

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Sistem Perpipaan Muatan

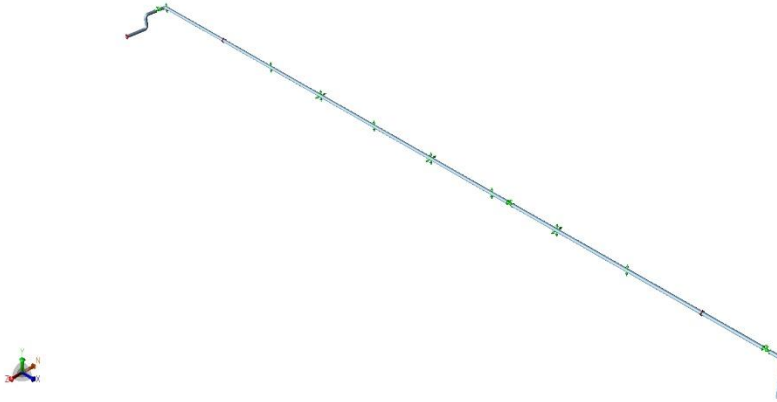
Penelitian ini dilakukan terhadap sistem perpipaan muatan (*cargo piping system*) pada kapal tanker berkapasitas 6.500 DWT dengan tujuan mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan dinding pipa terhadap respons mekanik sistem perpipaan berdasarkan ketentuan ASME B31.3 menggunakan perangkat lunak CAESAR II. Analisis difokuskan pada perubahan kondisi struktur akibat variasi ketebalan pipa yang disimulasikan secara bertahap mulai dari kondisi awal (*baseline*) hingga kondisi mendekati ketebalan minimum.

Model analisis dibangun berdasarkan konfigurasi aktual sistem perpipaan muatan kapal tanker yang terdiri atas rangkaian pipa lurus, sambungan *elbow*, *flange*, *valve*, serta sistem *pipe support* yang berfungsi menyalurkan beban menuju struktur kapal. Seluruh konfigurasi geometri dipertahankan sama pada setiap variasi simulasi sehingga perubahan respons struktur hanya dipengaruhi oleh perubahan ketebalan dinding pipa.

Pada penelitian ini digunakan material ASTM A106 Grade B dengan standar analisis ASME B31.3. Seluruh simulasi dilakukan menggunakan tekanan operasi sebesar 45 bar (4500 kPa) dan temperatur operasi 60°C. Parameter tersebut dipertahankan konstan pada seluruh variasi sehingga hasil analisis dapat dibandingkan secara langsung tanpa dipengaruhi perubahan kondisi operasi.

Variasi ketebalan dilakukan untuk menggambarkan kondisi degradasi pipa akibat korosi. Ketebalan awal sebesar 8,18 mm digunakan sebagai kondisi referensi (*baseline*), kemudian dilakukan simulasi pada ketebalan 7,18 mm, 6,18 mm, 5,18 mm, 4,18 mm, 3,53 mm, dan 3,18 mm. Ketebalan 3,53 mm merupakan hasil perhitungan ketebalan minimum desain (t_{design}) berdasarkan persamaan ASME B31.3. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai salah satu variasi analisis untuk mengevaluasi apakah ketebalan hasil perhitungan masih memenuhi persyaratan *code compliance* setelah dianalisis menggunakan perangkat lunak CAESAR II. Selain itu, dilakukan pula simulasi pada ketebalan 3,18 mm untuk mengevaluasi respons sistem perpipaan pada kondisi yang lebih tipis dari ketebalan desain.

Analisis dilakukan menggunakan tiga jenis *load case*, yaitu Operating Load (OPE), Sustained Load (SUS), dan Expansion Load (EXP). Dari ketiga kondisi tersebut dievaluasi beberapa parameter utama yang meliputi displacement, sustained stress, expansion stress, reaksi support dan anchor, serta code compliance terhadap batas tegangan yang diizinkan oleh ASME B31.3. Seluruh hasil simulasi kemudian dibandingkan antarvariasi ketebalan untuk mengetahui pengaruh penurunan ketebalan terhadap integritas sistem perpipaan.



Gambar 4. 1 Model Sistem Perpipaan Muatan Kapal Tanker pada CAESAR II
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.1 terlihat bahwa sistem perpipaan memiliki beberapa perubahan arah yang dihubungkan oleh sambungan *elbow* dan didukung oleh sejumlah *pipe support* untuk mengendalikan perpindahan akibat beban operasi. Konfigurasi tersebut menghasilkan distribusi kekakuan yang tidak seragam sehingga memungkinkan terbentuknya lokasi dengan konsentrasi tegangan lebih tinggi dibandingkan segmen lainnya. Oleh karena itu, identifikasi titik kritis menjadi salah satu aspek utama yang dievaluasi pada penelitian ini.

Seluruh hasil simulasi yang disajikan pada bab ini merupakan hasil analisis yang telah melalui proses audit engineering untuk memastikan konsistensi data antarvariasi ketebalan. Proses audit meliputi pemeriksaan nilai *displacement*, *stress*, *support reaction*, *code compliance*, serta identifikasi *node* kritis pada setiap variasi ketebalan. Dengan demikian, seluruh pembahasan pada bab ini disusun berdasarkan data simulasi yang telah tervalidasi sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi terhadap pengaruh penurunan ketebalan pipa.

4.2 Analisis Kondisi Baseline

Analisis kondisi *baseline* dilakukan untuk mengevaluasi perilaku awal sistem perpipaan muatan sebelum mengalami penurunan ketebalan akibat korosi. Kondisi ini menggunakan ketebalan dinding pipa sebesar **8,18 mm**, yang merupakan ketebalan awal pipa berdasarkan spesifikasi desain. Hasil simulasi pada kondisi *baseline* digunakan sebagai acuan dalam membandingkan perubahan respons mekanik sistem perpipaan pada setiap variasi ketebalan berikutnya.

Simulasi dilakukan menggunakan tekanan operasi sebesar **45 bar (4500 kPa)** dan temperatur operasi **60°C** sesuai parameter penelitian. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak CAESAR II dengan standar evaluasi ASME B31.3. Parameter yang dievaluasi meliputi perpindahan (*displacement*), tegangan akibat beban tetap (*sustained stress*), tegangan akibat ekspansi termal (*expansion stress*), reaksi pada *pipe support* dan *anchor*, serta *code compliance* terhadap tegangan yang diizinkan.

4.2.1 Analisis Displacement pada Kondisi Baseline

Perpindahan (*displacement*) merupakan salah satu parameter penting dalam analisis fleksibilitas sistem perpipaan karena menunjukkan kemampuan sistem dalam mengakomodasi deformasi akibat kombinasi beban operasi. Evaluasi terhadap nilai *displacement* diperlukan untuk memastikan bahwa deformasi yang terjadi tidak mengganggu integritas struktur maupun fungsi sistem perpipaan selama beroperasi.

Hasil simulasi pada kondisi *baseline* menunjukkan bahwa perpindahan maksimum masih berada dalam batas yang dapat diterima. Nilai perpindahan terbesar terjadi pada arah vertikal (sumbu **Y**), sedangkan perpindahan pada arah memanjang (sumbu **X**) dan melintang (sumbu **Z**) relatif lebih kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa deformasi sistem lebih banyak dipengaruhi oleh beban gravitasi berupa berat sendiri pipa dan berat fluida dibandingkan oleh tekanan internal.

Tabel 4. 1 Rekapitulasi Displacement Maksimum Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai	Node
DX maksimum (+)	0,5077 cm	140
DX maksimum (-)	-0,3578 cm	22
DY maksimum	-0,9603 cm	80
DZ maksimum	-0,2207 cm	27



Gambar 4. 2 Kontur Displacement Sistem Perpipaan pada Kondisi Baseline
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.2, dapat diamati bahwa perpindahan terbesar terjadi pada **Node 80** dengan arah dominan ke bawah (arah negatif sumbu Y). Kondisi ini sesuai dengan karakteristik sistem perpipaan yang menerima beban gravitasi selama operasi. Segmen pipa yang memiliki bentang bebas lebih panjang mengalami lendutan yang lebih besar dibandingkan segmen yang berada di dekat *pipe*

support atau *anchor*. Sementara itu, perpindahan pada arah sumbu X dan Z relatif kecil karena pergerakan pipa pada arah tersebut dibatasi oleh konfigurasi penyangga dan kekakuan sistem.

Secara mekanika struktur, pola perpindahan ini menunjukkan bahwa konfigurasi *pipe support* yang digunakan telah mampu mengendalikan deformasi sistem sehingga perpindahan tidak terkonsentrasi secara berlebihan pada satu segmen tertentu. Selain itu, tidak ditemukan perpindahan yang bersifat tidak wajar (*abnormal displacement*) maupun perubahan arah deformasi yang mengindikasikan ketidakstabilan model. Dengan demikian, hasil *displacement* pada kondisi *baseline* menunjukkan bahwa sistem perpipaan memiliki kekakuan yang memadai untuk menahan kombinasi beban operasi yang bekerja.

Hasil *displacement* pada kondisi *baseline* selanjutnya digunakan sebagai kondisi acuan untuk mengevaluasi perubahan deformasi akibat penurunan ketebalan dinding pipa pada variasi berikutnya. Perbandingan tersebut akan menunjukkan sejauh mana berkurangnya ketebalan memengaruhi fleksibilitas sistem perpipaan.

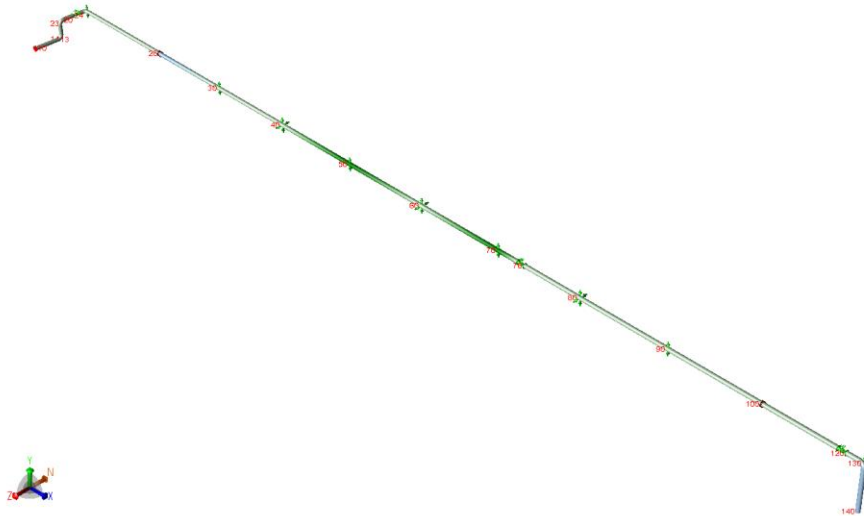
4.2.2 Analisis Sustained Stress pada Kondisi Baseline

Sustained stress merupakan tegangan yang timbul akibat kombinasi beban tetap (*sustained load*), yang terdiri atas berat sendiri pipa, berat fluida yang mengalir di dalam pipa, tekanan internal, serta berat komponen perpipaan seperti flange dan valve. Evaluasi terhadap sustained stress bertujuan untuk memastikan bahwa tegangan yang terjadi selama kondisi operasi tetap berada di bawah batas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*) menurut ASME B31.3 sehingga sistem perpipaan tetap memiliki integritas struktural yang memadai selama masa operasinya.

Pada kondisi *baseline* dengan ketebalan pipa sebesar **8,18 mm**, hasil simulasi CAESAR II menunjukkan bahwa sistem perpipaan masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 dengan status **PASS**. Nilai tegangan tertinggi diperoleh pada **Node 70**, yang secara konsisten menjadi lokasi dengan konsentrasi tegangan terbesar pada sistem perpipaan.

Tabel 4. 2 Rekapitulasi Hasil Sustained Stress Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai
Node Kritis	70
Code Stress	61.769,4 kPa
Allowable Stress	137.895,1 kPa
Stress Ratio	44,80%
Status	PASS



Gambar 4. 3 Distribusi Sustained Stress pada Kondisi Baseline
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.2 diketahui bahwa Code Stress yang terjadi pada kondisi *baseline* sebesar 61.769,4 kPa, sedangkan Allowable Stress berdasarkan ASME B31.3 sebesar 137.895,1 kPa. Dengan demikian, Stress Ratio yang dihasilkan sebesar 44,8 %, yang menunjukkan bahwa tegangan kerja sistem masih jauh berada di bawah batas tegangan yang diizinkan.

Nilai tersebut mengindikasikan bahwa sistem perpipaan masih memiliki margin keamanan sekitar 55,2 % terhadap batas allowable stress. Dengan kata lain, hanya sekitar 44,8 % dari kapasitas tegangan yang diizinkan telah digunakan pada kondisi operasi yang dianalisis. Margin keamanan yang masih cukup besar menunjukkan bahwa konfigurasi sistem perpipaan pada kondisi awal memiliki kemampuan yang baik dalam menahan kombinasi beban tetap tanpa mengalami kondisi tegangan yang mendekati batas desain.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa Node 70 merupakan lokasi dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa distribusi beban pada sistem perpipaan tidak merata, melainkan dipengaruhi oleh konfigurasi geometri, perubahan arah aliran melalui sambungan *elbow*, serta pengaruh kondisi batas yang diberikan oleh *pipe support* dan *anchor*. Perubahan arah pipa menyebabkan timbulnya momen lentur yang lebih besar dibandingkan segmen pipa lurus sehingga tegangan maksimum cenderung terlokalisasi pada area tersebut.

Selain mengevaluasi nilai *Code Stress*, hasil simulasi juga menunjukkan komponen penyusun tegangan yang berkontribusi terhadap kondisi *sustained*. Komponen tersebut terdiri atas Hoop Stress, Axial Stress, dan Bending Stress yang secara bersama-sama membentuk distribusi tegangan pada sistem perpipaan.

Tabel 4. 3 Komponen Tegangan Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Komponen Tegangan	Nilai (kPa)
Hoop Stress	55.765,90
Axial Stress	27.150,30
Bending Stress	34.967,90
Torsional Stress	926,8
Maximum Stress Intensity	63.658,40

Berdasarkan Tabel 4.3 terlihat bahwa **Hoop Stress** merupakan komponen tegangan terbesar pada kondisi *baseline*. Kondisi ini sesuai dengan teori tegangan pada pipa silinder bertekanan, di mana tekanan internal menghasilkan tegangan melingkar (*circumferential stress*) yang umumnya lebih besar dibandingkan tegangan aksial. Sementara itu, **Axial Stress** dipengaruhi oleh tekanan internal serta gaya aksial akibat berat sistem, sedangkan **Bending Stress** muncul sebagai akibat kombinasi berat sendiri pipa, berat fluida, serta perubahan arah perpipaan yang menghasilkan momen lentur.

Besarnya **Bending Stress** yang masih lebih rendah dibandingkan **Hoop Stress** menunjukkan bahwa konfigurasi *pipe support* yang digunakan mampu mengendalikan lendutan sistem sehingga momen lentur yang terjadi masih berada pada tingkat yang aman. Selain itu, nilai **Torsional Stress** yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem tidak mengalami beban puntir yang signifikan selama kondisi operasi.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi *sustained stress* menunjukkan bahwa kondisi *baseline* masih memiliki kapasitas yang cukup besar untuk menahan kombinasi beban tetap. Oleh karena itu, kondisi ini digunakan sebagai **acuan (baseline)** dalam mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan terhadap peningkatan tegangan pada variasi ketebalan berikutnya.

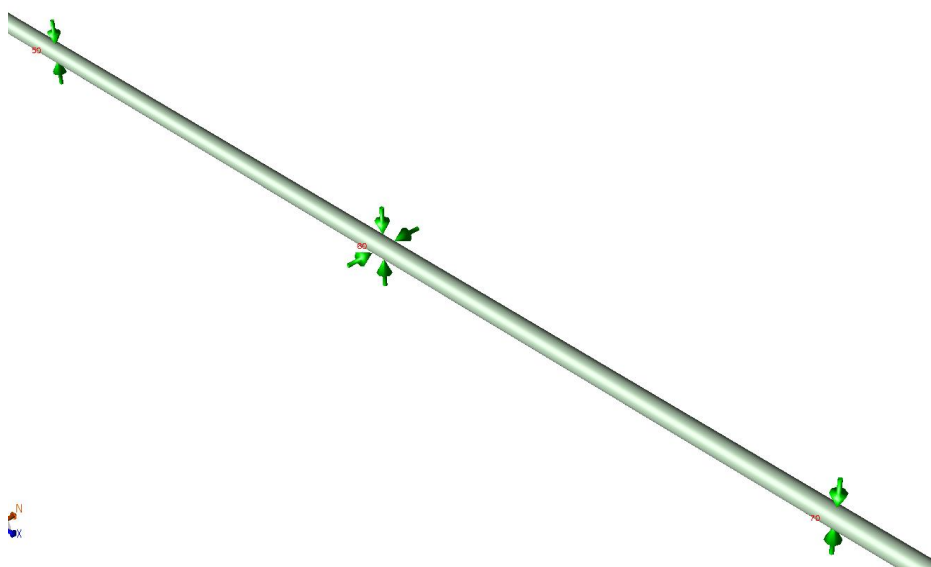
4.2.3 Analisis Expansion Stress pada Kondisi Baseline

Selain mengevaluasi tegangan akibat beban tetap (*sustained load*), analisis sistem perpipaan juga dilakukan terhadap **expansion stress**, yaitu tegangan yang timbul akibat perubahan temperatur operasi. Berbeda dengan *sustained stress* yang dipengaruhi oleh berat sendiri pipa, berat fluida, dan tekanan internal, *expansion stress* terutama disebabkan oleh pemuaiian termal (*thermal expansion*) yang menghasilkan gaya serta momen akibat adanya pembatasan pergerakan oleh *pipe support* maupun *anchor*. Evaluasi parameter ini bertujuan untuk memastikan bahwa deformasi termal yang terjadi tidak menghasilkan tegangan yang melampaui batas yang diizinkan oleh ASME B31.3.

Berdasarkan hasil simulasi CAESAR II pada kondisi *baseline*, sistem perpipaan menunjukkan bahwa tegangan akibat ekspansi termal masih berada jauh di bawah batas yang diizinkan sehingga seluruh sistem dinyatakan memenuhi persyaratan **ASME B31.3**.

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Expansion Stress Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai
Node Kritis	70
Expansion Code Stress	94.328,8 kPa
Expansion Allowable Stress	282.968,4 kPa
Stress Ratio	33,30%
Status	PASS



Gambar 4. 4 Distribusi Expansion Stress pada Kondisi Baseline
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui bahwa **Expansion Code Stress** yang terjadi sebesar **94.328,8 kPa**, sedangkan **Expansion Allowable Stress** sebesar **282.968,4 kPa**. Dengan demikian, nilai **Stress Ratio** hanya mencapai **33,3 %**, sehingga sistem masih memiliki cadangan kapasitas sekitar **66,7 %** terhadap batas yang diizinkan.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa deformasi akibat ekspansi termal masih dapat diakomodasi dengan baik oleh konfigurasi sistem perpipaan yang digunakan. Walaupun temperatur operasi mencapai **60°C**, perubahan panjang pipa akibat pemuaihan belum menghasilkan tegangan yang signifikan karena sistem masih memiliki fleksibilitas yang cukup melalui kombinasi perubahan arah perpipaan (*elbow*) serta konfigurasi *pipe support* yang mampu mengurangi akumulasi tegangan termal.

Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa **Node 70** kembali menjadi lokasi dengan nilai *expansion stress* terbesar. Konsistensi lokasi kritis antara analisis *sustained* dan *expansion* menunjukkan bahwa karakteristik geometri sistem memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap distribusi tegangan dibandingkan perubahan jenis pembebanan. Dengan kata lain, lokasi tersebut merupakan titik dengan konsentrasi gaya dan momen terbesar sehingga menjadi area yang paling sensitif terhadap berbagai kondisi operasi.

Apabila dibandingkan dengan hasil *sustained stress*, terlihat bahwa **stress ratio akibat ekspansi termal lebih rendah** dibandingkan **stress ratio akibat beban tetap**. Kondisi ini menunjukkan bahwa selama temperatur operasi **60°C**, kontribusi ekspansi termal terhadap total tegangan sistem masih lebih kecil dibandingkan pengaruh berat sendiri pipa, berat fluida, dan tekanan internal. Dengan demikian, faktor utama yang mengendalikan kondisi tegangan pada sistem perpipaan penelitian ini adalah pembebanan tetap (*sustained load*), sedangkan pengaruh ekspansi termal masih berada pada tingkat yang relatif rendah.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi sistem perpipaan pada kondisi awal masih memiliki fleksibilitas yang memadai untuk mengakomodasi deformasi akibat kenaikan temperatur operasi. Oleh karena itu, risiko kegagalan akibat tegangan termal pada kondisi *baseline* dapat dinyatakan masih rendah sesuai dengan ketentuan evaluasi yang diterapkan dalam ASME B31.3.

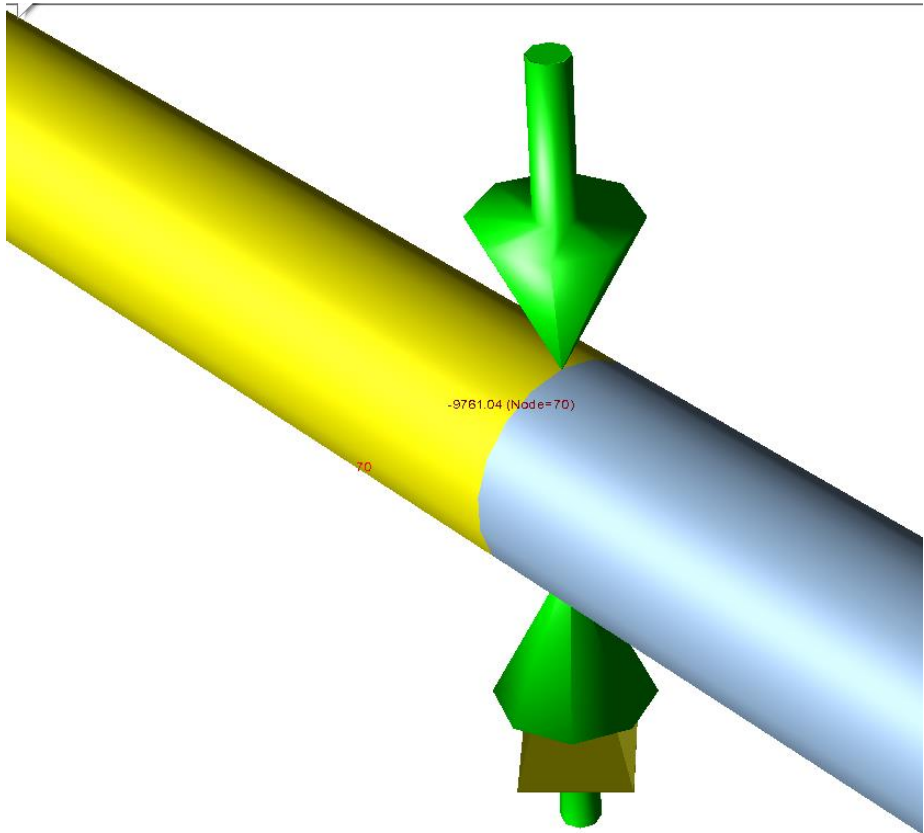
4.2.4 Analisis Reaksi Pipe Support dan Anchor pada Kondisi Baseline

Evaluasi terhadap **reaksi pipe support dan anchor** dilakukan untuk mengetahui distribusi gaya yang diteruskan oleh sistem perpipaan menuju struktur kapal selama kondisi operasi. Besarnya reaksi yang terjadi pada setiap titik penyangga menunjukkan bagaimana beban akibat berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, serta ekspansi termal didistribusikan ke struktur pendukung. Informasi ini penting karena besarnya gaya reaksi akan memengaruhi desain kekuatan *support*, *anchor*, maupun struktur kapal yang menerima pembebanan tersebut.

Hasil simulasi CAESAR II menunjukkan bahwa distribusi reaksi tidak terjadi secara merata pada seluruh sistem perpipaan. Beberapa *pipe support* menerima gaya yang lebih besar dibandingkan support lainnya sebagai akibat perbedaan bentang bebas pipa, perubahan arah aliran, serta lokasi penempatan komponen perpipaan.

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Reaksi Pipe Support dan Anchor Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai
Reaksi Vertikal Maksimum (Node 70)	-9.761 N
Reaksi Vertikal Node 50	-8.486 N
Reaksi Vertikal Node 90	-7.494 N
Reaksi Vertikal Node 30	-7.282 N
Gaya Anchor Node 28 (FX)	-509.856 N
Gaya Anchor Node 100 (FX)	511.288 N



Gambar 4. 5 Distribusi Pipe Support Reaction pada Kondisi Baseline
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa **Node 70** menerima reaksi vertikal terbesar dibandingkan titik support lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi tersebut menjadi titik utama penyaluran beban gravitasi dari sistem perpipaan menuju struktur kapal. Besarnya reaksi yang diterima support tersebut dipengaruhi oleh posisi relatif terhadap bentang bebas pipa, keberadaan komponen perpipaan, serta distribusi massa sistem secara keseluruhan.

Sementara itu, gaya terbesar pada arah aksial diterima oleh **anchor** yang berada pada **Node 28** dan **Node 100**. Kedua *anchor* tersebut berfungsi sebagai penahan utama gaya yang memanjang akibat tekanan internal dan deformasi sistem, sehingga besarnya gaya yang diterima relatif lebih tinggi dibandingkan *pipe support* lainnya. Distribusi gaya yang saling berlawanan pada kedua *anchor* menunjukkan bahwa sistem telah mampu menyeimbangkan gaya aksial selama kondisi operasi.

Secara umum, pola distribusi reaksi pada kondisi *baseline* menunjukkan bahwa konfigurasi *pipe support* dan *anchor* masih mampu mendistribusikan beban secara efektif tanpa menghasilkan konsentrasi gaya yang berlebihan pada satu titik tertentu.

Hal ini memperlihatkan bahwa sistem penyangga memiliki kekakuan yang memadai untuk mempertahankan stabilitas sistem perpipaan selama beroperasi.

4.2.5 Evaluasi Code Compliance pada Kondisi Baseline

Evaluasi *code compliance* merupakan tahap akhir dalam analisis kondisi *baseline* yang bertujuan untuk menentukan apakah sistem perpipaan memenuhi persyaratan tegangan yang ditetapkan dalam **ASME B31.3**. Berbeda dengan pembahasan *displacement, sustained stress, expansion stress*, maupun *support reaction* yang mengevaluasi masing-masing parameter secara terpisah, *code compliance* memberikan penilaian menyeluruh terhadap kemampuan sistem dalam menahan kombinasi pembebanan yang bekerja selama kondisi operasi.

Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan menggunakan fasilitas **Code Compliance Evaluation** pada perangkat lunak CAESAR II yang secara otomatis membandingkan **Code Stress** hasil simulasi dengan **Allowable Stress** yang ditetapkan berdasarkan material, temperatur operasi, dan ketentuan ASME B31.3. Sistem dinyatakan memenuhi persyaratan apabila nilai **Stress Ratio** tidak melebihi **100%**, atau dengan kata lain nilai **Code Stress** masih lebih kecil daripada **Allowable Stress**.

Tabel 4. 6 Evaluasi Code Compliance Kondisi Baseline
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai
Node Kritis	70
Code Stress	61.769,4 kPa
Allowable Stress	137.895,1 kPa
Stress Ratio	44,80%
Margin Keamanan	55,20%
Status Evaluasi	PASS

Berdasarkan Tabel 4.6 diketahui bahwa **Code Stress** yang dihasilkan pada kondisi *baseline* sebesar **61.769,4 kPa**, sedangkan **Allowable Stress** menurut ASME B31.3 sebesar **137.895,1 kPa**. Perbandingan kedua nilai tersebut menghasilkan **Stress Ratio** sebesar **44,8%**, sehingga sistem masih memiliki **margin keamanan sebesar 55,2%** terhadap batas tegangan yang diizinkan.

Margin keamanan tersebut menunjukkan bahwa kapasitas struktur perpipaan belum dimanfaatkan secara penuh selama kondisi operasi yang dianalisis. Dengan demikian, sistem masih memiliki cadangan kekuatan yang cukup besar untuk mengakomodasi variasi beban operasi tanpa melampaui batas tegangan yang diperkenankan oleh kode desain. Kondisi ini mengindikasikan bahwa konfigurasi sistem perpipaan pada ketebalan awal masih memiliki tingkat keandalan yang tinggi dalam mempertahankan integritas struktur.

Hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa **Node 70** merupakan lokasi dengan **Stress Ratio** tertinggi. Konsistensi lokasi kritis ini sejalan dengan hasil analisis *sustained stress* dan *expansion stress*, yang sama-sama menunjukkan bahwa distribusi tegangan terbesar terjadi pada node tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik

geometri sistem, khususnya perubahan arah perpipaan serta interaksi dengan *pipe support*, memiliki pengaruh dominan terhadap terbentuknya konsentrasi tegangan.

Apabila seluruh parameter hasil simulasi pada kondisi *baseline* dianalisis secara terpadu, terlihat bahwa sistem perpipaan menunjukkan respons yang konsisten. Nilai *displacement* masih berada pada batas yang wajar, *sustained stress* dan *expansion stress* masih jauh di bawah nilai *allowable stress*, sedangkan distribusi reaksi pada *pipe support* dan *anchor* masih menunjukkan pola pembebanan yang stabil. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa hasil evaluasi *code compliance* memberikan status **PASS**, sehingga sistem perpipaan pada ketebalan awal dinyatakan memenuhi persyaratan ASME B31.3.

Selain menunjukkan bahwa desain awal masih aman, hasil evaluasi *baseline* juga memiliki fungsi sebagai **kondisi acuan (reference condition)** dalam penelitian ini. Seluruh perubahan yang terjadi pada variasi ketebalan berikutnya akan dibandingkan terhadap kondisi awal ini untuk mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan terhadap perubahan *displacement*, tegangan, distribusi gaya reaksi, serta tingkat pemanfaatan tegangan (*stress ratio*). Oleh karena itu, kondisi *baseline* menjadi dasar utama dalam menilai sejauh mana degradasi ketebalan memengaruhi integritas sistem perpipaan muatan kapal tanker.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem perpipaan pada ketebalan **8,18 mm** masih memiliki **cadangan kapasitas tegangan yang cukup besar** serta memenuhi seluruh persyaratan evaluasi berdasarkan **ASME B31.3**. Dengan demikian, kondisi *baseline* dapat digunakan sebagai referensi yang valid untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan terhadap perilaku mekanik sistem perpipaan pada pembahasan selanjutnya.

4.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Pipa terhadap Respons Mekanik Sistem Perpipaan

Setelah kondisi awal (*baseline*) dievaluasi, tahap selanjutnya adalah menganalisis pengaruh penurunan ketebalan dinding pipa terhadap respons mekanik sistem perpipaan. Variasi ketebalan dilakukan secara bertahap mulai dari **8,18 mm** sebagai kondisi awal hingga **3,18 mm** sebagai kondisi minimum yang dianalisis. Seluruh simulasi dilakukan menggunakan konfigurasi geometri, kondisi operasi, material, dan *pipe support* yang sama, sehingga perubahan hasil yang diperoleh hanya dipengaruhi oleh penurunan ketebalan dinding pipa.

Evaluasi dilakukan terhadap lima parameter utama, yaitu **displacement, sustained stress, expansion stress, reaksi support dan anchor**, serta **code compliance**. Pendekatan ini memungkinkan hubungan antara penurunan ketebalan dan perubahan respons mekanik sistem dapat diamati secara menyeluruh.

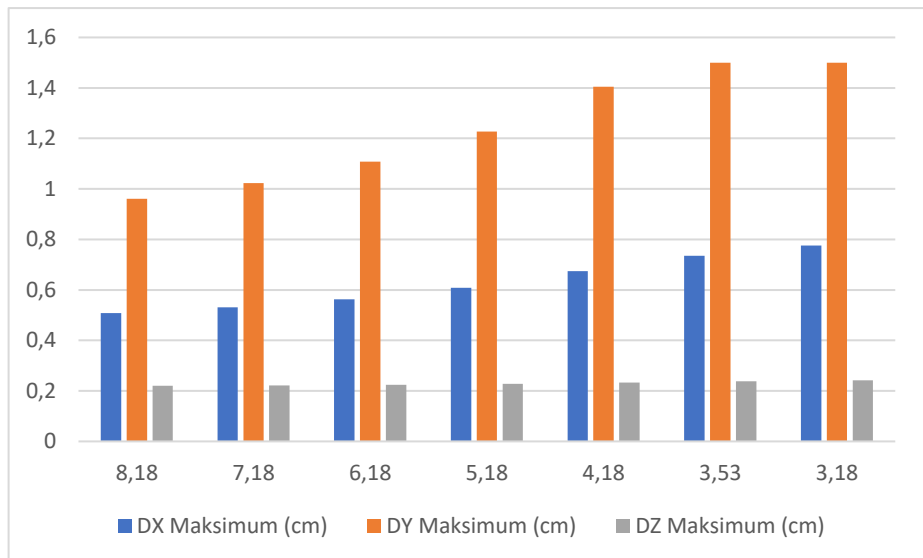
4.3.1 Pengaruh Variasi Ketebalan terhadap Displacement

Perubahan ketebalan dinding pipa secara langsung memengaruhi kekakuan lentur (*flexural rigidity*) sistem perpipaan. Semakin kecil ketebalan dinding pipa, semakin kecil pula momen inersia penampang yang dimiliki pipa sehingga kemampuan struktur dalam menahan deformasi menjadi berkurang. Akibatnya, perpindahan (*displacement*) yang terjadi selama kondisi operasi akan meningkat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan ketebalan menyebabkan peningkatan *displacement* pada seluruh arah koordinat. Namun demikian, peningkatan terbesar terjadi pada arah vertikal (sumbu Y), sedangkan perubahan pada arah X dan Z relatif lebih kecil.

Tabel 4. 7 Rekapitulasi Displacement Maksimum Seluruh Variasi Ketebalan (Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Ketebalan (mm)	DX Maksimum (cm)	DY Maksimum (cm)	DZ Maksimum (cm)
8,18	0,5077	0,9603	0,2207
7,18	0,5313	1,0233	0,2221
6,18	0,5634	1,108	0,2243
5,18	0,6083	1,2271	0,2277
4,18	0,6742	1,4052	0,2332
3,53	0,7348	1,5	0,2382
3,18	0,7757	1,5	0,2416



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Ketebalan Pipa terhadap Displacement Maksimum (Sumber:Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.7 terlihat bahwa seluruh komponen *displacement* mengalami peningkatan seiring berkurangnya ketebalan dinding pipa. Nilai **DX maksimum** meningkat dari **0,5077 cm** pada kondisi *baseline* menjadi **0,7757 cm** pada ketebalan **3,18 mm**, atau meningkat sekitar **52,8%**. Sementara itu, **DZ maksimum** meningkat relatif kecil, yaitu sekitar **9,5%**, sehingga menunjukkan bahwa deformasi pada arah melintang masih dapat dikendalikan oleh konfigurasi sistem.

Perubahan paling signifikan terjadi pada **DY maksimum**, yaitu dari **0,9603 cm** menjadi **1,5000 cm**, yang menunjukkan peningkatan sekitar **56,2%** dibandingkan kondisi awal. Dominasi perpindahan pada arah vertikal menunjukkan bahwa penurunan ketebalan terutama memengaruhi kemampuan pipa dalam menahan beban gravitasi akibat berat sendiri pipa dan fluida. Dengan berkurangnya kekakuan lentur, lendutan pada bentang bebas pipa menjadi lebih besar walaupun konfigurasi *pipe support* tidak mengalami perubahan.

Apabila dibandingkan antarvariasi, peningkatan *displacement* tidak bersifat linier sempurna. Pada penurunan ketebalan dari **8,18 mm** hingga **6,18 mm**, kenaikan perpindahan masih relatif kecil. Namun setelah ketebalan mencapai **5,18 mm**, laju peningkatan mulai bertambah sehingga pada variasi **4,18 mm**, **3,53 mm**, dan **3,18 mm** terjadi kenaikan yang lebih signifikan. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa pengaruh penurunan ketebalan terhadap kekakuan sistem menjadi semakin dominan ketika penampang pipa semakin tipis.

Hasil kontur *displacement* juga menunjukkan bahwa lokasi perpindahan maksimum tetap berada pada area yang sama untuk seluruh variasi ketebalan. Tidak ditemukan perpindahan lokasi deformasi utama maupun perubahan pola distribusi lendutan. Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan ketebalan tidak mengubah karakteristik deformasi sistem, tetapi hanya meningkatkan besarnya perpindahan pada lokasi yang telah menjadi titik paling fleksibel sejak kondisi *baseline*.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa menyebabkan sistem perpipaan menjadi semakin fleksibel sehingga deformasi selama kondisi operasi meningkat. Meskipun demikian, seluruh variasi masih menunjukkan pola deformasi yang stabil tanpa adanya perubahan konfigurasi deformasi yang mengindikasikan ketidakstabilan struktur. Dengan demikian, perubahan *displacement* yang terjadi dapat dikaitkan secara langsung dengan penurunan kekakuan akibat berkurangnya ketebalan dinding pipa.

4.3.2 Pengaruh Variasi Ketebalan terhadap Sustained Stress

Sustained stress merupakan parameter utama dalam evaluasi integritas sistem perpipaan karena menggambarkan respons struktur terhadap kombinasi beban tetap (*sustained load*), yang meliputi berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, serta berat komponen perpipaan seperti *flange* dan *valve*. Berbeda dengan *displacement* yang menunjukkan besarnya deformasi sistem, *sustained stress* digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan pembebanan tanpa melampaui batas tegangan yang diizinkan oleh ASME B31.3. Oleh karena itu, perubahan nilai *sustained stress* akibat penurunan ketebalan menjadi salah satu indikator utama dalam menilai penurunan tingkat keamanan sistem perpipaan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa menyebabkan peningkatan *Code Stress* secara bertahap pada seluruh variasi yang dianalisis. Peningkatan tersebut terjadi karena berkurangnya luas penampang efektif yang berfungsi menahan beban, sehingga tegangan yang diterima material menjadi lebih besar walaupun kondisi operasi dan konfigurasi sistem tidak mengalami perubahan.

Tabel 4. 8 Rekapitulasi Hasil Sustained Stress Seluruh Variasi Ketebalan
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

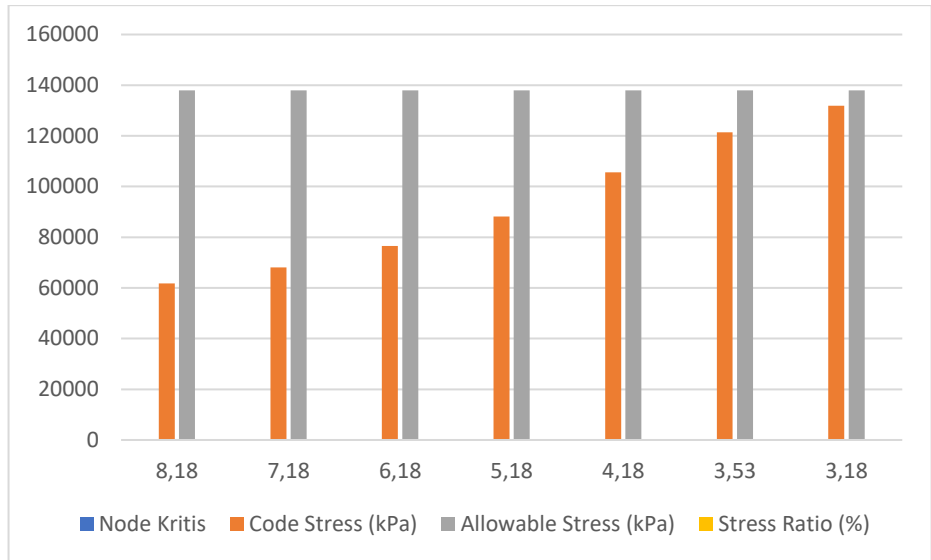
Ketebalan (mm)	Node Kritis	Code Stress (kPa)	Allowable Stress (kPa)	Stress Ratio (%)
8,18	70	61.769,40	137.895,10	44,8
7,18	70	68.084,10	137.895,10	49,4
6,18	70	76.499,30	137.895,10	55,5
5,18	70	88.230,90	137.895,10	64
4,18	70	105.658,00	137.895,10	76,6
3,53	70	121.449,90	137.895,10	88,1
3,18	70	131.866,10	137.895,10	95,6

Berdasarkan Tabel 4.8 terlihat bahwa nilai **Code Stress** meningkat secara konsisten seiring dengan penurunan ketebalan pipa. Pada kondisi *baseline* dengan ketebalan **8,18 mm**, *Code Stress* tercatat sebesar **61.769,4 kPa**, sedangkan pada ketebalan **3,18 mm** meningkat menjadi **131.866,1 kPa**. Dengan demikian, terjadi peningkatan sekitar **113,5%** dibandingkan kondisi awal. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan pipa dalam menahan pembebanan tetap.

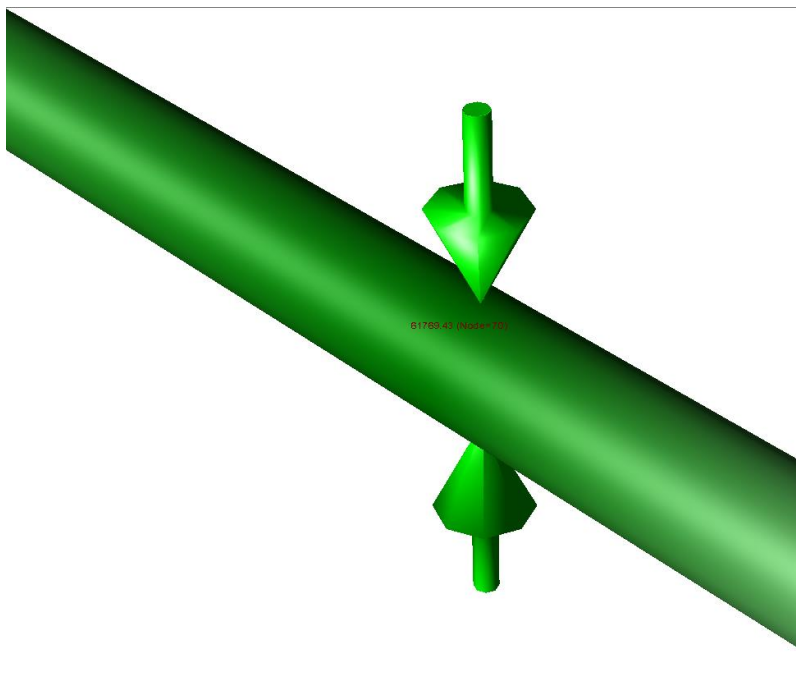
Peningkatan *Code Stress* diikuti oleh kenaikan **Stress Ratio** dari **44,8%** menjadi **95,6%**. Walaupun seluruh variasi masih memperoleh status **PASS**, kenaikan *Stress Ratio* menunjukkan bahwa kapasitas tegangan yang tersedia semakin berkurang. Dengan kata lain, semakin tipis dinding pipa maka semakin besar proporsi *allowable stress* yang telah dimanfaatkan oleh sistem.

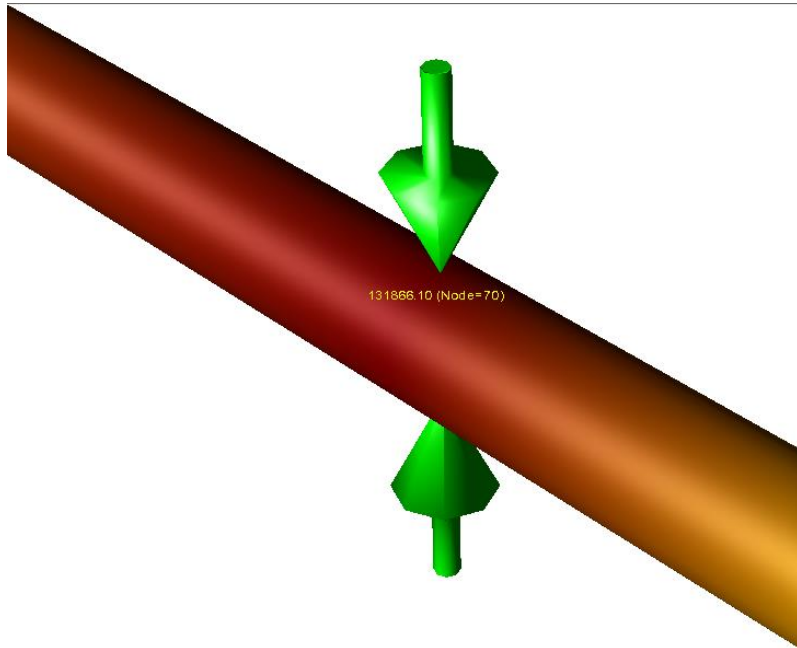
Fenomena tersebut sesuai dengan prinsip mekanika material, di mana tegangan berbanding terbalik dengan luas penampang efektif. Ketika ketebalan dinding pipa menurun akibat korosi, kemampuan penampang dalam mendistribusikan beban menjadi semakin kecil sehingga tegangan yang diterima material meningkat. Karena tekanan operasi, temperatur, serta konfigurasi sistem dipertahankan tetap pada seluruh simulasi, maka peningkatan *Code Stress* dapat dikaitkan secara langsung dengan penurunan ketebalan dinding pipa.

Hal yang menarik dari hasil simulasi adalah **lokasi tegangan maksimum tidak mengalami perubahan**. Pada seluruh variasi ketebalan, **Node 70** tetap menjadi lokasi dengan *Stress Ratio* tertinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan tidak mengubah distribusi pembebanan pada sistem, tetapi meningkatkan intensitas tegangan pada lokasi yang sejak awal telah menjadi titik konsentrasi tegangan.



Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Ketebalan Pipa terhadap Code Stress dan Stress Ratio
(Sumber: Penulis, 2026)





Gambar 4. 8 Distribusi Sustained Stress pada Kondisi Baseline (8,18 mm) dan Ketebalan 3,18 mm (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat bahwa distribusi tegangan maksimum tetap terkonsentrasi pada **Node 70** baik pada kondisi *baseline* maupun pada ketebalan **3,18 mm**. Perbedaan utama terletak pada meningkatnya intensitas distribusi tegangan pada ketebalan yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan tidak menyebabkan perpindahan lokasi kritis, melainkan meningkatkan besarnya tegangan pada titik yang sama. Dengan demikian, **Node 70** dapat diidentifikasi sebagai lokasi yang paling sensitif terhadap degradasi ketebalan akibat korosi dan menjadi area yang perlu memperoleh perhatian lebih dalam proses inspeksi maupun pemeliharaan sistem perpipaan.

Selain peningkatan *Code Stress*, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa nilai **Allowable Stress** tetap sebesar **137.895,1 kPa** pada seluruh variasi ketebalan. Hal ini disebabkan karena material yang digunakan, temperatur operasi, serta standar evaluasi tidak mengalami perubahan selama simulasi. Dengan demikian, perubahan *Stress Ratio* sepenuhnya dipengaruhi oleh peningkatan *Code Stress*, bukan oleh perubahan nilai *Allowable Stress*.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan *sustained stress*. Walaupun seluruh variasi masih memenuhi persyaratan **ASME B31.3**, peningkatan *Stress Ratio* hingga **95,6%** pada ketebalan **3,18 mm** menunjukkan bahwa margin keamanan sistem semakin kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa degradasi ketebalan akibat korosi perlu dipantau secara berkala karena berpotensi menyebabkan

sistem mencapai batas tegangan yang diizinkan apabila penipisan dinding pipa terus berlanjut.

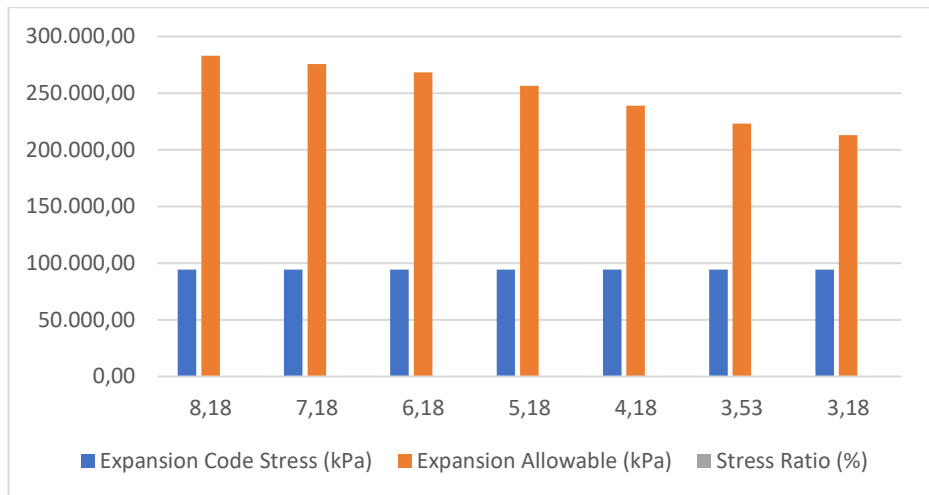
4.3.3 Pengaruh Variasi Ketebalan terhadap Expansion Stress

Expansion stress merupakan tegangan yang timbul akibat deformasi termal selama sistem perpipaan mengalami perubahan temperatur operasi. Dalam analisis berdasarkan ASME B31.3, expansion stress berbeda dengan sustained stress karena tidak dipengaruhi oleh berat sendiri pipa maupun tekanan internal secara langsung, melainkan oleh besarnya pemuaian termal yang dibatasi oleh konfigurasi geometri sistem, *pipe support*, dan *anchor*. Oleh karena itu, perubahan ketebalan pipa tidak selalu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai expansion stress.

Berdasarkan hasil simulasi CAESAR II, penurunan ketebalan dinding pipa tidak menyebabkan perubahan yang berarti terhadap nilai **Expansion Code Stress**. Meskipun terjadi sedikit perubahan pada nilai **Stress Ratio**, besarnya tegangan akibat ekspansi termal relatif konstan pada seluruh variasi ketebalan yang dianalisis.

Tabel 4. 9 Rekapitulasi Expansion Stress Seluruh Variasi Ketebalan
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Ketebalan (mm)	Expansion Code Stress (kPa)	Expansion Allowable (kPa)	Stress Ratio (%)
8,18	94.328,80	282.968,40	33,3
7,18	94.326,10	275.603,60	34,2
6,18	94.323,70	268.238,50	35,2
5,18	94.320,90	256.507,00	36,8
4,18	94.317,90	239.079,80	39,5
3,53	94.315,90	223.288,00	42,2
3,18	94.314,80	212.871,80	44,3



Gambar 4. 9 Grafik Hubungan Ketebalan terhadap Expansion Stress dan Expansion Stress Ratio (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.9 terlihat bahwa nilai Expansion Code Stress berada pada kisaran 94.314–94.329 kPa pada seluruh variasi ketebalan. Perbedaan antarvariasi sangat kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa penurunan ketebalan pipa tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya tegangan akibat ekspansi termal.

Sebaliknya, perubahan yang lebih terlihat terjadi pada Expansion Stress Ratio, yang meningkat dari 33,3% pada ketebalan 8,18 mm menjadi 44,3% pada ketebalan 3,18 mm. Namun demikian, peningkatan tersebut bukan disebabkan oleh kenaikan Expansion Code Stress, melainkan karena nilai Expansion Allowable Stress menurun pada setiap variasi ketebalan sesuai hasil evaluasi CAESAR II. Akibatnya, walaupun tegangan termal relatif tetap, persentase pemanfaatan terhadap batas tegangan yang diizinkan menjadi lebih besar.

Temuan ini menunjukkan bahwa respons sistem terhadap ekspansi termal lebih dipengaruhi oleh konfigurasi geometri perpipaan dibandingkan oleh perubahan ketebalan dinding pipa. Jalur perpipaan yang memiliki beberapa perubahan arah melalui *elbow* memberikan fleksibilitas yang cukup untuk mengakomodasi pemuaian akibat temperatur operasi. Selain itu, konfigurasi *pipe support* dan *anchor* mampu mengendalikan deformasi termal sehingga distribusi expansion stress tetap stabil pada seluruh variasi ketebalan.

Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa Node 70 tetap menjadi lokasi dengan expansion stress tertinggi pada seluruh variasi ketebalan. Konsistensi lokasi kritis ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan tidak mengubah distribusi deformasi termal, tetapi hanya memengaruhi tingkat pemanfaatan terhadap allowable stress. Dengan demikian, lokasi konsentrasi tegangan tetap dikendalikan oleh karakteristik geometri sistem, sedangkan perubahan ketebalan hanya memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap respons termal.

Apabila dibandingkan dengan hasil analisis *sustained stress*, terlihat perbedaan karakteristik yang cukup jelas. Pada analisis *sustained stress*, penurunan ketebalan menyebabkan peningkatan Code Stress yang cukup signifikan. Sebaliknya, pada analisis *expansion stress*, nilai Expansion Code Stress hampir tidak berubah walaupun ketebalan dinding pipa berkurang hingga 3,18 mm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa degradasi ketebalan akibat korosi lebih berpengaruh terhadap kemampuan pipa dalam menahan beban mekanis dibandingkan terhadap kemampuan sistem dalam mengakomodasi ekspansi termal.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi ketebalan dinding pipa tidak memberikan pengaruh dominan terhadap *expansion stress*, sehingga perubahan respons mekanik sistem lebih banyak dikendalikan oleh peningkatan *sustained stress*. Temuan ini menjadi salah satu hasil penting penelitian karena menunjukkan bahwa penurunan tingkat keamanan sistem perpipaan akibat korosi lebih berkaitan dengan pembebanan tetap (*sustained load*) daripada deformasi termal.

4.3.4 Pengaruh Variasi Ketebalan terhadap Reaksi Pipe Support dan Anchor

Reaksi pada *pipe support* dan *anchor* merupakan gaya yang diteruskan oleh sistem perpipaan menuju struktur pendukung akibat kombinasi beban operasi. Besarnya gaya reaksi dipengaruhi oleh berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, serta karakteristik kekakuan sistem. Oleh karena itu, perubahan ketebalan dinding pipa akibat korosi tidak hanya memengaruhi distribusi tegangan, tetapi juga mengubah besarnya gaya yang diterima oleh setiap *support* dan *anchor*.

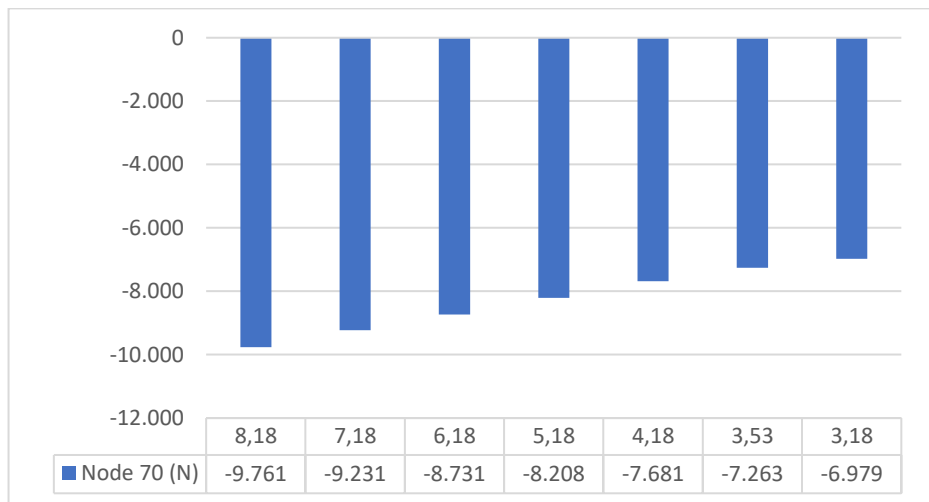
Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan terhadap titik-titik support yang menerima gaya terbesar pada kondisi operasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan ketebalan menyebabkan kecenderungan **penurunan gaya reaksi** pada hampir seluruh support dan anchor. Hal tersebut terjadi karena penipisan dinding pipa mengurangi massa total sistem sehingga beban gravitasi yang diteruskan menuju struktur pendukung juga berkurang.

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Reaksi Vertikal Pipe Support Seluruh Variasi Ketebalan (Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

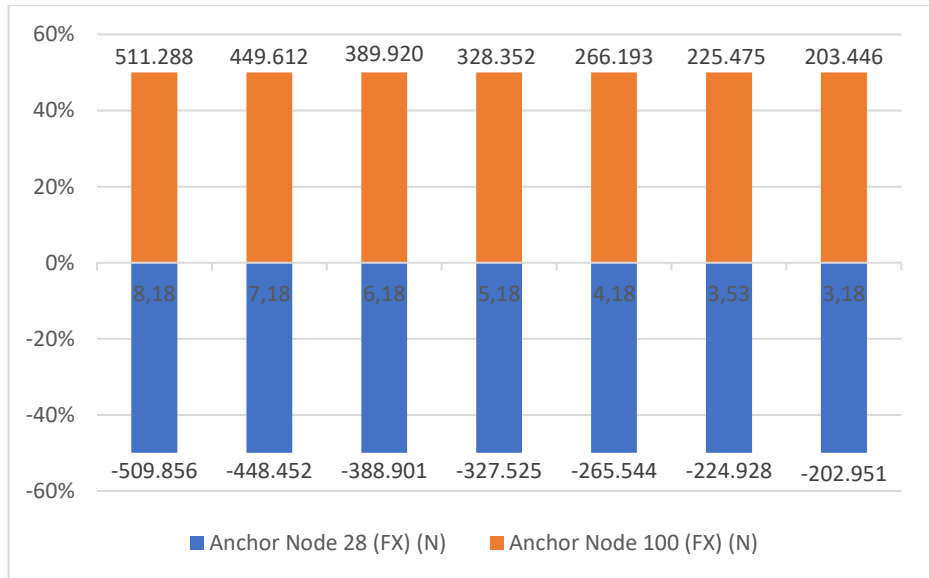
Ketebalan (mm)	Node 70 (N)	Node 50 (N)	Node 90 (N)	Node 30 (N)
8,18	-9.761	-8.486	-7.494	-7.282
7,18	-9.231	-7.962	-7.012	-6.821
6,18	-8.731	-7.411	-6.606	-6.380
5,18	-8.208	-6.866	-6.155	-5.923
4,18	-7.681	-6.316	-5.699	-5.461
3,53	-7.263	-5.970	-5.288	-5.152
3,18	-6.979	-5.796	-4.973	-4.980

Tabel 4. 11 Rekapitulasi Gaya Anchor Seluruh Variasi Ketebalan
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Ketebalan (mm)	Anchor Node 28 (FX) (N)	Anchor Node 100 (FX) (N)
8,18	-509.856	511.288
7,18	-448.452	449.612
6,18	-388.901	389.920
5,18	-327.525	328.352
4,18	-265.544	266.193
3,53	-224.928	225.475
3,18	-202.951	203.446



Gambar 4. 10 Grafik Hubungan Ketebalan terhadap Reaksi Vertikal Pipe Support
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 4. 11 Grafik Hubungan Ketebalan terhadap Gaya Anchor
(Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.10 terlihat bahwa seluruh reaksi vertikal pada *pipe support* mengalami penurunan secara bertahap seiring berkurangnya ketebalan dinding pipa. Support pada **Node 70** tetap menerima gaya terbesar selama seluruh variasi ketebalan, namun nilainya menurun dari **9.761 N** pada kondisi *baseline* menjadi **6.979 N** pada ketebalan **3,18 mm**, atau mengalami penurunan sekitar **28,5%**.

Pola penurunan yang serupa juga terjadi pada support di **Node 50**, **Node 90**, dan **Node 30**. Konsistensi tren tersebut menunjukkan bahwa perubahan ketebalan tidak mengubah pola distribusi pembebanan, tetapi mengurangi besarnya gaya yang diterima oleh struktur pendukung. Hal ini dapat dijelaskan karena penurunan ketebalan menyebabkan berkurangnya luas penampang dan massa pipa, sehingga beban gravitasi yang harus dipikul oleh sistem support menjadi lebih kecil.

Selain memengaruhi *pipe support*, penurunan ketebalan juga menyebabkan penurunan gaya yang diterima oleh *anchor*. Berdasarkan Tabel 4.11, gaya aksial pada **Anchor Node 28** menurun dari **509.856 N** menjadi **202.951 N**, sedangkan pada **Anchor Node 100** menurun dari **511.288 N** menjadi **203.446 N**. Kedua anchor tetap menerima gaya terbesar pada arah aksial, namun besar gaya yang diteruskan menuju struktur kapal semakin kecil seiring berkurangnya berat total sistem.

Meskipun gaya reaksi mengalami penurunan, hasil simulasi menunjukkan bahwa **lokasi support dan anchor yang menerima gaya maksimum tidak mengalami perubahan**. Support pada **Node 70** tetap menjadi titik dengan reaksi vertikal terbesar, sedangkan **Anchor Node 28** dan **Node 100** tetap menjadi penahan utama gaya aksial. Kondisi ini menunjukkan bahwa konfigurasi sistem perpipaan masih mempertahankan pola distribusi beban yang sama, sementara perubahan ketebalan hanya memengaruhi besarnya gaya yang ditransmisikan.

Dari sudut pandang rekayasa, penurunan gaya reaksi pada support dan anchor bukan berarti sistem menjadi lebih aman. Penurunan tersebut terjadi sebagai konsekuensi dari berkurangnya massa sistem akibat penipisan dinding pipa. Pada saat yang sama, hasil analisis pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa **tegangan justru meningkat** karena kemampuan penampang dalam menahan beban berkurang. Dengan demikian, meskipun beban yang diterima support menjadi lebih kecil, kondisi tegangan pada material pipa menjadi lebih kritis akibat berkurangnya ketebalan efektif.

Hasil ini menunjukkan bahwa **reaksi support dan tegangan sistem memiliki kecenderungan yang berbeda**. Penurunan ketebalan mengurangi gaya yang diteruskan ke struktur pendukung, tetapi secara bersamaan meningkatkan *stress ratio* pada material pipa. Oleh karena itu, evaluasi integritas sistem perpipaan tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan besarnya gaya reaksi, melainkan harus mempertimbangkan seluruh parameter hasil analisis secara terpadu.

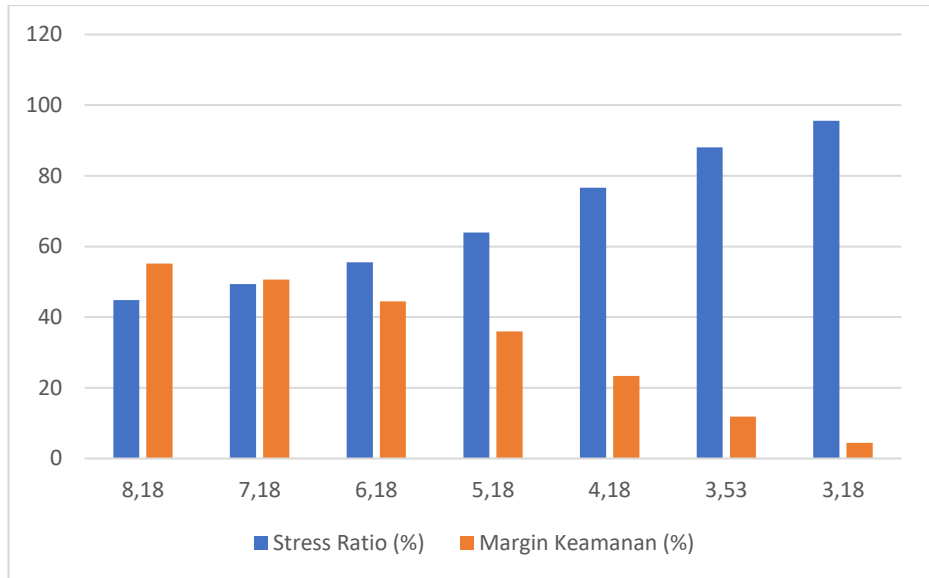
4.3.5 Pengaruh Variasi Ketebalan terhadap Code Compliance

Evaluasi *code compliance* dilakukan untuk menentukan apakah sistem perpipaan masih memenuhi persyaratan tegangan yang ditetapkan dalam **ASME B31.3** setelah mengalami penurunan ketebalan akibat korosi. Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan menggunakan fasilitas **Code Compliance Evaluation** pada perangkat lunak CAESAR II yang membandingkan **Code Stress** hasil simulasi terhadap **Allowable Stress** material ASTM A106 Grade B pada kondisi operasi yang telah ditentukan.

Berbeda dengan pembahasan sebelumnya yang mengevaluasi masing-masing parameter secara terpisah, analisis *code compliance* memberikan penilaian menyeluruh terhadap kondisi sistem perpipaan karena mempertimbangkan seluruh pengaruh pembebanan yang bekerja. Oleh karena itu, hasil evaluasi *code compliance* digunakan sebagai dasar dalam menentukan apakah setiap variasi ketebalan masih memenuhi ketentuan ASME B31.3.

Tabel 4. 12 Rekapitulasi Code Compliance Seluruh Variasi Ketebalan
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Ketebalan (mm)	Code Stress (kPa)	Allowable Stress (kPa)	Stress Ratio (%)	Margin Keamanan (%)	Status
8,18	61.769,40	137.895,10	44,8	55,2	PASS
7,18	68.084,10	137.895,10	49,4	50,6	PASS
6,18	76.499,30	137.895,10	55,5	44,5	PASS
5,18	88.230,90	137.895,10	64	36	PASS
4,18	105.658,00	137.895,10	76,6	23,4	PASS
3,53	121.449,90	137.895,10	88,1	11,9	PASS
3,18	131.866,10	137.895,10	95,6	4,4	PASS



Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Ketebalan Pipa terhadap Stress Ratio dan Margin Keamanan (Sumber:Penulis, 2026)

```

(3)Code Compliance
CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: JUL 1, 2026 Time: 21:34
Job Name: KOROSI 25 TAHUN KETEBALAN 3.18 MM
Licensed To: Licensed To: Edit name in <system>\company.txt
CODE COMPLIANCE REPORT: Code Stresses on Elements
CASE 3 (SUS) W+P1

Load Case From Code Allowable Ratio To Code Allowable Ratio Piping Code
Node Stress Stress Stress % Node Stress Stress % Code

LOAD CASE DEFINITION KEY
CASE 3 (SUS) W+P1

Note: For a complete breakdown of code-defined stress components, see the Stresses report.
Piping Code: B31.3 = B31.3 -2016, Jan 31, 2017

*** CODE COMPLIANCE EVALUATION PASSED ***

Highest Stresses: ( KPa )
Ratio (%): 95.6 @Node 70 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Code Stress: 131866.1 Allowable Stress: 137895.1
Axial Stress: 74752.4 @Node 130 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Bending Stress: 57712.7 @Node 70 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Torsion Stress: 1016.3 @Node 20 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Hoop Stress: 150523.6 @Node 13 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Max Stress Intensity: 157321.2 @Node 20 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1

```

Gambar 4. 13 Hasil Code Compliance Evaluation pada Ketebalan 3,18 mm (Sumber: Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.12 terlihat bahwa penurunan ketebalan dinding pipa menyebabkan **Stress Ratio** meningkat secara progresif pada setiap variasi ketebalan.

Pada kondisi *baseline* dengan ketebalan **8,18 mm**, nilai **Stress Ratio** sebesar **44,8%**, sedangkan pada ketebalan **3,18 mm** meningkat menjadi **95,6%**. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tipis dinding pipa, semakin besar proporsi kapasitas tegangan yang digunakan oleh sistem selama kondisi operasi.

Kenaikan *Stress Ratio* diikuti oleh penurunan **margin keamanan** dari **55,2%** menjadi hanya **4,4%**. Margin keamanan menunjukkan selisih antara kapasitas tegangan yang masih tersedia terhadap batas tegangan yang diizinkan oleh ASME B31.3. Dengan demikian, semakin kecil nilai margin keamanan, semakin kecil pula kemampuan sistem dalam mengakomodasi peningkatan beban atau penurunan ketebalan lebih lanjut tanpa melampaui batas tegangan yang diizinkan.

Meskipun terjadi peningkatan *Stress Ratio* yang cukup signifikan, seluruh variasi ketebalan pada penelitian ini masih memperoleh status **PASS** berdasarkan evaluasi *code compliance*. Hal ini menunjukkan bahwa hingga ketebalan **3,18 mm**, nilai **Code Stress** masih berada di bawah **Allowable Stress** material ASTM A106 Grade B sesuai ketentuan ASME B31.3.

Namun demikian, hasil tersebut tidak dapat diartikan bahwa seluruh variasi memiliki tingkat keamanan yang sama. Pada ketebalan **3,18 mm**, nilai **Stress Ratio** telah mencapai **95,6%**, sehingga hanya tersisa **margin keamanan sebesar 4,4%**. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem telah mendekati batas tegangan yang diizinkan oleh kode desain. Dengan kata lain, meskipun secara administratif sistem masih memenuhi persyaratan **ASME B31.3**, ruang toleransi terhadap peningkatan beban operasi maupun penurunan ketebalan lebih lanjut menjadi sangat terbatas.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan *Stress Ratio* terutama dipengaruhi oleh kenaikan **Code Stress**, sedangkan **Allowable Stress** tetap konstan pada seluruh variasi ketebalan. Hal tersebut disebabkan karena material, temperatur operasi, dan standar evaluasi tidak mengalami perubahan selama simulasi. Oleh karena itu, peningkatan tingkat pemanfaatan tegangan sepenuhnya merupakan akibat dari penurunan ketebalan dinding pipa yang menyebabkan kemampuan penampang dalam menahan pembebanan menjadi semakin berkurang.

Apabila hasil *code compliance* dikaitkan dengan pembahasan pada subbab sebelumnya, terlihat bahwa peningkatan *Stress Ratio* terjadi bersamaan dengan meningkatnya **displacement** dan **sustained stress**, sedangkan **expansion stress** relatif tidak mengalami perubahan yang berarti. Di sisi lain, **reaksi pada pipe support dan anchor** justru mengalami penurunan akibat berkurangnya massa sistem. Temuan ini menunjukkan bahwa degradasi ketebalan tidak memengaruhi seluruh parameter dengan arah yang sama, tetapi menghasilkan perubahan karakteristik mekanik yang berbeda pada setiap aspek analisis.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi *code compliance* menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tingkat pemanfaatan tegangan sistem perpipaan. Walaupun seluruh variasi masih memenuhi persyaratan **ASME B31.3**, peningkatan **Stress Ratio** hingga **95,6%** pada ketebalan **3,18 mm** mengindikasikan bahwa sistem telah berada pada kondisi dengan cadangan keamanan yang sangat terbatas. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa evaluasi integritas sistem perpipaan tidak cukup hanya didasarkan pada status **PASS** atau **FAIL**, tetapi juga perlu mempertimbangkan besarnya **margin keamanan**

yang masih tersedia sebagai dasar pengambilan keputusan dalam inspeksi, pemeliharaan, dan pengoperasian sistem perpipaan.

4.4 Evaluasi Ketebalan Minimum Sistem Perpipaan

Hasil analisis pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan tegangan sistem perpipaan. Meskipun seluruh variasi ketebalan masih memenuhi persyaratan **ASME B31.3**, peningkatan *Stress Ratio* yang terjadi secara bertahap menunjukkan bahwa cadangan keamanan sistem terus mengalami penurunan seiring berkurangnya ketebalan dinding pipa.

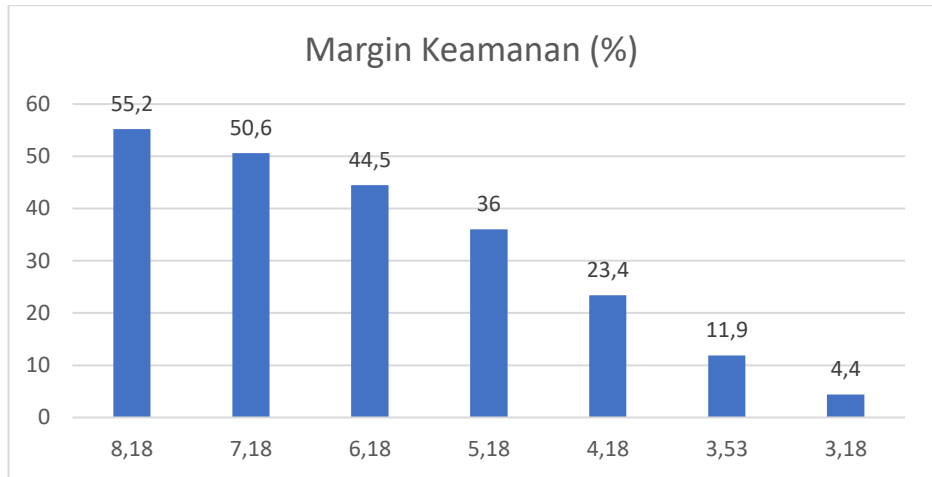
Oleh karena itu, pada subbab ini dilakukan evaluasi untuk menentukan ketebalan minimum yang masih memenuhi persyaratan kode berdasarkan hasil simulasi **CAESAR II**. Evaluasi tidak hanya didasarkan pada status **PASS** atau **FAIL**, tetapi juga mempertimbangkan perubahan *Stress Ratio*, margin keamanan, serta kecenderungan peningkatan tegangan yang terjadi pada setiap variasi ketebalan

4.4.1 Evaluasi Ketebalan Minimum Berdasarkan Analisis CAESAR II

Penentuan ketebalan minimum dilakukan dengan membandingkan hasil evaluasi *code compliance* pada seluruh variasi ketebalan yang dianalisis. Parameter utama yang digunakan meliputi **Code Stress**, **Stress Ratio**, **Margin Keamanan**, serta status evaluasi menurut ASME B31.3.

Tabel 4. 13 Evaluasi Ketebalan Minimum Berdasarkan Hasil Analisis CAESAR II
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Ketebalan (mm)	Stress Ratio (%)	Margin Keamanan (%)	Status
8,18	44,8	55,2	PASS
7,18	49,4	50,6	PASS
6,18	55,5	44,5	PASS
5,18	64	36	PASS
4,18	76,6	23,4	PASS
3,53	88,1	11,9	PASS
3,18	95,6	4,4	PASS



Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Ketebalan terhadap Margin Keamanan (Sumber:Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.13 terlihat bahwa seluruh variasi ketebalan masih memperoleh status PASS berdasarkan evaluasi *code compliance* ASME B31.3. Tidak ditemukan variasi yang menghasilkan Stress Ratio melebihi 100%, sehingga secara numerik seluruh kondisi simulasi masih memenuhi persyaratan tegangan yang diizinkan.

Namun demikian, hasil tersebut menunjukkan adanya kecenderungan yang sangat jelas, yaitu penurunan margin keamanan seiring berkurangnya ketebalan dinding pipa. Pada kondisi awal dengan ketebalan 8,18 mm, sistem masih memiliki margin keamanan sebesar 55,2%. Nilai tersebut terus menurun hingga hanya tersisa 4,4% pada ketebalan 3,18 mm.

Pola tersebut menunjukkan bahwa meskipun sistem masih memenuhi ketentuan kode, kemampuan struktur dalam mengakomodasi peningkatan beban tambahan maupun penurunan ketebalan lebih lanjut menjadi semakin terbatas. Dengan kata lain, status PASS tidak selalu menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keamanan yang tinggi, tetapi hanya menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi belum melampaui batas yang ditetapkan oleh ASME B31.3.

Dari hasil simulasi juga terlihat bahwa Node 70 tetap menjadi lokasi dengan *Stress Ratio* tertinggi pada seluruh variasi ketebalan. Konsistensi lokasi kritis ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan tidak mengubah distribusi tegangan dalam sistem, melainkan hanya meningkatkan intensitas tegangan pada titik yang sama. Oleh karena itu, lokasi tersebut dapat dikategorikan sebagai area kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam kegiatan inspeksi dan pemantauan kondisi perpipaan selama masa operasi.

Berdasarkan seluruh variasi yang dianalisis, ketebalan 3,18 mm merupakan ketebalan paling kecil yang masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini. Walaupun demikian, nilai Stress Ratio sebesar 95,6% menunjukkan bahwa sistem telah berada sangat dekat dengan batas tegangan yang diizinkan. Dengan margin keamanan yang hanya tersisa 4,4%, kondisi tersebut menunjukkan bahwa penurunan ketebalan lebih lanjut berpotensi menyebabkan sistem tidak lagi memenuhi persyaratan *code compliance*.

Hasil ini mengindikasikan bahwa penentuan ketebalan minimum berdasarkan simulasi tidak hanya harus mempertimbangkan status evaluasi, tetapi juga perlu memperhatikan besarnya cadangan keamanan yang masih tersedia. Pendekatan tersebut memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi aktual sistem dibandingkan hanya menggunakan klasifikasi PASS atau FAIL.

4.4.2 Evaluasi Ketebalan Desain (t_{design}) Berdasarkan Perhitungan ASME B31.3 dan Analisis CAESAR II

Ketebalan minimum desain (t_{design}) merupakan ketebalan minimum yang diperoleh melalui perhitungan berdasarkan persyaratan ASME B31.3 dengan mempertimbangkan tekanan desain, diameter luar pipa, tegangan ijin material, efisiensi sambungan, serta parameter desain lainnya. Dalam penelitian ini diperoleh nilai **t_{design} sebesar 3,53 mm**, yang selanjutnya digunakan sebagai salah satu variasi ketebalan untuk mengevaluasi apakah hasil perhitungan teoritis tersebut masih memenuhi persyaratan *code compliance* ketika diaplikasikan pada model sistem perpipaan yang mempertimbangkan kondisi aktual.

Berbeda dengan perhitungan teoritis yang hanya mengevaluasi kekuatan penampang berdasarkan parameter desain, analisis menggunakan CAESAR II memperhitungkan perilaku sistem perpipaan secara menyeluruh, meliputi konfigurasi geometri, perubahan arah perpipaan, pembebanan akibat berat sendiri pipa, berat fluida, tekanan internal, temperatur operasi, serta pengaruh *pipe support* dan *anchor*. Oleh karena itu, evaluasi terhadap t_{design} menggunakan CAESAR II memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai kondisi kerja sistem dibandingkan perhitungan teoritis semata.

Tabel 4. 14 Evaluasi Ketebalan Desain (t_{design}) Berdasarkan Hasil Perhitungan dan Simulasi (Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	Nilai
Ketebalan desain (t_{design})	3,53 mm
Design Pressure	45 bar (4500 kPa)
Design Temperature	60 °C
Code Stress	121.449,9 kPa
Allowable Stress	137.895,1 kPa
Stress Ratio	88,10%
Margin Keamanan	11,90%

```

(3)Code Compliance
CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: JUL 1, 2026 Time: 22:14
Job Name: KOROSI 3.53 MM SESUAI T DESIGN 45 BAR
Licensed To: Licensed To: Edit name in <system>\company.txt
CODE COMPLIANCE REPORT: Code Stresses on Elements
CASE 3 (SUS) W+P1

Load Case From Code Allowable Ratio To Node Code Allowable Ratio Piping Code
Case Node Stress Stress % Node Stress Stress %
KPa KPa

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 3 (SUS) W+P1

Note: For a complete breakdown of code-defined stress components, see the Stresses report.
Piping Code: B31.3 = B31.3 -2016, Jan 31, 2017

*** CODE COMPLIANCE EVALUATION PASSED ***

Highest Stresses: ( KPa )
Ratio (%): 88.1 @Node 70 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Code Stress: 121449.9 Allowable Stress: 137895.1
Axial Stress: 67028.3 @Node 130 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Bending Stress: 54979.9 @Node 70 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Torsion Stress: 971.9 @Node 20 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Hoop Stress: 135153.0 @Node 13 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1
Max Stress Intensity: 141954.6 @Node 20 LOADCASE: 3 (SUS) W+P1

```

Gambar 4. 15 Hasil Code Compliance Evaluation pada Ketebalan t_{design} (3,53 mm) (Sumber:Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.14 diketahui bahwa ketebalan desain hasil perhitungan ASME B31.3 sebesar 3,53 mm masih memenuhi persyaratan code compliance ketika dianalisis menggunakan perangkat lunak CAESAR II. Nilai Code Stress sebesar 121.449,9 kPa masih berada di bawah Allowable Stress sebesar 137.895,1 kPa, sehingga menghasilkan Stress Ratio sebesar 88,1% dan status evaluasi PASS.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketebalan desain yang diperoleh melalui persamaan ASME B31.3 masih mampu memberikan kapasitas kekuatan yang memadai ketika diterapkan pada sistem perpipaan yang memiliki konfigurasi geometri aktual. Dengan demikian, hasil perhitungan teoritis tidak hanya memenuhi persyaratan secara matematis, tetapi juga tervalidasi melalui analisis fleksibilitas sistem perpipaan yang mempertimbangkan interaksi antar komponen selama kondisi operasi.

Meskipun demikian, nilai Stress Ratio sebesar 88,1% menunjukkan bahwa sebagian besar kapasitas tegangan yang diizinkan telah digunakan. Sistem hanya memiliki margin keamanan sebesar 11,9%, sehingga ruang toleransi terhadap peningkatan tekanan operasi, perubahan kondisi pembebanan, maupun penurunan ketebalan akibat korosi menjadi relatif terbatas. Oleh karena itu, meskipun ketebalan 3,53 mm masih memenuhi persyaratan ASME B31.3, kondisi tersebut dapat dikategorikan sebagai ketebalan minimum yang masih layak digunakan berdasarkan kondisi desain yang dianalisis, sehingga diperlukan pengendalian terhadap laju korosi melalui inspeksi dan pemeliharaan secara berkala.

Apabila dibandingkan dengan variasi 3,18 mm, terlihat bahwa penurunan ketebalan sebesar 0,35 mm menyebabkan Stress Ratio meningkat dari 88,1% menjadi 95,6%, sedangkan margin keamanan menurun dari 11,9% menjadi 4,4%. Walaupun kedua

variasi masih memperoleh status PASS, ketebalan 3,18 mm berada jauh lebih dekat terhadap batas tegangan yang diizinkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa setiap penurunan ketebalan setelah mencapai t_{design} memberikan pengaruh yang semakin signifikan terhadap tingkat pemanfaatan tegangan sistem.

Tabel 4. 15 Perbandingan Ketebalan t_{design} dengan Variasi Ketebalan Terkecil
(Sumber: Hasil simulasi CAESAR II, diolah penulis, 2026).

Parameter	t_{design} (3,53 mm)	3,18 mm
Code Stress (kPa)	121.449,90	131.866,10
Stress Ratio (%)	88,1	95,6
Margin Keamanan (%)	11,9	4,4

Perbandingan pada Tabel 4.15 memperlihatkan bahwa meskipun kedua variasi masih memenuhi ketentuan ASME B31.3, tingkat pemanfaatan tegangan pada ketebalan 3,18 mm telah mendekati batas maksimum yang diizinkan. Dengan margin keamanan yang hanya tersisa 4,4%, sistem memiliki toleransi yang sangat kecil terhadap perubahan kondisi operasi maupun degradasi material lebih lanjut.

Sebaliknya, ketebalan 3,53 mm masih memberikan margin keamanan yang lebih besar sehingga lebih representatif sebagai ketebalan desain minimum berdasarkan kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil ini memperlihatkan bahwa nilai t_{design} yang diperoleh dari perhitungan ASME B31.3 telah tervalidasi melalui analisis fleksibilitas menggunakan CAESAR II, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam proses desain maupun evaluasi integritas sistem perpipaan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa ketebalan desain (t_{design}) sebesar 3,53 mm masih memenuhi persyaratan ASME B31.3 baik berdasarkan perhitungan teoritis maupun hasil simulasi CAESAR II. Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan perhitungan ketebalan minimum menurut ASME B31.3 masih memberikan tingkat keamanan yang memadai ketika diaplikasikan pada sistem perpipaan muatan kapal tanker dengan kondisi operasi yang dianalisis. Namun demikian, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa penurunan ketebalan di bawah nilai t_{design} menyebabkan cadangan keamanan sistem berkurang secara signifikan, sehingga pengendalian korosi dan inspeksi berkala tetap diperlukan untuk menjaga integritas sistem selama masa operasi.

4.4.3 Implikasi Hasil Penelitian terhadap Integritas Sistem Perpipaan Muatan Kapal Tanker

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi tidak hanya memengaruhi nilai tegangan, tetapi juga mengubah tingkat pemanfaatan kapasitas struktur selama kondisi operasi. Meskipun seluruh variasi ketebalan yang dianalisis masih memenuhi persyaratan **ASME B31.3**, peningkatan **Stress Ratio** serta penurunan **Margin Keamanan** menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam menahan pembebanan semakin berkurang seiring berlangsungnya degradasi material.

Berdasarkan hasil simulasi, ketebalan awal sebesar **8,18 mm** masih memberikan margin keamanan yang cukup besar sehingga sistem memiliki kemampuan yang baik dalam mengakomodasi variasi pembebanan operasi.

Sebaliknya, pada ketebalan **3,18 mm**, nilai **Stress Ratio** telah mencapai **95,6%**, sehingga kapasitas tegangan yang masih tersedia hanya sekitar **4,4%**. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun sistem masih memenuhi persyaratan kode, peluang sistem untuk menerima peningkatan pembebanan tanpa melampaui batas tegangan menjadi sangat kecil.

Dalam praktik pengoperasian kapal tanker, kondisi tersebut memiliki implikasi penting terhadap pengelolaan integritas sistem perpipaan. Korosi yang menyebabkan penurunan ketebalan dinding pipa secara terus-menerus akan meningkatkan tingkat pemanfaatan tegangan, sehingga apabila tidak dilakukan inspeksi dan pengendalian korosi secara berkala, sistem berpotensi mencapai kondisi yang tidak lagi memenuhi persyaratan desain. Oleh karena itu, evaluasi ketebalan pipa tidak hanya bertujuan menentukan apakah pipa masih layak dioperasikan, tetapi juga untuk memperkirakan seberapa besar cadangan keamanan yang masih dimiliki sistem.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa evaluasi berdasarkan status **PASS** atau **FAIL** saja belum cukup untuk menggambarkan kondisi aktual sistem perpipaan. Dua variasi ketebalan yang sama-sama memperoleh status **PASS** dapat memiliki tingkat keamanan yang sangat berbeda. Sebagai contoh, ketebalan **8,18 mm** memiliki **Margin Keamanan sebesar 55,2%**, sedangkan ketebalan **3,18 mm** hanya memiliki **Margin Keamanan sebesar 4,4%**. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa interpretasi hasil analisis harus mempertimbangkan besarnya **Stress Ratio** dan **Margin Keamanan**, sehingga keputusan inspeksi maupun penggantian pipa dapat dilakukan secara lebih tepat.

Selain itu, hasil validasi terhadap **t_{design}** memperlihatkan bahwa ketebalan minimum hasil perhitungan ASME B31.3 masih memberikan tingkat keamanan yang memadai ketika dianalisis menggunakan model perpipaan aktual pada CAESAR II. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan perhitungan berdasarkan kode desain masih relevan digunakan sebagai dasar penentuan ketebalan minimum, namun tetap perlu dilengkapi dengan analisis fleksibilitas sistem untuk mempertimbangkan pengaruh konfigurasi geometri, sistem penyangga, serta kondisi operasi yang sebenarnya.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pengaruh korosi terhadap integritas sistem perpipaan tidak hanya berkaitan dengan berkurangnya ketebalan material, tetapi juga berkaitan dengan perubahan respons mekanik sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, proses evaluasi integritas sistem perpipaan pada kapal tanker sebaiknya dilakukan melalui kombinasi antara perhitungan ketebalan berdasarkan standar desain dan analisis tegangan menggunakan perangkat lunak seperti CAESAR II, sehingga keputusan mengenai kelayakan operasi dapat didasarkan pada kondisi struktur yang lebih representatif.

4.5 Sintesis Hasil Penelitian

Sintesis hasil penelitian dilakukan untuk mengintegrasikan seluruh hasil analisis yang telah diperoleh pada kondisi *baseline*, variasi ketebalan akibat korosi, serta evaluasi ketebalan desain berdasarkan ASME B31.3 dan simulasi CAESAR II. Pembahasan pada subbab ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai pengaruh penurunan ketebalan terhadap perilaku mekanik sistem perpipaan muatan kapal tanker, sehingga setiap rumusan masalah penelitian dapat dijawab secara sistematis berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan.

Hasil analisis pada kondisi *baseline* menunjukkan bahwa sistem perpipaan dengan ketebalan 8,18 mm masih memiliki tingkat keamanan yang tinggi. Nilai Stress Ratio sebesar 44,8% menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil kapasitas tegangan yang dimanfaatkan selama kondisi operasi, sehingga sistem masih memiliki margin keamanan sebesar 55,2%. Selain itu, hasil evaluasi displacement, sustained stress, expansion stress, serta reaksi support dan anchor menunjukkan distribusi pembebanan yang stabil dan memenuhi seluruh persyaratan ASME B31.3. Oleh karena itu, kondisi *baseline* digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi pengaruh penurunan ketebalan terhadap respons mekanik sistem perpipaan.

Variasi ketebalan yang dilakukan pada penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan ketebalan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap setiap parameter hasil analisis. Nilai displacement meningkat secara bertahap seiring berkurangnya kekakuan lentur pipa, terutama pada arah vertikal yang dipengaruhi oleh beban gravitasi. Peningkatan displacement tersebut menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih fleksibel ketika ketebalan dinding pipa berkurang, meskipun pola deformasi dan lokasi perpindahan maksimum tetap berada pada node yang sama.

Pada analisis sustained stress, penurunan ketebalan menyebabkan peningkatan Code Stress dan Stress Ratio secara signifikan. Hal ini terjadi karena berkurangnya luas penampang efektif menyebabkan kemampuan material dalam menahan pembebanan tetap menjadi lebih kecil. Walaupun nilai Allowable Stress tetap konstan karena material dan temperatur operasi tidak berubah, peningkatan Code Stress menyebabkan tingkat pemanfaatan tegangan terus meningkat hingga mencapai 95,6% pada ketebalan 3,18 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa degradasi ketebalan akibat korosi memiliki pengaruh yang dominan terhadap integritas struktur sistem perpipaan.

Berbeda dengan sustained stress, hasil analisis expansion stress menunjukkan bahwa penurunan ketebalan tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap besarnya tegangan akibat ekspansi termal. Nilai expansion stress relatif konstan pada seluruh variasi ketebalan, sehingga dapat disimpulkan bahwa respons sistem terhadap perubahan temperatur lebih dipengaruhi oleh konfigurasi geometri perpipaan, keberadaan elbow, serta sistem support dan anchor dibandingkan oleh perubahan ketebalan dinding pipa.

Evaluasi terhadap reaksi pipe support dan anchor menunjukkan kecenderungan yang berbeda dibandingkan hasil analisis tegangan. Penurunan ketebalan menyebabkan gaya reaksi yang diterima support dan anchor semakin kecil karena massa total sistem perpipaan berkurang. Namun demikian, penurunan gaya reaksi tersebut tidak menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih aman, karena pada saat yang sama tegangan yang bekerja pada material justru meningkat akibat berkurangnya kemampuan penampang dalam menahan pembebanan. Temuan ini menunjukkan bahwa evaluasi integritas sistem perpipaan harus mempertimbangkan hubungan antara perubahan tegangan dan distribusi gaya reaksi secara bersamaan.

Hasil evaluasi code compliance menunjukkan bahwa seluruh variasi ketebalan yang dianalisis masih memperoleh status PASS berdasarkan ketentuan ASME B31.3. Akan tetapi, peningkatan Stress Ratio yang terjadi secara progresif diikuti oleh penurunan margin keamanan dari 55,2% menjadi 4,4%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa status PASS tidak selalu mencerminkan tingkat keamanan yang sama pada setiap variasi ketebalan. Oleh karena itu, selain memperhatikan status evaluasi, besarnya margin keamanan juga perlu dijadikan dasar dalam menilai kondisi aktual sistem perpipaan.

Evaluasi terhadap ketebalan desain (t_{design}) sebesar 3,53 mm menunjukkan bahwa hasil perhitungan manual berdasarkan ASME B31.3 masih memenuhi persyaratan *code compliance* ketika divalidasi menggunakan analisis fleksibilitas CAESAR II. Pada ketebalan tersebut diperoleh Stress Ratio sebesar 88,1% dengan margin keamanan sebesar 11,9%, sehingga masih memenuhi persyaratan kode. Akan tetapi, penurunan ketebalan hingga 3,18 mm menyebabkan Stress Ratio meningkat menjadi 95,6%, yang menunjukkan bahwa sistem telah mendekati batas tegangan yang diizinkan. Hasil ini mengindikasikan bahwa nilai t_{design} yang diperoleh melalui perhitungan ASME B31.3 masih mampu memberikan tingkat keamanan yang memadai untuk kondisi operasi yang dianalisis dalam penelitian ini.

Secara keseluruhan, hasil penelitian membuktikan bahwa penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi memberikan pengaruh yang paling signifikan terhadap peningkatan sustained stress dan penurunan margin keamanan sistem, sedangkan pengaruh terhadap expansion stress relatif kecil. Seluruh variasi ketebalan yang dianalisis masih memenuhi persyaratan ASME B31.3, namun tingkat pemanfaatan tegangan meningkat secara progresif seiring berkurangnya ketebalan. Dengan demikian, hasil penelitian menegaskan bahwa evaluasi integritas sistem perpipaan tidak cukup hanya didasarkan pada status PASS atau FAIL, tetapi juga harus mempertimbangkan perubahan stress ratio, margin keamanan, dan kecenderungan peningkatan tegangan sebagai dasar dalam menentukan strategi inspeksi, pemeliharaan, dan pengelolaan umur layan sistem perpipaan.