

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Pipa Muatan Kapal Tanker

Sistem pipa muatan pada kapal tanker merupakan sistem utama yang berfungsi untuk menyalurkan muatan cair dari tangki muatan menuju pompa muatan dan selanjutnya ke fasilitas penerima di darat. Sistem ini harus dirancang untuk bekerja secara andal di bawah kombinasi pembebanan yang meliputi berat sendiri pipa, berat fluida yang dialirkan, tekanan internal, serta pengaruh temperatur operasi. Kegagalan pada sistem pipa muatan dapat menyebabkan gangguan operasional, risiko keselamatan, dan pencemaran lingkungan, sehingga analisis dan perancangan sistem pipa muatan menjadi aspek penting dalam desain kapal tanker (Bai & Bai, 2020).

Pada kapal tanker, sistem pipa muatan umumnya memiliki konfigurasi yang kompleks karena mengikuti struktur kapal, dengan bentang pipa yang relatif panjang, perubahan arah melalui *elbow*, serta perbedaan elevasi antara ruang pompa dan geladak utama. Kondisi ini menyebabkan sistem pipa muatan lebih rentan terhadap terjadinya konsentrasi tegangan, terutama apabila konfigurasi penumpu pipa (*pipe support*) tidak dirancang secara optimal (Troitsky, 2020). Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik sistem pipa muatan kapal tanker menjadi dasar penting sebelum dilakukan analisis tegangan pipa.

Untuk memberikan konteks terhadap sistem pipa muatan yang dianalisis dalam penelitian ini, diperlukan penyajian data umum kapal. Data umum kapal berfungsi untuk menunjukkan bahwa sistem pipa muatan yang dianalisis berasal dari konfigurasi kapal nyata dan bukan sistem hipotetik. Namun demikian, data umum kapal dalam penelitian ini tidak digunakan secara langsung dalam perhitungan tegangan pipa, melainkan sebagai informasi pendukung untuk memperjelas objek penelitian.

Dalam sistem pipa muatan kapal tanker, kondisi operasi bongkar muat menyebabkan pipa bekerja secara kontinu di bawah beban berat sendiri, berat fluida, tekanan internal, dan pengaruh temperatur. Karakteristik jalur pipa yang panjang, adanya perubahan arah, serta perbedaan elevasi antar ruang menjadikan sistem pipa muatan kapal tanker lebih sensitif terhadap distribusi tegangan dibandingkan sistem perpipaan darat. Oleh karena itu, konfigurasi *pipe support* memiliki peran penting dalam mengendalikan respons tegangan pipa agar tetap berada dalam batas yang diizinkan selama kondisi operasi normal kapal (Bai & Bai, 2020; Troitsky, 2020)

Tabel 2. 1 Data Umum Kapal Tanker
(Sumber: Drawing Principal Particular Kapal Tanker 6.500 DWT, diolah oleh penulis.)

Parameter	Keterangan
Jenis kapal	Clean Product Tanker
Kapasitas kapal	6.500 DWT
Klasifikasi	American Bureau of Shipping (ABS)
Tahun desain	2018
Sumber data	Drawing cargo oil piping system

2.2 Teori Pipe Stress analysis

Pipe stress analysis merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengevaluasi respons tegangan dan deformasi pada sistem pipa akibat berbagai kombinasi pembebanan. Pembebanan tersebut meliputi beban berat sendiri pipa dan fluida, tekanan internal, serta pengaruh perubahan temperatur. Tujuan utama *pipe stress analysis* adalah memastikan bahwa tegangan yang terjadi pada sistem pipa tidak melebihi batas tegangan izin yang ditetapkan oleh standar desain (Peng & Peng, 2021).

Secara umum, jenis tegangan yang diperhitungkan dalam analisis sistem pipa meliputi tegangan aksial, tegangan lentur, dan tegangan geser. Tegangan aksial terjadi akibat gaya aksial yang bekerja sepanjang sumbu pipa dan dapat dirumuskan sebagai:

2.2.1 Tegangan aksial (*axial stress*)

Tegangan aksial (σ_a) merupakan tegangan yang timbul akibat gaya aksial yang bekerja sepanjang sumbu pipa. Tegangan ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma_{axial} = \frac{F}{A}$$

dengan:

- σ_a = tegangan aksial (MPa)
- F = gaya aksial yang bekerja pada pipa (N)
- A = luas penampang pipa (mm²)

Di mana σ_a adalah tegangan aksial, F adalah gaya aksial, dan A adalah luas penampang pipa (Boresi & Schmidt, 2018)

2.2.2 Tegangan Lentur (*Bending Stress*)

Tegangan yang timbul akibat momen lentur pada pipa.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

dengan:

- σ_b = tegangan lentur (MPa)
- M = momen lentur yang bekerja pada pipa (N·mm)

- Z = modulus penampang pipa (mm^3)

dengan M adalah momen lentur dan S adalah modulus penampang pipa. Tegangan lentur umumnya dominan pada segmen pipa dengan bentang panjang di antara dua *pipe support*.

2.2.3 Tegangan geser (Shear Stress)

Tegangan yang terjadi akibat gaya geser yang bekerja pada pipa.

$$\tau = \frac{V}{A}$$

dengan:

- τ = tegangan geser (MPa)
- V = gaya geser yang bekerja pada pipa (N)
- A = luas penampang pipa (mm^2)

di mana V adalah gaya geser. Kombinasi dari berbagai jenis tegangan tersebut menghasilkan tegangan total yang harus dievaluasi terhadap batas tegangan izin (Troitsky, 2020).

2.2.4 Tegangan Maksimum dan Evaluasi Tegangan

Dalam analisis sistem pipa, **tegangan maksimum** (σ_{max}) merupakan parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan sistem pipa. Tegangan maksimum merupakan hasil kombinasi dari berbagai jenis tegangan yang bekerja pada pipa dan secara umum dinyatakan sebagai:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}$$

dengan:

- σ_{max} = tegangan maksimum (MPa)
- σ_a = tegangan aksial (MPa)
- σ_b = tegangan lentur (MPa)

Berdasarkan teori *pipe stress analysis*, besarnya tegangan yang terjadi pada sistem pipa tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya beban yang bekerja, tetapi juga oleh kondisi batas (*boundary condition*) yang membatasi pergerakan pipa. Kondisi batas tersebut secara langsung ditentukan oleh konfigurasi *pipe support* yang digunakan, termasuk jarak antar support dan jenis support yang membatasi pergerakan aksial maupun lateral pipa. Dengan demikian, variasi konfigurasi *pipe support* dapat menyebabkan perubahan distribusi tegangan maksimum pada sistem pipa meskipun beban operasional yang bekerja tetap sama (Boresi & Schmidt, 2018; Li et al., 2020)

Dalam praktik *pipe stress analysis*, kombinasi dari berbagai jenis tegangan tersebut menghasilkan tegangan maksimum yang menjadi parameter utama dalam evaluasi keamanan sistem pipa. Untuk sistem pipa yang kompleks, perhitungan tegangan tidak dilakukan secara manual, melainkan menggunakan perangkat lunak analisis numerik seperti CAESAR II yang memodelkan sistem pipa sebagai rangkaian elemen dan

menghitung respons tegangan secara komprehensif sesuai dengan ketentuan standar ASME B31.3 (ASME, 2022).

Tabel 2. 2 Parameter Teknis Pipa sebagai Input Pipe Stress analysis
(Sumber: Drawing Principal Particular Kapal Tanker 6.500 DWT, diolah oleh penulis.)

Parameter	Simbo	Nilai	Satua	Keterangan
Diameter luar pipa	D_o	219.10	mm	Main cargo line
Ketebalan pipa	t	8.18	mm	Baja karbon
Densitas material	ρ_s	7.850	kg/m ³	Baja karbon
Densitas fluida	ρ_f	±900	kg/m ³	Cargo oil
Tekanan operasi	P	±4.500	KPa	Operasi
Temperatur operasi	T	±60	°C	Kondisi termal
Standar evaluasi	–	ASME B31.3	–	Tegangan izin

Rumus-rumus tegangan yang disajikan dalam subbab ini digunakan sebagai dasar teoritis untuk memahami perilaku mekanis dan respons sistem pipa terhadap pembebanan operasional. Dalam pelaksanaannya, perhitungan numerik tegangan pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak CAESAR II, yang telah mengimplementasikan formulasi perhitungan tegangan sesuai dengan ketentuan standar ASME B31.3. Dengan demikian, analisis tegangan yang dilakukan tetap berlandaskan teori, namun dihitung secara numerik untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif.

Agar analisis tegangan pipa dapat dilakukan secara akurat, diperlukan data teknis pipa sebagai input utama dalam pemodelan. Data teknis tersebut mencakup dimensi pipa, material, serta kondisi operasi pipa. Berdasarkan *drawing schematic cargo oil piping system* dan praktik umum perancangan sistem pipa muatan kapal tanker, karakteristik teknis pipa yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 2.2.

2.3 Jenis Pipe Support dan Fungsinya

Pipe support merupakan elemen struktural yang berfungsi menopang pipa dan mengendalikan pergerakannya agar sistem pipa tetap berada dalam kondisi aman selama operasi. Pemilihan jenis *pipe support* yang tepat sangat berpengaruh terhadap distribusi tegangan dan fleksibilitas sistem pipa (Perima, 2023)

Beberapa jenis pipe support yang umumnya digunakan dalam sistem perpipaan kapal tanker, di antaranya:

1. Rest Support

Rest support berfungsi untuk menahan pipa agar tetap pada posisinya tanpa memungkinkan pergerakan aksial atau lateral. Jenis ini cocok digunakan pada titik-titik yang tidak memerlukan pergerakan pipa, tetapi tetap harus mendukung pipa dengan kuat agar tidak mengalami pergeseran.

2. Guide Support

Guide support memungkinkan pipa bergerak pada satu arah tertentu, biasanya aksial, tetapi membatasi pergerakan pada arah lainnya. Ini berguna untuk mengendalikan pergerakan pipa akibat ekspansi termal atau pergerakan kapal tanpa memungkinkan pergerakan lateral yang dapat menyebabkan kerusakan.

3. Stopper Support

Stopper support membatasi pergerakan pipa pada dua arah, baik aksial maupun lateral. Ini digunakan pada titik di mana pipa harus tetap stabil dan tidak dapat bergerak untuk menghindari deformasi atau kerusakan akibat beban yang tidak terkontrol.

Perbedaan karakteristik pembatasan pergerakan tersebut menyebabkan perbedaan kondisi batas (*boundary condition*) pada sistem pipa. Kondisi batas inilah yang berperan penting dalam menentukan distribusi momen lentur dan tegangan pada pipa. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemilihan jenis *pipe support* yang tidak tepat dapat menyebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi dan meningkatkan risiko kegagalan struktural (Krisbianto & Nugroho, 2023).

Secara mekanis, *pipe support* berperan sebagai elemen pembentuk kondisi batas pada sistem pipa. *Rest support* berfungsi menahan beban vertikal tanpa membatasi pergerakan aksial pipa, *guide* membatasi pergerakan lateral namun tetap mengizinkan pergerakan aksial, sedangkan *stopper* membatasi pergerakan pipa pada arah tertentu secara lebih kaku. Perbedaan karakteristik pembatasan pergerakan tersebut menyebabkan respons tegangan pipa yang berbeda-beda pada setiap konfigurasi *pipe support*. Oleh karena itu, pemilihan jenis *pipe support* yang tepat menjadi faktor penting dalam mengendalikan tegangan aksial dan lentur pada sistem pipa muatan kapal tanker (S. Peng & Peng, 2021; Troitsky, 2020)

2.4 Peran Pipe Support sebagai Boundary Condition pada Analisis Tegangan Pipa

Pipe support merupakan salah satu komponen penting dalam sistem perpipaan yang berfungsi sebagai penyangga sekaligus pembentuk kondisi batas (*boundary condition*) pada sistem pipa. Keberadaan pipe support memengaruhi distribusi gaya, momen lentur, perpindahan (*displacement*), serta respons tegangan yang terjadi selama sistem perpipaan menerima kombinasi beban operasional. Oleh karena itu, konfigurasi pipe support menjadi salah satu aspek yang harus diperhatikan dalam pemodelan analisis tegangan menggunakan perangkat lunak CAESAR II (Perima, 2023).

Secara teoritis, jarak antar pipe support memengaruhi panjang bentang bebas (*span*) pipa. Bentang yang semakin panjang akan meningkatkan momen lentur dan defleksi akibat berat sendiri pipa maupun berat fluida yang mengalir di dalamnya. Sebaliknya, penempatan support yang terlalu rapat dapat meningkatkan kekakuan sistem sehingga membatasi pergerakan pipa akibat ekspansi termal. Oleh karena itu, dalam proses perancangan sistem perpipaan diperlukan konfigurasi support yang mampu memberikan keseimbangan antara kekakuan struktur dan fleksibilitas sistem sehingga distribusi tegangan tetap berada dalam batas yang diizinkan (Li et al., 2020).

Secara mekanika struktur, perilaku lendutan pipa yang diasumsikan sebagai balok elastis dengan dua tumpuan dapat dinyatakan menggunakan persamaan berikut.

dengan:

- δ = defleksi maksimum pipa,
- P = beban yang bekerja pada pipa,
- L = panjang bentang pipa di antara dua support,
- E = modulus elastisitas material pipa, dan
- I = momen inersia penampang pipa.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar panjang bentang pipa (L), maka defleksi yang terjadi akan meningkat secara signifikan sehingga dapat menyebabkan bertambahnya momen lentur dan tegangan pada sistem perpipaan (Boresi & Schmidt, 2018).

Meskipun secara teoritis konfigurasi dan jarak pipe support memengaruhi respons mekanis sistem perpipaan, **penelitian ini tidak menjadikan konfigurasi maupun jarak pipe support sebagai variabel penelitian**. Seluruh jenis, lokasi, dan konfigurasi support dipertahankan tetap pada setiap simulasi sehingga kondisi batas (*boundary condition*) sistem perpipaan tidak mengalami perubahan. Dengan demikian, setiap perubahan nilai *sustained stress*, *expansion stress*, *displacement*, *support reaction*, dan *anchor load* yang diperoleh pada penelitian ini dapat dikaitkan secara langsung dengan **penurunan ketebalan dinding pipa**, tanpa dipengaruhi oleh perubahan konfigurasi support.

Dengan mempertahankan konfigurasi pipe support sebagai parameter tetap, analisis yang dilakukan mampu memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh penurunan ketebalan terhadap respons mekanis sistem perpipaan berdasarkan kombinasi beban operasional sesuai ketentuan **ASME B31.3**, sementara fungsi pipe support dalam penelitian ini berperan sebagai kondisi batas yang merepresentasikan kondisi aktual sistem perpipaan kapal tanker (Boresi & Schmidt, 2018; Li et al., 2020).

2.5 Tegangan Maksimum dan Tegangan Izin

Tegangan maksimum merupakan nilai tegangan tertinggi yang terjadi pada sistem pipa akibat kombinasi pembebanan yang bekerja. Tegangan ini menjadi indikator utama dalam menilai tingkat keamanan struktural sistem pipa. Apabila tegangan maksimum melebihi batas tegangan izin, maka sistem pipa berpotensi mengalami kegagalan struktural (Troitsky, 2020).

Tegangan izin adalah batas tegangan yang diperbolehkan berdasarkan sifat material dan kondisi pembebanan tertentu, sebagaimana ditetapkan dalam standar desain. Dalam analisis sistem pipa, tegangan maksimum hasil simulasi harus dibandingkan dengan tegangan izin untuk memastikan bahwa sistem pipa berada dalam kondisi aman selama operasi.

2.6 Standar ASME B31.3 dalam Analisis Tegangan Pipa

ASME B31.3 merupakan standar internasional yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan dan evaluasi sistem perpipaan proses. Standar ini menetapkan kriteria batas tegangan untuk berbagai kondisi pembebanan, termasuk *sustained load* dan *operating load*. Dalam *pipe stress analysis*, ASME B31.3 digunakan sebagai dasar evaluasi untuk menentukan apakah tegangan maksimum yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima (ASME, 2022).

Dalam penelitian ini, ASME B31.3 digunakan sebagai standar pembanding utama untuk menilai keamanan sistem pipa muatan kapal tanker terhadap variasi ketebalan pipa. Penggunaan standar ini memastikan bahwa hasil analisis memiliki dasar teknis yang diakui secara internasional.

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu bertujuan mendapatkan serta mengetahui perbandingan dan acuan pada penelitian ini, dan juga untuk menghindari kesamaan dengan penelitian sebelumnya, oleh sebab itu, dalam tinjauan Pustaka dicantumkan hasil dari penelitian terdahulu sebagai berikut:

Penelitian mengenai *pipe stress analysis* telah banyak dilakukan untuk mengevaluasi integritas sistem perpipaan pada berbagai sektor industri. Analisis tegangan perpipaan menjadi salah satu metode yang penting untuk memastikan bahwa sistem perpipaan mampu beroperasi secara aman sesuai dengan batas tegangan yang ditetapkan oleh standar desain. Dalam praktiknya, distribusi tegangan pada sistem perpipaan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti konfigurasi geometri, kondisi pembebanan, karakteristik material, kondisi batas (*boundary condition*), serta sistem penyangga (*pipe support*) yang digunakan (Boreis & Schmidt, 2018; Troitsky, 2020).

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengaruh konfigurasi *pipe support* terhadap distribusi tegangan sistem perpipaan. (Aswin & Hasnan, 2023) menunjukkan bahwa jenis dan jarak *pipe support* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tegangan maksimum pada sistem perpipaan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi support yang tepat dapat membantu mengendalikan distribusi tegangan dan meningkatkan keandalan sistem perpipaan. Hasil yang sejalan juga diperoleh oleh (Krisbianto & Nugroho, 2023), yang menyatakan bahwa penggunaan jarak support yang sesuai mampu mengurangi potensi *overstress* pada sistem perpipaan.

Penelitian (Perima, 2023) menunjukkan bahwa perubahan posisi support dapat meningkatkan tegangan lentur yang terjadi pada sistem perpipaan. Sementara itu, Kurniawan (2023) menyimpulkan bahwa konfigurasi support memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan sehingga perlu dipertimbangkan secara cermat dalam proses desain sistem perpipaan. Penelitian (Lukitadi, 2025) juga menunjukkan bahwa jumlah dan jarak support memengaruhi kelayakan desain sistem perpipaan pada kondisi pembebanan statis maupun termal.

Hasil penelitian tersebut diperkuat oleh (Li et al., 2020) yang menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dan simulasi numerik untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi support terhadap distribusi tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

perubahan konfigurasi support secara langsung memengaruhi momen lentur dan distribusi tegangan pada sistem perpipaan. Selain itu, (Pradipta et al., 2025) melalui studi literatur menyimpulkan bahwa konfigurasi support merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi distribusi tegangan pada sistem perpipaan.

Selain penelitian yang berfokus pada konfigurasi support, beberapa penelitian juga membahas metode dan pendekatan analisis tegangan sistem perpipaan. (Dongoran & Koswara, 2021) menunjukkan bahwa perangkat lunak CAESAR II dapat digunakan secara efektif untuk mengevaluasi tegangan sistem perpipaan berdasarkan standar yang berlaku. Penelitian yang dilakukan oleh (L. Peng, Peng, & Li, 2019) menunjukkan bahwa analisis tegangan dan optimasi sistem perpipaan dapat dilakukan secara efektif menggunakan pendekatan numerik. Selanjutnya, (S. Peng & Peng, 2021) menjelaskan bahwa pendekatan numerik sangat efektif digunakan untuk mengevaluasi sistem perpipaan yang memiliki konfigurasi kompleks dan menerima kombinasi pembebanan yang beragam.

Dari sisi teoritis, (Bai & Bai, 2020) menjelaskan bahwa analisis tegangan merupakan aspek penting dalam menjaga integritas struktural sistem perpipaan yang menerima kombinasi beban yang kompleks selama masa operasi. Dalam konteks industri maritim, (Veritas, 2021) menegaskan pentingnya evaluasi integritas sistem perpipaan untuk menjamin keselamatan operasi dan mencegah kegagalan struktur yang dapat menimbulkan risiko keselamatan maupun kerugian ekonomi. Selain itu, (G Hu, Butler, Littlejohns, Wang, & Li, 2020) menunjukkan bahwa kondisi operasional sistem muatan kapal tanker memiliki hubungan yang erat dengan aspek keselamatan dan lingkungan, sehingga keandalan sistem perpipaan menjadi salah satu faktor penting dalam mendukung operasi kapal tanker secara aman.

Selain penelitian mengenai konfigurasi support dan analisis tegangan, beberapa penelitian juga membahas pengaruh penurunan ketebalan dinding pipa terhadap integritas sistem perpipaan. Purwidyasari et al. menunjukkan bahwa ketebalan minimum dan ketebalan sisa (*remaining wall thickness*) merupakan parameter penting dalam penilaian kelayakan operasi sistem perpipaan menggunakan pendekatan *Fitness for Service* (FFS). Penelitian Wibowo et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan tingkat korosi menyebabkan penurunan ketebalan pipa yang berdampak langsung terhadap umur sisa (*remaining life*) sistem perpipaan.

Penelitian Zhao et al. (2024) menunjukkan bahwa berkurangnya ketebalan dinding pipa akibat korosi menyebabkan penurunan kemampuan struktur dalam menahan beban operasi sehingga berpengaruh terhadap integritas sistem perpipaan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara penurunan ketebalan pipa dan peningkatan risiko kegagalan struktur. Mario dan Sutanto (2025) juga menyatakan bahwa ketebalan sisa (*remaining wall thickness*) merupakan parameter utama dalam menentukan tingkat keamanan sistem perpipaan berdasarkan evaluasi integritas menggunakan standar ASME. Selain itu, Cosham et al. melalui *Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)* menjelaskan bahwa kehilangan material akibat korosi dan penurunan ketebalan dinding pipa merupakan parameter utama yang harus dievaluasi dalam penilaian integritas sistem perpipaan.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah diuraikan, dapat diketahui bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengaruh konfigurasi support, optimasi sistem penyangga, dan evaluasi tegangan pada kondisi desain awal sistem perpipaan. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi support merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi distribusi tegangan sistem perpipaan. Namun

demikian, penelitian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons tegangan sistem pipa muatan kapal tanker masih relatif terbatas.

Selain itu, penelitian terdahulu belum banyak membahas hubungan antara ketebalan minimum desain (*design thickness*) hasil perhitungan ASME B31.3 dengan hasil analisis fleksibilitas sistem perpipaan menggunakan CAESAR II. Padahal dalam kondisi operasi aktual, sistem perpipaan menerima kombinasi beban yang lebih kompleks, meliputi berat pipa, berat fluida, tekanan internal, dan ekspansi termal yang secara bersama-sama memengaruhi tingkat tegangan yang terjadi pada sistem.

Standar (ASME, 2022) menyediakan metode perhitungan ketebalan minimum desain (*design thickness*) dan batas tegangan izin (*allowable stress*) yang digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem perpipaan. Namun demikian, diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengetahui apakah ketebalan minimum desain yang diperoleh secara teoritis masih mampu memenuhi persyaratan tegangan ketika dievaluasi menggunakan analisis fleksibilitas sistem perpipaan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan penelitian (*research gap*) dengan mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap *sustained stress*, *expansion stress*, *displacement*, reaksi support, dan *anchor load* pada sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT menggunakan perangkat lunak CAESAR II berdasarkan standar ASME B31.3. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi kesesuaian ketebalan minimum desain (*design thickness*) hasil perhitungan ASME B31.3 terhadap hasil analisis tegangan sehingga dapat diperoleh batas ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan kode dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi integritas sistem perpipaan.

2.8 kerangka Pemikiran

Sistem pipa muatan pada kapal tanker berfungsi sebagai sarana utama dalam proses pemuatan dan pembongkaran muatan cair, sehingga harus mampu beroperasi secara aman di bawah pengaruh beban operasional yang bekerja. Beban tersebut meliputi berat sendiri pipa, berat fluida muatan, tekanan internal, serta pengaruh temperatur operasi, yang secara simultan dapat menimbulkan tegangan pada sistem pipa. Besarnya tegangan yang terjadi tidak hanya ditentukan oleh besarnya beban yang bekerja, tetapi juga oleh kondisi batas (*boundary condition*) yang membatasi pergerakan pipa.

Kondisi batas sistem pipa ditentukan oleh konfigurasi *pipe support* yang digunakan, baik dari segi jarak antar *pipe support* maupun jenis *pipe support* yang membatasi pergerakan pipa secara aksial dan lateral. Variasi jarak antar *pipe support* akan memengaruhi panjang bentang pipa, momen lentur, dan defleksi, sedangkan perbedaan jenis *pipe support* seperti *rest support*, *guide*, dan *stopper* menghasilkan karakteristik pembatasan pergerakan yang berbeda. Perbedaan kondisi batas tersebut menyebabkan distribusi dan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada sistem pipa juga berbeda, meskipun beban operasional yang bekerja relatif sama.

Berdasarkan hubungan tersebut, evaluasi konfigurasi *pipe support* melalui analisis tegangan sistem pipa menjadi penting untuk menilai respons struktur pipa terhadap kondisi beban operasional. Dalam penelitian ini, evaluasi dilakukan dengan menganalisis pengaruh variasi jarak dan jenis *pipe support* terhadap nilai tegangan maksimum sistem pipa muatan kapal tanker menggunakan pendekatan *pipe stress analysis*. Hasil analisis tegangan kemudian dibandingkan dengan batas tegangan izin berdasarkan standar ASME

B31.3 untuk menilai apakah konfigurasi *pipe support* yang digunakan mampu menjaga sistem pipa tetap berada dalam kondisi aman. Kerangka pemikiran ini menjadi dasar dalam penyusunan hipotesis dan perancangan metode penelitian yang digunakan.

2.9 Hipotesis

Berdasarkan landasan teori dan penelitian terdahulu, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa penurunan ketebalan dinding pipa memengaruhi respons mekanis sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT pada kondisi beban operasional. Penurunan ketebalan diduga meningkatkan Sustained Code Stress, Stress Ratio, dan displacement, serta mengubah distribusi reaksi *support* dan *anchor load*, sedangkan Expansion Code Stress diperkirakan tidak mengalami perubahan yang signifikan.

Selain itu, ketebalan minimum desain (t_{design}) hasil perhitungan berdasarkan ASME B31.3 dihipotesiskan perlu divalidasi menggunakan analisis fleksibilitas dengan CAESAR II untuk memastikan bahwa sistem perpipaan tetap memenuhi persyaratan code compliance pada kondisi pembebanan operasional.