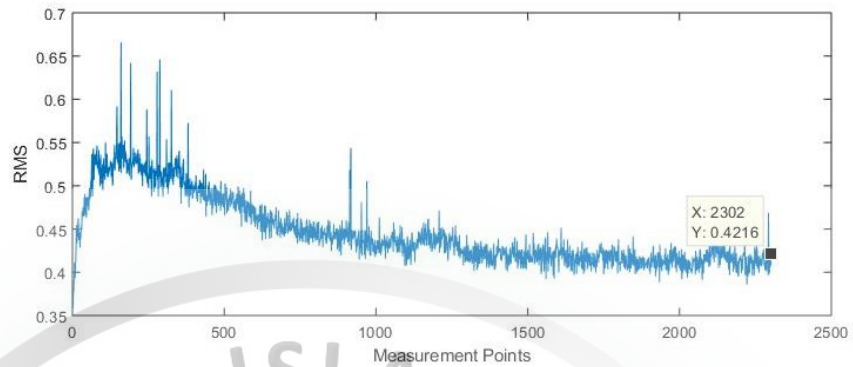
Gambar 4.10 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 3 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.11 merupakan plot data RMS *bearing 4 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



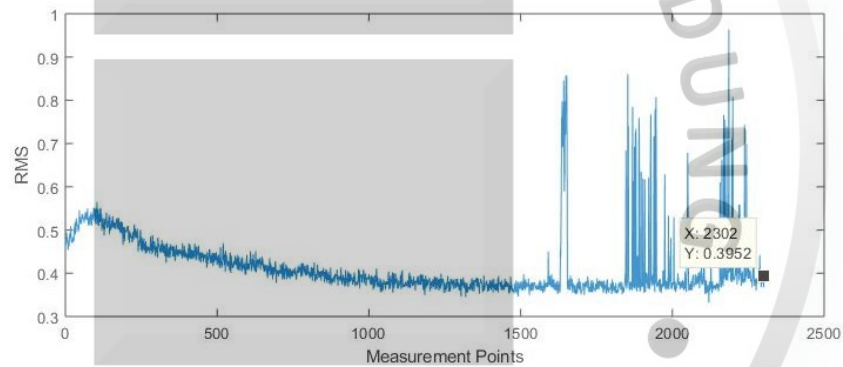
Gambar 4.11 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 4 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.12 merupakan plot data RMS *bearing 5 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



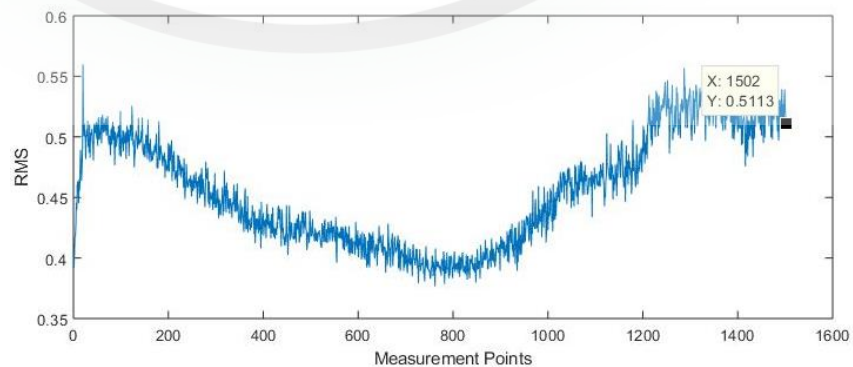
Gambar 4.12 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 5 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.13 merupakan plot data RMS *bearing 6 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



Gambar 4.13 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 6 vertical* pada data set 1.

Pada Gambar 4.14 merupakan plot data RMS *bearing 7 vertical* pada data set 1 sebagai berikut:



Gambar 4.14 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 7 vertical* pada data set 1.

b) RMS Data set 2

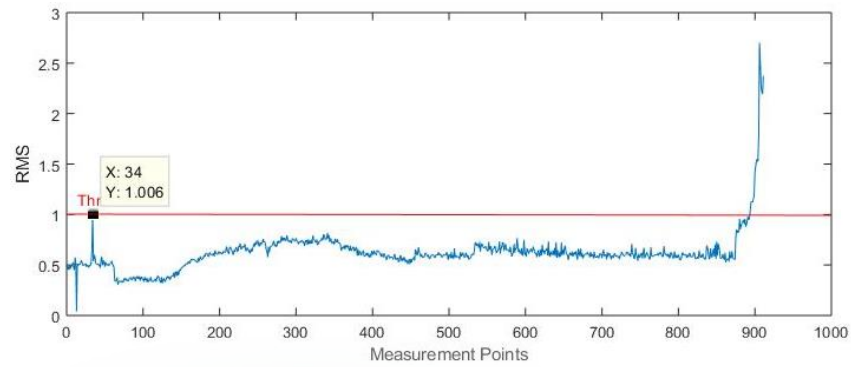
Pada RMS data set 2 terdapat 6 *bearing* dengan dua arah yang berbeda, dan juga memiliki total waktu yang berbeda pada setiap *bearing*-nya. Kemudian 6 *bearing* tersebut di plot dan di *Threshold* 1 menggunakan bantuan software Matlab, masing-masing data *bearing* yang pertama melebihi 1 akan diambil sebagai data time-to-failure. Berikut merupakan Data RMS arah *horizontal* pada dataset 2 disajikan pada Tabel 4.3 dibawah ini:

Tabel 4.3 RMS Data set 2 *Horizontal*

<i>Bearing 1 Horizontal</i>		<i>Bearing 2 Horizontal</i>		<i>Bearing 3 Horizontal</i>	
t	RMS	t	RMS	t	RMS
1	0.50943	1	0.28018	1	0.43057
2	0.46028	2	0.25302	2	0.44867
3	0.45350	3	0.26139	3	0.41408
4	0.50360	4	0.28687	4	0.39012
5	0.46414	5	0.29423	5	0.33350
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
907	2.49866	793	1.52149	824	0.27270
908	2.28062	794	1.97443	825	0.36082
909	2.20804	795	1.57479	826	0.31044
910	2.19400	796	1.59974	827	0.28632
911	2.37414	797	1.96285	828	0.29836

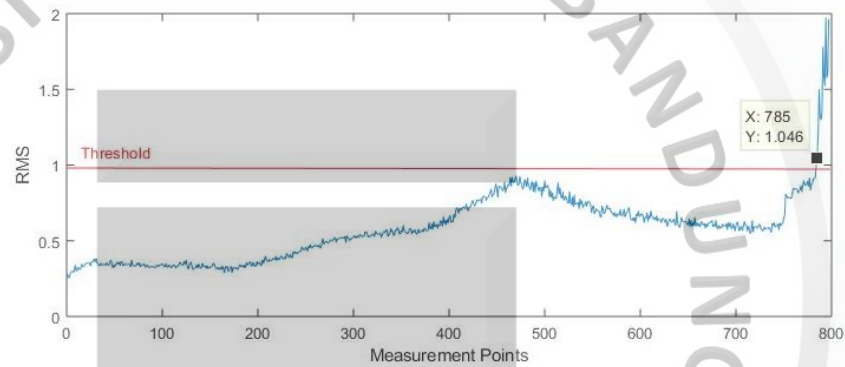
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Terdapat 3 *bearing* dengan jumlah *t* atau *measurement point* yang berbeda-beda. Setelah data RMS pada data set 1 arah *horizontal* diperoleh, data RMS tersebut diplot per-*bearing* dan kemudian di *Threshold* 1. Pada Gambar 4.15 merupakan plot data RMS *bearing 1 horizontal* pada data set 2 sebagai berikut:



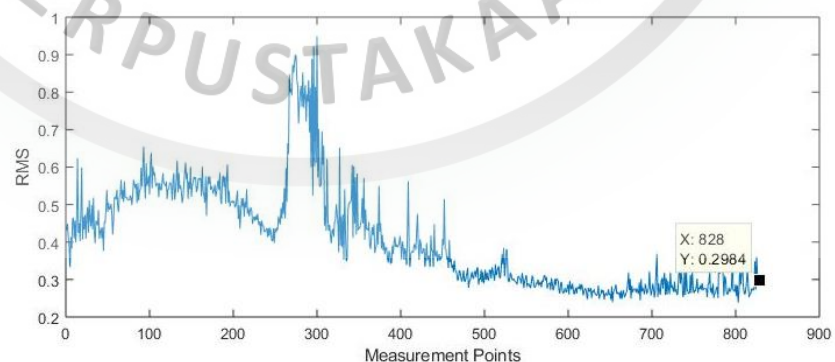
Gambar 4.15 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 1 horizontal* pada data set 2.

Pada Gambar 4.16 merupakan plot data RMS *bearing 2 horizontal* pada data set 2 sebagai berikut:



Gambar 4.16 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 2 horizontal* pada data set 2.

Pada Gambar 4.17 merupakan plot data RMS *bearing 3 horizontal* pada data set 2 sebagai berikut:



Gambar 4.17 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 3 horizontal* pada data set 2.

Berikut merupakan Data RMS arah *vertical* pada data set 2 disajikan pada

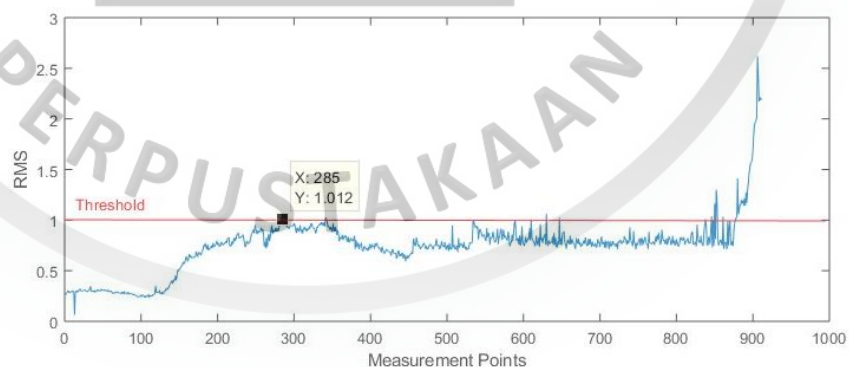
Tabel 4.4 dibawah ini:

Tabel 4.4 RMS Data set 2 *Vertical*

<i>Bearing 1 Vertical</i>		<i>Bearing 2 Vertical</i>		<i>Bearing 3 Vertical</i>	
t	RMS	t	RMS	t	RMS
1	0.26258	1	0.18961	1	0.25106
2	0.28174	2	0.20245	2	0.26058
3	0.28221	3	0.21402	3	0.25098
4	0.30130	4	0.22942	4	0.26218
5	0.29875	5	0.26096	5	0.26106
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
907	2.42868	793	2.06449	824	0.28541
908	2.17100	794	2.61376	825	0.71285
909	2.21369	795	2.03700	826	0.64759
910	2.18625	796	2.15060	827	0.27863
911	2.20586	797	2.69559	828	0.48030

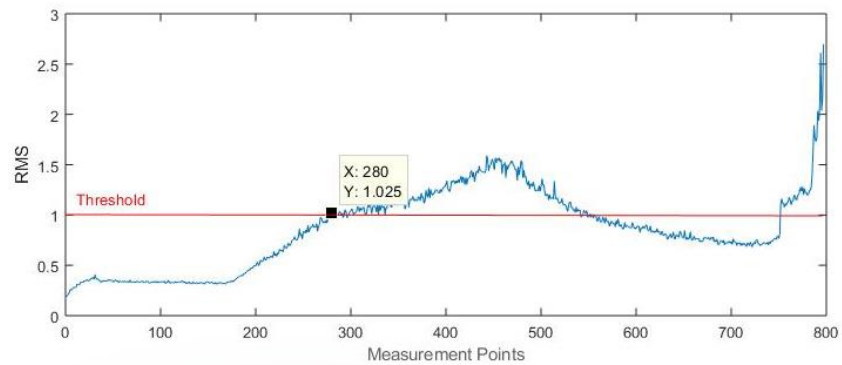
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Setelah data RMS pada data set 2 arah *vertical* didapat, data RMS tersebut diplot per-*bearing* dan kemudian di *Threshold* 1. Pada Gambar 4.18 merupakan plot data RMS *bearing 1 vertical* pada data set 2 sebagai berikut:



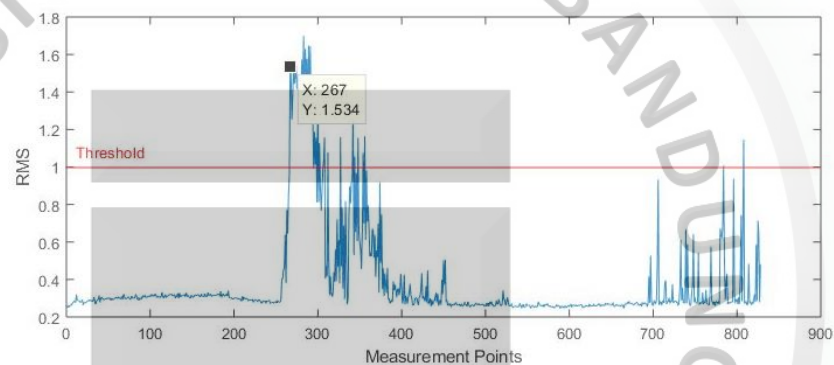
Gambar 4.18 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing 1 vertical* pada data set 2.

Pada Gambar 4.19 merupakan plot data RMS *bearing 2 vertical* pada data set 2 sebagai berikut:



Gambar 4.19 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 2 vertical* pada data set 2.

Pada Gambar 4.20 merupakan plot data RMS *bearing 3 vertical* pada data set 2 sebagai berikut:



Gambar 4.20 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 3 vertical* pada data set 2.

c) RMS Data set 3

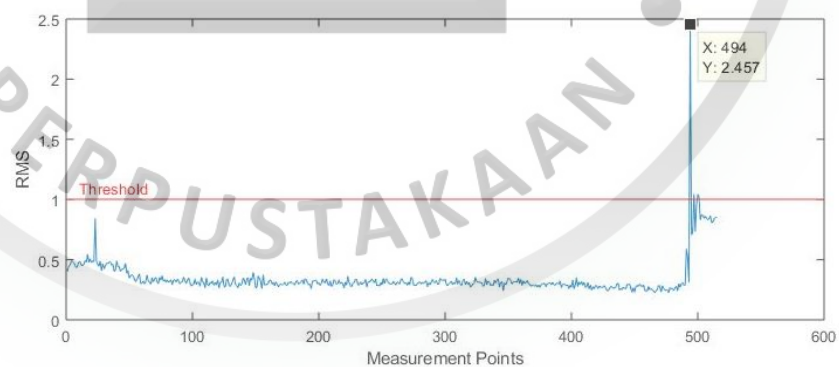
Pada RMS data set 3 terdapat 4 *bearing* dengan dua arah yang berbeda, dan juga memiliki total waktu yang berbeda pada setiap *bearing*-nya. Kemudian 4 *bearing* tersebut di plot dan di *Threshold 1* menggunakan bantuan software Matlab, masing-masing data *bearing* yang pertama melebihi 1 akan diambil sebagai data *time-to-failure*. Berikut merupakan Data RMS pada data set 3 disajikan pada Tabel 4.5 dibawah ini:

Tabel 4.5 RMS Data set 3 *Horizontal & Vertical*

<i>Bearing 1 Horizontal</i>		<i>Bearing 2 Horizontal</i>		<i>Bearing 1 Vertical</i>		<i>Bearing 2 Vertical</i>	
t	RMS	t	RMS	t	RMS	t	RMS
1	0.40250	1	0.35447	1	0.30048	1	0.24088
2	0.44454	2	0.34957	2	0.30849	2	0.23174
3	0.45187	3	0.36233	3	0.29745	3	0.25041
4	0.48549	4	0.35393	4	0.29394	4	0.24400
5	0.48783	5	0.39270	5	0.29707	5	0.25887
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
511	0.80611	1633	1.95526	511	1.44988	1633	2.08077
512	0.81591	1634	1.77982	512	1.47426	1634	2.13579
513	0.84093	1635	1.91672	513	1.50829	1635	2.13173
514	0.84990	1636	2.36816	514	1.43290	1636	2.30346
515	0.85662	1637	1.90986	515	1.44399	1637	2.18719

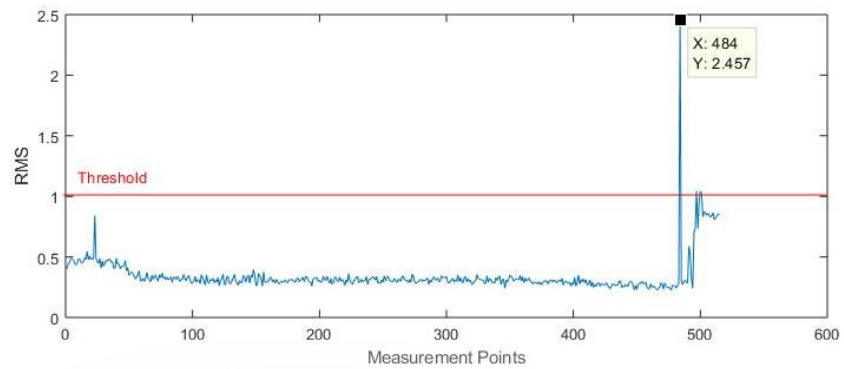
Sumber: *Prognostics and Health Management, FEMTO-ST Institute*

Terdapat 4 *bearing* dengan jumlah *t* atau *measurement point* yang berbeda-beda. Setelah data RMS pada dataset 3 arah *horizontal* dan *vertical* diperoleh, data RMS tersebut diplot per-*bearing* dan kemudian di *Threshold* 1. Pada Gambar 4.21 merupakan plot data RMS *bearing* 1 *horizontal* pada data set 3 sebagai berikut:



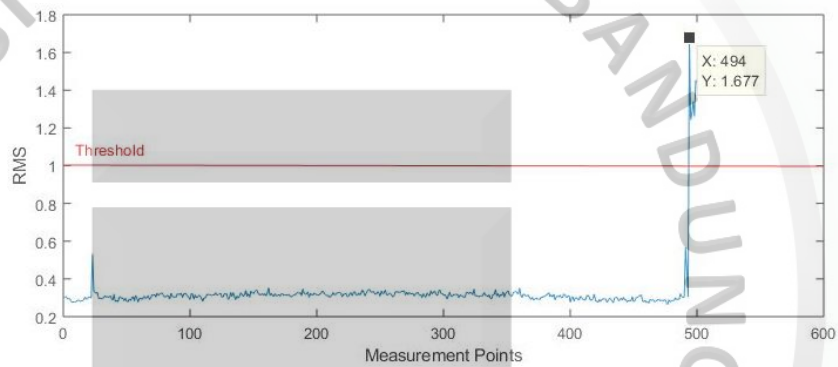
Gambar 4.21 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold* 1 untuk *bearing* 1 *horizontal* pada data set 3.

Pada Gambar 4.22 merupakan plot data RMS *bearing* 2 *horizontal* pada data set 3 sebagai berikut:



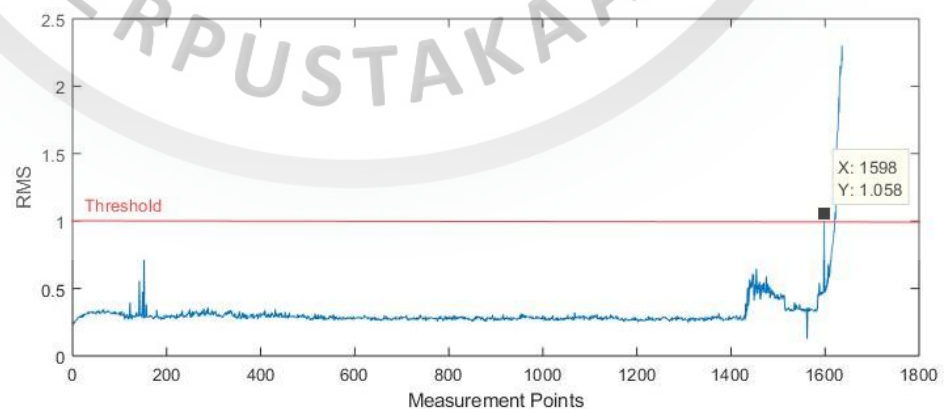
Gambar 4.22 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 2 horizontal* pada data set 3.

Pada Gambar 4.23 merupakan plot data RMS *bearing 1 vertical* pada data set 3 sebagai berikut:



Gambar 4.23 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 1 vertical* pada data set 3.

Pada Gambar 4.24 merupakan plot data RMS *bearing 2 vertical* pada data set 3 sebagai berikut:



Gambar 4.24 Plot antara RMS dengan *Measurement Points* dengan *Threshold 1* untuk *bearing 2 vertical* pada data set 3.

Setelah melakukan plot antara RMS dengan *measurement points*, diperoleh 24 data RMS dan data *time to failure* dari 3 set data yang diambil berdasarkan data RMS pertama yang melebihi 1. Pada data set 1 terdapat 6 *bearing* yang tidak melebihi 1, dimana 6 data *bearing* tersebut dikatakan tersensor, sedangkan 8 *bearing* lainnya melebihi 1 sebelum waktu yang telah ditentukan. Pada data set 2 terdapat 1 *bearing* yang tidak melebihi 1, dimana data *bearing* tersebut dikatakan tersensor, sedangkan 5 *bearing* lainnya melebihi 1 sebelum waktu yang telah ditentukan. Pada data set 3 seluruh *bearing* melebihi 1 sebelum waktu yang telah ditentukan.

Untuk mempermudah perhitungan maka data *time-to-failure* yang diperoleh ditransformasikan ke dalam menit, jam, dan hari. Dan data *time-to-failure* yang akan digunakan dalam analisis adalah data *time-to-failure* dalam hari. Berikut merupakan cara untuk mentransformasikan data *time-to-failure*:

- a) Data *time-to-failure* (menit) = (*measurement points* - 1) × 10 menit
- b) Data *time-to-failure* (jam) = Data *time-to-failure* (menit) ÷ 60
- c) Data *time-to-failure* (hari) = Data *time-to-failure* (jam) ÷ 24

Berikut ini adalah data *time-to-failure* yang dihasilkan dari RMS pada masing-masing *bearing*.

Tabel 4.6 Data *Time-to-failure*

No.	RMS	<i>Measurement Points</i> (sebelum diurut)
1	1.011	2139
2	1.071	830
3	1.665	1766
4	1.262	1086
5	0.256 ⁺	2302 ⁺
6	0.323 ⁺	2302 ⁺
7	0.417 ⁺	1502 ⁺
8	1.006	34
9	1.046	785
10	0.298 ⁺	828 ⁺
11	2.457	484
12	1.031	1621
13	2.259	1300
14	1.365	128
15	1.052	1630
16	1.262	1089
17	0.422 ⁺	2302 ⁺
18	0.395 ⁺	2302 ⁺
19	0.511 ⁺	1502 ⁺
20	1.012	285
21	1.025	280
22	1.534	267
23	1.677	494
24	1.058	1598

Keterangan: tanda (+) menunjukkan bahwa *bearing* tersensor

Berikut ini adalah data *time-to-failure* yang ditransformasi kedalam menit, hari, dan jam.

Tabel 4.7 Data *Time-to-failure* dalam menit, hari, dan jam

<i>Measurement Points</i> (setelah diurut)	Menit	Jam	Hari
34	330	5.5	0.229
128	1270	21.167	0.882
267	2660	44.333	1.847
280	2790	46.5	1.938
285	2840	47.333	1.972
484	4830	80.5	3.354
494	4930	82.167	3.424
785	7840	130.667	5.444
828 ⁺	8270 ⁺	137.833 ⁺	5.743 ⁺
830	8290	138.167	5.757
1086	10850	180.833	7.535
1089	10880	181.333	7.556
1300	12990	216.5	9.021
1502 ⁺	15010 ⁺	250.167 ⁺	10.424 ⁺
1502 ⁺	15010 ⁺	250.167 ⁺	10.424 ⁺
1598	15970	266.167	11.09
1621	16200	270	11.25
1630	16290	271.5	11.313
1766	17650	294.167	12.257
2139	21380	356.333	14.847
2302 ⁺	23010 ⁺	383.5 ⁺	15.979 ⁺
2302 ⁺	23010 ⁺	383.5 ⁺	15.979 ⁺
2302 ⁺	23010 ⁺	383.5 ⁺	15.979 ⁺
2302 ⁺	23010 ⁺	383.5 ⁺	15.979 ⁺

Keterangan: tanda (+) menunjukkan bahwa *bearing* tersensor

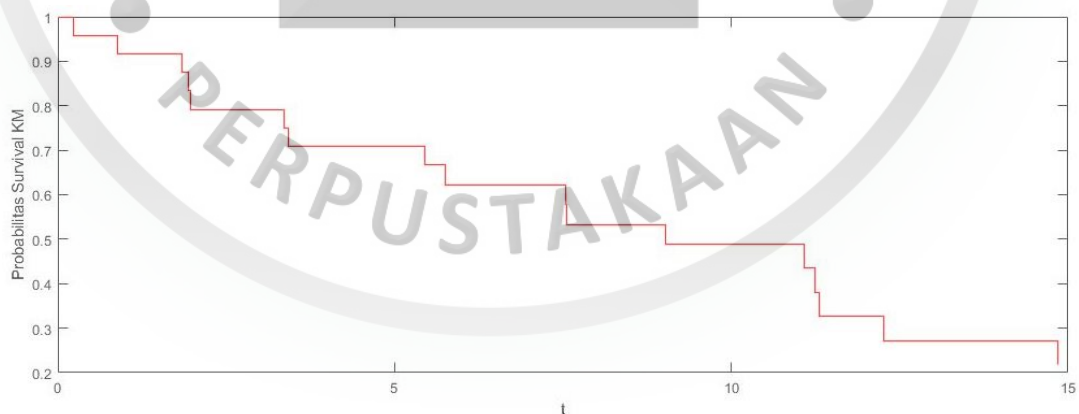
4.2. Estimasi Kaplan-Meier

Estimasi fungsi survival $\hat{S}(t)$ digunakan untuk menaksir fungsi ketahanan data *time-to-failure bearing FEMTO*. Pemakaian metode Kaplan-Meier dalam pemeliharaan mesin digunakan untuk memprediksi ketahanan suatu *bearing*. Berdasarkan fungsi survival pada persamaan (2.8), dimana t_j menyatakan *time-to-failure bearing* dalam hari, d_j adalah banyaknya kerusakan pada saat t_j ($j =$

1,2, ..., k) dan n_j adalah banyaknya *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 , dimana hasilnya disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan $\hat{S}_{KM}(t)$ menggunakan Estimasi Kaplan-Meier

j	t_j	n_j	d_j	$(n_j - d_j)/n_j$	$\hat{S}_{KM}(t)$
0	0	24	0	1	1
1	0.22917	24	1	0.95833	0.95833
2	0.88194	23	1	0.95652	0.91367
3	1.84722	22	1	0.95455	0.875
4	1.9375	21	1	0.95238	0.83333
5	1.97222	20	1	0.95	0.79167
6	3.35417	19	1	0.94737	0.75
7	3.42361	18	1	0.94444	0.70833
8	5.44444	17	1	0.94118	0.66667
9	5.75694	15	1	0.9375	0.62222
10	7.53472	14	1	0.92857	0.57778
11	7.55556	13	1	0.92308	0.53333
12	9.02083	12	1	0.91667	0.48889
13	11.0903	9	1	0.90909	0.43457
14	11.25	8	1	0.875	0.38025
15	11.3125	7	1	0.85714	0.32593
16	12.2569	6	1	0.83333	0.27161
17	14.8472	5	1	0.8	0.21728



Gambar 4.25 Plot Fungsi Survival data *time-to-failure* menggunakan Kaplan-Meier

Pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa plot dari laju ketahanan *time-to-failure bearing* semakin menurun. Semakin lama waktu kegagalannya, maka semakin rendah pula fungsi survivalnya.

4.3. Estimasi Survival *Probability Density Function* (PDF)

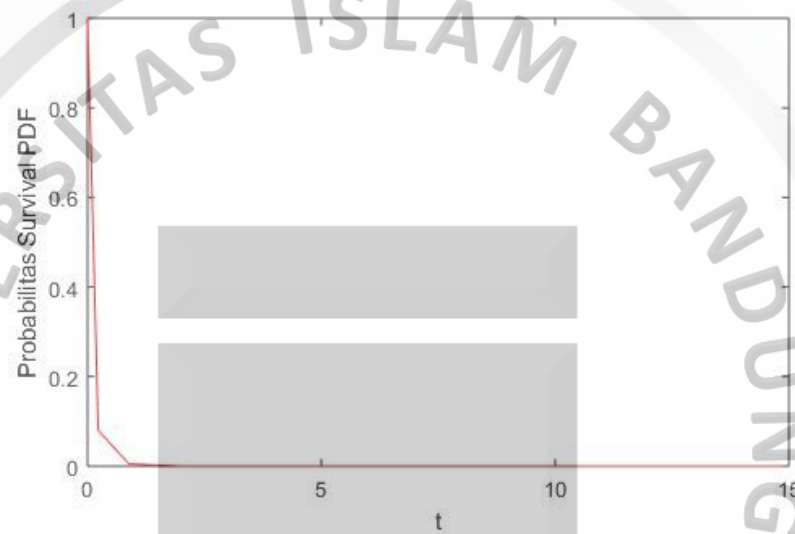
Estimasi survival ini digunakan untuk memperkirakan fungsi survival dari masing-masing unit j . Dimana pada estimasi ini $f(y|t + k\Delta)$ menyatakan sebuah fungsi densitas dari suatu distribusi. Berdasarkan fungsi survival pada persamaan (2.9), dimana nilai dari pdf_{obs} merupakan fungsi densitas yang diintegrasikan dengan batas atas $Y_{threshold}$ yang merupakan nilai *Threshold* yang telah ditentukan dan batas bawah y_i yang merupakan nilai RMS yang mewakili sebelum melewati batas threshold, dengan syarat $(t + k\Delta)$ yang merupakan interval waktu pada fungsi survival, dan nilai pdf_{ovr} merupakan fungsi densitas yang diintegrasikan dengan batas atas adalah ∞ (tak hingga) dan batas bawah y_i yang merupakan nilai RMS yang mewakili sebelum melewati batas threshold, dengan syarat $(t + k\Delta)$ yang merupakan interval waktu pada fungsi survival. Distribusi yang digunakan pada persamaan ini adalah distribusi Weibull dengan parameter $\alpha = 0.1$ dan $\beta = 0.15$, dimana hasilnya disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan $\hat{S}_{PDF}(t)$ menggunakan Estimasi PDF

t_j	y_i	pdf_{obs}	pdf_{ovr}	$\hat{S}_{PDF}(t)$
0	0	1	1	1
0.22917	0.48961	0.32446	0.07995	0.079945
0.88194	0.55924	0.31961	0.06598	0.005275
1.84722	0.31118	0.34106	0.12471	0.000658
1.9375	0.4555	0.3271	0.08737	5.75E-05
1.97222	0.52195	0.32213	0.07328	4.21E-06
3.35417	0.31898	0.34015	0.12237	5.15E-07
3.42361	0.31026	0.34117	0.12499	6.44E-08
5.44444	0.56323	0.31935	0.06522	4.2E-09

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan $\hat{S}_{PDF}(t)$ menggunakan Estimasi PDF (Lanjutan)

t_j	y_i	pdf_{obs}	pdf_{ovr}	$\hat{S}_{PDF}(t)$
5.75694	0.34472	0.3373	0.11497	4.83E-10
7.53472	0.56608	0.31917	0.06468	3.12E-11
7.55556	0.56657	0.31914	0.06459	2.02E-12
9.02083	0.39135	0.33266	0.1026	2.07E-13
11.0903	0.30047	0.34234	0.12799	2.65E-14
11.25	0.31507	0.3406	0.12354	3.27E-15
11.3125	0.34741	0.33702	0.11422	3.74E-16
12.2569	0.42599	0.32955	0.09415	3.52E-17
14.8472	0.46076	0.32668	0.0862	3.03E-18

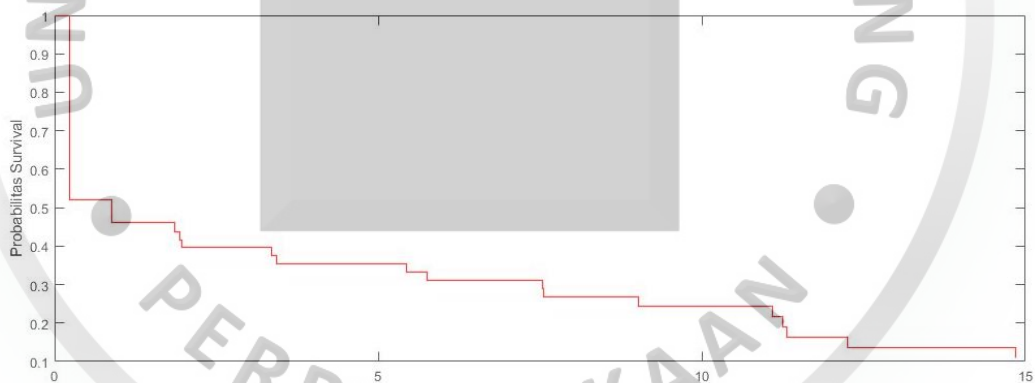
**Gambar 4.26** Plot Fungsi Survival data *time-to-failure* menggunakan PDF

Pada Gambar 4.26 menunjukkan bahwa plot dari laju ketahanan *time-to-failure bearing* semakin menurun. Semakin lama waktu kegagalannya, maka semakin rendah pula fungsi survivalnya.

Hasil probabilitas survival akhir adalah $S(t) = \text{mean}(\hat{S}_{KM}(t), \hat{S}_{PDF}(t))$ yang merupakan rata-rata antara nilai dari probabilitas survival menggunakan Kaplan-Meier dengan nilai probabilitas survival menggunakan *Probability Density Function* (PDF) yang disajikan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4.10 Hasil Probabilitas Survival Akhir $S(t)$

t_j	$\hat{S}_{KM}(t)$	$\hat{S}_{PDF}(t)$	$S(t)$
0	1	1	1
0.22917	0.95833	0.079945	0.51014
0.88194	0.91367	0.005275	0.46097
1.84722	0.875	0.000658	0.43783
1.9375	0.83333	5.75E-05	0.4167
1.97222	0.79167	4.21E-06	0.39584
3.35417	0.75	5.15E-07	0.375
3.42361	0.70833	6.44E-08	0.35417
5.44444	0.66667	4.2E-09	0.33333
5.75694	0.62222	4.83E-10	0.31111
7.53472	0.57778	3.12E-11	0.28889
7.55556	0.53333	2.02E-12	0.26667
9.02083	0.48889	2.07E-13	0.24444
11.0903	0.43457	2.65E-14	0.21728
11.25	0.38025	3.27E-15	0.19012
11.3125	0.32593	3.74E-16	0.16296
12.2569	0.27161	3.52E-17	0.1358
14.8472	0.21728	3.03E-18	0.10864

**Gambar 4.27** Plot Fungsi Survival Akhir

Pada Gambar 4.27 menunjukkan bahwa plot dari laju ketahanan *time-to-failure bearing* semakin menurun. Semakin lama waktu keagalannya, maka semakin rendah pula fungsi survivalnya.

4.4. Data Training dan Data Testing

Data yang akan digunakan dibagi kedalam data *training* dan data *testing*. Dimana data *training* digunakan untuk menentukan parameter w dan b dalam pembentukan model *Support Vector Regression* (SVR). Sedangkan data *testing* digunakan untuk validasi model yang telah terbentuk sebelumnya. Data yang akan digunakan adalah data hasil probabilitas survival akhir $S(t)$, sebelas data pertama pada data survival akan dijadikan sebagai data *training* dan enam data lainnya dijadikan sebagai data *testing*. Pada Tabel 4.11 merupakan data survival $S(t)$ yang telah dibagi kedalam data *training* dan *testing*.

Tabel 4.11 Data Survival $S(t)$

No.	t	$S(t)$
1	0.22917	0.51014
2	0.88194	0.46097
3	1.84722	0.43783
4	1.9375	0.4167
5	1.97222	0.39584
6	3.35417	0.375
7	3.42361	0.35417
8	5.44444	0.33333
9	5.75694	0.31111
10	7.53472	0.28889
11	7.55556	0.26667
12	9.02083	0.24444
13	11.0903	0.21728
14	11.25	0.19012
15	11.3125	0.16296
16	12.2569	0.1358
17	14.8472	0.10864

4.5. Fungsi Kernel

Fungsi kernel yang dapat digunakan adalah Kernel Polynomial dan Kernel Gaussian RBF, dimana nilai C yang digunakan adalah $C = [1 \ 10 \ 100 \ 1000]$ dan nilai $\varepsilon = 0.00001$. Pemilihan fungsi kernel untuk model SVR adalah dengan

membandingkan nilai RMSE yang paling kecil antara fungsi Kernel Polynomial dan Kernel Gaussian RBF yang terdapat pada Lampiran 3, dengan nilai parameter untuk Kernel Polynomial adalah $d = 1$ dan nilai parameter untuk Kernel Gaussian RBF adalah $\sigma = 0.35$. Pada Tabel 4.12 merupakan perbandingan fungsi kernel antara Kernel Polynomial dan Kernel Gaussian RBF.

Tabel 4.12 Perbandingan Fungsi Kernel

C	RMSE	
	Gaussian RBF	Polynomial
1	0.039	0.321
10	0.039	0.321
100	0.039	0.321
1000	0.039	0.321

Dapat dilihat pada Tabel 4.12 bahwa fungsi Kernel Gaussian RBF merupakan fungsi kernel terbaik dengan nilai RMSE lebih kecil dari fungsi Kernel Polynomial.

4.6. *Support Vector Regression (SVR)*

Untuk menghitung nilai parameter pada SVR yaitu w dan b , menggunakan bantuan *software* Matlab yang tersaji pada Lampiran 3, sehingga diperoleh sebagai berikut:

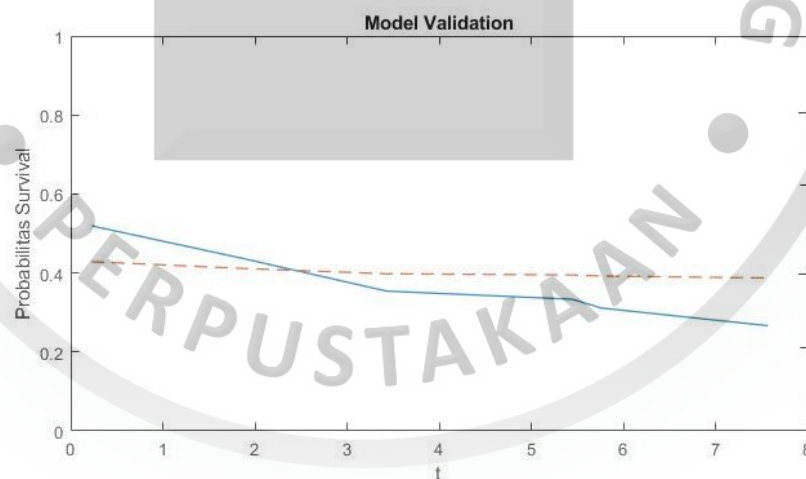
Tabel 4.13 Nilai w dan b

w	b	N
0.14833	0.37079	6
0.06702		
-0.01601		
-0.03618		
-0.05906		
-0.10412		

Jumlah pada N merupakan jumlah *support vector* yang dipilih. Nilai w dan b digunakan untuk membentuk model *Support Vector Regression (SVR)*. Berdasarkan persamaan (2.10), didapat model *Support Vector Regression* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\hat{S}(t) &= \sum_{i=1}^N w_i \cdot \varphi_i(t) + b \\
&= (0.14833\varphi_1(t) + 0.06702\varphi_2(t) - 0.01601\varphi_3(t) - 0.03618\varphi_4(t) \\
&\quad - 0.05906\varphi_5(t) - 0.10412\varphi_6(t)) + 0.37079 \\
&= (0.14833 \times K(t, 0,22917) + 0.06702 \times K(t, 1,88194) - 0.01601 \\
&\quad \times K(t, 3,42361) - 0.03618 \times K(t, 5,44444) - 0.05906 \times K(t, 5,75694) \\
&\quad - 0.10412 \times K(t, 7,55556) + 0.37079 \\
&= (0.14833 \times e^{-\frac{\|t-0,22917\|^2}{0,245}} + 0.06702 \times e^{-\frac{\|t-1,88194\|^2}{0,245}} - 0.01601 \\
&\quad \times e^{-\frac{\|t-3,42361\|^2}{0,245}} - 0.03618 \times e^{-\frac{\|t-5,44444\|^2}{0,245}} - 0.05906 \times e^{-\frac{\|t-5,75694\|^2}{0,245}} \\
&\quad - 0.10412 \times e^{-\frac{\|t-7,55556\|^2}{0,245}} + 0.37079
\end{aligned}$$

Berikut merupakan plot hasil akurasi prediksi pada model SVR menggunakan data *training*.

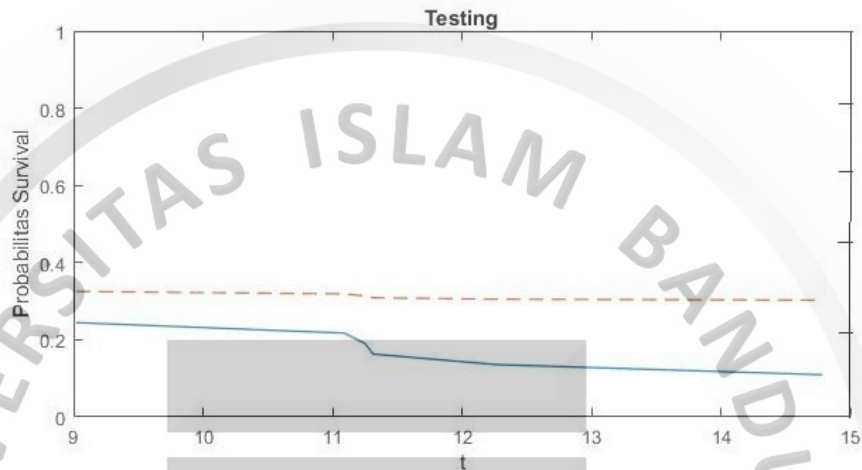


Gambar 4.28 Plot Prediksi Data *Training*

Pada Gambar 4.28, garis biru menunjukkan data asli sedangkan garis merah merupakan hasil prediksi. Secara visual dapat dilihat bahwa hasil prediksi dapat menjelaskan secara baik data asli. Selanjutnya akan dihitung nilai R^2 untuk melihat seberapa besar tingkat akurasi pada model SVR menggunakan persamaan (2.30).

$$R^2 = \left(\frac{Cov(y_t, \hat{y}_t)}{S_{y_t} S_{\hat{y}_t}} \right)^2 = \left(\frac{0.001405644}{0.092285719 \times 0,015330149} \right)^2 \times 100\% = 98.72\%$$

Kemudian data *testing* digunakan sebagai validasi untuk model SVR dengan bantuan *software* Matlab pada Lampiran 4. Berikut merupakan plot hasil akurasi prediksi pada model SVR menggunakan data *testing*.



Gambar 4.29 Plot Prediksi Data *Testing*

Pada Gambar 4.29, garis biru menunjukkan data asli sedangkan garis merah merupakan hasil prediksi. Secara visual dapat dilihat bahwa hasil prediksi dapat menjelaskan secara baik data asli. Selanjutnya akan dihitung nilai R^2 untuk melihat seberapa besar tingkat akurasi pada model SVR menggunakan persamaan (2.30).

$$R^2 = \left(\frac{Cov(y_t, \hat{y}_t)}{S_{y_t} S_{\hat{y}_t}} \right)^2 = \left(\frac{0.000432066}{0.050812631 \times 0,008591013} \right)^2 \times 100\% = 97.96\%$$

Tingkat akurasi pada model SVR dengan data *training* dan juga data *testing* menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dilihat dari nilai R^2 , yaitu 98.72% dan 97.96%.

Diperoleh tingkat akurasi pada model *Support Vector Regression* (SVR) dengan melihat nilai R^2 yang tersaji pada Tabel 4.14 sebagai berikut:

Tabel 4.14 Hasil R^2 dari Model *Support Vector Regression* (SVR)

		R^2
<i>Support Vector Regression</i> (SVR)	<i>Data Training</i>	98.72%
	<i>Data Testing</i>	97.96%

Dapat dilihat dari Tabel 4.14 diatas model *Support Vector Regression* (SVR) menggunakan data *training* dan data *testing*, keduanya memiliki tingkat akurasi yang sama-sama tinggi.

