

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem pipa muatan kapal tanker bekerja di bawah kombinasi beban berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, serta pengaruh perubahan temperatur selama operasi. Kombinasi pembebanan tersebut dapat menyebabkan timbulnya tegangan yang signifikan pada pipa apabila sistem tidak dirancang dengan fleksibilitas yang memadai. Oleh karena itu, analisis tegangan pipa (*pipe stress analysis*) menjadi tahapan penting dalam perancangan dan evaluasi sistem pipa muatan kapal tanker untuk memastikan bahwa tegangan yang terjadi masih berada dalam batas yang diizinkan (S. Peng & Peng, 2021; Troitsky, 2020)

Dalam perancangan sistem perpipaan, konfigurasi geometri, kondisi pembebanan, karakteristik material, serta sistem support memegang peranan penting dalam mengendalikan distribusi tegangan. Sistem support berfungsi menopang beban pipa sekaligus mengakomodasi pergerakan pipa akibat ekspansi termal dan pembebanan lainnya. Selain itu, karakteristik penampang pipa seperti diameter dan ketebalan dinding pipa juga berpengaruh terhadap kekakuan dan kemampuan pipa dalam menahan beban operasi. Dengan demikian, evaluasi kondisi geometrik dan mekanis sistem perpipaan menjadi faktor penting dalam menjaga tingkat tegangan pipa tetap berada dalam batas yang diizinkan (Boresi & Schmidt, 2018; Guilin Hu, Butler, Littlejohns, Wang, & Li, 2020; Li, Wang, & Zhou, 2020)

Pada sistem pipa muatan kapal tanker, seperti yang tergambar dalam *schematic cargo oil piping system*, pipa umumnya memiliki bentang relatif panjang dengan beberapa perubahan arah serta perbedaan elevasi antara ruang pompa dan geladak utama. Kondisi ini menjadikan sistem pipa muatan lebih rentan terhadap konsentrasi tegangan dibandingkan sistem perpipaan industri darat. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kondisi pembebanan, konfigurasi sistem perpipaan, serta perubahan karakteristik struktur dapat meningkatkan tegangan maksimum dan mempercepat terjadinya kegagalan struktural pada pipa (Aswin & Hasnan, 2023; Krisbianto & Nugroho, 2023)

Meskipun kajian mengenai *pipe stress analysis* telah banyak dilakukan, penelitian yang secara khusus membahas pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons tegangan pada sistem pipa muatan kapal tanker masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada analisis tegangan sistem perpipaan pada kondisi desain awal, sistem perpipaan proses di fasilitas darat, maupun sistem perpipaan *offshore*, sehingga karakteristik perubahan respons tegangan akibat penurunan ketebalan pipa pada sistem pipa muatan kapal tanker belum banyak dikaji secara mendalam. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang secara spesifik menganalisis pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons tegangan sistem pipa muatan kapal tanker berdasarkan kriteria tegangan izin ASME B31.3 (ASME, 2022; Pradipta, Nugroho, & Santoso, 2025)

Selain faktor konfigurasi awal, kondisi sistem pipa muatan kapal tanker juga dapat mengalami perubahan karakteristik mekanis selama masa operasi yang secara umum dapat memengaruhi tingkat kekakuan dan respons tegangan pipa terhadap pembebanan. Perubahan tersebut, baik yang disebabkan oleh toleransi manufaktur, degradasi material secara umum, maupun faktor operasional lainnya, berpotensi meningkatkan sensitivitas

sistem perpipaan terhadap distribusi tegangan. Salah satu parameter yang paling berpengaruh terhadap perubahan respons struktur adalah ketebalan dinding pipa. Penurunan ketebalan dinding pipa menyebabkan berkurangnya luas penampang, momen inersia, dan kekakuan struktur sehingga dapat meningkatkan tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan. Beberapa studi menyatakan bahwa perubahan karakteristik geometri penampang pipa dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan dan perilaku struktur perpipaan (S. Peng & Peng, 2021; Zhang, Liu, & Chen, 2022)

Standar ASME B31.3 menyediakan metode perhitungan untuk menentukan ketebalan minimum desain (*design thickness*) berdasarkan tekanan internal yang bekerja pada pipa (ASME, 2022). Namun demikian, ketebalan minimum yang diperoleh dari perhitungan teoritis belum tentu dapat merepresentasikan kondisi aktual sistem perpipaan secara menyeluruh. Dalam kondisi operasi, sistem perpipaan tidak hanya menerima tekanan internal, tetapi juga dipengaruhi oleh berat pipa, berat fluida, ekspansi termal, konfigurasi geometri, dan kondisi support. Oleh karena itu, diperlukan analisis fleksibilitas menggunakan perangkat lunak CAESAR II untuk mengevaluasi apakah ketebalan minimum desain tersebut masih mampu memenuhi persyaratan tegangan yang ditetapkan oleh ASME B31.3.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan penelitian yang mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons sistem perpipaan muatan kapal tanker menggunakan perangkat lunak CAESAR II berdasarkan standar ASME B31.3. Evaluasi dilakukan melalui analisis *sustained stress*, *expansion stress*, *displacement*, reaksi support, dan *anchor load* pada berbagai variasi ketebalan pipa hingga mencapai ketebalan minimum desain. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai batas ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan kode serta memberikan gambaran mengenai perilaku sistem perpipaan akibat penurunan ketebalan dinding pipa.

Penelitian ini difokuskan pada analisis tegangan sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT menggunakan pendekatan *pipe stress analysis* berbasis pembebanan statis dan termal. Variabel utama yang dianalisis adalah perubahan ketebalan dinding pipa, sedangkan geometri sistem perpipaan, material pipa, kondisi operasi, dan konfigurasi support dipertahankan tetap pada seluruh variasi yang ditinjau. Penelitian ini tidak membahas mekanisme korosi aktual, umur sisa pipa, maupun analisis kegagalan struktural lanjutan, sehingga ruang lingkup penelitian tetap terfokus pada evaluasi tegangan berdasarkan kriteria tegangan izin standar ASME B31.3.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, beberapa permasalahan yang dapat diidentifikasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem pipa muatan kapal tanker bekerja di bawah kombinasi beban operasi yang terdiri dari berat pipa, berat fluida, tekanan internal, dan temperatur operasi yang dapat menimbulkan tegangan pada sistem perpipaan.
2. Penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi selama masa operasi dapat mengurangi luas penampang dan kekakuan struktur pipa, sehingga berpotensi meningkatkan tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan.

3. Belum diketahui pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap nilai sustained stress, expansion stress, displacement, serta reaksi support dan anchor pada sistem pipa muatan kapal tanker.
4. Belum diketahui batas ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 berdasarkan hasil analisis tegangan menggunakan perangkat lunak CAESAR II.
5. Belum diketahui kesesuaian antara ketebalan minimum desain ( $t_{design}$ ) hasil perhitungan ASME B31.3 dengan kondisi aktual sistem perpipaan yang mempertimbangkan kombinasi beban operasi secara menyeluruh.
6. Diperlukan evaluasi terhadap pengaruh penurunan ketebalan pipa untuk menentukan kondisi kritis sistem perpipaan serta batas ketebalan yang masih aman digunakan selama operasi.

### **1.3 Rumusan Masalah**

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi tegangan sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT pada kondisi awal (baseline) berdasarkan analisis CAESAR II sesuai kriteria ASME B31.3?
2. Bagaimana pengaruh penurunan ketebalan pipa akibat korosi terhadap sustained stress, expansion stress, displacement, serta reaksi support dan anchor pada sistem pipa muatan kapal tanker?
3. Berapakah ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan code Compliance ASME B31.3 berdasarkan hasil analisis tegangan menggunakan CAESAR II?
4. Apakah ketebalan minimum desain ( $t_{design}$ ) hasil perhitungan ASME B31.3 masih memenuhi persyaratan code compliance ketika dievaluasi menggunakan analisis fleksibilitas sistem perpipaan?

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kondisi tegangan sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT pada kondisi awal (baseline) berdasarkan analisis CAESAR II sesuai kriteria ASME B31.3.
2. Menganalisis pengaruh penurunan ketebalan pipa akibat korosi terhadap sustained stress, expansion stress, displacement, serta reaksi support dan anchor pada sistem pipa muatan kapal tanker.
3. Mengidentifikasi ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 berdasarkan hasil analisis tegangan menggunakan perangkat lunak CAESAR II.
4. Mengevaluasi kesesuaian ketebalan minimum desain ( $t_{design}$ ) hasil perhitungan ASME B31.3 terhadap hasil analisis fleksibilitas dan code compliance sistem perpipaan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

### 1.5.1 Manfaat Secara Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan kajian *pipe stress analysis*, khususnya pada sistem perpipaan muatan kapal tanker. Selain itu, penelitian ini dapat memperkaya pemahaman mengenai pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons tegangan, perpindahan (*displacement*), serta integritas sistem perpipaan berdasarkan kriteria ASME B31.3. Hasil penelitian juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan evaluasi ketebalan minimum dan keandalan sistem perpipaan akibat pengaruh korosi.

### 1.5.2 Manfaat Secara Praktis

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar evaluasi teknis dalam menilai kondisi integritas sistem pipa muatan kapal tanker yang mengalami penurunan ketebalan akibat korosi. Selain itu, penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai batas ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 berdasarkan analisis CAESAR II, sehingga dapat menjadi referensi dalam kegiatan inspeksi, perawatan (*maintenance*), dan pengambilan keputusan terkait pengoperasian maupun penggantian sistem perpipaan pada kapal tanker.

## 1.6 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian dibatasi oleh beberapa ketentuan sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada analisis tegangan sistem pipa muatan kapal tanker menggunakan pendekatan *pipe stress analysis* berdasarkan pembebanan statis dan termal.
2. Sistem pipa yang dianalisis merupakan sistem pipa muatan (*cargo oil piping system*) pada kapal tanker 6.500 DWT yang dimodelkan berdasarkan *drawing schematic cargo oil piping system* sebagai representasi sistem perpipaan aktual.
3. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons sistem perpipaan yang meliputi *sustained stress*, *expansion stress*, *displacement*, reaksi support, dan *anchor load*.
4. Variasi ketebalan pipa yang dianalisis terdiri dari 8,18 mm, 7,18 mm, 6,18 mm, 5,18 mm, 4,18 mm, 3,18 mm, 2,18 mm, 1,18 mm, dan 0,634 mm sebagai ketebalan minimum desain hasil perhitungan ASME B31.3.
5. Konfigurasi geometri sistem perpipaan, material pipa, kondisi operasi, dan sistem support dibuat tetap pada seluruh variasi ketebalan sehingga perubahan respons sistem hanya dipengaruhi oleh perubahan ketebalan pipa.
6. Pemodelan dan simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, dan temperatur operasi sesuai kondisi operasi sistem.
7. Penelitian ini tidak mencakup analisis dinamis kapal secara eksplisit, seperti pengaruh gerakan *heave*, *roll*, dan *pitch*, serta tidak mempertimbangkan pengaruh gelombang laut secara langsung.
8. Penelitian ini tidak menggunakan data korosi aktual, laju korosi, maupun data inspeksi ketebalan pipa. Penurunan ketebalan yang digunakan merupakan variasi ketebalan untuk mengevaluasi sensitivitas respons tegangan sistem perpipaan.

9. Penelitian ini tidak membahas analisis umur sisa (*remaining life assessment*), prediksi laju korosi, maupun keputusan penggantian pipa secara aktual.
10. Evaluasi keamanan sistem perpipaan dilakukan dengan membandingkan hasil analisis tegangan terhadap batas tegangan izin (*allowable stress*) berdasarkan standar ASME B31.3.
11. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak CAESAR II sehingga hasil penelitian dibatasi oleh metode perhitungan, asumsi, dan kemampuan analisis yang tersedia pada perangkat lunak tersebut.

## 1.7 Luaran Penelitian

Luaran yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 1. **Prototype Sistem Perpipaan**

Penelitian ini menghasilkan prototype sistem pipa muatan kapal tanker dalam bentuk model fisik yang merepresentasikan konfigurasi jalur perpipaan yang digunakan pada penelitian. Prototype tersebut digunakan sebagai media visualisasi untuk menunjukkan tata letak sistem perpipaan, komponen pendukung, serta gambaran kondisi sistem yang dianalisis menggunakan perangkat lunak CAESAR II. Prototype diharapkan dapat menjadi media pembelajaran yang membantu pemahaman mengenai sistem perpipaan kapal tanker dan analisis tegangan perpipaan.

### 2. **Hak Kekayaan Intelektual (HKI) Modul Pembelajaran CAESAR II**

Penelitian ini menghasilkan modul pembelajaran penggunaan perangkat lunak CAESAR II yang memuat prosedur pemodelan sistem perpipaan, input data, pengaturan *load case*, analisis tegangan, serta interpretasi hasil analisis berdasarkan standar ASME B31.3. Modul yang disusun direncanakan untuk didaftarkan sebagai Hak Kekayaan Intelektual (HKI) sebagai bentuk perlindungan terhadap karya ilmiah dan media pembelajaran yang dihasilkan dari penelitian.

### 3. **Artikel Ilmiah**

Penelitian ini menghasilkan artikel ilmiah yang membahas pengaruh penurunan ketebalan pipa terhadap respons tegangan sistem pipa muatan kapal tanker berdasarkan standar ASME B31.3 menggunakan perangkat lunak CAESAR II. Artikel ilmiah tersebut diharapkan dapat dipublikasikan pada jurnal atau prosiding ilmiah yang relevan dengan bidang teknik perkapalan, struktur kapal, dan sistem perpipaan.

