

Analisa Kekuatan Dinding Tangki Terhadap Kemiringan Pondasi Menggunakan Metode Elemen Hingga

Wahyuchandra Ramadhani^{1*}, Djoko Setyanto¹

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jl. Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<i>Article history:</i> Received 28 November 2024 Accepted 9 Desember 2024	<i>Storage tanks are essential equipment in oil and gas facilities, designed to store crude oil and natural gas before their distribution based on needs and demands. These facilities frequently encounter issues such as land subsidence or shifting caused by weather and ground movement. Such ground movement can alter the position of the tank foundation, leading to uneven tank bases and causing the tanks to tilt. Tank tilting impacts the structural integrity of the tank walls, necessitating an analysis to ensure that the tank structure can evenly distribute stress. This analysis employs the finite element method (FEM), focusing on a scenario where the tank body tilts on one side. The process involves collecting technical data, creating a geometric model, performing FEM simulations, and drawing conclusions. Simulation results indicate that the highest stress and deformation occur at the tank base, with stress measured at 21,050 psi and maximum deformation at 2.523 mm. These values are within the allowable stress limit for SA 283 Gr. C material, which is 23,600 psi. Consequently, the out-of-settlement conditions for Tank T-02, as determined by FEM simulation, confirm that the tank remains safe to operate in accordance with its specification standards.</i>
<i>Keywords:</i> Tank, Bulged, Stress, Finite Element Analysis	

Article Info	Abstrak
<i>Article history:</i> Diterima 28 November 2024 Disetujui 9 Desember 2024	Tangki penimbun merupakan peralatan pada fasilitas migas yang digunakan untuk menimbun serta menyimpan minyak dan gas bumi untuk nantinya di salurkan kembali sesuai kebutuhan dan permintaan. Pada fasilitas migas sering kali ditemui kasus penurunan atau pergeseran tanah akibat cuaca dan pergerakan tanah. Pergerakan tanah tersebut mengakibatkan posisi pondasi tangki dapat berubah atau mengalami penurunan dan mengakibatkan dasar tangki menjadi tidak rata sehingga membuat tangki menjadi miring. Kemiringan pada tangki akan mempengaruhi kekuatan struktur dinding tangki sehingga diperlukan analisis untuk memastikan stuktur badan tangki mampu mendistribusikan tegangan secara merata. Analisis akan menggunakan metode elemen hingga dimana badan tangki memiliki kemiringan pada salah satu sisi tangki. Metodologi pada analisis ini dimulai dari pengumpulan data teknis, pembuatan model geometri, melakukan simulasi metode elemen hingga, dan dibuatkan kesimpulan. Hasil simulasi didapatkan tegangan dan deformasi tertinggi pada bagian bawah tangki yaitu 21.050 psi, dan deformasi tertinggi didapatkan 2,523 mm. Allowable stress material SA 283 Gr. C yaitu 23.600 Psi masih diatas tegangan simulasi. Dengan demikian, out of settlement dario hasil simualsi dengan metode elemen hingga pada tangki T-02 masih aman untuk dioperasikan sesuai dengan standar spesifikasi tangki.
<i>Kata Kunci:</i> Tangki, Kemiringan, Tegangan, Metode Elemen Hingga	

*Corresponding author. Wahyuchandra Ramadhani
Email address: wahyuch.12024003075@student.atmajaya.ac.id

1. PENDAHULUAN

Tangki penimbun merupakan peralatan fasilitas terutama pada aspek instalasi minyak dan gas bumi yang berfungsi sebagai penyimpan atau penimbun sementara bahan bakar untuk nantinya didistribusikan kembali (Nurdianto et al., 2022). Terdapat beberapa jenis tangki secara umum di gunakan berdasarkan posisinya yaitu tangki pendam horizontal dan tangki pendam vertikal. Tangki penimbun vertikal dengan konstruksi tinggi menjulang, harus mampu mempertahankan posisi tegap untuk menjamin tangki dapat menampung fluida sesuai operasinya. Kondisi tangki yang miring akan menimbulkan anomali pada distribusi tegangan akibat gaya hidrostatis fluida yang ditampung terutama pada bagian yang terendah (Setiana et al., 2020).

Analisis ini dilakukan pada inspeksi di salah satu tangki di instalasi minyak dan gas milik perusahaan negara, dimana inspeksi ini merupakan tahap proses perpanjangan sisa umur layan terhadap peralatan-peralatan minyak dan gas untuk dapat dioperasikan dan memiliki legalitas. Proses inspeksi dilakukan pada Desember 2023 di Donggala, Sulawesi Tengah. Pada proses pembuatan laporan hasil dari inspeksi ditemukan anomali berupa kemiringan fondasi melebihi kriteria sehingga diperlukan analisis lebih lanjut mengenai kemiringan tanah yang melebihi kriteria tersebut (Setiawan & Kasda, 2014).

Masalah yang terjadi pada fasilitas dengan struktur tanah yang tidak rata ataupun memiliki fondasi dengan tipe dangkal yang akan mengakibatkan bangunan di atasnya mengalami kemiringan (Setiana et al., 2020). Fondasi tangki terdiri dari beberapa macam seperti fondasi dengan ringwall beton, tanpa ringwall, ringwall batu pecahan kerikil, dan fondasi rakit (API 650, 2021). Tangki ini termasuk kedalam fondasi dengan ringwall beton. Pada beberapa kasus, tangki yang mengalami kemiringan dapat ditemukan di beberapa lokasi dengan umur tangki yang relatif lama dan juga dapat terjadi akibat berada di daerah rawan gempa atau mengalami pergeseran tanah akibat beban cairan (Setiana et al., 2020). Tangki ini sudah beroperasi cukup lama yaitu sekitar 44 tahun. Kemiringan pada tangki dapat terjadi akibat penurunan ketinggian tanah yang mengakibatkan tangki menjadi miring dan di luar dari kriteria yang telah ditetapkan.



Gambar 1.
Tangki Vertikal pada Instalasi Bahan Bakar

Studi ini sebagai bentuk analisa atau evaluasi sebagai proses laporan perpanjangan sisa umur layan. Analisis ini dilakukan dengan tujuan memastikan kondisi tangki dapat menampung fluida sesuai dengan spesifikasi dan sebagai penentuan integritas tangki. Hasil kesimpulan dapat menjadi acuan untuk dioperasikan dengan normal atau dengan kondisi khusus. Tangki yang mengalami kemiringan fondasi akan mempengaruhi kekuatan struktur yang berdampak pada dinding tangki menerima tekanan yang lebih besar (Setiawan & Kasda, 2014). Out of Settlement dianalisis untuk memastikan bagian course

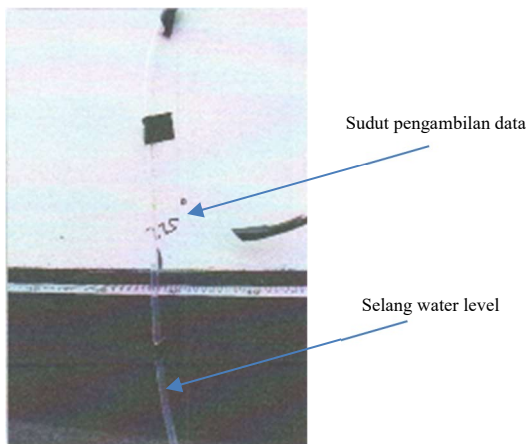
pertama atau bagian bawah mampu untuk menahan beban tekanan fluida (bahan bakar minyak) dengan maksimum ketinggian fluida yang diizinkan tentunya dengan rekomendasi sebagai bagian dari monitoring kemiringan pondasi selanjutnya (Setiana et al., 2020).

2. METODE KAJIAN

Metode analisis kemiringan tangki menggunakan metode elemen hingga terhadap objek tiga dimensi yang dibentuk menyerupai objek aslinya. Objek yang dibentuk model 3 dimensi ini merupakan tangki yang berada di Terminal Bahan Bakar Minyak (TBBM) Donggala, Sulawesi Tengah. Dalam pekerjaan Perpanjangan Sisa Umur Layan terhadap peralatan-peralatan minyak dan gas.

Pelaksanaan analisis diawali dengan mengumpulkan data-data tangki sesuai data aktual di lapangan. Data tangki meliputi spesifikasi tangki seperti dimensi, ketebalan dinding tangki aktual, kondisi visual, kemiringan dinding tangki, dan kemiringan pondasi tangki.

Pengukuran kemiringan pondasi tangki menggunakan sistem water level oleh inspektor yaitu menggunakan air sebagai pengukur ketinggian, dimana air akan mencari ketinggian yang sama dalam keadaan diam. Water level ini menggunakan selang yang berisi fluida berupa air. Pengukuran dilakukan secara keseluruhan keliling tangki dengan membagi menjadi 8 titik pengambilan. Selain water level, settlement pondasi dapat diukur menggunakan alat yang dinamakan theodolite.



Gambar 2.
Pengukuran settlement dengan Water Level

Sebagai bahan acuan dalam perhitungan, model, dan simulasi data spesifikasi tangki dapat dilihat pada tabel 1. Tangki dibangun tahun 1976 dan sudah beroperasi selama lebih dari 44 tahun. Data ketebalan tangki diukur menggunakan ultrasonic thickness measurement berupa kumpulan thickness dapat dilihat pada Gambar 4 dan titik dari thickness di ukur dapat dilihat pada Gambar 2. Thickness yang digunakan pada geometri ketebalan tangki adalah thickness minimum dari Gambar 4 yaitu 5,58 dari course 2 sebagai kasus terburuk (*worst case*).



Gambar 3.
Pengujian ketebalan dinding tangki dengan Ultra Sonic Test Thickness

Tabel 1.
Spesifikasi Tangki

1. Tag. No.	T-02
2. Service	Pertamax Turbo
3. Specific Gravity	0,77
4. Tank diameter	14,63 m
5. Tinggi	7,4 m
6. kapasitas	1200 m ³
7. Tahun Pembuatan	1979

Pada simulasi 3D model tangki, akan menggunakan material SA 283 Gr. C. Spesifikasi material SA 283 Gr. C merujuk pada standar API 653 yang dapat dilihat pada gambar 3. Didapatkan Yield strength yaitu 30000 psi, Allowable stress menggunakan lower two course yaitu 23600 Psi, dan young modulus yaitu 2,9e07 psi. Properties material akan di input kedalam material software meaway.

Material Specification and Grade	Minimum Specified Yield Stress, σ_y (lb/in. ²)	Minimum Specified Tensile Strength, σ_t (lb/in. ²)	Allowable Product Stress, S (lb/in. ²) (Note 6)		Allowable Hydrostatic Test Stress, S_h (lb/in. ²) (Note 6)	
			Lower Two Courses	Upper Courses	Lower Two Courses	Upper Courses
ASTM Specifications						
A 283-C	30,000	55,000	23,600	26,000	26,000	27,000
A 36	36,000	58,000	24,900	27,400	27,400	30,100
A131-A, B, CS	34,000	58,000	24,900	27,400	27,400	30,100
A131-EH 36	51,000	71,000	30,500	33,500	33,500	36,800
A573-58	32,000	58,000	24,900	27,400	27,400	28,800
A573-65	35,000	65,000	27,900	30,700	30,700	31,500
A573-70	42,000	70,000	30,000	33,000	33,000	36,300
A516-55	30,000	55,000	23,800	26,000	26,000	27,000

Plate Specification	Grade	Normal Plate Thickness t in.	Minimum Yield Strength psi	Minimum Tensile Strength psi	Product Design Stress S_y psi	Hydrostatic Test Stress S_h psi
A283	C		30,000	55,000	23,000	22,500
A285	C		30,000	55,000	29,000	22,500

Gambar 4.
Spesifikasi Material [2] & [1]

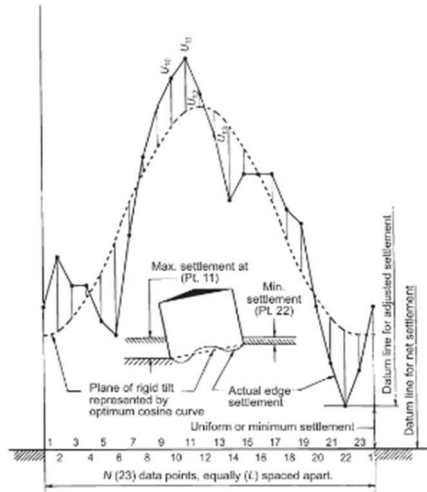
Pengukuran ketebalan dinding tangki menggunakan non destructive test (NDT) ultrasonic pada seluruh bagian tangki terutama bagian yang dapat dijangkau oleh inspektor. Data thickness nantinya akan digunakan sebagai ketebalan pada model 3 dimensi. Ketebalan tangki dalam model nantinya akan dipilih dari kumpulan data dengan data ketebalan terendah akan digunakan untuk ketebalan gambar geometri nantinya pada analisis ini, menggunakan data thickness yang paling terkecil pada course 1 atau bagian terbawah tangki.

Elevasi settlement yang diperbolehkan sesuai API 653 untuk kemiringan dapat menggunakan persamaan 1.

$$S_{max} = \frac{(L^2 x \gamma x 11)}{2[(ExH)]} \tag{1}$$

Dimana,

- S_{max} : out-of-plane settlement (feet)
- L : jarak busur antara titik pengukuran (feet)
- Y : yield strength material (Psi)
- E : is young's moduulus (Psi)
- H : is tank height (feet) [2].



Gambar 5.
Representasi Settlement Tangki [2]

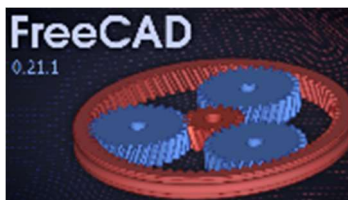
Untuk membentuk out-of-plane settlement dapat dicari dengan elevasi aktual dikurangi dengan cosine curve value. Pada Gambar 5 menunjukkan perbandingan antara cosine curve value dan elevasi. Out-of-plane akan bersifat negatif jika elevasi di bawah cosine curve value, dan bersifat positif jika nilai elevasi berada di atas cosine curve value. Out-of-plane settlement akan dibandingkan dengan maximum out-of-plane settlement. Jika melebihi nilai tersebut maka perlu dilakukan analisis lebih. Mencari cosine curve value dapat menggunakan persamaan berikut.

$$Elev_{Pred} = a + b \times \cos(\theta + c) \tag{2}$$

Dimana,

- a : elevasi rata-rata
- b : amplitude
- c : phase shift [2].

Pembetulan model tiga dimensi menggunakan software freeCAD Ver.0.21.1 dimana software ini merupakan software open source berbasis Computer Aided Design (CAD) atau program desain tiga dimensi dan dua dimensi. Pembuatan model didasari dengan data data tangki aktual seperti diameter, tinggi, ketebalan dinding tangki, dan kemiringan pondasi tangki.



Gambar 6.
Software FreeCAD dan Mecway

Model yang telah dibentuk, dapat dianalisis menggunakan software Mecway Version 16. Mecway merupakan software metode elemen hingga yang salah satunya dapat melakukan analisis struktur. Analisis tangki dilakukan dengan memasukkan desain tiga dimensi kedalam software mecway dan akan dilakukan meshing. Meshing merupakan membagi sebuah objek menjadi bagian kecil dan sederhana (Setiawan & Kesda, 2014). Desain akan diberikan boundary atau batasan dalam analisis ini menggunakan fluida dengan ketinggian fluida sama dengan tinggi tangki dan berat jenis seperti pertamax turbo. Prosedur yang telah terpenuhi akan dilakukan proses simulasi yang akan didapatkan hasil berupa tegangan. Tegangan ini yang akan dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan oleh material SA 283 Gr. C.

Tegangan hasil dapat dikatakan aman jika hasil simulasi yaitu tegangan aktual berada di bawah tegangan yang diizinkan. Jika tegangan aktual berada di atas tegangan izin, maka perlu dilakukan simulasi ulang dengan ketinggian fluida hingga tegangan aktual berada di bawah tegangan izin (Setiana et al., 2020)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil dari inspeksi tangki dengan menggunakan water level, dapat dilihat pada Tabel 2 akumulasi dari ketinggian settlement dari 8 titik pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan jarak yang sama. Didapatkan selisih tertinggi pada -55 mm dan 50 mm. Hasil dari pengukuran ini akan dikalkulasikan untuk didapatkan out-of-settlement dan dibandingkan dengan kriteria maksimum settlement.

Tabel 2.

Shell Settlement Leveling

Lokasi Pengukuran	Shell Settlement		Selisih (mm)
	H1 (mm)	H2 (mm)	
0°	300	300	0
45°	300	319	19
90°	300	350	50
135°	300	245	-55
180°	300	262	-38
225°	300	275	-25
270°	300	290	-10
315°	300	318	18

Kriteria maksimum settlement merupakan settlement yang diperbolehkan sesuai standar API 653 Maksimum allowable out-of-plane settlement dapat ditentukan menggunakan persamaan 1 sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

$$S_{max} = \frac{(18,849^2 \times 30000 \times 11)}{2[(29500000 \times 24,278)]}$$

$$S_{max} = 0,081851 \text{ feet}$$

$$S_{max} = 24,948 \text{ mm}$$

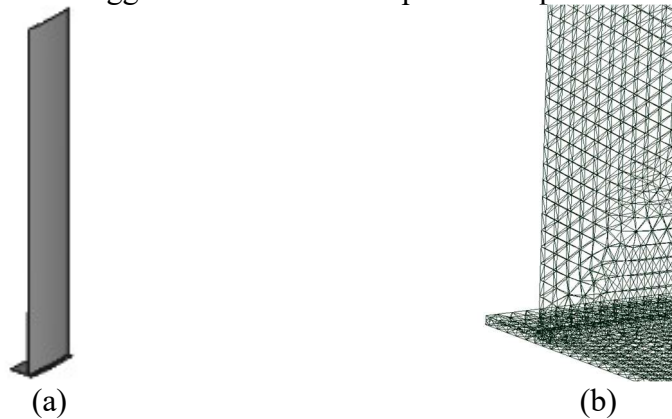
Untuk mencari cosine curve menggunakan persamaan 2 dan digunakan sebagai selisih untuk out-of-plane settlement sehingga akan dibandingkan dengan kriteria maksimum settlement yang diizinkan. Nilai negatif (-) merupakan arah out-of-plane berada di atas atau dibawah curve. Sebagai perbandingan nilai negatif dapat diabaikan guna mencari nilai yang melebihi nilai maksimum settlement yang diizinkan. Ringkasan hasil elevasi, cosine curve, dan out-of-plane settlement dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3.

Hasil elevasi, cosine curve dan out-of-plane settlement pada setiap titik

Point	Angle	Elevation (mm)	Cosine Curve (mm)	Out-of-plane Settlement (mm)
1	0°	300	325	-25,1
2	45°	319	323	-4,2
3	90°	350	305	45,3
4	135°	245	281	-35,5
5	180°	262	265	-2,7
6	225°	275	267	8,4
7	270°	290	285	5,0
8	315°	318	309	8,8

Pemodelan shell dan Bottom akan mengacu pada data hasil lapangan. Karena bottom tidak dapat diakses sehingga ketebalan bottom diasumsikan memiliki tebal 8 mm.. Pemodelan dilakukan dengan memperhatikan ketebalan minimum dari setiap course atau tingkatan dinding tangki, maka shell plat tangki memiliki ketebalan 5,16 mm. Pemodelan akan dilakukan pada bagian yang memiliki kemiringan di luar ambang batas sehingga model tangki akan terlihat hanya memiliki sebagian sisi tangki untuk menyederhanakan bagian yang kritis. Model digambarkan memiliki kemiringan 0,5 derajat. Model tangki yang telah dibuat menggunakan FreeCAD dapat dilihat pada Gambar 7(a).

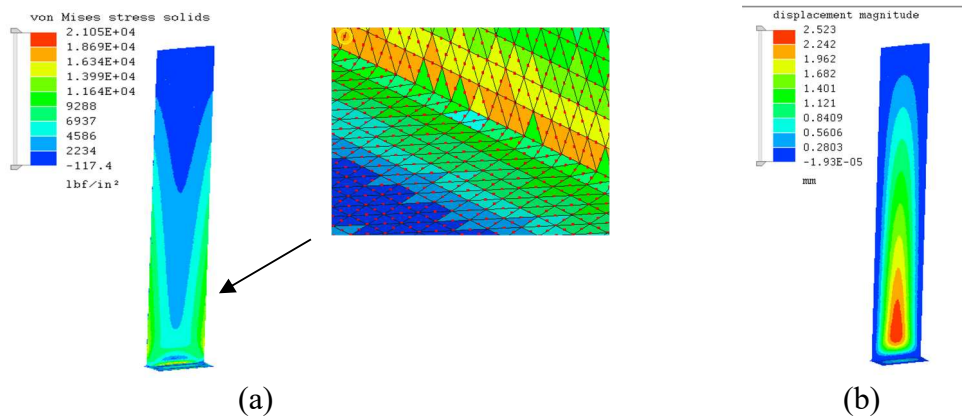
**Gambar 7.**

(a) Model 3D Tangki T-02 dan (b) Meshing 3D Model

Meshing dilakukan dengan bentuk segitiga dengan ukuran 15 mm untuk mendapatkan gambaran area simulasi yang cukup detail. Hasil meshing dapat dilihat pada Gambar 7(b) yang menunjukkan hasil meshing cukup baik. Meshing menggunakan linier element dimana node pada setiap elemen hanya terdapat di setiap sudut.

Kondisi boundary atau batasan tangki berupa titik tumpu, beban static head, dan gaya gravitasi akan disematkan pada simulasi. Fluida disimulasikan memiliki ketinggian fluida sesuai dengan tinggi tangki yaitu 7,4 meter. Berat massa fluida Pertamina Turbo adalah 770 kg/m³. Gaya gravitasi yaitu 9,81 m/s².

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan tegangan tertinggi berada di bagian bawah tangki dekat dengan bagian bottom. Distribusi tegangan dapat dilihat pada Gambar 8(a) memiliki warna merah dan jingga dimana tegangan tertingginya 21050 psi. Distribusi deformasi terpusat pada bagian bawah tangki dengan deformasi sebesar 2,523 mm. Diilustrasikan pada Gambar 8(b) deformasi tertinggi diwarnakan dengan warna merah dan deformasi terendah digambarkan dengan warna biru dan hijau.



Gambar 8.

(a) Distribusi Tegangan dan (b) Distribusi Deformasi

Berdasarkan data hasil simulasi didapatkan tegangan tertinggi tangki yaitu 21050 psi dan tidak melebihi allowable stress material SA-283 Gr.C yaitu 23600 Psi. Sehingga tangki T-02 dapat terisi fluida dengan ketinggian operasi. Kemiringan pondasi tangki perlu dilakukan monitoring untuk memastikan kemiringan tangki tidak bertambah yang mengakibatkan bertambahnya tegangan yang terkonsentrasi pada bagian tangki dengan settlement terendah.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perhitungan maksimum out-of-plane settlement, didapatkan 24,9 mm sedangkan out-of-settlement pada tangki T-02 yaitu 45,3 mm pada point 3 yang dapat dilihat pada Tabel 3. Sehingga diperlukan analisis lebih lanjut mengenai kemiringan settlement menggunakan desain 3D dan simulasi metode elemen hingga.

Berdasarkan simulasi didapatkan tegangan tertinggi yaitu 21050 psi pada dinding bagian bawah. Sedangkan allowable stress pada material SA 283 Gr. C yaitu 23600 Psi dan yield strength . Dapat disimpulkan tekanan terhadap plate tangki akibat settlement diluar kriteria harus berada di bawah allowable stress dari material SA-283 Gr. C. Konsentrasi tegangan berada di bagian bawah tangki yang ditandai dengan warna orange dan merah. Deformasi hasil simulasi didapatkan 2,523 mm pada bagian bawah tangki dengan deformasi tertinggi digambar dengan warna merah. Ketinggian maksimum fluida untuk tangki T-02 dapat disesuaikan dengan data spesifikasi tangki yaitu 7,4 m. Sehingga tangki T-02 tetap dapat digunakan dengan kondisi tangki terisi penuh. Sebagai rekomendasi, kemiringan pada tangki perlu dilakukan monitoring untuk memastikan pondasi tangki tidak mengalami kemiringan yang lebih besar.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. API 650. (2021). *Welded Tanks for Oil*.
2. API 653. (2020). *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*.
3. Nurdianto, P, P., Preasojo, & B., Ahmad, M, M,. (2022). Studi Kasus Asessmenet Settlement Shell Tangki Timbun Berdasarkan API 653
4. Setiana, B. & Raswitaningrum, T, R,. (2020). Evaluasi Kapasitas Isi Tangki Minyak yang Telah Mengalami Kemiringan.
5. Setiawan, R, & Kasda. (2014). Analisa Tegangan pada Tangki Penyimpanan 3000 KI dengan Cacat Geometri Ketidakbulatan.
6. Setiana, B. & Raswitaningrum, T, R,. (2020). Evaluasi Penurunan Pondasi Tangki Minyak Sesuai Api 653.