

Fitness For Service And Remaining Life Assessment Pada Tangki T-900

Satrio Hafiz Putra Rustam^{1*}, Burniadi Moballa², Gusma Hamdana Putra³

Program Studi D4 Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: shafiz@student.ppns.ac.id^{1*}; bmoballa@ppns.ac.id^{2*}; hamdana.putra@ppns.ac.id^{3*};

Abstract - Storage tanks play an important role in the oil and gas industry by providing a safe container for crude oil and refined products during the operational period. However, aging tanks often experience structural deviations due to operational pressure and environmental factors. This study focuses on assessing the remaining life of a crude oil storage tank located in Balikpapan, which is planned to be repurposed for gasoline storage. Initial inspection revealed critical issues, including roundness, plumbness deviation, and foundation settlement, which can significantly affect the tank's structural stability and long-term reliability. A Fitness for Service (FFS) evaluation, based on API 579-1/ASME FFS-1 guidelines, was carried out to determine whether the tank remains safe for continued operation. Calculations were conducted using statistical methods for corrosion rate and remaining life, this calculation combined with ASTM G16-13 and ISO 14802. The result of remaining life for plumbness is 60 years, settlement is 200 years, while roundness has exceeded its service life by 6 months.

Keyword: storage tank, settlement, plumbness, roundness, fitness for service..

Nomenclature

RMS	root mean square.
RMSD	root mean square deviation.
S²	varian sampel.
\bar{x}	rata-rata sampel.
x_i	nilai aktual.
y_i	nilai prediksi atau estimasi dari model.
n	jumlah data.
$t_{avg,1}$ & $t_{avg,2}$	pengukuran rata-rata dari dua data inspeksi atau sampel pada tempat yang sama.
$S(x)$	pooled standard deviation.
n_1 & n_2	pengukuran yang dilakukan pada masing-masing inspeksi atau data sample.
$S^2(x_1)$	varians dari sample pengukuran pertama.
$S^2(x_2)$	varians dari sample pengukuran kedua.
R_x	remaining life.
r_x	rate of existing.
x_{max}	data maksimal toleran menurut standard.
$\Delta year$	jumlah tahun pada data inspeksi.

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas (migas) memiliki peran strategis dan tetap menjadi pilar utama dalam mendukung aktivitas sektor industri. Salah satu infrastruktur vital dalam industri ini adalah tangki penyimpanan (*storage tank*), yang berfungsi untuk menampung minyak mentah (*crude oil*) maupun produk hasil olahannya. Selama masa operasinya, tangki penyimpanan

sangat rentan mengalami degradasi struktural akibat berbagai faktor, seperti kekurangan dalam desain awal, gangguan operasional, serta pengaruh lingkungan.

Salah satu perusahaan di Balikpapan memiliki tangki penyimpanan yang awalnya digunakan untuk *mixed crude oil* dan direncanakan akan dikonversi menjadi tangki *gasoline* atau bensin. Dalam praktiknya, tangki ini mengalami sejumlah permasalahan teknis, salah satunya adalah penurunan pondasi (*settlement*) yang berdampak signifikan terhadap integritas struktur. *Settlement* dapat menyebabkan deformasi pada dinding tangki, perubahan geometri (seperti ketidaksesuaian *roundness* dan *plumbness*), serta meningkatkan risiko kegagalan struktural secara keseluruhan. Selain itu, tekanan operasi dan benturan (*impact*) turut mempercepat degradasi, termasuk korosi yang muncul akibat perubahan kondisi tanah dan lingkungan.

Untuk mengidentifikasi kelayakan operasional tangki dalam kondisi tersebut, diperlukan pendekatan evaluasi berbasis manajemen integritas aset, yaitu melalui analisis *Fitness for Service* (FFS).

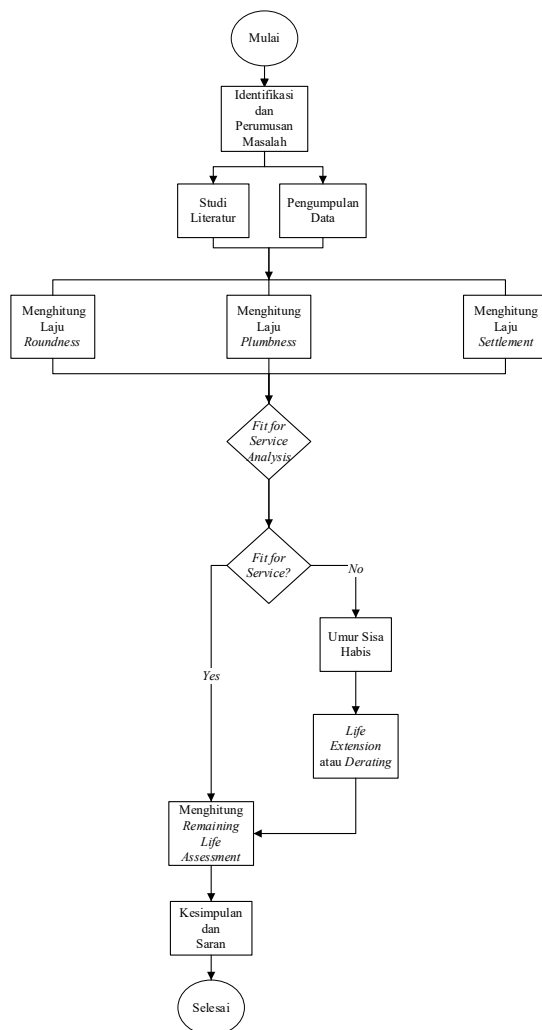
Fitness for Service (FFS) merupakan metode teknik yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan operasional suatu peralatan yang telah mengalami kerusakan atau degradasi. Tujuannya adalah menentukan apakah peralatan tersebut masih dapat beroperasi secara aman dan efisien dalam kondisi saat ini, atau memerlukan perbaikan, modifikasi, maupun penggantian. FFS umumnya diterapkan pada aset yang mengalami masalah seperti korosi, retakan, deformasi geometri (*roundness*, *plumbness*), maupun *settlement*. Evaluasi dilakukan mengacu

pada standar API 579-1/ASME FFS-1, yang memungkinkan penilaian komprehensif terhadap kondisi tangki dan rekomendasi tindakan teknis yang diperlukan untuk memastikan kelayakan operasi.

2. METODOLOGI

2.1 Metode Penelitian

Metodologi perhitungan *plumbness*, *roundness*, dan *settlement* tangki menurut API 579, menggunakan perhitungan komprehensif, maka dari itu perhitungan dapat menggunakan metode statistik, sehingga perhitungan menggunakan standar ASTM G16-13 serta untuk *remaining life* menggunakan ISO 14802, sedangkan untuk penjelasan langkah dijelaskan dalam gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Identifikasi Dan Perumusan Masalah

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan pada tangki T-900. Permasalahan yang teridentifikasi mencakup indikasi kerusakan struktural, antara lain deformasi (*plumbness* dan *roundness*), korosi,

serta penurunan pada pondasi tangki (*settlement*). Hasil identifikasi permasalahan tersebut menunjukkan adanya potensi dampak terhadap kelayakan operasional tangki. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi operasional tangki menggunakan pendekatan *Fitness for Service* (FFS) sesuai standar API 579, serta memperkirakan umur sisa (*remaining life*) tangki berdasarkan laju kerusakan yang dianalisis melalui pendekatan statistik.

2.3 Tahap Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari:

- a. Data Dimensi Tangki, meliputi diameter, tinggi, kapasitas, serta general arrangement dari tangki.
- b. Data Operasional, yang mencakup kondisi tekanan dan temperatur selama proses pengoperasian berlangsung.
- c. Data Inspeksi, mencakup hasil pengukuran deformasi tangki (*roundness* dan *plumbness*) serta ketebalan dinding tangki.

Seluruh data tersebut diperoleh melalui inspeksi lapangan dengan menerapkan metode *Non-Destructive Testing* (NDT), antara lain pengukuran ketebalan dinding menggunakan metode *Ultrasonic Testing* (UT), serta pengukuran deformasi menggunakan teknik laser scanning.

2.4 Perhitungan Rata-Rata Kerusakan

Dikarenakan kerusakan terdapat bilangan negatif, maka dilakukan perhitungan rata-rata menggunakan rumus *root mean square* sehingga deviasi atau kerusakan dihitung dalam rumus (1) sebagai berikut :

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

n = jumlah pengukuran.

x_i = nilai data ke-*i*.

2.5 Perhitungan Varians

Varians dalam statistik merupakan ukuran yang menggambarkan tingkat penyebaran atau variasi data terhadap nilai rata-ratanya. Varians dihitung sebagai nilai rata-rata dari kuadrat selisih antara setiap nilai data dengan rata-rata data tersebut. Secara matematis, varians (*s²*) untuk sampel dirumuskan pada persamaan nomor (2) sebagai berikut:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{2}$$

x_i = nilai observasi ke-*i*.

\bar{x} = rata-rata sampel.

n = jumlah observasi (ukuran sampel).

2.5 Perhitungan Standar Deviasi

Root Mean Square Deviation (RMSD) atau sering juga dikenal sebagai *Root Mean Square Error* (RMSE), merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk mengukur besarnya perbedaan (deviasi atau error) antara nilai yang diestimasi (prediksi atau model) dengan nilai aktual atau teramati. RMSD menunjukkan seberapa besar rata-rata kesalahan prediksi atau penyimpangan yang terjadi pada suatu model atau pengukuran. Secara matematis, RMSD didefinisikan dalam rumus (3) sebagai berikut:

$$RMSD = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \quad (3)$$

x_i = nilai aktual.

y_i = nilai prediksi atau estimasi dari model.

n = jumlah data.

2.6 Perhitungan Pooled Standar Deviasi

Pooled Standard Deviation (standar deviasi gabungan) adalah suatu ukuran statistik yang digunakan untuk mengestimasi standar deviasi bersama dari dua atau lebih kelompok atau sampel yang dianggap memiliki varians yang serupa (homogen). Konsep ini biasanya digunakan dalam analisis statistik, khususnya dalam pengujian hipotesis seperti uji-t dua sampel independen atau ANOVA. Secara matematis, rumus *pooled standard deviation* untuk dua sampel independen dijelaskan dalam rumus (4) sebagai berikut:

$$S(x) = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S^2(x_1) + (n_2 - 1)S^2(x_2)}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4)$$

n_1 = variabel dari sample pengukuran pertama.

n_2 = variabel dari sample pengukuran kedua.

$S^2(x_1)$ = varians dari sample pengukuran pertama.

$S^2(x_2)$ = varians dari sample pengukuran kedua.

2.7 Perhitungan T-statistic Score

T-statistic score adalah nilai statistik yang digunakan dalam pengujian hipotesis untuk menentukan apakah terdapat perbedaan signifikan secara statistik antara dua kelompok data atau apakah suatu parameter tertentu berbeda dari nilai hipotesis tertentu (biasanya nilai rata-rata). Secara umum, t-statistik dihitung menggunakan rumus (5) berikut:

$$t = \frac{t_{avg,1} - t_{avg,2}}{S(x) \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (5)$$

$t_{avg,1}$ & $t_{avg,2}$ = pengukuran rata-rata dari dua data inspeksi atau sample pada tempat yang sama.

$S(x)$ = *pooled standard deviation*.

n_1 & n_2 = pengukuran yang dilakukan pada masing-masing inspeksi atau data sample.

2.8 Pengujian Null Hypothesis Test

Merupakan prosedur statistik yang digunakan untuk menentukan apakah terdapat bukti statistik yang cukup untuk menolak suatu hipotesis awal yang disebut hipotesis nol (H_0). Hipotesis nol biasanya menyatakan bahwa tidak ada efek, tidak ada hubungan, atau tidak ada perbedaan signifikan antara dua atau lebih kelompok/populasi. Berikut penjelasannya :

1. Pilih tingkat signifikansi, α . Pada dasarnya, tingkat signifikansi adalah probabilitas terjadinya kesalahan pada hasil pengujian. Tingkat signifikansi biasanya dipilih sebesar 0,02, 0,05, atau 0,1.
2. Tentukan derajat kebebasan (*degree of freedom*, DOF). Derajat kebebasan adalah jumlah total sampel pada kedua pengukuran, yang dapat dinyatakan sebagai berikut:
 $DOF = n_1 + n_2$
3. Tentukan nilai kritis (nilai p) yang sesuai dengan tingkat signifikansi dan derajat kebebasan. Nilai kritis dapat diperoleh dari tabel statistik atau *software* statistik.
4. Evaluasi nilai statistik-t (*t-statistic*) untuk masing-masing titik pengukuran.
5. Apabila nilai statistik-t lebih besar daripada nilai kritis, atau (nilai t > nilai p), maka terdapat perbedaan signifikan antara kedua nilai rata-rata. Sebaliknya, jika tidak, maka perbedaannya dinyatakan tidak signifikan secara statistik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan Rata-Rata Kerusakan

Pada tahap ini, setelah melakukan dan pengolahan penyajian data, perhitungan rata-rata dengan masing-masing data dilakukan untuk mengetahui penyebaran data dari setiap kerusakan berupa *plumbness*, *roundness* dan *settlement*. Berikut adalah tabel 1 untuk perhitungan *plumbness*, *roundness*. Tabel 2 untuk perhitungan elevasi tangki :

Tabel 1 Perhitungan Statistik Awal Roundness, Plumbness.

Keterangan	Rata - Rata Deviasi	Variance	Standard Deviation
Plumbness 2023	0.0441	0.00147	0.077
Plumbness 2024	0.0019	0.00178	0.044
Roundness 2023	0.0074	0.00006	0.010
Roundness 2024	0.0455	0.00188	0.053

Tabel 2 Perhitungan Statistik Awal Elevasi Tangki (Settlement)

Keterangan	Rata Rata Elevasi	Varians	Standard Deviasi
------------	-------------------	---------	------------------

Elevasi Tangki 2021	9.696	0.0000532	0.00754
Elevasi Tangki 2023	9.696	0.0000106	0.00336

3.2 Perhitungan T-statistic Score

Setelah mendapatkan data untuk masing-masing penyebaran data dan rata-rata masing-masing data, maka dihitung *t-score* untuk menentukan signifikansi data yang telah diolah. Berikut dalam tabel 3 adalah hasil perhitungan *t-score*:

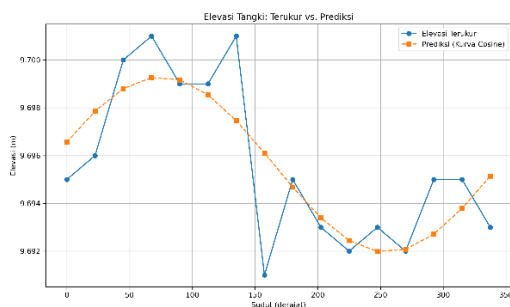
Tabel 3 Perhitungan T-score

Keterangan	Pooled Standard Deviation	t-score	p-value (significance level α=0.05 DOF =88)	Signifikan?
Plumbness	0.00173	1.020	1.987	TIDAK
Roundness	0.00171	80.681	1.987	YA
Elevasi Tangki	0.0000384	27.626	2.037	YA

Terjadi signifikan terhadap data *roundness* dan elevasi tangki, namun terjadi tidak signifikan terhadap data *plumbness*. Laju kerusakan *plumbness* akan tetap diikutkan hanya saja ada catatan terkait kelayakan data, sehingga laju kerusakan dapat dihitung untuk menemukan sisa umur dari peralatan.

3.3 Perhitungan Laju Kerusakan

Untuk menghitung laju kerusakan, diperlukan data berupa maksimum kerusakan sesuai dengan masing-masing standar kriteria kerusakan tersebut. Menurut API 650, maksimum defleksi atau deviasi atau kerusakan untuk *plumbness* adalah 1/200 tinggi tangki, sedangkan untuk *roundness* dengan diameter tangki 36,6 m adalah 0,019 m. Sedangkan untuk maksimum penurunan tangki (*settlement*) mengacu pada API 653 adalah 0,038 m. Perhitungan maksimum *settlement* dilakukan menggunakan *software* untuk menentukan grafik kurva kosinus *Elev_{pred}* sehingga didapatkan hasil grafik sebagai berikut :



Gambar 2 Grafik Kurva Kosinus Settlement

Setelah mendapatkan maksimum dari masing-masing kerusakan, maka dihitung *rate of existing* dari masing-masing kerusakan atau deviasi. Perhitungan *rate of existing* atau laju kerusakana dijelaskan dalam rumus (7) sebagai berikut :

$$r_x = \frac{x_1 - x_2}{\Delta year} \tag{7}$$

x_1 = rata-rata akhir.

x_2 = rata-rata awal.

$\Delta year$ = jumlah tahun pada data inspeksi.

Setelah menghitung laju kerusakan, dihitung *remaining life* atau sisa umur dari kerusakan-kerusakan tersebut, sisa umur tersebut akan menjadi perhatian untuk mengevaluasi peralatan terkait penanganan selanjutnya. Perhitungan *remaining life* dijelaskan dalam rumus (6) sebagai berikut :

$$R_x = \frac{x_{max} - x_2}{r_x} \tag{6}$$

x_{max} = data maksimal toleran menurut standard.

x_2 = rata-rata akhir.

r_x = *rate of existing*.

Dari perhitungan diatas, didapatkan sisa umur tangki sebagai berikut :

Tabel 4 Perhitungan Remaining Life

Keterangan	Laju Kerusakan (m/year)	Maksimum Kerusakan (m)	Remaining Life (year)
Plumbness	0.0005	0.073	60.33931703
Roundness	0.0381	0.019	-0.695043788
Elevasi Tangki	0.0002	0.038	204.3704835

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa *plumbness* memiliki laju kerusakan sebesar 0,0005 m/tahun, *roundness* 0,0381 m/tahun, elevasi tangki (*settlement*) 0,0002 m/tahun, dengan umur sisa peralatan *plumbness* 60 tahun dan *settlement* 204 tahun. Sedangkan untuk *roundness* sudah melebihi sisa umur.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa tangki T-900 masih layak digunakan untuk jangka waktu tertentu dengan beberapa catatan dan kondisi sebagai berikut:

1. Kondisi *plumbness* tangki menunjukkan laju kerusakan sebesar 0,0005 m/tahun dengan remaining life sebesar 60 tahun, sehingga dianggap aman untuk jangka panjang.
2. Kondisi *roundness* tangki memiliki laju kerusakan sebesar 0,0381 m/tahun, sudah melebihi batas toleransi maksimum yang ditentukan oleh standar API 650, sehingga perlu segera dilakukan perbaikan atau modifikasi untuk menjamin integritas struktur tangki.

3. Kondisi elevasi tangki (*settlement*) memiliki laju kerusakan 0,0002 m/tahun *dengan remaining life* sebesar 204 tahun, yang menunjukkan kondisi stabil dan masih memenuhi standar keamanan operasional untuk jangka waktu lama.

Secara keseluruhan, meskipun sebagian besar parameter masih dalam kondisi aman, rekomendasi utama adalah segera menangani kerusakan *roundness* agar tidak menimbulkan risiko kegagalan struktural yang lebih serius di masa depan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Petroleum Institute, (2016). API Standard 579-1/ASME FFS-1 Fitness-for-Service, Washington D.C., USA.
- [2] American Petroleum Institute, (2020). API Standard 650 Welded Tanks for Oil Storage, Washington D.C., USA.
- [3] American Petroleum Institute, (2014). API Standard 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Washington D.C., USA.
- [4] Anderson, T.L., (2017). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th Edition, CRC Press, USA.
- [5] Bhandari, V.B., (2018). Design of Machine Elements, 4th Edition, McGraw-Hill Education, India.
- [6] Helmus, F.P., (2021). Structural Analysis and Integrity Assessment of Storage Tanks, Journal of Pressure Vessel Technology, 143(3), pp. 031501-1–031501-9.
- [7] Lai, M.O., (2019). Structural Stability and Buckling of Storage Tanks, Springer Nature, Singapore.
- [8] Prawoto, Y., (2016). Panduan Praktis Inspeksi Tangki Penyimpanan Minyak, Andi Publisher, Yogyakarta.
- [9] Reddy, A. and Gopinath, V., (2020). Finite Element Analysis and Remaining Life Assessment of Storage Tanks Subjected to Foundation Settlement, International Journal of Mechanical Sciences, 181, 105757.
- [10] Wang, Y., Zhang, L., and Guo, Z., (2020). Risk Assessment and Remaining Life Prediction of Corroded Oil Storage Tanks, Reliability Engineering & System Safety, 199, 106922.
- [11] Zhu, J., and He, Z., (2018). Geometric Imperfections and Their Effects on the Structural Integrity of Storage Tanks, Engineering Structures, 163, pp. 111-120.