

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan, simulasi, dan analisis tegangan sistem pipa muatan kapal tanker 6.500 DWT menggunakan perangkat lunak CAESAR II berdasarkan standar ASME B31.3, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi tegangan sistem pipa muatan pada kondisi awal (*baseline*) memenuhi persyaratan ASME B31.3. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem perpipaan dengan ketebalan dinding pipa 8,18 mm menghasilkan Sustained Code Stress sebesar 61.769,4 kPa dengan Stress Ratio sebesar 44,8%, sedangkan Expansion Code Stress sebesar 94.328,8 kPa dengan Stress Ratio sebesar 33,3%. Seluruh nilai tegangan berada di bawah batas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*), sehingga sistem perpipaan dinyatakan memenuhi persyaratan code compliance berdasarkan ASME B31.3 pada kondisi pembebanan yang dianalisis.
2. Penurunan ketebalan dinding pipa memengaruhi respons mekanis sistem perpipaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan ketebalan menyebabkan peningkatan Sustained Code Stress, Stress Ratio, dan displacement akibat berkurangnya luas penampang serta kekakuan struktur pipa. Sebaliknya, Expansion Code Stress tidak mengalami perubahan yang signifikan karena lebih dipengaruhi oleh ekspansi termal dan konfigurasi sistem perpipaan. Selain itu, penurunan ketebalan juga menyebabkan perubahan distribusi reaksi pada *support* dan *anchor load*.
3. Berdasarkan hasil analisis tegangan menggunakan CAESAR II, ketebalan pipa sebesar 3,18 mm masih memenuhi persyaratan code compliance ASME B31.3 pada kondisi pembebanan yang dimodelkan. Pada ketebalan tersebut diperoleh Sustained Code Stress sebesar 131.866,1 kPa dengan Stress Ratio sebesar 95,6% dan status PASS. Namun demikian, nilai Stress Ratio yang mendekati 100% menunjukkan bahwa margin terhadap batas tegangan yang diizinkan semakin kecil sehingga penurunan ketebalan lebih lanjut berpotensi menyebabkan sistem tidak lagi memenuhi persyaratan ASME B31.3.
4. Ketebalan minimum desain ( $t_{design}$ ) hasil perhitungan berdasarkan ASME B31.3 sebesar 3,53 mm masih memenuhi persyaratan code compliance ketika dievaluasi menggunakan analisis fleksibilitas sistem perpipaan menggunakan CAESAR II. Hasil simulasi menunjukkan Sustained Code Stress sebesar 121.449,9 kPa dengan Stress Ratio sebesar 88,1%, sehingga masih berada di bawah batas tegangan yang diizinkan. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan  $t_{design}$  berdasarkan ASME B31.3 memberikan hasil yang konsisten terhadap analisis tegangan pada kondisi pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini.

Perlu diperhatikan bahwa ketebalan minimum yang masih memenuhi *code compliance* berdasarkan hasil simulasi CAESAR II pada penelitian ini tidak dapat diinterpretasikan sebagai batas aman pengoperasian sistem perpipaan pada kapal secara langsung. Penelitian ini hanya mengevaluasi respons tegangan sistem perpipaan berdasarkan ketentuan ASME B31.3 pada kondisi pembebanan yang dimodelkan. Penentuan kelayakan operasi sistem perpipaan pada kapal tetap harus mempertimbangkan persyaratan badan klasifikasi, minimum allowable thickness, corrosion allowance, hasil inspeksi ketebalan aktual, mekanisme degradasi material, serta regulasi keselamatan yang berlaku. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai acuan dalam evaluasi perilaku tegangan

sistem perpipaan daripada sebagai dasar penentuan batas minimum pengoperasian pipa pada kapal.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data ketebalan aktual hasil inspeksi, seperti *Ultrasonic Thickness Measurement (UTM)*, sehingga kondisi penurunan ketebalan dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara lebih akurat.
2. Analisis dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan beban dinamis kapal, seperti pengaruh gerakan heave, roll, dan pitch, sehingga respons sistem perpipaan pada kondisi operasi yang lebih realistis dapat dievaluasi.
3. Penelitian selanjutnya dapat mengombinasikan analisis menggunakan CAESAR II dengan metode Fitness for Service (API 579/ASME FFS-1) atau Remaining Life Assessment (RLA) untuk mengevaluasi kelayakan operasi berdasarkan kondisi ketebalan aktual dan umur layan sistem perpipaan.
4. Evaluasi lebih lanjut dapat dilakukan dengan menganalisis pengaruh perubahan konfigurasi *pipe support*, variasi kondisi batas (*boundary condition*), maupun perubahan tata letak sistem perpipaan terhadap distribusi tegangan dan fleksibilitas sistem.
5. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam evaluasi integritas sistem pipa muatan kapal tanker melalui analisis tegangan menggunakan CAESAR II berdasarkan ASME B31.3. Namun, penerapannya dalam penentuan kelayakan operasi sistem perpipaan harus tetap dikombinasikan dengan persyaratan badan klasifikasi, hasil inspeksi aktual, dan ketentuan keselamatan yang berlaku.