

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

2.1.1 Desain Storage Tank Kapasitas 450 kL Menggunakan One Foot Method

Pada tahun 2020, Renald Rahman Prabowo dan rekan-rekannya melakukan penelitian terkait perancangan tangki penyimpanan berkapasitas 450 kL dengan mengacu pada standar API 650. Penelitian ini berjudul *“Desain Storage Tank Kapasitas 450 kL Menggunakan One Foot Method dan Perhitungan Estimasi Biaya”*.

Penelitian tersebut berfokus pada bagaimana menentukan ketebalan minimum pelat tangki agar tetap aman digunakan, sekaligus menghitung estimasi biaya pembangunan tangki. Dalam perhitungannya, digunakan metode One Foot Method, yaitu metode yang umum dipakai untuk menghitung ketebalan dinding tangki berdasarkan kondisi beban fluida yang bekerja di dalamnya.

2.1.2 Metodologi yang Digunakan

Dalam penelitian ini, data yang digunakan meliputi dimensi tangki seperti diameter dan tinggi, sifat fluida yang disimpan, serta nilai tegangan ijin dari material yang digunakan.

Proses analisis dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

- Menghitung ketebalan *shell* menggunakan metode One Foot Method

- Menentukan ketebalan bagian *bottom*, annular, dan *bottom* sesuai ketentuan API 650
- Menghitung jumlah pelat pada setiap bagian tangki
- Melakukan estimasi biaya, baik dari sisi material maupun konstruksi

Pendekatan ini dilakukan untuk memastikan bahwa desain tangki tidak hanya aman secara teknis, tetapi juga efisien secara ekonomi.

2.1.3 Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh beberapa temuan penting, di antaranya:

- a. Ketebalan *shell* hasil perhitungan sebenarnya berada di bawah batas minimum standar, sehingga dalam praktiknya digunakan ketebalan 6 mm sesuai ketentuan API 650.
- b. Untuk bagian lain dari tangki diperoleh ketebalan sebagai berikut:
 - *Bottom plate* sebesar 9 mm
 - Annular *bottom* sebesar 9 mm
 - *Bottom* sebesar 8 mm
- c. Dari sisi biaya, pembangunan tangki dengan kapasitas 450 kL diperkirakan membutuhkan biaya sekitar Rp 1,06 miliar, yang mencakup biaya material dan konstruksi.

2.2 Perencanaan Tangki Minyak Berdasarkan API 650

2.2.1 Perencanaan Tangki Minyak dari Baja

Penelitian lain dilakukan oleh Faisal Maulana pada tahun 2011 yang membahas tentang perencanaan tangki minyak berbahan baja dengan menggunakan standar API 650.

Penelitian ini berjudul “Perencanaan Tangki Minyak dari Baja Menggunakan Peraturan API 650”.

Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa tangki minyak merupakan struktur penting dalam industri, khususnya sebagai tempat penyimpanan fluida dalam jumlah besar sebelum didistribusikan. Oleh karena itu, perencanaan tangki harus dilakukan secara teliti agar tidak terjadi kegagalan struktur seperti kebocoran atau kerusakan akibat beban kerja.

2.2.2 Metodologi yang Digunakan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini lebih bersifat analitis dengan pendekatan studi literatur. Perhitungan dilakukan berdasarkan teori struktur cangkang dan mengacu pada standar API 650.

Tahapan yang dilakukan meliputi:

- Analisis gaya-gaya yang bekerja pada tangki
- Perhitungan tegangan pada struktur
- Evaluasi deformasi yang terjadi akibat beban
- Perencanaan dimensi dan ketebalan elemen tangki

Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa tangki mampu bekerja dengan aman dalam kondisi operasional.

2.2.3 Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan beberapa hal penting, yaitu:

- a. Tangki minyak termasuk dalam struktur cangkang tipis yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *shell*, *bottom*, dan *bottom*.

- b. Beban yang bekerja pada tangki, seperti tekanan fluida, dapat menimbulkan gaya normal, gaya geser, serta momen yang harus diperhitungkan dalam desain.
- c. Dengan menggunakan standar API 650, desain tangki yang dihasilkan mampu memenuhi kriteria keamanan, di mana tegangan yang terjadi tidak melebihi batas ijin material dan deformasi masih dalam batas yang diperbolehkan.

2.3 Tangki Penyimpanan

2.3.1 Pengertian dan Fungsi Tangki

Tangki penyimpanan merupakan salah satu peralatan penting dalam industri proses yang berfungsi untuk menampung fluida dalam jumlah tertentu sebelum digunakan kembali atau diproses lebih lanjut (Moss and Basic, 2013). Dalam industri refinery dan pengolahan logam, tangki penyimpanan memiliki peranan penting dalam menjaga kontinuitas operasi, khususnya dalam sistem utilitas seperti penyediaan air proses dan kondensat.

Fluida yang disimpan dalam tangki dapat berasal dari berbagai sumber, salah satunya adalah kondensat yang dihasilkan dari proses kondensasi pada heat exchanger maupun dari sistem pembangkitan uap menggunakan demineralized water dan steam. Oleh karena itu, tangki tidak hanya berfungsi sebagai tempat penyimpanan, tetapi juga sebagai bagian dari sistem distribusi fluida dalam proses industri.

2.3.2 Tipe Tangki *Fixed bottom*

Berdasarkan konstruksinya, tangki penyimpanan dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, salah satunya adalah tangki tipe *fixed bottom*. Tangki ini memiliki atap tetap yang terpasang secara permanen pada bagian atas tangki dan tidak bergerak mengikuti level fluida.

Tangki tipe *fixed bottom* umumnya digunakan untuk menyimpan fluida dengan tekanan rendah dan tingkat penguapan yang relatif kecil (API, 2020). Salah satu bentuk atap yang sering digunakan adalah conical *bottom*, yaitu atap berbentuk kerucut yang dirancang untuk mengalirkan beban ke struktur tangki serta mencegah akumulasi air hujan pada permukaan atap.



Figure 0-1 Cone Bottom Storage Tank

2.3.3 Material Tangki (Carbon Steel)

Material yang umum digunakan dalam konstruksi tangki penyimpanan adalah baja karbon (carbon steel). Pemilihan

material ini didasarkan pada sifat mekanik yang baik, kemudahan dalam proses fabrikasi, serta biaya yang relatif ekonomis dibandingkan material lainnya.

Dalam standar American Petroleum Institute API 650, baja karbon digunakan sebagai material utama dalam pembuatan tangki penyimpanan yang beroperasi pada tekanan rendah. Material seperti ASTM A36 sering digunakan pada bagian *shell*, *bottom*, dan *bottom* karena memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban hidrostatik fluida. ASTM A36 banyak digunakan karena memiliki kekuatan dan kemampuan las yang baik (ASTM International, 2023).

2.3.4 Komponen Utama Tangki

Tangki penyimpanan secara umum terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi membentuk suatu sistem struktur. Komponen tersebut meliputi *shell*, *bottom*, dan *bottom* yang masing-masing memiliki fungsi tertentu dalam menahan beban fluida dan menjaga integritas tangki.

Shell merupakan bagian dinding tangki yang berbentuk silinder vertikal dan berfungsi untuk menahan tekanan hidrostatik fluida. *Shell* biasanya disusun dari beberapa lapisan pelat (*course*) dengan ketebalan yang berbeda sesuai dengan distribusi tekanan fluida. Semakin ke bawah, ketebalan pelat *shell* umumnya semakin besar karena menerima tekanan yang lebih tinggi.

Bottom plate atau pelat dasar berfungsi sebagai alas tangki yang menahan beban total fluida. Pelat dasar biasanya disusun dari beberapa pelat yang dirangkai secara radial dan dilengkapi dengan kemiringan tertentu untuk memudahkan proses pengosongan fluida.

Bottom atau atap tangki berfungsi untuk melindungi fluida dari pengaruh lingkungan luar. Pada tangki tipe *fixed bottom*, atap biasanya berbentuk kerucut (*conical bottom*) dan didukung oleh struktur penopang seperti rafter dan column yang berfungsi untuk menyalurkan beban ke dinding tangki.

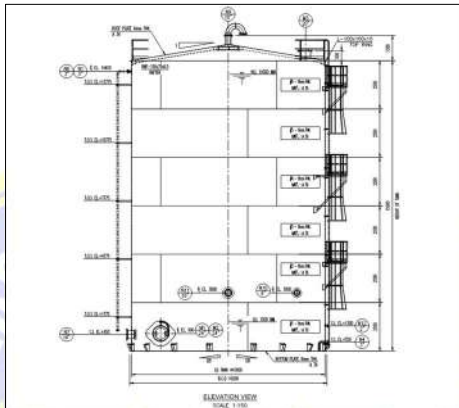


Figure 0-2 Elevation Tank Drawing

Sebagai bagian dari struktur dasar, susunan pelat pada bagian bawah tangki mengikuti pola fabrikasi tertentu untuk memastikan kekuatan dan kemudahan pemasangan.

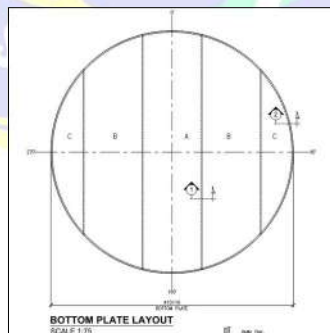


Figure 0-3 Bottom plate Drawing

2.3.5 Aksesoris Tangki (Appurtenances)

Selain komponen utama, tangki penyimpanan juga dilengkapi dengan berbagai perlengkapan tambahan atau appurtenances yang berfungsi untuk mendukung operasi dan keselamatan.

Salah satu aksesoris utama adalah nozzle, yang berfungsi sebagai jalur masuk dan keluar fluida serta sebagai koneksi dengan sistem perpipaan. Nozzle tersedia dalam berbagai ukuran sesuai dengan kebutuhan sistem dan biasanya dilengkapi dengan reinforcement pad untuk memperkuat area sambungan.

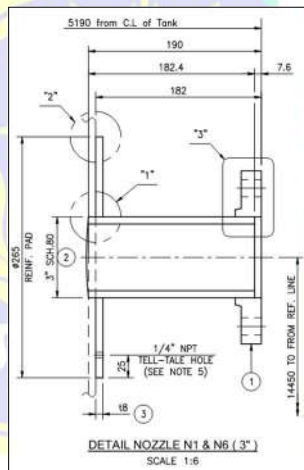


Figure 0-4 Detail Nozzle Drawing

Selain nozzle, tangki juga dilengkapi dengan manhole yang berfungsi sebagai akses untuk inspeksi dan perawatan bagian dalam tangki. Manhole biasanya dipasang pada bagian

shell maupun *bottom* dengan ukuran tertentu agar dapat dilalui oleh operator.

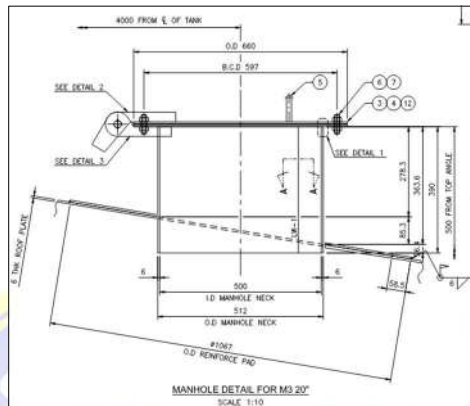


Figure 0-5 Detail Manhole Drawing

Untuk mendukung aktivitas operasional, tangki dilengkapi dengan ladder dan platform yang memungkinkan operator mengakses bagian atas tangki dengan aman. Pada bagian tertentu juga dipasang handrail sebagai sistem pengaman untuk mencegah kecelakaan kerja.

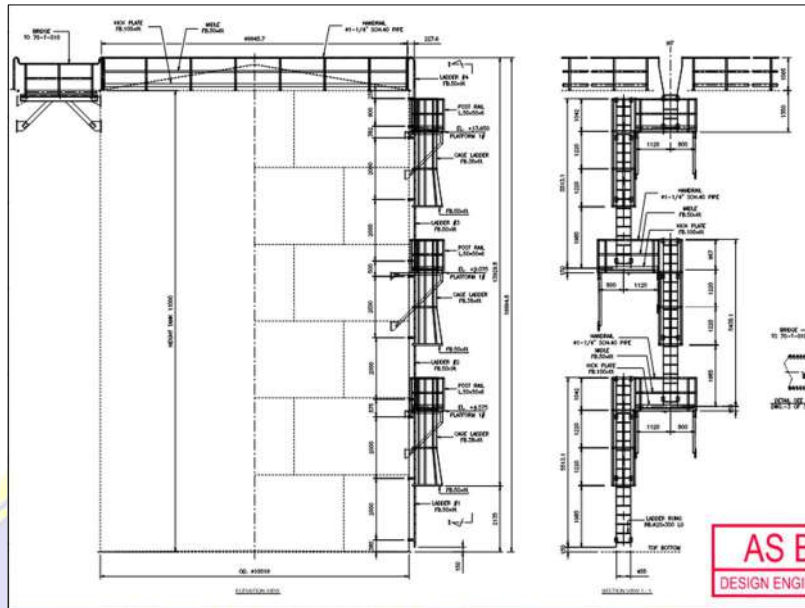


Figure 0-6 Detail Ladder & Platform

Dalam kondisi tertentu, tangki juga dilengkapi dengan sistem penahan berupa *anchor bolt* yang berfungsi untuk menjaga stabilitas tangki terhadap beban eksternal seperti angin dan gaya angkat (uplift).

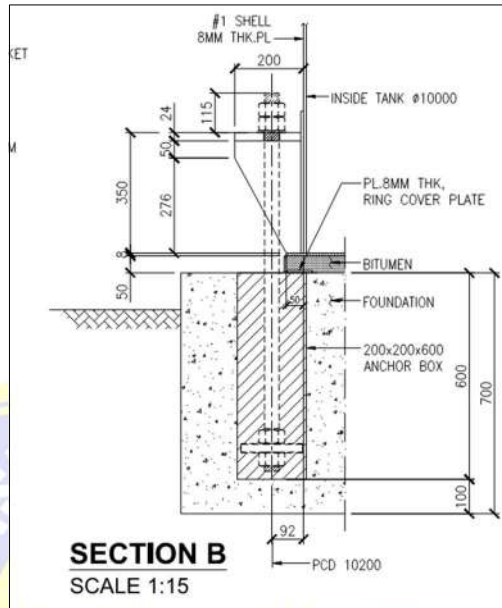


Figure 0-7 Detail Drawing Anchor

Selain itu, tangki juga dilengkapi dengan nameplate yang berisi informasi teknis seperti kapasitas, dimensi, dan standar desain yang digunakan, serta earthing system yang berfungsi untuk mencegah akumulasi listrik statis pada tangki.

Dengan adanya komponen utama dan aksesoris tersebut, tangki penyimpanan dapat berfungsi secara optimal dalam mendukung kebutuhan proses industri.

2.4 Material dan Metalurgi Tangki Penyimpanan Kondensat

2.4.1 Kondensat pada Sistem Heat Exchanger

Kondensat merupakan fluida hasil perubahan fasa dari uap menjadi cair yang terjadi akibat proses kondensasi pada heat exchanger. Dalam sistem industri, kondensat umumnya

berasal dari uap air (steam) yang telah melepaskan energi panasnya, sehingga kembali menjadi cairan dengan temperatur yang masih relatif tinggi. Kondensat sering dimanfaatkan kembali dalam sistem karena memiliki efisiensi energi yang baik dan kualitas air yang relatif tinggi.

Secara umum, kondensat memiliki sifat yang mendekati air dengan massa jenis relatif konstan. Namun demikian, dalam kondisi tertentu kondensat dapat mengandung gas terlarut seperti karbon dioksida (CO_2) dan oksigen yang dapat menyebabkan korosi pada material logam. Selain itu, temperatur kondensat yang tinggi juga dapat mempercepat laju reaksi korosi pada baja karbon.

Menurut Pattanayak et al. (2021), kondensat dari sistem heat exchanger dapat mengandung gas terlarut yang meningkatkan potensi korosi pada baja karbon, terutama pada kondisi temperatur tinggi dan sistem tertutup. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material tangki harus mempertimbangkan ketahanan terhadap korosi dan temperatur operasi (DOI: 10.1016/j.clet.2021.100053).

Selain itu, dari sisi mekanik, fluida kondensat memberikan beban hidrostatik pada dinding dan dasar tangki yang harus diperhitungkan dalam proses perancangan struktur tangki.

2.4.2 Pemilihan Material Tangki (ASTM Carbon Steel)

Material yang digunakan dalam konstruksi tangki penyimpanan kondensat umumnya adalah baja karbon (carbon steel), seperti ASTM A36. Material ini banyak digunakan pada tangki penyimpanan atmosferik karena memiliki kekuatan mekanik yang cukup, mudah dilas, serta ekonomis dalam proses fabrikasi.

Dalam standar American Petroleum Institute API 650 dijelaskan bahwa material pelat tangki harus memenuhi persyaratan tertentu serta termasuk dalam daftar material yang diperbolehkan. Pada bagian material, API 650 mencantumkan bahwa baja karbon seperti ASTM A36 dapat digunakan untuk komponen utama tangki seperti *shell*, *bottom*, dan *bottom* .

Pemilihan material ini juga sesuai dengan gambar teknik tangki yang digunakan dalam penelitian, dimana sebagian besar komponen utama menggunakan material ASTM A36 .



Figure 0-8 Plat Baja ASTM A36

Secara mekanik, ASTM A36 memiliki kekuatan luluh sekitar 250 MPa serta sifat keuletan yang baik, sehingga mampu menahan beban hidrostatis tanpa mengalami kegagalan getas (ASTM International, 2023). Selain itu, kandungan karbon yang relatif rendah memberikan sifat weldability yang baik, sehingga memudahkan proses pengelasan pada saat fabrikasi tangki.

2.4.3 Metalurgi dan Pengelasan Baja Karbon

Baja karbon seperti ASTM A36 yang digunakan dalam konstruksi tangki memiliki struktur mikro yang terdiri dari ferrite dan pearlite. Struktur ini memberikan kombinasi antara kekuatan dan keuletan, sehingga material mampu menahan beban statik serta deformasi tanpa mengalami kegagalan getas.

Namun demikian, dalam proses fabrikasi tangki, material akan mengalami proses pengelasan yang menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah tertentu. Salah satu daerah yang paling terpengaruh adalah Heat Affected Zone (HAZ), yaitu area di sekitar sambungan las yang mengalami siklus pemanasan dan pendinginan. Perubahan struktur mikro pada daerah ini dapat menyebabkan peningkatan kekerasan lokal serta potensi terjadinya retak jika tidak dikontrol dengan baik.

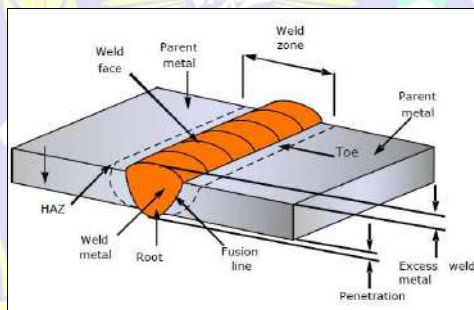


Figure 0-9 HAZ pada pengelasan

Oleh karena itu, pemilihan metode pengelasan dan elektroda menjadi faktor penting dalam menjaga integritas struktur tangki. Berdasarkan standar American Society of Mechanical Engineers ASME Section IX, pengelasan harus

dilakukan berdasarkan prosedur yang telah dikualifikasi (Welding Procedure Specification – WPS), serta diverifikasi melalui pengujian (Procedure Qualification Record – PQR) untuk memastikan kualitas sambungan las.

ASME Section IX menyatakan bahwa:

“The purpose of qualification of WPS is to determine that the weld procedure... will produce welds having the required properties acceptable for their intended service.”

Hal ini menunjukkan bahwa prosedur pengelasan tidak hanya berfungsi sebagai panduan teknis, tetapi juga sebagai jaminan bahwa sambungan las memiliki sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan operasi.

Metode pengelasan yang umum digunakan dalam fabrikasi tangki antara lain:

- Shielded Metal Arc Welding (SMAW)
- Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Metode SMAW dan GMAW banyak digunakan karena mampu menghasilkan penetrasi yang baik serta cocok untuk pelat dengan ketebalan sedang hingga tebal.

Dalam pengelasan baja karbon seperti ASTM A36, digunakan elektroda dengan kandungan hidrogen rendah (low hydrogen electrode) untuk mencegah terjadinya retak akibat hidrogen (hydrogen induced cracking). Elektroda yang umum digunakan adalah E6013 dan E7018.

Menurut Kou (2003), penggunaan elektroda low hydrogen sangat penting untuk menghindari retak pada baja karbon

akibat difusi hidrogen selama proses pengelasan (ISBN: 978-0471434917).



Figure 0-10 Proses pengelasan pada bottom tangki

Selain itu, ASME Section IX juga menekankan bahwa variabel pengelasan seperti arus, tegangan, posisi pengelasan, dan jenis material harus dikontrol secara ketat karena dapat mempengaruhi kualitas hasil las dan sifat mekanik sambungan .

Dengan demikian, proses pengelasan tidak hanya berfungsi sebagai metode penyambungan, tetapi juga mempengaruhi sifat metalurgi material, sehingga harus dikontrol secara ketat untuk memastikan kualitas dan keamanan struktur tangki.

2.4.4 Pengujian Non-Destructive Testing (NDT)

Setelah proses pengelasan selesai, dilakukan pengujian untuk memastikan kualitas sambungan tanpa merusak material. Berdasarkan API 650, pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sambungan las bebas dari cacat yang dapat menyebabkan kegagalan struktur .

Beberapa metode pengujian yang digunakan antara lain:

1. Ultrasonic Testing (UT)

Pengujian ini menggunakan gelombang ultrasonik untuk mendeteksi cacat internal seperti retakan atau porositas pada sambungan las.

2. Penetrant Testing (PT)

Metode ini digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan dengan menggunakan cairan penetrant yang dapat masuk ke dalam retakan kecil.

3. Hydrostatic Test

Pengujian ini dilakukan dengan mengisi tangki menggunakan air hingga ketinggian tertentu untuk memastikan tidak terjadi kebocoran serta untuk menguji kekuatan struktur tangki.



Figure 0-11 UT, Penetrant, Radiography

2.5 Dasar Perancangan Tangki Berdasarkan API 650

2.5.1 Design basis

Perancangan tangki penyimpanan dilakukan berdasarkan tekanan hidrostatik fluida dan tegangan ijin material sesuai standar API 650.

Tekanan hidrostatik:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (2.1)$$

atau:

$$P = 9.81 \cdot G \cdot H \quad (2.2)$$

Persamaan tekanan hidrostatik mengacu pada prinsip mekanika fluida (Beer et al., 2020).

Keterangan:

P = tekanan hidrostatik (kPa)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

G = specific gravity fluida

H = tinggi fluida (m)

2.5.2 Shell Design (*One-foot method*)

Perhitungan ketebalan *shell* menggunakan metode *one-foot method* berdasarkan API 650 Section 5.

Tegangan lingkaran (mekanika bahan):

$$\sigma_h = \frac{P \cdot D}{2t} \quad (2.3)$$

Ketebalan desain *shell* (API 650):

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot H \cdot G}{S \cdot E} + CA \quad (2.4)$$

Ketebalan *hydrotest*:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H-1)}{S \cdot E} \quad (2.5)$$

Ketebalan yang digunakan:

$$t = \max(t_d, t_{min}) \quad (2.6)$$

Persamaan ketebalan *shell* mengacu pada API 650 Section 5.6 (API, 2020).

Keterangan:

t = ketebalan *shell* (mm)

D = diameter tangki (m)

H = tinggi fluida di atas titik perhitungan (m)

G = specific gravity fluida

S = tegangan ijin material (MPa)

E = efisiensi sambungan las

CA = corrosion allowance (mm)

t_{min} = ketebalan minimum standar

2.5.3 Bottom plate Design

Ketebalan pelat dasar ditentukan berdasarkan ketentuan minimum API 650.

$$t_{bottom} = t_{min} + CA \quad (2.7)$$

Keterangan:

t_{bottom} = ketebalan pelat dasar (mm)

t_{min} = ketebalan minimum standar (mm)

CA = corrosion allowance (mm)

2.5.4 Bottom and Structure Design

Beban total atap:

$$W = W_d + W_l \quad (2.8)$$

Keterangan:

W = total beban atap (kN)

W_d = beban mati (kN)

W_l = beban hidup (kN)

Beban merata pada elemen struktur:

$$w = \frac{W}{L} \quad (2.9)$$

Keterangan:

w = beban merata (kN/m)

L = panjang elemen (m)

Momen lentur maksimum (balok sederhana):

$$M = \frac{w \cdot L^2}{8} \quad (2.10)$$

(asal: teori mekanika bahan – beam sederhana)

Tegangan lentur:

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2.11)$$

Keterangan:

M = momen lentur (kN·m)

Z = modulus penampang (mm³)

σ = tegangan lentur (MPa)

Kriteria desain:

$$\sigma \leq S \quad (2.12)$$

Persamaan momen lentur dan tegangan lentur mengacu pada teori mekanika bahan (Beer et al., 2020).

2.5.5 Top Member Design

Untuk elemen seperti rafter dan ring *beam*:

Momen:

$$M = \frac{w \cdot L^2}{8} \quad (2.13)$$

Tegangan:

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2.14)$$

Kriteria:

$$\sigma \leq S \quad (2.15)$$

Analisis elemen struktur dilakukan berdasarkan teori balok sederhana (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959).

Keterangan:

w = beban merata

L = panjang bentang

Z = modulus penampang

S = tegangan ijin material

2.5.6 Wind load and Stability

Tekanan angin (mekanika fluida):

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.16)$$

Keterangan:

q = tekanan angin (kN/m^2)

V = kecepatan angin (m/s)

Gaya angin:

$$F = q \cdot C_d \cdot A \quad (2.17)$$

Keterangan:

F = gaya angin (kN)

C_d = koefisien drag

A = luas bidang (m^2)

Momen guling:

$$M = F \cdot \frac{H}{2} \quad (2.18)$$

Kriteria stabilitas:

$$M_{res} \geq M \quad (2.19)$$

Perhitungan tekanan angin mengacu pada ketentuan ASCE 7 (ASCE, 2022).

2.5.7 Anchor bolt Design

Gaya angkat akibat momen:

$$F_{uplift} = \frac{M}{D/2} \quad (2.20)$$

Keterangan:

M= momen guling (kN·m)

R= jari-jari tangki (m)

Gaya tarik per anchor:

$$F_t = \frac{F_{uplift}}{n} \quad (2.21)$$

Luas penampang anchor:

$$A = \frac{F_t}{\sigma_b} \quad (2.22)$$

Diameter anchor:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2.23)$$

Analisis baut dan gaya tarik mengacu pada metode desain elemen mesin (Budynas and Nisbett, 2020).

Keterangan:

T= gaya tarik (kN)

n= jumlah anchor

A= luas penampang (mm²)

d= diameter anchor (mm)

σ_b= tegangan ijin material (MPa)

2.5.8 Reactions on Foundation

Reaksi vertikal:

$$R_v = W_{tank} + W_{fluid} \quad (2.24)$$

Reaksi horizontal:

$$R_h = F \quad (2.25)$$

Tekanan pada pondasi:

$$q = \frac{R_v}{A} \quad (2.26)$$

Kriteria keamanan:

$$q \leq q_{allowable} \quad (2.27)$$

Analisis reaksi dan keseimbangan gaya mengacu pada prinsip statika (Hibbeler, 2017).

Keterangan:

R_v = reaksi vertikal (kN)

R_h = reaksi horizontal (kN)

A = luas pondasi (m^2)

q = tekanan tanah (kN/m^2)

$q_{allowable}$ = daya dukung tanah

